CompleteEASE™ 数据分析手册

J. A. Woollam Co., Inc.



Copyright © 2004-2011 J. A. Woollam Co., Inc. All Rights Reserved.

Print Date: October 5, 2011 CompleteEASE version 4.63

J. A. Woollam Co., Inc.

645 M Street, Suite 102 Lincoln, NE 68508

Internet:	sales@jawoollam.com	
	support@jawoollam.com	
Website:	http://www.jawoollam.com	
Phone:	402.477.7501	
Fax:	402.477.8214	

Trademarks

CompleteEASE[™] is a trademark of the J. A. Woollam Co., Inc. All other trademarks used within are the property of their respective owners.

COPYING AND DISTRIBUTION

You are welcome to make backup copies of the CompleteEASE software and documentation for your own use and protection. However, you are not permitted to make copies for others or for resale.

目录

目录

1.

2.

		iii
Intro	oduction 简介	1-1
1.1.	Manual Overview 手册总览	1-1
1.2.	软件安装及更新	1-4
	安装准备	1-4
	升级 早期版本到 4.45 (alpha-SE)	1-4
	运行安装程序	1-4
	操作硬件	1-8
1.3.	本手册中使用的约定	1-9
	Tabs 主菜单	1-9
	Screen Panels 屏幕面板	1-9
	Buttons 按钮	1-9
	Model Commands 模型命令	1-10
	Mouse-selected Menus 鼠标选择菜单	1-11
	Pipelining Descriptions 操作序列描述	1-11
1.4.	File Structure 文件结构	1-12
	Recent 列表 和 Recent 目录	1-13
	COMMON 公共位置	1-13
	Folder "Links" 文件夹链接	1-13
	'Browse for File'浏览文件	1-19
1.5.	Setting Up Multiple Users 设置多用户	1-19
1.6.	Short-cut Guide 快捷键向导	1-22
1.7.	What is Spectroscopic Ellipsometry 什么是椭偏术?	1-24
Data	a Collection 数据采集	2-26
2.1	alpha-SF. Systems	2-26
2.1.	Maasuring a Sample 测量一个样品	עב ב רר ר

2.1.	alpha-SE Systems	2-26
	Measuring a Sample 测量一个样品	2-27
2.2.	M-2000, RC2, 和 AccuMap-SE Systems	2-29
	Measurement Recipe 测量处方	2-29
2.3.	Acquisition Parameters 采集参数	2-32
	Data Type 数据类型	2-32
	Sample Alignment 样品对准	2-32
2.4.	Scan Pattern 扫描图案	2-34
2.5.	Model 模型	2-35
	Basic Models 基本模型	2-36
2.6.	Running a Recipe 运行处方和 Viewing Results 显示结果	2-37

3. 数据分析 1 – 基础篇

3-40

	CompleteEASE 转	次件手册
	Save Layer Optical Constants 保存层光学常数	4-107
	Save	4-106
	B-Spline 基准样条	4-103
	WvlByWvl Layer 逐一波长	4-100
	<pseudo> Transforms 伪光学常数转换</pseudo>	4-99
4.1.	Metal Substrates 金属基底	4-99
数据分	分析 2 – 中级篇	4-97
	Snapsnot 天飛	3-93
	Save Log File 体行口态义件	2 05
	Copy Analysis Report to Clipboard 反前刀机很百到努焰似	2 05
	Aut Opt. Collst. to Report 在Clinhoard 复制公析据生到前吡垢	2 04
	Usererate Kepon 生风狼百	2 02
	Ke-analyzing Multiple Data Sets 多级掂里新分竹	
	Compare Optical Constants	
	Comparing Results 比牧结朱	
	Fit Log 拟合日志	3-88
	Copy to Clipboard 复制到剪贴权	3-87
3.6.	Log and Report a Series of Films 日志和报告	3-86
	Try Alternate Models 尝试个问模型	3-84
	Graded Index 折射率梯度	3-81
	Surface Roughness 表面粗糙	3-81
	Glass with Transparent Film 玻璃上的透明膜层	3-79
3.5.	Transparent Films 透明膜 - 2	3-79
	Fitting Depolarization 拟合退/消偏振	3-75
	Including Backside reflections 包含背反射	3-74
	Graphing Depolarization 退偏振绘图	3-72
	Using the Graph ScratchPad 使用图形暂存器	3-69
	Graphing Multiple Data Sets 多数据作图	3-68
	Backside Substrate Reflections 基底的背面反射	3-68
3.4.	Transparent Substrates 透明基底	3-68
	Rename Layer & Fit Parameters 重命名层和拟合参数	3-65
	Global Fits 全局拟合	
0.0.	Si with Transparent Film Si 上的透明薄膜	
3.3.	Transparent Thin Films 透明薄膜 - 1	
	Tine Kiess Fie-Intuing 序反顶弦音	3 50
	Huing 隐藏, Renaming 里印石, 和 Bounding Fit Parameters 限制拟合参数.	
	Derived Parameters 派生参数	3-54
	带有甲间层的 JAW Oxide on Si Model, JAW 住上的氧化层模型	3-54
		2 5 4

General Data Analysis 数据分析理论概述 Theory......3-42 "Pseudo" Optical Constants"伪"光学常数......3-43 Layered Optical Model 分层光学模型3-43 "Fitting" the Data 拟合数据......3-46 Evaluating the Fit Results 评估拟合结果......3-46 "Physical" Optical Constants"物理的"光学常数......3-48

iv ● 目录

3.1.

3.2.

4.

	Parameter Uniqueness 参数唯一性	4-110
4.3.	Absorbing Thin Films 吸收膜(B-SPLINE)	4-113
	Identifying an Absorbing Film 甄别一个吸收膜	4-113
	Si with Absorbing Film Si 上的吸收膜	4-114
	The "B-Spline" 层	4-116
	Wavelength Range Expansion (WVL-EXPAND) Fit 波长扩展拟合	4-118
	在 B-SPLINE 层中使用 WVL-EXPAND Fit (波长扩展拟合)	4-120
	带有 Global Fits 全局拟合 的 WVL-EXPAND Fitting 波长扩展拟合	4-120
4.4.	Absorbing Thin Films 吸收薄膜 (Gen-Osc) 通用振子	4-122
	Parameterize Layer 参量化层	4-122
	Glass with Absorbing Film 玻璃上的吸收膜	4-131
4.5.	Multiple Layer Film Stacks 多层膜堆叠	4-137
	Oxide or Roughness?氧化还是粗糙	4-141
4.6.	Multiple Data Types 多数据类型 (SE + T 透过率)	4-142
	Parameter Uniqueness 参数唯一性	4-142
	Append Data 合并数据	4-143
	Transmission Data % Weight 透过数据权重百分比	4-144
数据	分析 3 – 高级篇	5-147
5 1	Man Data and Model Non-Idealities 地貌数据和非理相	5-1/19
5.1.	Show Man Data 显示地貌数据	
	Show Map Data 亚尔地貌 效抗	5-150
	Selecting a Fourier from the Wap 地貌中起评一 十点	
	Wavelength Units - eV 波长单位-eV	5-150
	Fixing Cauchy Dispersion 修正柯而母散	5-152
	'Set Banges' 设置范围	5 152
	Sellmeier 谢米尔	5-152
	Fit Scan Data 拟合扫描数据	
	Model Calculation 構刊老虔因麦	
	Model Calculation - Thickness Non-Uniformity	
	Model Calculation – Bandwidth (nm)	5-157
	Include Depolarization Data 包含退偏数据	5-158
52	Multi-Sample Analysis 多样品分析	5-161
5.2.	Short-Cuts for Manning Data 世貌数据的快捷键	5-161
	Blank Model 空模型	5-162
	Set Symbol Size 设置符号大小	5-163
	Zooming on Man 缩放地貌	5-164
	Selecting Multiple Points on a Man 地貌上选择多占	5-165
	Changing the Granh 改变图形	5-167
	Graph All Data Sets 所有数据绘图	5-167
	Selecting and Unselecting Data Sets 洗择和反洗数据列	5-168
	Multi-sample Analysis 多样品分析	5-169
	Clear Multi-Data Set Mode	
	Multi-Sample Analysis 多样品分析 (revisited)	
5.3.	Creating OC Library for Composition or Temperature-dependent materi	als5-180
2.01	Opt. Const. Compare Model 光学常数比较模型	

Self-Assembled Monolayers 自组装单分子膜......4-109

4.2.

5.

音分析 4 – <i>In S</i> itu 原位数据	6-193
Biaxial Layer 双轴层	
Convert to Anisotropic 转变为各向异性	5-188
Anisotropic Films 各向异性薄膜	5-186
Save OC Library 保存光学常数库	5-185

6. 数据分析 4 - In Situ 原位数据

61	In Situ Data Analysia 百位粉握八折	6 104
0.1.	III Shu Data Analysis 原位致拓力们	0-194
	Short-Cuts for Dynamic Data 动态数据的快捷键	
	Navigating In Situ Data 原位数据导航	
	查看特定时间上的光谱数据	
	Turning off the "Auto-Fit" function 关闭自动拟合功能	6-196
	Building a Model 建立一个模型	6-197
	'Fit Dynamic 动态拟合'	6-198
	Selecting Multiple Time-Slices 选择多个时间片	
	Manipulating Multi-Data Sets 操作多数据	
	Multi-Time Slice Analysis 多时间片分析	
	Fitting Optical Constants 拟合光学常数	
6.2.	Growth Rate and Optical Constants 生长速率和光学常数	
	Virtual Interface 虚拟界面	
	Growth Rate and Optical Constants (GROC) Model 生长速率	率和光学常数模型6-208
	Multilayer Example 多层膜样品	

7. 参考- Graph

5.4.

7-217

7.1.	基本屏幕布局	
7.2.	Graph Panel 图形面板	
	'Show Data 显示数据'	
	Range-Select 范围选择	
	Zoom All 显示全部	
7.3.	Right-Click Menu 右键菜单(Graph)	
	Zoom All 显示全部	
	Statistics 统计	
	Copy Graph to Clipboard 把图形拷贝到剪贴板	
	Copy Data to Clipboard 把数据拷贝到剪贴板	
	Copy Data to Graph ScratchPad 把数据拷贝到图形暂存器	
	View Graph ScratchPad 查看图形暂存器	
	Show Legend 显示图例	
	Show Symbols 显示符号	
	Set Symbol Size 设置符号大小	
	Auto X,Y,Z Scale 自动 X,Y,Z 轴比例	
	Manual X,Y,Z-Scale 手动 X,Y,Z 轴比例	
	Scale Z-Range by n-Sigma	
	Graph Points as a Line	
	Use Clipboard Aspect Ratio 使用剪贴板纵横比	
	Cancel Menu 取消菜单	
7.4.	Graph Type 绘图类型	
	Psi, Delta	
	Re(rho), Im(rho)	
	N, C, S	

	<pseudo> Transforms (<e1>, <e2>, <n>,<k>)伪转换</k></n></e2></e1></pseudo>	7-226
	Mueller-Matrix Data 穆勒矩阵数据	7-227
	Show Mueller Matrix Utility 显示穆勒矩阵	
	Generalized Ellipsometry Ratios	7-232
	Select Ratios to Graph	
	Intensity 强度	7-233
	Depolarization 退偏振	
	Graph vs. Angle	7-234
	Double-Y Axis 双 Y 轴	
	Difference Mode 差异模式	
	More Options 更多选项	
7.5.	Special Graph Items (特殊绘图项)	
	Multi-Sample (Appended Data) (合并数据)	
	Rotation Data 旋转数据	
	Map Data 地貌数据	
	Dynamic Data 动态数据	
7.6.	Graph ScratchPad 图形暂存器	

8. 参考- Measurement 主菜单

8.1.	System Status Panel 系统状态窗口	8-246
8.2.	Measurement Controls: alpha-SE Systems	8-246
	Mode: 模式	
	Sample Alignment 样品对准:	
	Model	
	Save Data after Measurement	
	'Measure'	8-248
	Common Models 常用模型	8-248
8.3.	M-2000, RC2, 和 AccuMap-SE 系统	
	Measurement Recipe	
	Save Data after Measurement 测量后保存数据	
	'Measure'	
	Acquire Multiple Measurements	
	Show Recipe Scheduler	
8.4.	Acquisition Parameters 采集参数	8-256
	Data Type 数据类型	8-257
	Sample Alignment 样品对准	8-258
	Common Acquisition Parameters 常用采集参数	
8.5.	Scan Pattern 扫描图案	
	Scan Region of Interest 扫描感性趣的区域	
	Adding Common Scan Patterns 添加常用扫描图案	
8.6.	Fit Results Panel 拟合结果面板	8-263
87	Right-click menu 右键菜单(Measurement>Fit Results)	8-263
0171	Copy to Clipboard – Formatted	8-263
	Copy to Clipboard - Table	
8.8.	'View Previous Fit Results 显示以前的拟合结果	8-264
参考	- Analysis 主菜单	9-268

9. 参考 - Analysis 主菜单

9.1.	Data: Panel	
	'Open'	
	'Save'	9-269

8-246

	'Info'信息	9-269
	'Set Ranges'	9-270
9.2.	Fit: 拟合面板	
	'Generate' 生成数据	
	'Fit'拟合	9-271
	'Fit Scan Data' 动态拟合	9_271
	'Fit Dynamic'	9_271
	"Deset" 重署	0 271
0.2	KCSCt 里直	
9.3.	Analysis>Fill:	
	"Auto Fit" 目列拟合	
	"View Fit Stats"显示拟合统计	9-273
	"View Parameter Stats"显示参数统计	9-273
	"Copy to Clipboard – Formatted"	9-273
	"Copy to Clipboard – Table"	9-273
	"Copy Parmeters to Clipboard"复制参数到剪贴板	9-274
	"Copy Analysis Report to Clipboard"复制分析报告	9-274
	"Add to Fit Log"追加到日志	
	"View Fit Log"显示拟合日志	9-276
	"Advanced Graph Options"高级绘图洗项	9-280
	"Granh OCs vs Time"光学常数相对时间绘图	9-281
0.4	Model· 楷刑窗口	0 282
9.4.	MOUCE. 候至团口	0 283
	Open	
	Save 休什	
	Clear Snowshot 打工机照?	
	Open Snapshot 们 开伏照	
	Save Snapshot 保存快照 ²	
	Add 添加	
	Delete	
	Save	9-285
	Include Surface Roughness 包含表面粗糙	9-285
	Model Pictorial 模型图例	9-285
	Editing Layers 编辑膜层	9-285
	"Remove Grading 移除梯度"	9-288
	"Start Superlattice"开始超晶格	9-288
	"End Superlattice"结束超晶格	9-289
	Angle Offset 角度偏移	9-289
95	Right-click menu (Analysis>Model:)	9-289
2.2.	Draw Model Optical Constants Profile	
	Conv Model To Clinboard 复制模型到前贴板	9_290
	Copy Model (Layers Only) To Clinboard 复制構型 (仅瞄E结构) 至	前际标 0 200
0.6	Lever times 巨米刑	0 201
9.0.	Layer types 広天空	
	I abulated n,K 衣列 n,K	
	V01d 学	
	EMA-Coupled	
	Cauchy 刑 四	
	Cauchy_WVL	
	Cauchy_Extended	
	The Sellmeier Layer	
	WVIBYWVI	
	ыахіаі	9-296

	Uniaxial and Uniaxial-Diff	
9.7.	+MODEL Options	
	Include Substrate Backside Correction 包含基底背反射	
	Model Calculation	
9.8.	+FIT Options	9-320
	Perform Thickness Pre-Fit	9-320
	Use Global Fit	9-320
	Selected Data	9-321
	Fit Weight	
	Include Depolarization Data	
	Include Intensity Data	0 377
	Transmission Data % Weight	0 222
	Limit Wul for Eit	
	Limit Angles for Eit	
	Limit Angles for Fit	
	Ship Date Date in the Etc.	
	Skip Data Points in the Fit	
	Max Fit Iterations	
	Auto Fit Parameter Reset	
	Include Derived Parameters	
9.9.	+OTHER Options	
	Wvl. Range Expansion Fit	
	Try Alternate Models	
	Fit Parameter Uniqueness	9-330
	Fit Parameter Error Estimation	9-331
	Systematic Errors	
	Simulate Data	9-336
	Add Opt. Const. to Report	9-336
	# of Processor Cores to Use	9-336
	Show Color Calculation Dialog	9-336
	Configure Options	9-337
Gen-	Osc 通用振子 函数	10-338
10.1.	Real-Part (e1)实部	
	Einf	
	Pole	
10.2.	Lorentz	
10.3.	Lorentz Im(Amp)	
10.4.	Harmonic	
10.5.	Harmonic Im(Amp)	
10.6.	Gaussian	
10.7.	Drude(RT) & Drude(NMu)	
10.8.	Tauc-Lorentz & Cody-Lorentz	
	Tauc-Lorentz	
	Cody-Lorentz	
	Tonguy	10 2 4 2
10.9		IU-141
10.9. 10.10	Psemi-M0 & Psemi-Tri	10-343
10.9. 10.10. 10.11	Psemi-M0 & Psemi-Tri	10-343 10-344 10-348
10.9. 10.10. 10.11. 10.12	Psemi-M0 & Psemi-Tri CPPB (Critical Point Parabolic Band)	
10.9. 10.10. 10.11. 10.12.	Psemi-M0 & Psemi-Tri CPPB (Critical Point Parabolic Band) Custom	

10.

目录 ● ix

13.

13.1.

	Optical Constants 光学常数	
	'Use Defaults' 使用默认值	
13.2.	Miscellaneous 杂项	13-381
	Reset Win. Size 重置窗口尺寸	13-381
	Manage Users 管理用户	
	Show Manual (F1)显示手册	
	View CompleteEASE Shortcuts	
13.3.	Configuration Controls 配置控制	
	'Edit Configuration 编辑配置'	13-384
	General Configuration Parameters	
	Memory Management Configuration Parameters	
	Display Units Configuration Parameters	
	Remote Communications Configuration Parameters	
	Window Setup Configuration Parameters	
	Graph Clipboard Configuration Parameters	13-391
	Hardware Simulation Mode Configuration Parameters	

Reference - Options Tab

12.1.	Configuration Files 配置文件	
	hardware.cnf	
	CompleteEASE.cnf	
	CompleteEASEhard.cnf	
	bview.cnf	
	Privileges.cnf	
	rce-cal.cnf, rce-comp.cnf, rce-dc.cnf, rce-refl.cnf	
12.2.	Hardware Tab – AlphaSE	
	Hardware 硬件	
	Signal 信号	
	Calibration 校准	
	Show Logs 显示日志	
12.3.	Hardware Tab – M-2000 and RC2	
	Hardware Status 硬件状态	
	Controls 控制	
	General	
	Calibration 校准	
	System	
	Misc	
	System Information	

Wavelength Units 波长单位13-380

12. **Reference - Hardware Tab**

11.

参考- In situ 主菜单 显示 the In situ tab (如果不可见).....11-353 11.1. In situ 主菜单功能......11-354 11.2. Status window 状态窗口......11-354 View Panel 显示面板......11-357

11-353

12-360

13-380

In Situ Tab Configuration Parameters	13-393
Data Export Parameters 数据输出参数	
Shutter Controls Configuration Parameters	13-394
Import and Save Configuration	13-395
About CompleteEASE	13-395
Create Debug File	13-395
View Error Log	
	In Situ Tab Configuration Parameters

14. Appendices

14-396

14.1.	Troubleshooting Guide 故隨排除指南	14-396
1	Reporting Problems to the J. A. Woollam Co.	
	Creating a Debug file 创建调试文件	
14.2.	CompleteEASE Data Transfer (to/from WVASE32)	
	Importing CompleteEASE Data to WVASE32:	
	Exporting WVASE32 Data to CompleteEASE:	14-399
14.3.	Comparing Results between CompleteEASE and WVASE32	14-401
	Fit Weighting	
	Depolarization Data	
	Intensity Data	
	Surface Roughness	14-401
14.4.	Contacting the J.A. Woollam Co., Inc.	

15. Index

15-1

1. Introduction 简介

感谢您购买 Woollam 公司的光谱椭偏仪(SE)系统。我们希望本手册中的信息 会帮助您更好地理解及评价使用 CompleteEAS 软件进行的数据分析。

1.1. Manual Overview 手册总览

手册被组织成下列章节:

Chapter 1: Introduction

Chapter 1 第 1 一章将介绍椭偏术。包含基础椭偏理论,安装说明,一个快捷键的列表,以及整个手册中使用的"约定"。此外,文件结构和用户设置部分已 更新。如果您是从 CompleteEASE 早期版本升级来的,请联系 Woollam 公司以 获取 "New Features of Interest"(值得关注的新功能)的特别应用指南。

Chapter 2: Data Collection

Chapter 2 第 2 章提供了数据采集的简要描述。由于各自的仪器配置有所不同,本章内容仅提供参考,对于你自己的设备可以查询随仪器一同发送的硬件手册。

Chapter 3: 数据分析 1-

Chapter 3 第 3 章开始的系列章节将深入展开数据分析的过程。每个章节将用数据实例来演示。第 3 章介绍了 CompleteEASE 软件使用的基本 SE 数据分析算法。用户可以了解基本的模型结构及操作方法。本章的例子包括:

- Oxides on Silicon 硅上的氧化层
- Transparent Thin Films 透明薄膜
- Glass substrate considerations 玻璃基底
- Surface Roughness and Index Grading 表面粗糙和折射率梯度
- Logging and Reporting Results from a Series of Films 日志及报告结果

Chapter 4: 数据分析 2-

Chapter 4 第 4 章继续以数据分析为重点,主要针对吸收材料。举例的目的是展示 CompleteEASE 里的众多先进功能。本章的例子包括:

- Metal Substrates 金属基底
- Organic monolayers on Gold 金上的单分子有机膜
- Absorbing Thin Films (B-SPLINE approach) 吸收膜(B-SPINE)
- Absorbing Thin Films (GENOSC approach) 吸收膜(GENOSC)
- Combining SE and Transmission data SE 和透射数据联合分析

Chapter 5: 数据分析 3-

Chapter 5 第 5 章是数据分析的高级应用。本章的例子包括:

- Working with Uniformity Maps 均匀性 Mapping
- Multi-Sample Analysis 多样品分析
- Model Non-Idealities 模型中考虑非理想状态
- Creating Alloy or Temperature Files 创建混合合金材料库
- Anisotropic Thin Films 各向异性膜

Chapter 6: 数据分析 4 – In Situ 原位

Chapter 6 第 6 章介绍薄膜在实时沉积或刻蚀过程中测量到的时间相关 SE 数据的分析。这个章节对于使用液体池和加热台也有帮助,这些测量到的实时数据 会与样品的条件相关。

- Working with In Situ Data 在线数据
- Growth Rate and Optical Constants model 生长速率和光学常数模型

Chapters 7 到 13: Feature References 功能参考

这些章节适用于需要特定主题介绍的高级用户,章节安排如下:

Chapter 7:	Basic Screen Layout and Graph Panel	
	基本屏幕分布及图形面板	
Chapter 8:	Measurement Tab 测量主菜单	
Chapter 9:	Analysis Tab 分析主菜单	
Chapter 10:	Gen-Osc Functions Gen-Osc 功能	
Chapter 11:	In-Situ Tab 在线主菜单	
Chapter 12:	Hardware Tab 硬件主菜单	
Chapter 13:	Options Tab 选项主菜单	

Appendices: Additional Information 附录: 其他信息

附录包括其他参考信息

- Appendix 14.1 Trouble-Shooting Guide. 排错向导
 - Appendix 14.2 Importing/Exporting WVASE32 data files 数据互转
- Appendix 14.3 Comparing WVASE32 and CompleteEASE results.
 比较 WVASE32 和 CompleteEASE 的数据分析结果
- Appendix 14.4 Contacting the J.A. Woollam Company

1.2. 软件安装及更新

安装准备

用于控制椭偏仪系统的计算机需要满足表 1-1 中列出的要求。微软视窗 XP 是 推荐的操作系统。

COMPUTER SPECIFICATIONS	REQUIREMENTS
Operating System	Microsoft Windows 98, ME, 2000, XP, Vista. 32- and 64-bit Windows 7* *fully tested for analysis, but some incompatibility with hardware, so please consult JAWCo for updated details.
Memory (RAM)	256 MB
Hard Disk Space	120 MB
USB Ports	1 required, version 1.1 or higher
Processor	Intel Pentium III, AMD Athlon, or higher 1 GHz clock speed or faster **Many operations in CompleteEASE benefit from multi- core processing power.
Display	Color display at least 800x600 pixel resolution

表 1-1. 运行 Complete EASE 软件的最低计算机配置

升级 早期版本到 4.45 (alpha-SE)

CompleteEASE 软件从版本 4.47 开始,α-SE 使用的软件驱动程序已更改。 这个更新可以更好地支持 Windows 睡眠和暂停功能,另外,对于未来的的 64 位 Windows 版本,可以提供方便的支持。已经安装了 CompleteEASE 旧版本 的电脑,一个额外的步骤需要将旧的驱动程序更新到新的驱动程序。若果α-SE 插入到的是不同的 USB 端口,而老的驱动已使用过,那么上述的步骤也是 需要的。完整的介绍如何更新驱动的文档可以向 Woollam 公司索要。

运行安装程序

每台椭圆仪系统有各自 的配置文件。如果你有 安装问题,请参考第 14.1 节的故障排除 从安装光盘上运行"CompleteEASE_Setup_4.xx.EXE"安装程序。安装盘上除了这个安装程序外还有一个"CNF"文件夹,这个文件夹下面有对应椭偏位的硬件配置文件。安装将复制 CompleteEASE 的程序文件, CompleteEASE 运行所需要的 Java 虚拟机文件、及其他文件(材料光学常数文件、光学模型文件、范例数据等)。 注意: CompleteEASE_Setup 程序不会自动安装 "CNF"目录下您的特定仪器的校准和配置文件。这些文件在出厂时创建,如果你的这些文件在使用中损坏,你将需要复制安装 CD 上 CNF 目录下的所有文件到相应的安装目录 C:\CompleteEASE\CNF\下。这些文件将仪器返回到出厂设置,并取代任何最近已进行的校准。如果需要这样做,请联系 JAWCo 以取得更进一步的建议。

按照 CompleteEASE_Setup 安装程序的屏幕提示。安装的默认目录是 C: \ CompleteEASE\。为了最大限度地减少兼容性问题,建议软件安装在这个目录 下。如图 1-2。安装光盘包含了一个特定椭偏仪系统的配置文件。如果您安装 CompleteEASE 软件的计算机将要操作或控制椭偏仪,请选择 "Full Installation 完全安装",如图 1-3 所示。这将安装操作硬件所需要的驱动程序。安装后 CNF 文件还是需要手动复制的。

CompleteEASE软件可以被安装到多台计算机上进行数据分析(大部分系统包含5个安装许可)。如果您要安装的计算机不会用来操作或控制椭偏仪,仅仅用来分析已有的椭偏数据,那么请选择"Data Analysis Only"(仅数据分析),如图 1-3 所示。

注意: CompleteEASE 软件仅能打开由 CompleteEASE 软件压缩的测量数据。因此,您可以将 CompleteEASE 安装在多台计算机,但仅能打开由 CompleteEASE 采集的数据。

🔂 Setup - CompleteEASE		
License Agreement Please read the following important information before continuing.		
Please read the following License Agreement. You must accept the terms of this agreement before continuing with the installation.		
This program is Copyright (c) 1999-2010 by the J.A. Woollam Co., Inc., and is intended for use only by its customers. Unauthorized use, modification, reproduction, or distribution of this program, or any portion of it, may result in severe civil and criminal penalties; violators will be prosecuted to the maximum extent possible under law.		
 I accept the agreement I do not accept the agreement 		
< Back Next > Cancel		

图 1-1. CompleteEAS 软件许可协议.



图 1-2. CompleteEASE 的缺省安装路径

B Setup - CompleteEASE	
Select Components Which components should be installed?	
Select the components you want to install; clear the components you do not install. Click Next when you are ready to continue.	want to
Data Analysis Only (no hardware configuration or drivers are installed)	-
Full Installation Data Analysis Only (no hardware configuration or drivers are installed)	
< <u>B</u> ack <u>N</u> ext >	Cancel

图 1-3. CompleteEASE 的安装选项。软件可选择完全安装(控制椭偏仪系统及数据分析) 或仅用于数据分析。

下一个弹出消息是软件的配置选择,选项包括创建图标、关联 CompleteEASE 文件类型等。这些可选项显示在图 1-4 中。如果您选择快捷图标(图 1-6), CompleteEASE 程序的快捷键将被放置在 Windows 桌面上。先不要启动程序, 根据硬件系统的连接指示来启动 CompleteEASE 软件。在大多数计算机上,该软件安装过程不超过两分钟。



图 1-4. CompleteEASE 安装过程中的任务选项

Setup - CompleteEASE	
Ready to Install Setup is now ready to begin installing CompleteEASE on your computer.	Ð
Click Install to continue with the installation, or click Back if you want to revie change any settings.	ew or
Destination location: C:\CompleteEASE	^
Setup type: Data Analysis Only (no hardware configuration or drivers are installed)	=
Selected components: Main Files	-
Additional tasks: Create a CompleteEASE icon on the desktop Create a CompleteEASE icon on the Start Menu Associate CompleteEASE files with Notepad	-
4	•
< <u>B</u> ack Install	Cancel

图1-5. 安装前的详细资料

现在,羌不要启动 CompleteEASE 程 序



图1-6. CompleteEASE 图标

操作硬件

如果您将使用 CompleteEASE 软件操作硬件,软件需要读取仪器的配置文件。这些文件在安装光盘中,对于不同仪器,这些文件是不同的。如果升级 CompleteEASE 到新版本,配置文件之前已安装,不需要做任何额外的文件复制。如果您在一台新电脑上安装 CompleteEASE 软件,并需要操作硬件,或者要修复一个损坏的版本,您可以复制安装 CD 上 CNF 目录下的所有文件到硬盘驱动器上的相应文件夹中C:/CompleteEASE/CNF/。

注意:如果 CompleteEASE 已经能运行您的系统,你勿重复从 CD 上复制配置文件到 安装目录,因为这会覆盖您最新的校准文件,并返回到出厂设置。这可能需要重新校准 仪器。进一步详情,请联系 Woollam 公司。

1.3. 本手册中使用的约定

CompleteEASE 软件用 Java 编写, Tab-接口可以方便地组织软件功能。图 1-7 是 CompleteEASE 初始屏幕显示。



图 1-7. CompleteEASE 软件

为了帮助用户浏览本手册,将遵循下列约定来描述 CompleteEASE 软件功能。

Tabs 主菜单

当软件控制的是一台 alpha-SE™椭偏仪时,通常有四个主菜单,显示在软件屏幕的顶部, 分别为: *Measurement*(测量), *Analysis*(分析), *Hardware*(硬件)和 *Options*(选项)。对于 M-2000及 RC2系统,用于实时测量的 *In Situ*(在线)主菜 单将会显示。在本手册中,主菜单会被写成粗体和斜体。

Screen Panels 屏幕面板

在每个表单中,屏幕区域称为 panels(面板)。图 1-7 所示的 *Measurement*(测量) 主菜单下,面板包括 System Status(系统状态), Measurement Controls(测量控制)和 Fit Results(拟合结果)。在本手册中 panels 面板将用粗体,蓝色文本书写。

Buttons 按钮

图 1-8 显示了 CompleteEASE 的 *Hardware* (硬件) 主菜单。请注意,有六个 panel(面 板): Hardware (硬件), Controls (控制), Alignment (对准), Other (其他),

Routine Test Measurement (日常测试) 和 **System Information** (系统信息)。在 有些 panel(面板)中有各种 buttons (按钮)。按钮将指定单一功能,如''Align Sample' (对准样品)和'Display Signal'(显示信号)。

CompleteEASE	f 2 X
Measurement In situ Analysis Hardware Opt	ions
Hardware Status	System Information
Waiting to Acquire Data Controls General Calibration Alignment Other Aligns Sample System Check Digplay Signal Move To Load Pos. Routine Test Measurement Measure Measure Show Results	System: SimSE On ESM Base Wavelength Range: 4,960 eY to 1,240 eV Angle Status: 60.00 Z-Stage Status: 0,000mm Translato Status: X Axis = 0,00000 cm, Y Axis = 0,00000 cm Focus Probes: Installed
	Edit Hardware Config. View Hardware Log

图 1-8. Hardware 主菜单中 Screen Panels (屏幕面板)和 Buttons (按钮)。

Model Commands 模型命令

图 1-9 显示了 Analysis (分析) 主菜单。在 Analysis (分析) 主菜单内,有一个 Model (模型): 面板。该模型包括了许多的选项----其中一些有用粗体显示,带下划线, 红色字母。在本手册中,他们也将被显示为粗体,下划线及红色字母。例如, Add (添加), Delete (删除)和 Save (保存)。模型的细节被进一步划分为可扩展部分,由一个粗体红 色+或-符号表示。符号指示文本显示是处于折叠状态(+)还是展开状态(-)。这些部分 将使用红色粗体文字及+符号: +MODEL Options (模型选项),+FIT Options (拟合 选项),+OTHER Options (其他选项)。



图1-9. Analysis (分析) 主菜单 中 Model (模型) 部分

Mouse-selected Menus 鼠标选择菜单

CompleteEASE 软件还同时利用左,右鼠标按钮来访问额外的菜单和功能。在本手册中,如 果您需要选择左或右鼠标按钮时,您可能会分别看到下面的符号:(**心R**)或(**心L**)。图 1-10显示当鼠标按钮(**心R**)在 Fit(拟合): results box(结果框)中按下时出现的菜 单。



图 1-10. 在 Fit (拟合) Fit results section (结果部分) (白色区域) 鼠标右击(**CR**),将 弹出与拟合相关的特殊菜单。

Pipelining Descriptions 操作序列描述

上面章节中软件使用可以被描述成一个操作序列,用来简化使用某个软件功能或菜单的描述。 在这种情况下,说明将采用类似下面的方式:

Tab (主菜单) >Panel (面板):>'Button'(按钮)

例如,在*Analysis*(分析)主菜单里 Model(模型)面板中的'Open'(打开)按钮将方便的描述为:

Analysis>Model:>'Open'

 又例如,从下面的操作序列中可以得到如下信息, Analysis (分析) 主菜单里, Fit: (拟合) 面板框中的鼠标右键后的"Add to Fit Log"(添加到拟合日志)菜单: Analysis>Fit:>(②R)>"Add to Fit Log"

1.4. File Structure 文件结构

CompleteEASE 软件被安装在您的硬盘驱动器的一个单一目录下。了解 CompleteEASE 的 子目录将有助于您使用 CompleteEASE 软件。图 1-11 显示了 CompleteEASE 下的子文件 夹。



图1-11. CompleteEASE 目录下的文件夹及文件

下表提供了 CompleteEASE 下这些子目录的细节及功能。

DIRECTORY 目录	FUNCTION 功能
cnf	硬件配置文件
DAT	Common(公共)的数据文件,包括一个子文件夹, 里面有 CompleteEASE 软件附带的例子数据。所有用 户可查看和打开存放在这个目录下的任何数据,但只 读。此目录不适合存放个人文件。
HTML Clipboard	CompleteEASE 用来构建 HTML 剪贴板报告的文件和 图片。
jar	Java 的应用程序文件
МАТ	Common(公共)使用的光学常数材料库。此文件夹 进一步分为: Advanced(高级), Basic(基本), Dielectric(电介质), Metal(金属)和 Semiconductor(半导体)文件夹。所有用户可查看 和打开存放在这个目录下的任何数据,但只读。
MOD	用来描述一个样品及其相关分析策略的 Common (公 共)模型文件。又分为 Advanced(高级), Basic (基本)和 Calibration Wafers(校准硅片)。
Recipe	Common (公共)Recipe(处方)文件,描述一个完整的测量方法和数据分析模型策略。这仅与可变角及可变测量点位的系统相关, alpha - SE系统不使用这些文件。

表1-2. CompleteEASE 中的目录信息

尽管 CompleteEASE 中可以一直使用 default 默认目录,推荐用户创建自己的目录来存储 Data(数据文件), Models(模型), Materials(材料),和 Recipes(处方)。为了保 护 default(默认)文件,主目录(如表 1-2)中创建的任何子目录内会被设成"只读"。例 如,在 MOD下的三个子目录(Advanced 高级, Basic 基本和 Calibration Wafer 校准硅片) 是只读的。

Recent 列表 和 Recent 目录

CompleteEASE的 models(模型), material files(材料文件)和 data files(数据文件) opening(打开)/saving(保存)对话框中都含有"recent"(最近访问)和"recent folders"(最近访问文件夹)条目列表。让用户能够更迅速地找到他们最近使用过的文件和 文件夹。Recent Folders列表中包含10最近访问(不包括内置的文件夹)的文件夹。当与 'Browse For File'(浏览文件)按钮联合使用时,这个列表尤其有用。本节的后 续内容中将有介绍。

COMMON 公共位置

文件可以直接保存在 Mod 目录下。这个位置被设为 Models(模型)和 Snapshots(快照)的 COMMON(公共)目录。同样, COMMON(公共)目录 DAT 及 MAT 下可分别存放常用数据文件和材料层文件。为了说明这一点,图 1-12 显示了\MOD 目录结构,以及相应的 **Analysis>Model:**>'Open'对话框。请注意,所有文件夹列在对话框中,并且额外增加了一个"Recent"(最近使用过)文件夹外。大多数文件夹显示为蓝色,表示他们是只读的。Common 是唯一的黄色文件夹,因为它保持完全访问,并显示四个文件直接是在\MOD 目录下。

File Edit View Tools	EASE\MOD Help • 😢 Burn	← 4g Sear	ch		۲ ۲				
Favorite Links Documents Favority Changed Favority Changed Favority Changed	Name Advanced Basic Calibration TO - Glob MgO on Si Polysilicon TiO2 on Gl	Date modified Wafers al Fit.mod .mod o n Glass.mod ass, Graded.mod	Туре	Size		Open Model Folder Links Common Common Basic Basic Recent Folders Add Folder Link Refesh Folders	Eiles: TO - Olobal Fit.mod TO 2 on Olass, Graded.mod Mg0 on Si mod Polysilicon on Olass.mod	Date 8/1 3/10 2:14 PM 8/1 3/10 2:14 PM 8/1 3/10 2:13 PM 8/1 3/10 2:13 PM	Size 4 22 KB 4 22 KB 4 12 KB 4 12 KB 4 63 KB
Folders 7 items					~	File Name:	oj Open Cancel		

图 1-12. MOD 目录结构以及 Open Model (打开模型)的对话框。

Folder "Links" 文件夹链接

CompleteEASE 中 Data(数据), Models(模型), Materials(材料), Snapshots(快照) 和 Recipes(处方)使用本地计算机的实际链接。实际的文件夹可以位于计算机上的任何地方。CompleteEASE 中有一个"链接"列表来管理这些链接的文件夹指向。要查看一个文件夹的实际位置,(哈R)(右击)文件夹,在计算机上的位置就会显示在菜单的顶部,如图 1-16 所示。

注意: 如果您的计算机上的文件夹被移动,删除或改名,CompleteEASE 中的"链接"将 被破坏。新增加的'Refresh Folders'按钮可以更新所有链接。

Adding Folder 增加链接 "Links" (within CompleteEASE)

将"链接"指向计算机上添加文件夹是很方便的,添加完"链接"的文件夹会出现在 CompleteEASE文件夹列表中。举一个例子,我们将增加一个"链接"指向到现有的数据文 件夹。在*Analysis*(分析)主菜单下,**Data:**(数据)面板中按'Open'(打开)按钮:你会看 到如图 1-13 所示的对话框,'Add Folder Link'(添加文件夹链接)按钮将允许您选择在您的 计算机中的文件夹来做"链接"。

当您按'Add Folder Link' (添加文件夹链接)按钮时,您计算机上的目录将出现在 CompleteEASE 文件夹浏览器中,如图 1-14 所示。如果您需要创建一个新的文件夹,可以 按' Create New Folder'(创建文件夹)按钮。

注意:在点击'Create New Folder'(创建新文件夹)之前,你需要用鼠标定位到创建新文件夹的位置。点击按钮后,输入文件名称,确认输入框上方的文件夹目录位置正确后再点击 OK 键确认。

Open Data				
Folder Links:	Eiles:			
- Recent	Name	Date	Size	
- Common	120nm Oxide on Si.SE	5/10/04 11:11 AM	6 KB	
- Examples	1600nm Oxide on Si.SE	5/10/04 11:16 AM	6 KB	
←	25nm Oxide on Si.SE	5/10/04 11:08 AM	6 KB	
	300nm Oxide on Si.SE	5/10/04 11:14 AM	6 KB	
	60nm Oxide on Si.SE	5/10/04 11:13 AM	6 KB	
	a-Si Grow Sim.iSE	6/16/08 3:12 PM	1878 KB	
	a-Si Multilayer.SE	4/16/08 3:41 PM	6 KB	
	a-Si on Glass #2 with Backside Refl.SE	4/16/08 4:58 PM	6 KB	
	a-Si on Glass #2.SE	4/16/08 4:57 PM	6 KB	
	a-Si on Glass.SE	4/16/08 3:37 PM	6 KB	
	Aniso-Organic on Si.SE	6/24/09 10:53 PM	4 KB	
	Au_Substrate.SE	4/16/08 3:13 PM	6 KB	
	cr on glass_SE.SE	4/16/08 3:48 PM	6 KB	
	cr on glass_T.SE	4/16/08 3:48 PM	2 KB	
	Cron SiO2 MAP.SE	4/16/08 3:17 PM	1930 KB	
	Flow-on Glass on Si.SE	5/10/04 11:17 AM	6 KB	
	glass substrate_rough.SE	4/16/08 2:51 PM	6 KB	
	glass substrate_smooth.SE	4/16/08 2:52 PM	7 KB	
	glass substrate_taped.SE	4/16/08 2:51 PM	6 KB	
	ITO on Glass with Backside Refl.SE	4/16/08 4:56 PM	6 KB	-
Add Folder Link Refresh Folders	ISE & SE	•		
File Name:				
0				
Comment:				
Browse For File	Open Cancel			

图 1-13. Open Data (打开数据)对话框,显示 Folder Links: (文件夹链接)面板中的数 据文件夹。

举一个例子,在 C:/Measurements/下创建一个新文件夹。首先,用您的鼠标选择位置,如 图 1-14 所示。接下来,点击' Create New Folder'(创建新文件夹)按钮,你将看到如图 所示的输入窗口。验证选择的目录位置是否正确。如果位置正确,输入的新的文件夹名然后 按'OK'(确定)。

注意: CompleteEASE 不会自动"link"(链接)到如上所述创建的新文件夹上。

创建新文件夹后,点击'Add Folder Link',然后在 CompleteEASE Folder Browser 窗口中找到 并选中这个文件夹,然后点击窗口中的'Add Folder Link'按钮,文件将在 Open Data (打开数据)的窗口中显示,如图 1-15 所示。



图 1-14. CompleteEASE Folder Browser 窗口用于查找计算机上的文件夹。要创建一个新文 件夹,先选择正确的位置,然后按'Create New Folder 新建文件夹'按钮。然后输入新文件夹 的名称。在确认新文件夹创建前,验证文件夹位置的正确性是明智之举。

Open Data			
Folder Links:	Eiles:		
Recent Common Examples Examples Tom-2010 Data	Name	Date	Size
Add Folder Link Refresh Folders	ISE & SE	•	
File <u>N</u> ame:			
Comment:			_
Browse For File	en <u>C</u> ancel		

图 1-15. Open Data 列表, 显示新"link" (连接) Tom-2010。

Creating New Sub-Folders 创建新的子文件夹

要在现有的链接文件夹下创建一个子文件夹在,可以使用新的右键菜单选项: "Create New Sub Folder"(创建新子文件夹)。要做到这一点,在 Complete EASE 中将鼠标移到 要创建子文件的文件夹上并点击右键,如图 1-16 所示,选择"Create New Sub Folde"(创建新子文件夹)。然后,输入在新文件夹的名字,图 1-16。

注意:新的子文件夹将显示,它没有直接被"linked"(链接)。这个将在下面的章节中讲解。



图 1-16. 在文件夹上右击(**①**R) 鼠标,访问'Remove from List'(从列表中移除)、 "Default Save Directory"(缺省保存目录)等菜单选项。

Adding Folder "Links" (Drag-and-Drop) 拖放法增加链接

在 CompleteEASE 中,使用 Windows 窗口内的拖放功能,可以方便地添加新的文件夹到"links" (链接)列表中。例如,我们想要将数据文件和分析结果保存在一个单独的文件 夹中。为了演示,一个新的文件夹 C:\Measurements\James Data-2010\已在 Windows 资 源管理器中创建。

要添加这个文件夹的"link" (链接)到 CompleteEASE 列表中,选择, *Analysis* (分析)>**Data:** (数据)>'Open' (打开) 来访问对话框,如



图 1-17 所示,现在,切换到资源管理器或我的电脑窗口并找到需要链接到 CompleteEASE 中的数据文件夹。在这个例子中,该文件夹为"James Data-2010"。 (~①L)文件夹上鼠标左击,按住鼠标按钮的同时移动到 CompleteEASE Folder Links: 面



图 1-17)所示,当你松开鼠标按钮时,该文件夹将出现在 Complete EASE 中。这不是实际 文件夹,而是一个电脑中文件夹一个"link" (链接)。



图 1-17. 使用拖放法复制文件夹链接到 Complete EASE 中。

Viewing SubFolders 查看子目录

在 CompleteEASE 旧版本,只允许访问单独的"links"(链接)。在 CompleteEASE4.0 后 的版本中,我们扩展了"links"(链接),每个"links"(链接)下的 2 层子目录可以被访问。 请看图 1-18 中的例子。在这里,对应于目录 Measurements 的"links"(链接)。 CompleteEASE 自动显示在该文件夹下的 2 层子目录。

Open Data		X
Folder Links:	<u>F</u> iles:	
Recent Common Examples Recent Folders James 2010 Data Company X Run 1 Run 2 Company Y Company Y Project A Project C	Name	Date Size
File <u>N</u> ame: Comment:		
Browse For File	Open Cancel	

图 1-18. 在 Open Data 窗口中的几个目录的子目录被展开, CompleteEASE 可以浏览和 访问任何"链接"文件夹下的2 层子目录。

CompleteEASE 可以"link"(链接)到计算机上的任意文件夹,因此您可以放置不同位置的 链接以得到不同目录层次视图。但你只能查看链接文件夹下的2层子文件夹。为了说明这一 点,图 1-19显示了三个不同文件夹链接:"James Data-2010","Measurements Data", "CompanyX"。实际上这些文件夹具有相同的文件路径,展开时它们可以查看到相同的子 文件夹。然而,对于"Measurements"链接,由于"CompanyX"已经是第二两层子目录, 作为"CompanyX"下的第三层子目录"Run 1","Run 2"将无法显示。



图 1-19. 建了了三个链接,分别指向"James Data-2010","Measurements Data"和 "CompanyX",尽管这些文件夹处于同一路径的不同层次,各链接只能展开最多两层子目录。

Default Save Directory 默认文件保存位置

现在你可以使用**仓R**(右键)菜单下的 default save directory 将任何文件夹设置为默认保存位置,如图 1-20 所示。该位置将显示为粗体文本,表明这里为打开和保存数据文件的默认位置。请注意,如果这个默认文件夹隶属于多个链接,所有链接中的这个文件夹都会显示为粗体。

Open Data		
Folder Links:	Eiles:	Folder Links:
Prevent Examples Examples Company X Gumbany X Gumbany X Company Y Company X Company Y Company X Company Y Company X Company Y Company X Company X Company X Company X Company X Company Y	D Data\Company X	Recent Common Examples Recent Folders Run 1 Run 2 Company X Run 1 Run 2 Company Y Measurements Data Company Y Company X Company X Company Y Company Y Company Y Tom-2010 Data
File <u>N</u> ame: Comment:		
Browse For File	pen <u>C</u> ancel	

图 1-20. (*OR) 右击文件夹名字, 然后点击'Default Save Directory'。该位置将显示为粗体文本并成为数据保存和打开的默认位置。注意,所有不同链接中的这个文件夹都会显示为 粗体。

'Browse for File'浏览文件

此按钮会弹出 Windows 文件对话框,可以访问您计算机的任意位置,以便选择需要的文件。 当文件被打开后,包含此文件的文件夹将被添加到 Recent (最近访问文件夹)列表中。

Browse	ter Pagers	e dese	2.0	×
Look in:	🐌 Measurements Data	•	G 🤌 📂 🛄 🗸	
Recent Places	Name File Folder (2) James-2010 Data	Date modified 8/13/2010 3:03 PM 8/13/2010 3:03 PM	Type File Folder File Folder	Size
Desktop	- 1011 2020 Data	0,13,2010 5105 111	The Folder	
James Hilfiker				
Computer				
Network	•	III		•
	File name:		E	Open
	Files of type: All Files (*.*)		•	Cancel

图 1-21. 标准 Windows 文件浏览器

1.5. Setting Up Multiple Users 设置多用户

一台光谱椭偏仪通常会有多个用户使用。在这种情况下,每一个用户建立自己独立的文件夹 "链接"会更方便。然而,这需要每个用户各自登录。要为 CompleteEASE 配置多个用户, 执行以下更改。

进入 **Options**(选项)主菜单,选择'Edit Configuration'(编辑配置)按钮。配置参数 被分成不同的区域。展开"General"(常规)部分,如图 1-22,并进行以下更改。

- 1. 设置"User Log-in Mode"为 Must Log In
- 2. 通过选中单选框参数为 ON, 改变 "Users Have Own Folders List" 为 True (真)。
- 可选:您可以设置"Always Add CE Folder"为 True或 False来确定是否所有用户可以看到 CompleteEASE 中所有的文件夹。如果设为 True,所有用户可以看计算机上 CompleteEASE 中的所有文件夹。

注意:完成以上步骤后,CompleteEASE 重新启动后设置才会生效。当然,你也可以在重新 启动软件前设置好用户列表(下个步骤)。



图 1-22. CompleteEASE configuration (配置)对话框. General 参数区域已展开,显示了 设置多用户的选择参数"User Log-In Mode""Always Add CE Folders"和"Users Have Own Folders List"。

将 CompleteEASE 配置为多个用户后,你需要设置拥有各自帐户的用户。点击 **Options** (选项) > **Miscellaneous** (杂项)> 'Manage Users'(管理用户),用户管理窗口会出现,如 图 1-23。点击'Add New User'(添加新用户)然后为每个需要添加的用户键入各自的用 户名和密码。

注意:如果密码为空,登录时将不需要密码。

User Management		X			
Current Users					
User Name	Password	Access Level			
Default		SysOp			
James	J1	SysOp			
Tom	T1	SysOp			
Add New User Edit User Delete User					
	Close				

图1-23. 设置多个用户账户。

为每个用户建立完账户后,需要关闭 CompleteEASE 并重新启动。这样之前的设置将生效。 当您重新启动 CompleteEASE 时,需要输入用户名和密码才能进入软件。用户名可以在下 拉列表中找到,如图 1-24 所示。

User Name: Password: Default
Password: Default
James
Tom

图1-24. 多用户模式设置后启动软件需要登录,用户名可以在下拉列表中选择。

现在,任何由个人用户创建的目录只有该用户登录时才会显示。但是,如果创建的文件夹位于 CompleteEASE 目录中,所有用户将会看到这个目录。基于这个原因,对于仅限个人访问的文件夹应该创建在 CompleteEASE 目录以外的位置。对于我的例子中,创建了文件 C:\Measurements,在此文件夹下,每个用户可以创建自己的子目录,并且用户可以配置 CompleteEASE 中的链接,仅显示用户自己需要的文件夹。

1.6. Short-cut Guide 快捷键向导

在 CompleteEASE 软件中有两种类型的快捷键。第一,跟所有的软件一样,某一字母显示 有下划线,那么该菜单快捷键为按住 ALT 键后按该字母。额外的全局快捷键需要组合 CTRL, SHIFT 及 ALT 按键。这些额外的快捷键列于表 1-3 中。

表1-3. 🏌	快捷键参考
---------	-------

SHORT CUT	FUNCTION
CTRL-M	Go to Measurement Tab 到 Measurement 主菜单
CTRL-A	Go to Analysis Tab 到 Analysis 主菜单
CTRL-I	Go to In situ Tab 到 In situ 主菜单
CTRL-H	Go to <i>Hardware</i> Tab 到 <i>Hardware</i> 主菜单
CTRL-O	Go to Options Tab 到 Options 主菜单
CTRL-P	Graph the Psi data curves 对 Psi 画图
CTRL-D	Graph the Delta data curves 对 data 画图
CTRL-N	Graph the "N" data curves (N,C,S format) 画图 N
CTRL-C	Graph the "C" data curves (N,C,S format) 画图 C
CTRL-S	Graph the "S" data curves (N,C,S format) 画图 S
CTRL-1	Graph the <e1> data curves 画图 e1</e1>
CTRL-2	Graph the <e2> data curves 画图 e2</e2>
CTRL-T	Graph the Intensity data 对强度数据画图
CTRL-Z	Graph the Depolarization data 对退偏振数据画图
CTRL-SPACE BAR	Switch view from single-point to Map/Dynamic
CTRL-L	Add to Fit Log 增加拟合日志
CTRL-ALT-L	View Fit Log 显示拟合日志
CTRL-R	Add Report to HTML Clipboard 增加报告到 HTML 剪贴板
CTRL-V	View HTML Clipboard 增加报告到 HTML 剪贴板
CTRL-ALT-O	Toggle Default Optical Constant units between "e1 & e2" and "n & k" 光学常数显示"e1 & e2" 和 "n & k" 切换
CTRL-ALT-W	Toggle Default wavelength units between "nm" and "eV" 波长单位"nm"和"eV" 切换
CTRL-ALT-S	Show graph statistics 显示图形统计
CTRL-ALT-SHIFT-I	Add the In Situ Tab 增加 In Situ 表单
SHIFT-Mouse roller (鼠标滚轮)	将鼠标放在模型的某个参数上,前后滚动鼠标,可以增加 或减小这个参数的值
CTRL-SHIFT-Mouse roller	与 SHIFT-Mouse roller 相同, 但滚动时值的变化幅度要小些

如果你的数据是 Uniformity Mapping data (地貌均匀性数据),下列快捷键可以帮助处理数据和图表。

表 1-4. mapping data (地貌数据)的快捷键.

SHORT CUT	FUNCTION
CTRL-Click on Point (点击某点)	Select/De-Select Point 选择或反选该点
CTRL-ALT-Click on Point	Delete Point 删除该点
CTRL-ALT-SHIFT Click on Point	Show camera image from point
	(when available) 显示该点的图像(如有)
CTRL-SPACE Bar 空格键	显示单点和 Map 数据的切换

最后,当对 in-situ (在线)数据 和 multi-sample(多样品)数据进行分析时,额外的快捷键可以帮助在不同数据或不同模型中快速切换。

表 1-5 mapping data	(地貌数据)	的快捷键参考
--------------------	--------	--------

SHORT CUT	FUNCTION
CTRL-(F1, F2, F3)	Switch between models 1, 2, 3
	在各模型中切换
ALT-(1,2,3)	Switch between data sets 1, 2, 3
	在各数据中切换

1.7. What is Spectroscopic Ellipsometry 什么是椭偏术?

椭偏术是一种非破坏光学测量技术,表征样品时使用偏振光束照射,如图 1-25 所示。 椭偏术测量经样品反射(或透射)后导致的光束偏振态的变化。偏振态的变化通常表示 为由等式(1-1)定义的椭偏参量 Psi (Ψ) 和 Delta:

$$\tan(\Psi) \cdot e^{i\Delta} = \rho = \frac{r_p}{r_s}$$
(1-1)

在这个公式中,定义 rho (ρ)为 p -偏振光(r_p)的反射率除以 s -偏振光(r_s)的反射率的值。 ρ是一个复数,在极坐标下椭偏参数的值可以被简单的描述: tan(Ψ)是反射率的大小比, Δ是相位。与简单的基于反射或透射强度测量相比,椭偏测量提供以下三个主要优点:

- Precision (高精度)由于偏振态的变化通过一个比例来定义,椭偏对于 测量光束的绝对强度变化不敏感(即样品本身是测量的'reference'参考)。 因此,无需知道光强"绝对"值即可获得准确的测量。
- Sensitivity (灵敏) 椭偏参量∆是相位信息,它提供了对超薄膜的超强 灵敏度,甚至可达到分辨 sub-nm(亚纳米)膜厚的水平。
- Information (信息) 椭偏术在每个波长上测量 2 个值(Psi 和 Delta), 与反射强度或透射强度测量相比,信息量加倍。



高准确性,高重复性,高灵敏度,使得椭偏测量非常适合要求苛刻的薄膜计量应用。

图1-25. 偏振光与样品的交互作用

在分光椭偏术(SE)中,作为波长函数的 Psi 和 Delta 被采集。这大大增加了数据集中的信息内容,使多样品性能的同时确定成为可能。然而,要从测量到的 SE 数据集中提取样品参数,如薄膜厚度和光学常数等,必须建立一个光学模型来拟合数据。 Complete EASE 软件提供了图形化的用户界面,可以方便的建立模型,并在软件中显示测量数据和模型拟合结果等。在 3.1 节中更详细地阐述了数据分析的基础和理论。 Complete EASE 还提供了一个简单的与 SE 硬件连接的接口,可以快速方便的采集准确的 SE 数据。

更多的椭偏理论,请参阅以下文献:

- 1. H. Tompkins and E. Irene, eds. <u>Handbook of Ellipsometry</u>, William Andrew Publishing, New York, 2005.
- 2. H. Fujiwara, <u>Spectroscopic Ellipsometry Principles and</u> <u>Applications</u> John Wiley & Sons, West Sussex, England 2007.
- 3. J.N. Hilfiker and J.A. Woollam, *Ellipsometry*, in <u>Encyclopedia of</u> <u>Modern Optics</u>, edited by Robert D. Guenther, Duncan G. Steel and Leopold Bayvel, Elsevier, Oxford, 2004.
- 4. J. A. Woollam et al., "Overview of Variable Angle Spectroscopic Ellipsometry (VASE), Part I: Basic Theory and Typical Applications", *SPIE Proc.* **CR72** (1999) 3.
- 5. B. Johs et al., "Overview of Variable Angle Spectroscopic Ellipsometry (VASE), Part II: Advanced Applications", *SPIE Proc.* **CR72** (1999) 29.
- 6. H.G. Tompkins and W.A. McGahan, <u>Spectroscopic Ellipsometry</u> and <u>Reflectometry</u>, John Wiley & Sons, 1999.
- 7. R.M.A. Azzam, and N.M. Bashara, <u>Ellipsometry and Polarized</u> <u>Light</u>, North Holland Press, Amsterdam 1977, Second edition 1987.

2. Data Collection 数据采集

任何一种椭偏测量需要做的第一步是用椭偏仪采集数据。这些操作方法会在仪器的硬件手册 中有更好的描述。 CompleteEASE 用于 Woollam 公司的如下椭偏仪: alpha-SE、M-2000、 RC2 和 AccuMap-SE。如何采集数据取决椭偏仪的型号及每台椭偏仪的不同硬件配置。 本章介绍了使用 CompleteEASE 进行数据采集的概况。更详细的资料请参阅你系统的硬件 手册:第8章中, Measurement (测量)主菜单的各功能均有讲述。

注意:本章的介绍是针对各种不同系统的。光路对准、系统校准等的详细说明,请参照相应的硬件手册。

2.1. alpha-SE Systems

由于没有 mapping 等选项, CompleteEASE 中 alpha-SE 采集数据的屏幕比较简单。 alpha-SE 的 Measurement (测量) 主菜单如图 2-1 所示。



图 2-1. alpha-SE 的 Measurement (测量) 主菜单

在采集数据之前需要做 5 项选择。分别是 i)measurement "Mode"(测量方法), ii) "Sample Alignment"(样品对准)方式, iii)测量角度, iv)分析数据的"Model"(模型) 以及 v) "Save Data after Measurement"(测量后是否要保存数据)。它们中的三个选项 使用下拉菜单,如图 2-2 所示。



图 2-2. measurement Mode, Sample Alignment 和 Model 的菜单选项

对于大多数的测量,"Standard"(标准)测量方法和"Standard"(标准)样品对准被使用。 第8章中有其他选择细节的介绍。

Measuring a Sample 测量一个样品

一旦测量选项已完成选择,您就可以点击'Measure'(测试)按钮开始测量,如图 2-3 所示。 由于 alpha-SE 会自动进行样品对准,系统会通过探测样品反射来的来先对准样品(使用选 择的样品对准方法),然后采集数据(使用选择的测试方式)。最后,如果选择了一个 Model (模型),数据将使用该模型分析,以确定薄膜的特性。

weasurement	Analysis	Hardware	Options	
System Status Acquiring Da	ta			
Measurement (Controls			
Mode: Fast	- 5	S <u>a</u> mple Alignm	ent: Standard	
Angles: Mode <u>l</u> : Si with Th	ermal Oxide	70° 🗹 75°	90°(S-T)	
	Caus Date	a after Measure	ment	
	P Dave Dat	a anor modolare		

图 2-3. 点击 'Measure' 将开始数据采集过程, System Status 面板将显示当前的硬件操作 状态。

如果"Save Data After Measurement"(测量后保存数据)选择框是被选中的,如图 2-4 所示的对话框将弹出。在 Folder Links:(文件夹链接)中定位你要存储数据的位置,输入文件名和注释。如果文件夹"link"(链接)不存在,你可以创建或增加一个新的 link(链接)。有关链接的详细操作方法参考章节 1.4。

注意: CompleteEASE 数据文件是加密的,文件扩展名为".SE"或".iSE"。这些文件只有 CompleteEASE 软件可以打开。

Folder Links:	Elles:	
Common Caracteria Common	Name	Date Size
Add Folder Link Refresh Folders File Name: Comment		•

图 2-4. Save Data (数据保存) 对话框. 输入 File Name (文件名) 和 comment (注释) 然后点击'Save' (保存)。

SE (橢偏)数据采集完后,数据将使用选定的 model (模型)进行分析,拟合参数后得到的结果显示在 Fit Results 面板中。拟合后的模型数据和实测数据会显示在图形窗口中:如果模型数据和实测数据拟合得好,黑色虚线(模型数据曲线)将贴合在彩色 Psi 和 Delta 实测数据曲线的上方。如果不是这种情况,可能选择了错误的 model (模型)。一个氧化硅的薄膜分析结果显示在图 2-5.中。该模型的拟合参数结果将显示在 *Measurement* >Fit Results 面板中,测试波长上 Psi 和 Delta 值的曲线与拟合后模型产生的相应数据曲线显示在 Complete EASE 软件下方的底部窗口中。



图 2-5. 用 alpha-SE 系统成功测量的氧化物薄膜

2.2. M-2000, RC2, 和 AccuMap-SE Systems

对于 M-2000, RC2 和 AccuMap-SE 系统,数据采集的选择项会更多些。这个章节里将讨论典型系统的基本选项。由于不同系统配置差异较大,系统配置等详细信息建议参考对应系统的硬件手册。图 2-6 显示了配置有 mapping (地貌-*平移台*)和 camera (相机)的 M-2000 系统的 *Measurement* (测量)主菜单。对应某一测量的多个测量选项,CompleteEASE 将这些测量参数 (如何测量,测量点位等)的设置放在 Recipe 处方中。这些 recipe 处方文件可以 创建、保存、编辑,以适用各类测量或不同样品。

CompleteEASE			- 0' X
Measurement In situ Analysis Hard	ware Options		Log Out
System Status	Fit Results	Scan Map	
Waiting to Acquire Data	No Results Available		
Measurement Controls			
Recipe: <select a="" recipe=""></select>			
Acq.:			
Scan:			
Model:			
Measure			
	View Prev Results Granh Parms	View Camera Imana	
		view Camera image	
Graph Type		si	now Data
<u></u>			

图 2-6. 配置有自动变角,自动样品对准(俯仰调节),自动样品平移台,聚焦光学件, 相机的 M-2000 系统的 Measurement (测量)主菜单。

Measurement Recipe 测量处方

这种系统的测量控制被组合到一个 Recipe (处方)中,每一个 Recipe (处方)包含数据采 集的三个大类: 1) Data Acquisition (数据采集方法),2) Mapping Scan settings (扫描点位设置),和 3) Modeling (数据分析模型)

Measurement>Measurement Controls>Recipe:下拉菜单中有以下选项 1) Prompt for Acquisition Parameters (采集参数提示), 2) Prompt for Recipe Components (处方单元提示), 3) list of all Common recipes (常用处方列表), 4) Choose From File Dialog (从文件对话 框选择处方), 5) Create/Edit Recipe (创建/编辑处方)。这些选项如图 2-7 所示。

🔗 Comp	leteEASE				
Measu	rement	In situ	Analysis	Hard	
System	n Status-				
Waitin	ng to Acqu	uire Data			
Measu	rement Co	ontrols			
Recipe:	<select a="" f<="" th=""><th>Recipe≻</th><th></th><th>-</th></select>	Recipe≻		-	
Acq.: Scan: Model:	Acq.: <select a="" recipe=""> scan: <prompt acquisition="" for="" parameters=""> <prompt components="" for="" recipe=""> odel: 55 65 and 252 acc. 2mm thick milds</prompt></prompt></select>				
	C	hoose From	n File Dialog		

图 2-7. Recipe (处方) 选项。.

<Prompt for Acquisition Parameters 处方单元提示>

选择<Prompt for Acquisition Parameters>时,将使用一个不完整的处方,这个选项将 忽略 Scan Pattern (扫描点位)和 Model (模型)。这假假设你只想测一个单点数据,保存 后在以后分析。你可以在类似于图 2-8 的窗口中定义你需要的测试参数。数据采集的参数设 置选项将在第8章节中讲述。

Acquisition Parameters Setup
Data Acquisition Parameters
Data Type: Standard
Acq. <u>T</u> ime: 2.00
Scan Options
Angle Scan: 55.00 To 70.00 By 15.00
Measure In Transmission Mode
Alignment Options
Sample Tilt Alignment: Automatic
Sample Height Alignment: Automatic-Quick
Sample Thickness: 1.19 mm Set To Current Position
Align At First Angle Alignment Angle: 65.00
Other Options
☑ Do Not Return To Sample Load Position
☑ Do Not Reposition Translator
Load <u>Ok</u> Cancel

图 2-8. Acquisition Parameters Setup (数据采集参数设置) 对话框

<Prompt for Recipe Components 处方单元提示>

如果你准备对样品上的多个点位进行 Map 测量,并且/或知道使用哪个模型来分析数据, <Prompt for Recipe Components>选项允许用户对处方中的三个单元 Acquisition Parameters(数据采集方法),Scan Pattern(扫描点位设置),和 Model(数据分析模型)中 的设置分别选择,如图 2-9 所示。如果你需要选择的设置还没有建立,那么可以通过 Recipe Components(处方单元)对话框来创建它们。

Choose Recipe Components
Recipe
Acq. Parms: <select acquisition="" an="" parameters="" set=""></select>
Scan Pattern: None
Model: None
Additional Parameters
Folder for saving acquired data:
Save Results Only - No Raw Data
Export measurement results
Load Existing Recipe

图 2-9. 为一个处方选择不同单元的参数。

'Create/Edit Recipe 创建/编辑处方'

这个按钮用来创建或编辑处方。这将打开与之前相同的如图 2-9 所示的窗口。Recipe 选项将在后面的章节中详细描述。

对于任何一个 recipe (处方),它总是有三个主要的单元组成,分别为 Acquisition Parameters (数据采集方法), Scan Pattern (扫描点位设置),和 Model (数据分析模型),如图 2-10 所示。这些单元将在后面详细讨论。

Choose Recipe Components	X
Recipe	
Acq. Parms: <select acquisition="" an="" paran<="" td=""><td>neters Set> Edit/Create</td></select>	neters Set> Edit/Create
<u>S</u> can Pattern: None	▼ <u>E</u> dit/Create
Model: None	▼
Additional Parameters	
Folder for saving acquired data:	
🔲 Save Results Only - No Raw Data	
Export measurement results	
Load Existing Recipe	<u>O</u> k <u>C</u> ancel

图 2-10. Recipe 中的 Components (单元)

2.3. Acquisition Parameters 采集参数

Acquisition Parameters (数据采集参数)描述了在一个测量 Recipe (不管是单点还是多 点扫描)中对于每一点位数据是如何采集的。图 2-11 显示了常用的 Acquisition Parameters (数据采集参数)选择项。这些选项在相应的硬件手册中有详细讨论。

Acquisition Parameters Setup
Data Acquisition Parameters
Data Type: Standard
Acq. Time: 2.00
Scan Options
Angle Scan: 55.00 To 70.00 By 15.00
Measure In Transmission Mode
Alignment Options
Sample Tilt Alignment: Automatic
Sample Height Alignment: Automatic-Quick
Sample Thickness: 1.19 mm Set To Current Position
Align At First Angle Alignment Angle: 65.00
Other Options
☑ Do Not Return To Sample Load Position
☑ Do Not Reposition Translator
Load Qk Cancel

图 2-11. M-2000 和 RC2 系统的 Acquisition Parameters Setup 窗口。不同的系统配置会有 不同选择项。

Data Type 数据类型

Data Type(数据类型)定义测量时采集何种数据,如图 2-12 所示。对于 95%的应用, "Standard"(标准)选项将被选择。



图 2-12. Data Type (数据类型)中的不同选项

Sample Alignment 样品对准

样品对准选项与系统的型号和配置有关。一般的,样品对准有两个基本步骤,俯仰对准和高度对准。常用的选项将在下面详述。

Tilt Alignment (俯仰对准)

俯仰对准是调节样品的俯仰(倾斜)位置,使得入射到样品上的光束能以正确的角度反射到 探测器上。 俯仰对准选项包括 Skip (跳过), Manual (手动),或 Automated (自动),如图 2-13 所示。

Sample Tilt Alignment:	Automatic	•
	Skip	
	Manual	
	Automatic	

图 2-13. 样品 Tilt Alignment (俯仰对准)的选项

如果系统装有聚焦件,Tilt alignment (俯仰对准)常常选择 Skip (跳过),因为这时的俯仰 调节变得不灵敏。如果一直测量很平整的样品,那么 Tilt alignment (俯仰对准)也可以选择 Skip (跳过)。例如,系统一直测量 200mm 的晶圆,那么不同样品的俯仰角是十分接近的,那么 Tilt alignment (俯仰对准)就可以选择 Skip (跳过)。

对于 Manual (手动)或 Automatic (自动)对准,系统用一个4象限探测器来判断反射光。 通过调节样品俯仰使得在探测器的四个象限上的光强分布相同,这时光束在四象限探测器的 中央(同心),也就是正确的反射光位置。这种方法对于各个样品的俯仰调节都有很高的重 复性。一个有自动俯仰的系统的俯仰对准窗口如图 2-14。

CompleteEASE				- d 🛛
Cancel Alignment	-Align M	ode	Detector	Motor Increments
	 Auto 	natic	Lookdown	Z Stage 0.5 💌
Use Data Acquisition Time	🔾 Man	al	 Receiver 	Tilt Stage 0.02 💌
Sample Tilt X = -1.4 Y = -1.3 Intensity = 1.307 Ave. Signal = 0.000			Z Position Tiit Positio	= 0.500mm n = (0.071,0.024)
·				
•				

图 2-14. 样品 Tilt Alignment(俯仰对准)窗口。

Sample Height Alignment(样品高度对准)

样品高度对准是调节样品反射表面的高低位置(反射光束高低位置随之改变),对准的目的是让不同厚度样品上的反射光能到达准确的位置(探测器上光强最强)。对于有小光斑的椭偏仪(聚集光斑椭偏仪),这个调节尤其重要。如果有不同厚度(基底)的样品要在同一台椭偏仪上测试,那么 Sample Height Alignment (样品高度对准)是必不可少的。常用的 Sample Height Alignment (样品高度对准)选项如图 2-15 所示。对于配

置有 Automated Height Alignment (自动样品高度对准)的系统,在不同 Z 轴高度时的探测器上的反射光光强被记录下来,如图 2-16 所示。具有最高光强的 Z 轴位置将被认为 是 Z 轴的正确位置(对准位置)。

Sample Height Alignment:	Automatic-Quick
	Skip
	Manual
	Automatic-Quick
	Automatic-Robust
	Use Sample Thickness

图 2-15. Sample Height Alignment(样品高度对准)选项

	Alian Mode	Detector	Motor Increments
Cancer Angrittent	 Automatic 	Lookdown	Z Stage 0.5 💌
Use Data Acquisition Time	🔾 Manual	Receiver	Tilt Stage 0.02 💌
Max Signal Intensity = 17.72 Current Position = 0.523			
-3.71 mm		1	7.00 mm

图 2-16. Sample Height-Alignment (样品高度对准)窗口

2.4. Scan Pattern 扫描图案

扫描图案描述样品上的测量点位。这个选项只适用于配置有自动样品移动台的椭偏仪。 要创建一个新的扫描图案,点击 Scan Pattern 右边的'Edit/Create'(编辑/创建)按钮, 如图 2-17 所示。

Choose Recipe Components
Recipe
Acq. Parms: 55, 65, 75°, 3sec, 3mm thick, quick parms 💌 Edit/Create
Scan Pattern: None
Model: None
Additional Parameters
Folder for saving acquired data:
Save Results Only - No Raw Data
Export measurement results
Load Existing Recipe Ok Cancel

图 2-17. 从 Recipe Components 对话框中选择 'Edit/Create' (编辑/创建) Scan Pattern (扫描图案)。

Scan Patter Editor(扫描图案编辑器),如图 2-18 所示,可以描述圆形及矩形样品。 其中有很多自动画点的选项,包括 Grid Fill(网格填充),R-T Grid Fill(极坐标填充), and Line Fill(线型填充)。对这些选项多次的尝试后,可以直观地找到填充规律。

Scan Pattern Editor: (not saved)	X
Substrate Dimensions Circle	
1: 0.0000, 9.5000 ■ 2: 38000, 8.5500 ■ 3: 28500, 8.5500 ■ 4: 1.9000, 8.5500 ■ 5: 0.9500, 8.5500 ■ 6: -0.0000, 8.5500 ■ 7: -0.9500, 8.5500 ■ 8: -1.9000, 8.5500 ■ 9: -2.8500, 8.5500 ■ 10: -3.8000, 8.5500 ■ 11: -5.7000, 7.6000 ■ 12: -4.7500, 7.6000 ■ 13: -3.8000, 7.6000 ■ 14: - 2.8500, 7.6000 ■ 13: - 3.8000, 7.6000 ■ 14: - 2.8500, 7.6000 ■ 15: - 1.9000, 7.6000 ■ 16: - 0.000, 7.6000 ■ 16: - 1.9000, 7.6000 ■ 16: - 0.000, 7.6000 ■ 16: - 1.900, 7.6000 ■ 16: - 1.900, 7.6000 ■ 16: - 1.900, 7.6000 ■ 16: - 0.000, 7.6000 ■ 16: - 0.000, 7.6000 ■ 16: - 0.000, 7.6000 ■ 16: - 0.000, 7.6000 ■ 16: - 0.000, 7.6000 ■ 17: - 0.000, 7.6000 ■<	
Alignment Position ☆ 0.0 Y:0.0 Align at this position only ▼ Deskew Points	Pattern Offset x 0.0 Y 0.0 Theta (Y: 0.0 Load Position: Default Transmission Intensity Baseline
□ Do Deskew X1: [0.0 Y1: [0.0 X2: [0.0 Y2: [0.0 □ Record Image At Each Point Image Zoom: 1x ▼ Load Save Close	Use Point For Transmission Baseline X 0.0 Y. 0.0

图 2-18. Scan Pattern Editor (扫描图案编辑器)

2.5. Model 模型

模型用来描述 CompleteEASE 如何"fit"(拟合)数据,以获得薄膜厚度及光学常数(或者其他的材料特性)。模型将在以后的章节中详细阐述,内容包括针对不同样品,如何在众多的 common models(公共模型)中选择适用的模型。对于多点扫描的数据,模型将逐点对数据拟合。

Basic Models 基本模型

为了方便使用, CompleteEASE 中的"Basic"目录链接下有一个基础模型列表。它们包括 生长在硅片或玻璃上的透明或吸收薄膜。如图 2-19 所示。

🔗 Co	mpleteEASE			r d 🛛		
Mea	asurement In situ Analysis Hardware	Options		Log Out		
Data	a: No Data Loaded	Iodel: No Model Loaded				
				- 1		
	Open Model			<u>ما</u> ا		
	Folder Links:	<u>F</u> iles:				
Graph	Recent Common Basic Basic Collibration Wafers	Name a-Si on Glass (with Backside Reflection) mod a-Si on Glass mod Glass Substrate, transmission Data Include Glass Substrate-Transmission Data Include Glass Substrate-Transmission Data Include Glass with Absorbing Film with Backside re Glass with Absorbing Film mod Glass with Transparent Film (with Backside re Glass with Transparent Film Mackside reflection), ITO (thin) on Glass, Mot ITO on Glass, Mot Ackside reflection), mod Si with Native Oxide mod Si with Native Oxide mod Si with Transparent Film mod Si with Transparent Film mod Si with Transparent Film mod	Date Size 6/2206 12:52 PM 3 KB 7/2208 10:53 AM 3 KB 6/2807 415 PM 2 KB 7/2208 12:71 PM 8 KB 7/2208 12:71 PM 8 KB 7/2208 12:71 PM 8 KB 7/2208 12:75 PM 7 KB 6/2206 12:57 PM 2 KB 6/2206 12:56 PM 3 KB 6/2206 12:56 PM 3 KB 7/2208 10:54 AM 3 KB 7/2208 10:55 AM 3 KB 7/2208 10:55 AM 3 KB 7/2208 10:55 AM 1 KB 7/2208 10:55 AM 1 KB 7/2208 10:55 AM 2 KB 7/2208 10:55 AM 2 KB)ata		
	Add Folder Link	j				
File Name: Si with Transparent Film.mod						

图 2-19. 在 Analysis 主菜单中, 点击'Open Model'并选择左边的"Basic" 目录链接来访问在玻璃或硅片基底上的许多初始模型。

2.6. Running a Recipe 运行处方 和 Viewing Results 显示结果

选择了 Recipe 或者 Recipe 中的各组件后,点击'Measure'按钮,CompleteEASE 软件会对 Scan Pattern 中的各点逐个走位并测量,测量时依从 Acquisition Parameter (测量参数)的设置值。每个点在测量结束后会使用选定的 Model 来分析。图 2-20 展示了一个实例。 System Status 面板中显示硬件的工作状态。Fit Results 面板会更新各点的拟合结果。 Scan Map 面板将显示图案点位,绿色的是测量完的点,蓝色的是正在测量的点,红色的是等待测量的点。Graph 窗口中将显示最近测量结束的点的数据。



图 2-20. CompleteEASE 运行一个多点测量的 Recipe

对于多点位的测量,显示图形可以切换,窗口中可以显示测量完成点的参数。要显示这些参数,点击 Fit Results 面板下方的'Graph Parms'按钮。你可以在 Graph 窗口左上方的下拉菜单中选择作图的参数,如图 2-21。



图 2-21. 在测量过程中显示测量参数结果

当测试完成后,测试结果将列在 Fit Results 面板里的表格中。如图 2-22。运行 recipe 的各模型参数将和测量数据一起被保存,之后你可以用 Fit Results 面板中的'View Previous Results' 按钮来打开它。这将弹出如图 2-23 的窗口。



图 2-22. 扫描完后的结果

View Data							
Location	Fil	e Information					
Current: James Choose		test					
Files		Recipe: CUS	ТОМ				
		Acq. Parameters: 70)°,1 secon	d, Quick.PAR	MS		
Name Date	4	Scan Pattern: test.s	can				
4/22/09[17.13]		Model: Thermal Oxic	le on Si.MO	D			
			Z Align	SigInt	Tilt X	Tilt Y	Ha
		Average	0.7082	19.5896	0.0688	0.0263	
		Min	0.7082	17.5025	0.0688	0.0263	
		Max	0.7082	21.2114	0.0688	0.0263	
		Std. Dev.	0.0000	0.7022	0.0000	0.0000	
		% Range	0.0000	9.4664	0.0000	0.0000	
		(-0.000,1.500)	0.708	20.266	0.069	0.026	=
		(-0.750,1.125)	0.708	19.950	0.069	0.026	
		(-0.375,1.125)	0.708	20.485	0.069	0.026	
		(0.000,1.125)	0.708	20.446	0.069	0.026	
		(0.375,1.125)	0.708	17.763	0.069	0.026	
		(0.750,1.125)	0.708	17.989	0.069	0.026	
		(1.125,0.750)	0.708	21.211	0.069	0.026	
		(0.750,0.750)	0.708	18.757	0.069	0.026	
		(0.375,0.750)	0.708	18.289	0.069	0.026	
		(-0.000,0.750)	0.708	20.085	0.069	0.026	
		(-0.375,0.750)	0.708	20.430	0.069	0.026	
		(-0.750,0.750)	0.708	19.866	0.069	0.026	
		(-1.125,0.750)	0.708	20.024	0.069	0.026	
		(-1.125,0.375)	0.708	19.953	0.069	0.026	
		(-0.750,0.375)	0.708	19.964	0.069	0.026	
		(-0.375,0.375)	0.708	19.724	0.069	0.026	
		(0.000,0.375)	0.708	19.937	0.069	0.026	
I		(0.375,0.375)	0.708	19.500	0.069	0.026	-
Calc <u>M</u> ulti-Sample Stats <u>G</u> raph Data							
Open File Copy Text To Clipboard Copy Table To Clipboard							
	[<u>C</u> lose					

图 2-23.测试完成后的结果显示

3. 数据分析 1 - 基础篇

我们发现,学习软件功能的最好方法是实例操作,通过系列实例的练习来提高分析能力。 为此,我们将在之后多个章节中对常见的 CompleteEASE 数据分析过程进行实例演绎。 之后的教程,对初学者及专家都有帮助。第3章是简单的数据分析实例。在这里,主 要讲述透明薄膜的分析。第4章是中等难度的分析教程,涉及吸收材料的分析难点将 在这里进行讲解。最后,第5章介绍了一些高级的数据分析,例如多样品分析和各向 异性材料,第6章介绍了 *in situ (在线*)数据的分析方法。

本章的例子如下,通过这些例子的讲解,逐一展示 Complete EASE 的主要功能。

Section 3.1 General Data Analysis 数据分析理论概述 Theory

Section 3.2 已知 N,K 的样品: SiO2 on Si

在这个例子中使用到的功能		
• Opening model and data files	• Fitting data	
• Parameter error bars	• Hiding or renaming fit parameters	
Visualizing model changes	• Thickness "Pre-Fitting"	
• Reporting "derived" parameters		

• Defining fit parameters (i.e. turning on and off)

Section 3.3 Transparent Thin Films 透明薄膜 - 1

在这个例子中使用到的功			
Cauchy dispersion equation	Displaying optical constants		
Global fits	• Expanding layers		
Renaming Layers			

Section 3.4 Transparent Substrates (透明基底)

这个例子中用到的新功能		
• Graphing multiple data sets	Using the Graph Scratch Pad	
 Including backside reflections 	Depolarization data	

Section 3.5 Transparent Films 透明膜 - 2

这个例子中的功能		
Grade Layer		
	这个例子中的功能 ● Grade Layer	

Section 3.6 Log and Report a Series of Films (系列膜的日志和报告)

这个例子中的功能				
Copying to clipboard	• Comparing optical constants in fit log			
(Formatted or Table)	 Copy Analysis Report to Clipboard 			
• Fit log	• Re-analyzing data from log			
Open/Save Snapshot				

3.1. General Data Analysis 数据分析理论概述 Theory

在 spectroscopic ellipsometry (SE)(分光椭偏术)中数据分析是相当重要的一个环节: 没有数据分析,那么SE (Q测量不同波长上的 Psi 及 Delta 值。为了确定膜厚,光学常数 等你所关注的材料特性,一般地,基于模型的椭偏数据分析是必要的。也有一个例外, 那就是块材的光学常数,这个将在下面介绍。基于模型的数据分析的步骤可以用图 3-1 的流程图来表示。其基本步骤如下:

- 1. 测量样品获得 SE (光谱椭偏)数据。
- 2. 建立一个层状的光学模型用来表示样品的名义结构。这个模型用来"generate"(产生)SE(光谱椭偏)数据。
- 3. 定义模型中的拟合参数,然后由软件来自动调整这些拟合参数,使得测量数据与模型产生的 SE 数据达到最佳的匹配。这就为我们所熟悉的数据"fitting"(拟合)。
- 分析结果需要评估。如果结果不可接受,需要修改光学模型及(或)重新定义拟合参数,然后重新拟合数据。



图 3-1. SE 数据分析流程

以上的步骤将在以后的章节中详细描述。请注意 SE 数据分析的基本步骤看似简单,然而有很多实际样品的分析往往是比较难的。CompleteEASE 软件力求简化多类样品的通用 SE 数据分析过程,然而对于一些复杂的样品,通用的分析模型是没有的。如果你在分析中遇到困难,并需要帮助时,请联系你的 J.A. Woollam Co., Inc. 代表。

"Pseudo" Optical Constants "伪" 光学常数

如果 SE 数据是在一个块材上测得,并且这个样品没有任何氧化,没有表面粗糙,没有 其他膜层或覆盖层,那么这个样品的光学常数就可以从 SE 数据中直接导出。等式 2-1 可以用来转换 SE 数据的 Psi 和 Delta 成为光学常数的"n"和"k"(或者等价的,复介电常 数值"ɛ1"和 "ɛ2")

$$\left\langle \varepsilon \right\rangle = \left\langle \varepsilon_1 \right\rangle + i \left\langle \varepsilon_2 \right\rangle = \left\langle \widetilde{n} \right\rangle^2 = \left(\left\langle n \right\rangle + i \left\langle k \right\rangle \right)^2 = \sin(\phi)^2 \cdot \left| 1 + \tan(\phi)^2 \cdot \left(\frac{1 - \rho}{1 + \rho} \right)^2 \right|$$
(2-1)

φ是入射角, ρ由等式 1-1 定义。

然而只有多项理想假定(样品无氧化,表面粗糙及其他膜层)同时成立的样品,使用等式 2-1 直接转换 SE 数据为真正的材料光学常数的方法才成为可能。既然所有的假定同时成立的可能不大(或者至少很难验证以上假定同时成立),由此转换公式导出的光学常数被冠名为"pseudo"(伪)光学常数。"<>"括号用来指明"pseudo"(伪)光学常数。

在 CompleteEASE 中, 选择"Graph Type:"中的相应选项,可以显示当前 SE 数据的 pseudo optical constants (伪光学常数) <n> & <k> (或 pseudo dielectric function 伪介电常 数<e1> & <e2>)。对于块材,显示 pseudo optical constants 是有用的。

t ₁	n,k (film 2)
t_2	n,k (film 1)
·	n,k (substrate)

图 3-2. 两层薄膜的分层光学模型,参数为膜厚 t1、t2 和各层的光学常数 n 和 k

Layered Optical Model 分层光学模型

对于大多数的样品而言, SE 数据分析的第一步是建立一个分层的光学模型,这个模型 描述了样品的名义结构,如图 3-2 所示。每个层的参数是膜厚(t₁, t₂,等)及光学常数。 光学常数描述光束如何通过膜层及如何与膜层交互作用。使用光学模型及标准的薄膜方 程法则(Snell's law, Fresnel(菲涅耳)公式,等),通过软件计算可以"generated"(产 生)或"simulated"(模拟)SE 数据。如果模型能很好的描述样品,那么光学模型产生 的 SE 数据将与实际样品上测到的 SE 数据相吻合。如图 3-3.插图所示。



图 3-3. CompleteEASE 中的分层光学模型,使用模型产生数据 (a) 模型产生的数据 (黑 色虚线) 与测得的 SE 数据 (彩色曲线)吻合不好 (b) 适当的调整顶层的薄膜厚度,模型 产生的数据曲线重合到了测量曲线上。

有时,一个理想的分层模型并不能充分描述实际样品的光学特性。CompleteEASE软件可以模拟两个常见的"non-idealities"非理想状态,surface roughness(表面粗糙)和 index gradients(折射率梯度分布)。Surface roughness(表面粗糙)如图 3-4 所示,为 了模拟一个真实样品可能有的非突变的"rough"(粗糙)表面层,一个等效的粗糙层可 以加到模型中。这个等效的粗糙层的光学常数导出方法为:混合顶部膜层及"void"(空)(光学常数为 n=1, k=0)的光学常数,计算时使用 Bruggeman Effective Medium Approximation (EMA)(等效介质混合)理论,并假定 void content (占空)的比例为 50%。尽管等效粗糙层与实际样品近似度较高,这种方法能很好模拟 SE 数据的前提是表面粗糙层远小于测量光的波长。对于大多数 SE 系统,这意味着,表面粗糙度必须小于 40 纳米。



图 3-4. surface roughness (表面粗糙) 光学模型: (a) 实际样品的 non-abrupt (非突变) "rough" (粗糙) 表面, (b) 光学模型的 "effective" (等效) 粗糙层。

有时一个膜层的光学常数在层内是变化的。这可能是膜沉积过程中工艺变化导致的。图 3-5 描述了 CompleteEASE 可以模拟一个"graded"(梯度折射率)膜层: 膜层被分割层 厚度较小的几个子层的叠加,每个子层的光学性质略有差异。在 CompleteEASE 中,假 定梯度膜层的折射率"n"是线性变化的。这种简单的近似在 CompleteEASE 中可以自动 完成,并且可以很好的模拟多种样品。



图 3-5. (a) "graded" (梯度) 膜中光学特性是连续变化的, (b) CompleteEASE 中近似地 分割成不连续的梯度层。

"Goodness" of Fit: 拟合匹配度, MSE 定义

量化测量数据与光学模型生成的数据的"匹配"或者"吻合"程度,是 SE 数据分析过程中一个重要的部分。人们可以很容易地用"眼睛"看出 图 3-3 中模型(b)的吻合度要比模型(a)好得多。然而,对于一个自动的分析过程,数据匹配或吻合程度是由等式(2-2) 定义的"MSE"值来量化的。

$$MSE = \sqrt{\frac{1}{3n - m} \sum_{i=1}^{n} \left[\left(N_{E_i} - N_{G_i} \right)^2 + \left(C_{E_i} - C_{G_i} \right)^2 + \left(S_{E_i} - S_{G_i} \right)^2 \right] \times 1000}$$
(2-2)

其中 "n" 是测量 wavelengths (波长) 的数量, "m" 是拟合参数的数量, 另 N=Cos(2 Ψ), C=Sin(2 Ψ)Cos(Δ), S=Sin(2 Ψ)Sin(Δ)

"MSE"是 Mean Squared Error(均方差)的首字母缩写。实际上等式(2-2)给出的定义 应该称为"Root Mean Squared Error"(均方根误差)(误差求和后除以测量点数与拟合 参数数量的差值,并开根)。然而,由于历史的原因,我们仍然使用"MSE"来量化 "goodness of fit"(拟合匹配度)。

基本上, MSE 对所有测量点的数据(以"E"下标参数)与模型生成的数据(用"G"的下标参数)的差方求和。在 CompleteEASE 中,测量数据与模型生成数据的求差参数 项分别为"N", "C",和"S",这些参数是由椭偏参量 Psi和 Delta 导出的。以下特点使参数"N", "C",和"S"更适合用来定义 MSE(与使用参数Ψ和Δ比较):

- 1. N, C, & S 永远介于-1.0 到 1.0 之间。
- 2. 配置有旋转补偿器的椭偏仪测量任何样品时的数据,对于参数 N, C, & S 具有大致相同的重复性和准确性。

在 CompleteEASE 中打开的当前数据,可以显示 N, C, & S 参数曲线图,操作 方法是在"Graph Type:"下拉菜单中选择 N, C, & S 。

MSE 值越小,测量 SE 数据与模型数据就匹配(拟合)地更好。N, C, & S 项的 典型重复性和准确性是 0.001,在 MSE 定义式(4-2)中包含了"1000"的乘法因 子。这意味着一个理想模型的 MSE 值应该约为 1。然而,这仅适用于少数类 型的样品(例如 Si 基底上的单层薄膜),对于复杂样品(厚膜及多层膜等) 而言,最佳的模型拟合可能会有很大的 MSE 值(>10),但这仍然可以接受。 MSE 也有可能小于 1,这意味着拟合的匹配度好于测量的随机误差,换言之, 结果很有可能包含了从测量数据伴随而来的"noise"(噪声)。

"Fitting" the Data 拟合数据

为了获得测量数据与模型产生的数据的最佳匹配(换言之,获得最小的 MSE),光学模型中的参数必须经过调整。用户定义在拟合过程中模型里的哪 些参数可调,这些可以调整的参数也称为拟合参数,它们通常为各膜层的厚度 及定义光学特性的参数。CompleteEASE 软件使用标准的迭代,非线性回归算 法(采用 Levenberg- Marquardt 法)自动调整拟合参数以获得最小的 MSE。 在以下假定条件下,Levenberg- Marquardt 法可以快速收敛到一个最好(最低) 的 MSE 值。 1)光学模型准确地描述了实际样品结构, 2)拟合参数的初始值 与正确值(最佳拟合)相当接近。为了帮助证实最佳模型拟合获得与否, CompleteEASE 包含了几个有力的功能。在之后的章节中,这些功能将在实例 数据分析中使用到。

- "Try Alternate Models"(尝试不同模型)命令将自动执行理想模型拟合数据,进而使用带表面粗糙层、折射率梯度等非理想模型进行拟合。 使用不同模型的拟合结果将总结在表格及图表中,用户可以确定哪个模型更适合实际样品。
- "Thickness Pre-Fit"(膜厚预拟合)和"Global Fit"(全局拟合)选项 执行在设定的拟合参数范围内,以及给定步长下的大范围搜索拟合。 最佳的拟合模型最后被选用并输出报告。

Evaluating the Fit Results 评估拟合结果

评估结果,可以说是 SE 数据分析中最重要的(而且不幸的是,最容易被忽视) 方面。对于一个可以接受的模型拟合结果,下列条件必须同时满足:

1. 模型产生的数据必须与测量数据匹配上。

不幸的是,这实际上是难以量化的,可是作为一个粗略的准则,对于结构简单的薄膜样品,SE关于波长的数据曲线,均方误差值应在0.5-

2。对于厚一些的具有更多结构/振荡的薄膜样品,均方误差值高到10-20也是可以考虑接受的。另一种"可以接受"的定义是,模型产生的数据基本吻合测量数据曲线,再现了所有结构和特征(除了噪音)。 机合不总是能够达到完美匹配,然而以下#2和#3的条件还是要满足的。

2. 模型应该唯一

一般的经验法则是,在充分拟合数据集的前提下,选择最简单的模型。 总是可以通过添加更多的层和(或)模型中的拟合参数来减小 MSE 值。但除非 MSE 值显著(大幅)减小,额外的模型复杂性是不可取 的。无法保证给定的模型一定是唯一的(也就是说,它是唯一可以获 得相同 MSE 值的光学模型)。对于更复杂的样品,我们应尽量尝试 改变模型及使用拟合参数的不同初始值,来部分验证模型的唯一性。

3. 该模型和拟合参数必须是物理的

评价这一条件要求依赖于对材料的组份和样品结构的基本理解。例如, 假设对于某一材料, 拟合模型确定的光学常数超出了可接受的界限 (例如, k<0或 n>10),结果是非物理的,应视为无效。通常,与此 相类似样品的测量知识基础对于评价拟合结果的"可信度"是有帮助 的。例如,从经验,我们知道,当分析的数据是采集自氧化铟锡 (ITO)的样品上时,折射率梯度是可以接受的(甚至是预期的), 如果一个模型报告硅上的热氧化层有折射率梯度的话,这个分析模型 或许有问题。stylus profilometry, AFM(原子力显微镜),XTEM(透 射电镜),SIMS(二次离子质谱仪), Auger depth profiling 等补充技 术也可以用来证实模型的拟合结果。

如果拟合模型被认为是不可接受的,尝试修改光学模型和(或)定义的拟合参数,并重复拟合过程,直到拟合结果可接受。寻找一个可接受的并具有拟合质量和模型复杂度的平衡点,需要耐心和经验。

"Physical" Optical Constants "物理的"光学常数

对于任何模型,必须符合光学常数拟合结果不为"unphysical"(非物理)形状的重要准则。如果没有经验,评估这个会比较困难。为帮助理解光学常数,这 里将例举一些材料的光学常数并解释如何使它的形状变得"physical"(合理)。 同时我们也会列举相应"unphysical"(非物理)的结果。



A. 如果是透明材料(k=0),那么折射率(n)必随着波长的减小 而增大。

图 3-6. 如果 k=0, Index (折射率) 必随着波长的减小而增大。遵守这个规则 的光学常数是合理的。



图 3-7. 如果 k=0, Index (折射率) 必随着波长的减小而增大。这个光学常数 是不合理的,原因是在没有吸收(k=0)的情况下,低于 600nm 处曲线反转(随 波长减小而减小)。

B. 如果材料开始吸收(k 增加),折射率(n)将"turn-over"
 (反转),也就是随波长减小而减小。



图 3-8. 如果材料开始吸收(k随波长减小而增加),折射率(n)将反转,也就 是随波长减小而减小。符合这种规律的光学常数是合理的。





图 3-9. 图形中的光学常数是"physical"(物理的)。在高于400nm(k=0)的 波长上折射率是减小的, 折射率在吸收加大(350nm附近)时反转, 然后随着 吸收的减小(低于320nm), 折射率转为随波长减小而增大的正常色散。

D. 消光系数 (k) 不能为负值。



图 3-10. 图中的光学常数是"unphysical" (非物理的),因为 extinction coefficien (消光系数) k 出现负值。

3.2. 已知 N,K 的样品: SiO₂ on Si

例子中使用到的功能				
• 打开 model (模型) 和数据文件	• Fitting data (拟合数据)			
 参数 error bars (误差线) 	 Hiding(隐藏)或 renaming (重命名)fit(拟合)参数 			
• 报告 "derived" (派生)参数	• 膜厚 "Pre-Fitting" (预拟合)			
• 定义 fit 拟合参数 (也就是 on 打开	和 off 关闭)			
 观察 model(模型)变化 				

每一层材料的光学常数已知的样品,数据分析是最简单的。这种情况下光学模型中仅需要拟合膜厚。不幸的是,大多数的样品不隶属于此类简单样品,因为材料的"optical constants"(光学常数)很少是不变的常数。材料的光学常数经常与材料的沉积和处理条件相关。在后面的章节中,SE数据分析会示范同时拟合膜厚及不同波长上的光学常数。然而本章仅示范假定材料的光学常数已知的"classic"(经典)椭偏分析,这里的例子是硅晶圆基底上热生长的氧化层(SiO2 on Si)。

对于生长在半导体级硅片上的高品质热氧化膜,硅片衬底和 SiO2 薄膜的光学 常数都是已知的常数。对于分析此类样品分析,CompleteEASE 中有一个标准 模型。要打开这个模型:

- 1. 启动 CompleteEASE 软件 (假如软件尚未启动).
- 2. 选择 Analysis>Model > 'Open'.
- 3. 高亮显示(通过点击) Folder Links: 中屏幕左侧列表中的"Basic"目录。
- 4. 在"Files:"区域选择 "Si with Thermal Oxide.mod" 然后点击'Open'按钮 (或鼠标双击)。

然后,打开一个我们之前用椭偏仪采集到的数据文件实例:

- 1. 选择 Analysis>Data >'Open'。
- 2. Folder Links:列表中高亮显示"Examples" 目录。
- 3. 选择"25nm Oxide on Si.SE" 文件
- 4. 点击 'Open' 按钮打开选择的数据文件(或双击鼠标)。

打开指定的模型和数据文件后,CompleteEASE 屏幕将如图 3-11 所示。实验测得的 SE 数据(不同波长上 Psi 和 Delta 椭偏参数的值)的红色和绿色曲线出现在图形面板 中,光学模型包含一个基底(SI_JAW)和两个膜层(INTR_JAW 和 SIO2_JAW)。



图 3-11. 打开"Oxide on Si" model (模型)和"25nm Oxide on Si" 例子数据后 CompleteEASE 的屏幕。

Fit Results 拟合结果 和 Parameter Error Bars 参数误 差线

要分析数据,点击 Analysis>Fit >'Fit'。拟合很快执行完成,(在大多数计算机上小于1秒)拟合结果将显示在 Fit 区域(图 3-12).当然,我们最关注的主要参数是 total film thickness(总膜厚)(27.42nm)。跟在"±"后面的值是评估每个参数的误差线。

由 CompleteEASE 报告的误差线值来自拟合算法计算的 90%置信区间。由于 置信区间的计算作了一些统计假设,因此无需一般意义上的严格满足, CompleteEASE 中报告的误差线值不应该从字面上解释。在实践中,误差线提 供一个测量重现性的评价。大误差线(相对于拟合参数的大小)揭示该模型对 于这个拟合参数不灵敏(该参数很可能可以从 fit 参数中删除)。"Total Thickness"(总厚度)参数是一个派生参数(后面有更多叙述)。它的误差线 总和了模型中各个可变(拟合)膜厚的误差线。还要注意的是拟合结束后, "Model"(模型)生成的黑色虚线基本上重叠在彩色实测数据曲线的上方。



图 3-12. Si 上氧化硅样品的 SE 数据 fit (拟合)和结果。

作为一个练习,使用"Si with Thermal Oxide"模型确定下列硅上氧化层的 total film thickness(总膜厚): "60nm Oxide on Si", "120nm Oxide on Si", "300nm Oxide on Si"和 "1600nm Oxide on Si"。打开每个数据文件 (Analysis>Data > 'Open'),然后点击'fit',结果应该吻合表 3-1 所示的值。在此 表中,有几个重要趋势值得注意:

- 1. 虽然所有的拟合曲线看上去都很好(即黑色模型虚线曲线依附在实测彩色曲线 之上),然而随着膜厚的增加 SME 值也是增加的(从约13>10)。
- 2. 报告的"Total Thickness"(总厚度)值与文件名中给出的值并不是完全相同 (这是可以接受的,因为文件名只是一个薄膜厚度估计值)。

Example File	MSE	Angle Offset	Total Thickness (nm)
25nm Oxide on Si	0.943	0.001 ±0.0023	27.42 ±0.007 nm
60nm Oxide on Si	0.687	0.037 ± 0.0014	58.54 ±0.006 nm
120nm Oxide on Si	2.510	0.071 ± 0.0044	124.61 ±0.007 nm
300nm Oxide on Si	3.673	-0.051 ± 0.0070	273.02 ±0.014 nm
1600nm Oxide on Si	13.885	-0.094 ± 0.0261	1640.58 ±0.195 nm

表 3-1. 硅上氧化层的各样品的拟合结果.

带有中间层的 JAW Oxide on Si Model, JAW 硅上的 氧化层模型

由 J.A. Woollam 公司提供的,在 CompleteEASE 软件中的"Si with Thermal Oxide" (硅片上的热氧化硅)光学模型有几个独特的功能。首先,氧化膜被建模为 2 层: INTR_JAW 是一个有较高折射率的中间层,SIO2_JAW,其中包含了 SiO2 薄膜的光学 常数(这个光学常数是与块材 SiO2"fused silica"(石英)的光学常数不同的)。这些层 及 SI_JAW 基底的光学常数出版在 Herzinger et al.¹上。中间层增加模型的复杂性,但 模型被应用在很宽的氧化层厚度范围时,它大大提高了数据拟合的匹配度。

为了简化模型,并提供更唯一的拟合结果,中间层("Thickness #1")固定为 1nm。 此值适合于薄的氧化膜(厚度<100nm),而对于较厚的氧化物,同时拟合中间层厚 度可以略微改善拟合匹配度。例如,打开"1600nm Oxide on Si"数据文件,并用 "Si with Thermal Oxide"模型拟合数据。现在在"Thickness #1"的值上右击鼠标 右键(也就是,在"1 nm"上(哈R)),以此将中间层的膜层厚度添加为拟合参数。现 在厚度值显示为粗体,并且有"(fit)"字样紧随其后,表明现在这个值已被定义为拟 合参数。(要"off"关闭一个拟合参数,只需简单地在拟合参数值上鼠标右击 (哈R))。点击'Fit'按钮,如图 3-13. 增加中间层("Thickness #1")为拟合参数, 使用"Si with Thermal Oxide"模型拟合数据"1600nm Oxide on Si"的结果。的 结果框将出现。注意,Thickness #1 的拟合结果为 3.48(比名义 1nm 有增加), 另 MSE 的值从 13.885 略减小到 10.316。除非界面厚度是该样品的分析目的,否 者,固定 Thickness #1 在 1nm 是最好的。



图 3-13. 增加中间层("Thickness #1")为拟合参数,使用"Si with Thermal Oxide" 模型拟 合数据"1600nm Oxide on Si"的结果。

Derived Parameters 派生参数

尽管中间层的厚度在拟合过程中增加,两个拟合的总厚度结果基本上保持不变 (1640.58 与 1640.52nm)。"Total Thickness"(总厚度)不是一个实际拟合参数, 该值是模型中各拟合层的厚度总和,是"derived"(派生)出来的。将派生参数加到结 果的方法是,在 Model >+FIT Options (图 3-14)下,将"Include Derived Parameters"转变"ON。除了"Total Thickness",派生参数包括指定层序号及指定波长 上的"n"和"k", optical thickness(光学厚度),total optical thickness(总光学厚度) 和许多其他可派生的参数。这些将在以后的例子中讲述。

Doc-To-Help Standard Template

Introduction 简介 • liv

通过在参数值上右击鼠 标来转换拟合参数的拟 合与否。

¹ C.M. Herzinger, B. Johs, W.A. McGahan, J.A. Woollam, and W. Paulson, "Ellipsometric determination of optical constants for silicon and thermally grown silicon dioxide via a multi-sample, multi-wavelength, multi-angle investigation", *J. Appl. Phys.* **83** (1998) 3323.



图 3-14. 模型中的"Include Derived Parameter"

如果你想删除一个派生参数,在你想要删除参数的右边数字(显示为蓝色)上简单右击鼠标即可。

Hiding 隐藏, Renaming 重命名, 和 Bounding Fit Parameters 限制拟合参数

在"Si with Thermal Oxide"模型中,"Angle Offset"(角度偏差)也被定义为一个拟合的参数。在光学模型计算时,把"Angle Offset"(角度偏差)加到名义入射角之上。对于大多数分析(尤其是拟合光学常数时)最好固定"Angle Offset"(角度偏差)为0。然而,由于硅和氧化物的光学常数是稳定不变的,在模型只有一个(Thickness #2)拟合参数,拟合 Angle Offset"可以通过补偿微小的样品对准误差,来达到略微改善SiO2厚度的分析结果的目的。薄膜(<100nm)对入射角度偏差灵敏。

在分析中"Thickness #2"为拟合参数,但此参数并没有显示在拟合结果中。在报告中为了防止与"Total Thickness" 混淆,"Thickness #2"被隐藏了。为了使拟合参数在报告中隐藏不显示,鼠标左击(仓L)拟合参数。例如,如果您在"1637.05 nm"上(仓L),如图 3-15(a)所示对话框将出现。"Minimum"(最小)和"Maximum"(最大)值的设置可以限定拟合参数范围。如果"Show Adv. Parameters"(显示高级选项)框被选中,Parameter Name(参数名称),ErrorBars(误差线)及Specification区域变成可设置。如果"Hide"(隐藏)复选框被选中,拟合结果将不显示这个拟合参数值。

CompleteEASE Input	CompleteEASE Input
Edit the value for Thickness # 2 in nm	Edit the value for Top SiO2 in nm
1639.58 🖌 Fit	1639.58
Minimum: -1.00 Maximum: 10000.00	Minimum: -1.00 Maximum: 10000.00
Show Adv. Parameters	Show Adv. Parameters
Parameter Name	Parameter Name
□ <u>R</u> ename <u>N</u> ame: Thickness # 2	<u> <u> R</u>ename <u> Name:</u> <u> Top SiO2 </u> <u> Hide </u> <u> </u> <u> </u></u>
Parameter Error Bars	Parameter Error Bars
Maximum Error 10000.00	Maximum Error 10000.00
Parameter Specification	Parameter Specification
Low Spec. 0.00 High Spec. 0.00	Low Spec. 0.00 High Spec. 0.00
Derivative Increment	Derivative Increment
% of Nominal Derivative Increment: 100.000	% of Nominal Derivative Increment: 100.000
Qk <u>C</u> ancel	Qk <u>C</u> ancel

图 3-15. 拟合参数对话框,显示如何 (a) "Hide" 或(b) "Rename" 拟合参数, 拟合参数的 高低 预期值也可以在(b)中设置。

在图 3-15(b) 对话框中修改"Thickness #2":

- 选择"Rename"(重命名)框,为参数键入一个不同的"Name:"(名字) (例如"Top SiO2")
- 取消"Hide"(隐藏)框的选择
- 键入"Low Spec." (1200) 和 "High Spec." (1400) 的值.

点击"Ok"关闭对话框,并重新 Fit(拟合)数据(确认"1600nm Oxide on Si"数据文件已被打开)。拟合结果将如图 3-16 所示,由于"Top SiO2"值(1639.58)超出了高低预期值(1200-1400),拟合结果的后面将出现(Out Of Spec.)的信息。



图 3-16. 拟合结果中拟合参数被重命名为"Top SiO2"并且出现"Out-of-Spec"

Thickness Pre-fitting 厚度预拟合

在这里,使用"Si with Thermal Oxide" model (模型)来做一个进一步的演示。 在这个例子中重新打开"Si with Thermal Oxide" model (模型)及"1600nm Oxide on Si" data (数据)。在 Model>+FIT Options 下,鼠标左击蓝色下划线 处,转变"Perform Thickness Pre-Fit"(膜厚预拟合)选项为"OFF"。然后点击 Fit>'Generate',屏幕显示将如图 3-17。注意,使用初始膜厚(100nm)的模型产 生的数据(黑色虚线)与测得的实际数据曲线不吻合。现在点击'Fit'(拟合) 按钮,数据拟合结果很差,报告的 MSE 值很高(677)。如果拟合参数的初始 值远离最佳拟合值附近的合理区间,这种情况就会发生。



图 3-17. 使用"Si with Thermal Oxide"模型缺省值产生数据。"Perform Thickness Pre-Fit" 选项被置为"OFF"。

现在设置"Thickness #2"为"1650"及"Angle Offset"为"0"(通过点击各自的参数值),然后点击"Generate"。屏幕将如图 3-18 所示。 尽管模型产生数据的曲线与实验数据的曲线没有完全吻合(略偏移),至少数据的基本特征及结构是相似的。Click the 点击'Fit'按钮,可以明显看出,高质量的拟合结果获得了。



图 3-18. 使用接近的膜厚初始值(1600nm)产生的数据与"1600nm Oxide on Si" 实际数据。

好的"Thickness #2"厚度初始值是达到最佳拟合的的关键。没有厚度 PreFit (预拟合),软件尝试调整拟合参数(厚度),以降低 MSE 值。然而,MSE 剖面并不是只在正确厚度处有唯一的极小值。它还包含许多其他极小值,这是所谓的局部极小值。这些局部极小值会终止(诱骗) normal fit (标准拟合)过程。这些局部极小 MSE 值都 很大,如图 3-19 所示,所以很容易辨别出这些拟合来的"正确"膜厚产生的数据并不匹配测量数据。但是,猜测每个样品的薄膜厚度初始值是一件很乏味的事。



图 3-19. 使用 Thermal Oxide on Silicon model (模型) 拟合 1600nm SiO2 on Silicon 数据 时的 MSE 剖面图。SiO2 膜厚的唯一准确值在 1640nm 附近。然而一个 normal ftt 找到这 个准确值的前提是初始值在此值附近。为了解决这一问题,我们的专利"Thickness PreFit"(厚度预拟合)会自动搜索一个在最佳拟合附近的理想初始值。

CompleteEASE 中"Thickness PreFit"(厚度预拟合)会自动提供一个理想初始 值给 model(模型)中的最厚膜层,该拟合采用特殊的专利申请中的算法。为了演 示此功能,把"Perform Thickness Pre-Fit"选项转变为"ON",输入一个"Thickness #2" 参数的"bad"(不好的)初始值,例如"50"。点击'Generate'来验证初始参数并不 接近最佳拟合。现在,当你点击'Fit'按钮,一个好的数据拟合出现在屏幕上,尽管初始 厚度值(50nm)不接近最终最佳拟合值(1639.58nm)。对于大多数的分析,将 "Perform Thickness Pre-Fit"选项置为"ON"是非常有用的,尤其是没有准确的厚度 初始值时。

为了更好地理解 Thickness Prefit,可以这样考虑,随着薄膜厚度的增加,数据将会在 不同波长上产生振荡,这些振荡来自于薄膜表面反射光与膜底面反射光的干涉。随着厚 度的增加,相对波长上将会出现更多的振荡。当然这跟折射率也是相关的,但基本原则 是,一个更大的"optical thickness"(光学厚度)将有更多的振荡。Thickness Prefit 通过快速解析数据中的振荡来"估算"实际厚度,如图 3-20 所示。通常,这个快 速运算足以为 normal fit 提供一个好的初始值。



图 3-20. 基于数据中的振荡, Thickness Prefit 使用独特的算法非常快速地估计了薄膜厚度。

Visualizing Model Changes 可视的模型改变

模型改变时是如何影响模型理论数据的呢?理解这个是有用的。例如,当膜厚增加时干涉振荡峰会向长波长方向移动。当 model(模型)中的参数改变时, CompleteEASE 可以方便的即时产生模型数据。

- 将鼠标放置到 model (模型)中你想要调整的参数上。
- 按住 "Shift" 键, 然后向上或向下滚动鼠标滚轮。model (模型)中的 参数会按照一定的量增加或减小, 随着参数的改变, 当前参数的模型 数据会即时产生。
- 如果想使参数增量(减小量)变小,在滚动鼠标滚轮同时按下"Ctrl-Shift"键。

3.3. Transparent Thin Films 透明薄膜 - 1

例子中使用到的功能	
• Cauchy (柯西) 色散关系式	• 显示 optical constants (光学常数)
• Global Fits (全局拟合)	• Expanding Layers (扩展层)
• Renaming Layers (重命名层)	

下一组的例子将演示如何确定透明薄膜厚度和折射率"n",这些样品是沉积在已知光学常数基底上的透明膜。有些情况下我们并不事先知道薄膜是否透明(吸收薄膜将在后面的章节中介绍),有不少应用可以假定薄膜是透明的,例如,至少在可见光谱范围:光学镀膜材料(SiO₂,TiO₂,Ta₂O₅,MgF₂等),一些氮化物(Si₃N₄,AlN),许多有机薄膜(photoresists,PMMA,spin-on(旋涂)polymers),等等。此外,数据的周期振荡揭示了半透明膜顶部和底部反射光的干涉(如图 3-21)所示。



图 3-21. 透明薄膜中的干涉

透明薄膜在可见光谱范围上的折射率常常使用等式 4-3 的 Cauchy(柯西)色散 关系来描述。参数"An"与相关材料折射率幅度近似,而参数"Bn"和""Cn"给 出折射率曲线随波长变化的形状或曲率。图 3-22 显示了三种常见透明材料的 折射率色散曲线。对于在可见光谱范围透明的大部分材料,折射率曲线随波长 减小而略有上升, Cauchy(柯西)色散方程可以很好的描述这一特征。

$$n(\lambda) = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4}$$
(4-3)


图 3-22. 使用 Cauchy 色散等式描述的常见透明材料的折射率 "n"。

Si with Transparent Film Si 上的透明薄膜

这个例子中使用"Flow-on Glass on Si"示例数据文件。首先,使用在上一节讲述 过的"Si with Thermal Oxide" model(模型)来拟合数据。结果应该类似于图 3-23,数据拟合是合理的,但是,在某些光谱区实验数据曲线与模型数据曲线 之间的差异可以观察得到,而且 MSE 是也相当高(~28)此外,有一个相当 大的 Angle Offset(角度偏移)(-0.698)。这对于有 0.01 °角度准确性的测量硬 件来说显然是不合理的。这也证实了对于这个数据,当前模型是不可接受的。 镀在这个样品上的 "Flow-on Glass"材料涂与 SiO2 相似,但折射率略有不同。 因此,这里需要一个可以量化折射率不同的其他模型。



图 3-23. 使用 "Si with Thermal Oxide" mode (模型) 拟合

为了确定该 Flow-on Glass film 膜的折射率和厚度,打开"Si with Transparent Film"模型(在 Open Model 对话框中,可以在"Basic"文件夹下找到),然后点击'Fit'按钮。得到一个很好的数据拟合结果(虽然拟合时间超过使用"Si with Thermal Oxide"模型的数据拟合),图 3-24 显示了拟合结果。报告的拟合参数 是 Thickness #1(这是薄膜厚度)和薄膜的 Cauchy 参数: A, B和C。在指定 波长(632.8nm)上的折射率作为派生参数也在报告中列出。



图 3-24. 使用"Si with Transparent Film"模型拟合"Flow-on Glass on Si"数据的结果。

在膜层的名字上鼠标右击 (**℃**R) 来显示它的光学常 数(n,k) 要显示薄膜对应各波长的折射率,在材料的名字"Cauchy Film"上右击(⁻R)并选择"Graph Layer Optical Constants" (图 3-25)。光学常数将显示在图形窗口,如图 3-26 所示。

要显示和编辑膜层的 Cauchy (柯西)参数,左击(仓L)"Layer #1"左边的红色符号"+",该层展开(同时"+"变成"-",再点击可折叠层),拟合参数现在可以看到并编辑,如图 3-26 所示。"k Amplitude"(k 振幅), "Exponent"(指数),和"Band Edge"(带边界)参数可以描述一个指数的"Urbach" 尾部吸收--这个例子中不需要用到。

注意: Cauchy 层将在后面的章节 9.6 中详细描述



*图 3-25. 为了显示某一膜层的光学常数,在膜层的名字上(①*R)并选择"Graph Layer Optical Constants"。



图 3-26. 显示的各波长上光学常数曲线,另外 Cauchy 层已被展开,显示了可编辑的各参数。

Global Fits 全局拟合

跟"Si with Thermal Oxide"模型一样,"Si with Transparent Film"模型中也使用 了"Thickness Pre-Fit"(厚度预拟合)选项,用以得到好的膜厚初始值。为了 提供合适的折射率初始值,"Global"fit(全局拟合)被执行。在全局拟合中, 用宽范围的参数初始值尝试拟合,最低 MSE 值的参数将作为"final"(最终) 拟合的初始值。在 Model>+FIT Options 下可以找到"Use Global Fit"选项。将 此选项设置为"ON",鼠标点击+将其展开,可以显示用来定制全局拟合过程 (图 3-27)的额外设置。 在"Si with Transparent Film"模型中, Cauchy 的参数"A"(膜层折射率的基本 近似值) 被定义为一个全局拟合的参数。最多 3 个全局拟合参数可以被定义。 参数"A"的"Min."(最小)和"Max."(最大)值分别为 1.3 和 3.0,另外"# of Guesses"(猜测数量)是 30。点击'Fit'按钮后,使用参数"A"在 1.3 到 3.0 之间 的等额(30 等分)递增的值作为不同的初始值进行 30 次"trial fits"(尝试拟合) 的全局拟合。对于每一尝试拟合(即对于每一"A"值-相当于膜的折射率), thickness pre-fit(厚度预拟合)会被执行,这样完整的薄膜厚度和折射率的数 列被尝试。最后,将尝试拟合中具有最小 MSE 的那组参数作为初始值,并进 行 final fit(最终拟合)。



图 3-27. "Si with Transparent Film" model (模型) 的设置; 注意"Use Global Fit" 和 "Include Derived Parameters"部分。

由于 Global fit 过程中有大量计算,在 Global fit (全局拟合)过程中,一个有 'Stop'(停止)按钮的状态栏将显示在屏幕上(图 3-28)。为了加快 Global fit, 在进行尝试拟合时,仅在"# of Data Points to Use"选项中定义的实验数据点子集 参与拟合。在尝试拟合时的迭代次数可以通过#of iterations 限制。这些选项的 默认值(20和5)足以满足大多数样品,但是,如果有必要,那么可以增加: 较大的值可能提高 global fit 的能力,但缺点是分析时间会增加。同样,为了处 理特定类型的样品,参数 Min., Max., 和# Guesses 可能需要调整。



图 3-28. 在执行 Global Fit 时状态框及 'Stop' 按钮将显示。

Rename Layer & Fit Parameters 重命名层和拟合参数

请注意这个例子,在Fit:面板中列出了Cauchy的拟合结果,如图 3-29 所示。



图 3-29.Flow-on Glass 的拟合结果

要将这个模型保存,以后应用于这个新材料,重命名拟合参数来描述被测薄膜的类型是有帮助的。在 Cauchy 层名字上鼠标右击并选择"Rename Layer & Fit Parameters"(重命名层和拟合参数),如图 3-30 所示。



图 3-30. 在一个层的名字上鼠标右击访问 "Rename Layer and Fit Parameters" (重命名层 和拟合参数)

这将弹出如下对话框,如图 3-31 所示。可以修改层名字及层参数名(对于 Cauchy,它们是 A, B 和 C),在报告中显示的厚度参数也可以修改。这里选 择了第一和第三项,最后的拟合(再次点击 Fit)结果如图 3-32 所示。

Rename Layer Options				
Name: Flow-on Glass				
Rename Layer				
Rename Layer Parameters				
Rename Thickness				
<u>Ok</u> <u>C</u> ancel				

图 3-31. "Rename Layer Options" (重命名层选项) 对话框.



图 3-32. 层名(模型中)和厚度名(显示在 Fit: 结果面板中)已被修改后的最后拟合结果。

3.4. Transparent Substrates 透明基底

这个例子中的新特性				
• 多数据作图	• 多数据作图			
• 包含背反射	• 包含背反射			

在前面的例子中,我们介绍了用 Cauchy(柯西)色散关系式对透明薄膜折射 率建模。此外,Cauchy(柯西)也可应用于透明基底。这对于玻璃或塑料是常 用的方法,模型"Glass Substrate"就是使用 Cauchy(柯西)来确定玻璃基底折 射率的。这个例子将演示透明基底建模。

对于透明基底,我们必须考虑可能的复杂因素-光有可能从基底的背面反射回 来并达到探测器。背面反射将混入表面反射中,但是收集到的这两个光束是 incoherent (不相干)的。也就是在光束的光学描述中,彼此关联的"相位" 信息已丢失,在这种情况下,背面反射将只调整信号的总幅度,而不会产生类 似于我们在薄膜中看到的"oscillations"(振荡)。如果不正确处理,此由背面 反射引入的振幅"offset"(偏移)将导致基底折射率拟合结果的错误。幸运的是, 背面反射可以用软件修正(如下所述)。

Backside Substrate Reflections 基底的背面反射

对于透明基底,背面反射是我们不想要的。它们会影响测量,并且导致错误的 折射率报告,包括基底或样品上表面的薄膜。有多种方法来处理透明基底, Synowicki².对这个话题有罗列。一般有两种方法来处理透明的基底。首先是避 免探测到背面反射。避免探测到背面反射的方法包括:

- 空间分离背反射光束 1)厚基底, 2)小的测量光斑尺寸,或 3)楔形基底。
- 散射和/或吸收背面的反射通过 1) 打毛背面以散射光线或 2)在背面使 用折射率匹配材料 (磨砂胶带已被证明是可以使用的)。

如果背面反射可能无法避免的,那么在软件计算中就需要包含背反。这将在例 子中演示。幸运的是,大多数 Woollam 的 SE 系统可以采集 depolarization 退 偏振数据,它为数据中背面反射是否被采集到提供证据。如果 depolarization 退 偏振基本上是零,那么没有背反射到达探测器。这是情况是我们想要的。如果 背面反射到达探测器,可以在 Complete EASE 软件建模时合并不相干数据来 修正这种状态。让我们考虑一个从玻璃基底测量得来的数据,以更好地理解这 种情形。

Graphing Multiple Data Sets 多数据作图

从 Examples 目录打开"glass substrate_rough"数据例子。这个样品测量前已用机 械方法将载玻片背面打毛,以消除所有从背面来的反射光。接下来,右击

Doc-To-Help Standard Template

Introduction 简介 • Ixviii

² R.A. Synowicki, "Suppression of Backside Reflections from Transparent Substrates", Phys. Stat. Sol. (c) 5, No. 5 (2008) 1085-1088.

Data > 'Open'访问"Append Data"(合并数据)命令。如图 3-33 按钮。从 Examples 目录选择"glass substrate_taped"数据例子。重复以上步骤,追加"glass substrate_smooth"数据文件。

注意: 使用 Open 仅能打开单个文件, Append (合并)命令可以同时选择多个 文件。

CompleteEASE				
Measurement Ar	ialysis 🕞			
Data: glass substrate_rough				
Append Data				
Fit:				

图 3-33. 'Open'上 (**⑦**R) 来访问 "Append Data" (合并数据) 命令。

当多个数据集被追加(合并), CompleteEASE 允许在 Graph 窗口中访问所有 三个数据(单独或所有数据同时)。在 graph 面板左上方 "Graph Type"中选择 Psi。在这个相同的位置,关闭 Double Y Axis(双Y轴)。最后,选择 graph 面板右上方的"Graph All Data Sets"。从不同样品上测量到的所有三个样品的 Psi 数据曲线可以在这里进行比较,如图 3-34 所示。



图 3-34. 当多个数据集被追加,新的选择项将出现在 Graph 面板的上方,允许访问各数据。选择"Graph All Data Sets"复选框,允许所有的数据进行对比绘图。

Using the Graph ScratchPad 使用图形暂存器

虽然"Graph All Data Sets"可以提供三个数据的快速比较,但它是不可定制的。 例如,我们不能改变颜色,或者在所有曲线中选择一个子集。为此,我们引入 Graph Scratch Pad(图形暂存器)。在 graph 区域鼠标右击(***CR**)来选择"Copy Data to Graph ScratchPad"(复制数据到图形便条)如图 3-35 所示。这将复制当前 graph 中显示的所有数据曲线到一个内部的 "pad"(暂存器)中提供后续操作。然后,同样使用鼠标右击(***CR**)菜单来选择 "View Graph ScratchPad"(显示图形暂存器)。这将打开 CompleteEASE 软件中的 Graph ScratchPad,如图 3-36 所示。在 ScratchPad 中进行操作来选择想要比较的曲线,改变它们的颜色及风格。最后,修改它们的名字以对应各自的数据来源。图 3-37 比较了背面贴半透明胶带及粗糙玻璃样品的数据,两者几乎是一样的。这表明,背面贴半透明胶带可有效去除透明基底的背面反射,其效果与打毛背面相当。数据对比也显示了粗糙背面或贴胶带样品数据与光滑背面样品数据的较大差异。这个大的偏移是由基底的背面反射光导致的。下一步,我们将对各数据建模分析,展示背面反射如何导致折射率误差的产生,最后,介绍如何修正背面反射。





图 3-35. graph 区域右击(仓R) 来访问 "Copy Data to Graph Scratchpad".

图 3-36. CompleteEASE 中图形暂存器允许进一步定制绘图



图 3-37. 用图形暂存器来比较粗糙背面玻璃基板数据及背面贴磨砂胶带抑制背面反射的 数据。



图 3-38. 拟合"Glass Substrate" 数据

在后面的例子中,我们将学习如何同时拟合多个数据。然而,在这个例子中,我们将分别拟合每个数据。首先,打开"glass substrate_rough"数据文件。接下来,打开"Glass Substrate"model(模型)。点击'Fit'你应该得到如图 3-38 的结果。数据看上去噪声较大,但这主要是由小的图形标尺导致的。



图 3-39. Cauchy model (柯西模型) 拟合得到的空白玻璃基底折射率

最终的折射率结果可以通过在 Cauchy Substrate (柯西基底)上右击,并选择 "Graph Layer Optical Constants"来显示。在 Graph 窗口内右键点击(**仓** R),并选 择 "Copy Graph to Clipboard" (复制图形到剪贴板)将如图 3-39 所示的图形转 移到 Word 中。

注意:在继续之前,请将 optical constants (光学常数)图形复制到"Graph ScratchPad"中,在这个例子的后续操作中我们要比较拟合结果。

Graphing Depolarization 退偏振绘图

椭偏术测量使用偏振光。如果被测样品各向同性并且是理想的,这种测量可以 获取两个参量值: Ψ和Δ。但是,如果样品有部分退偏振,用两个参数来描述 偏振态变化是不充分的。使用旋转补偿器专利技术的 alpha-SE、M-2000 和 RC2系统允许对以下三个参量进行测量: Ψ,Δ,和%depolarization(退偏百分 比)。对于理想状态下的样品%depolarization(退偏百分比)应该为零。

提示:为取获准确的退偏数据,有些椭偏仪需要测量 DC(直流)量。为更好的测量 depolarization,请参考您的硬件手册(或联系 JAWCo)。

快捷键:

用 CTRL-Z 对 Depolarization 绘图 在继续之前,在 Graph 窗口的左上角点击"Graph Type"。由显示 "Psi & Delta" 改变到 "Depolarization"。请注意,如图 3-40 所示的 Depolarization 百 分比接近零。这表明,几乎没有光从背面反射到探测器中。



图 3-40. 无镀膜的载玻片上的 Depolarization (无背面反射)。

接下来,打开"glass substrate_smooth"数据文件。现在 Depolarization(退偏振)的中心位置至少有2%。这表明,背面是光滑的,从背面来的不相干光反射到达了探测器。改变数据图为"Psi"。点击 Fit:>'Generate'。尽管数据测自同类玻璃基底(仅仅有背面反射的不同),当前模型产生的数据与实验测量数据并不匹配。背面反射不仅仅引入 depolarization(退偏振),背反同时导致了椭偏参量的偏移。使用同一 model(模型拟合),你应该得到如图 3-41 所示的结果。



图 3-41. 不使用背反射修正,数据 glass substrate_smooth 的拟合结果及光学常数。

在继续之前,查看 optical constants(光学常数),并添加这些新结果到 Graph ScratchPad 中,-以便在 Graph ScratchPad 中比较两个结果,如图 3-42 所示。第一个拟合的结果应该是正确的,因为数据中不包括玻璃背面的反射。第二个拟

快捷键:

用CTRL-P 绘图 Psi 合得到低得多的折射率,显然是不正确的,因为数据中包含了背反,但并没有 在 model(模型)中考虑进去。两个拟合都有理想的 MSE 值,这常常会导致 错误的信息。在这种情况下,有几种方法来保证模型的正确性。对于透明基底, 最好测量多个入射角的数据,这种数据会揭示光滑背面的数据是不正确地,因 为当背反存在时,多于 1 个角度的数据不会同时拟合上。不幸的是,这个数据 是用 alpha-SE 测量的单一角度数据。幸运的是,还有一种方法,可以计算测量 数据中背反的量从而帮助得到正确的结果。下面的章节中将考虑背反因素,因 为在透明基底中背面反射是常常会出现的。



图 3-42. 在 Complete EASE 的 Graph ScratchPad 中比较折射率的拟合结果。

Including Backside reflections 包含背反射

背面反射的出现通常为透明基底。基底一般比相干椭偏仪白光波长要长(厚) 得多。因此,背反的光没有相干性,与表面镀膜反射的光束相比,背反射的相 位信息已丢失。

当表征表面薄膜时背面反射是我们不想要的。对于各项异性的基底,这一点更 突出。为了防止背反射,可以打毛背面以使光速散射,如图图 3-43。对于较厚 的基底,背面反射光斑可从空间上被探测器分离,因而不是一个问题。



图 3-43. 从透明基底背面反射来的光是不相干的。可以通过打毛基底来散射光束,达到 避免背反的效果。

如果背反射无法避免,"incoherent"(不相干)光的总量可以用数学方法来处理。 要在模型中包含背反射影响,展开 Model 窗口中的+MODEL Options。将 "Include Substrate Backside Corrections"转为 ON,如图 3-44 所示。修正依赖与 采集到的背反射光的量,对于不同的基底是不同的。在 Model Options(模型 选项)部分,选择"# Back Reflections"作为一个拟合参量。



图 3-44. 展开 Model Options 来设置包含背反射。背反射的数量可以"fit"(拟合),从 而更好的匹配试验数据。

Fitting Depolarization 拟合退/消偏振

在拟合椭偏数据时,如果只有一个入射角数据,那么基底的光学常数与背反射的量存在相关。然而,depolarization 数据仅受背反量(探测器收集到的)影响。 默认设置是忽略 depolarization(退偏振)数据而只拟合 Psi 和 Delta。其实,在 模型中选择是否拟合 depolarization 是一个隐藏功能。为了显示这个功能,在 Model:面板的底部,点击 <u>Configure Options</u>。这将弹出如图 3-45 所示对话框。 将 Fit Options 段的"Include Depolarization Data"旁的复选框选中,并点击'Ok'。 添加了这个选项后,在 Model:>+Fit Options 中将"Include Depolarization Data" 转为 ON,如图 3-46 所示。



图 3-45. 点击 <u>Configure Options</u> 显示额外的 Model (模型)选项。在本例中,如图示, 我们添加"Include Depolarization Data"。

+ MODEL Options

- FIT Options

Perform Thickness Pre-Fit = OFF Use Global Fit = OFF Fit Weight = N.C.S Include Depolarization Data = N % Weight = 100.00 Limit Wvl. for Fit = OFF Limit Angles for Fit = OFF Max. Acceptable MSE = 100.000 + Include Derived Parameters = ON + OTHER Options

Configure Options Turn Off All Fit Parameters

图 3-46. 在 model 的 Fit Options 部分的"Include Depolariztion Data"选项。

包含背面反射(拟合# Back Reflections 参数)并且 Depolarization 参与拟合选定后, 再次点击' 'Fit'对"Glass Substrate_smooth"数据拟合。

注意:为获得退偏振数据的拟合,你可能需要将# of Backside Reflections 的值 降到1(从默认的5)。

正确操作后,结果应该如图 3-47 所示。对于背面反射光到达探测器的量, depolarization 的测量可以提供灵敏度。在这个例子中,最佳的背反拟合量是 1.5,如图 3-48 所示(其中背面反射量是变化的,可以看出背面反射量是否为 唯一的结果)。这意味着基板很薄,从背面来的一次反射全部到达探测器收, 而第二次的背反由于空间的偏移而仅有约一半到达探测器。当然,随着反射数 量的增加,到达探测器的额外光是比较微弱的,因此,灵敏度下降。所以,对 于背反总量为 3,4 或 5 时,计入量几乎没有差异。

在继续之前,让我们查看这次拟合的 optical constants(光学常数),并且将它 复制到 Graph ScratchPad 中,以便与之前的结果做进一步的比较。最后的 optical constants(光学常数)比较如图 3-49 所示。对光滑背面样品数据拟合时 使用 depolarization(退偏振)修正得到的折射率结果,与粗糙背面玻璃的结果 类似(但不完全相等)。如果不考虑背面影响,折射率拟合结果会受到显著影 响。修正的最终结果可能在两方面存在差异。

- Depolarization 数据不能准确表征。
- 背面打毛的玻璃仍然有背反射存在。



图 3-47. 包含背反射和 depolarization (退偏)数据时的拟合结果。



图 3-48. # of Backside Reflections 的唯一性测试,显示出 1.5 的背反具有最好的拟合。 depolarization 测量帮助量化这个结果。



图 3-49. 玻璃折射率结果的最终比较。背反修正改善了基底折射率结果(与粗糙/漫反射 背面的结果接近),但并不是完全吻合。有背反且不修正的数据,准确性很差。

3.5. Transparent Films 透明膜 - 2

例子中使用到的功能

- Surface Roughness (表面粗糙) Grade Layer (梯度层)
- Try Alternate Models
- (尝试不同模型)

Glass with Transparent Film 玻璃上的透明膜层

在这个例子中,加载"Glass with Transparent Film" model(模型)及"ZrO2 on Glass"数据文件。点击'Fit'按钮: Global(全局)拟合将执行,拟合结果显示在 图 3-50 中。ZrO₂的折射率可以在"Cauchy Film"上右击(℃**R**)并选择"Graph Layer Optical Constants"来显示。结果如图 3-51 所示。



图 3-50. 使用"Glass with Transparent Film" model (模型), 拟合"ZrO2 on Glass" 数据 的拟合结果。



图 3-51. 使用 Cauchy 色散层拟合得到的 ZrO2 optical constants (光学常数)。

"Glass with Transparent Film"模型与之前使用的模型"Si with Transparent Film" 相比,主要的的区别在于使用的基底材料不同,这里用"7059_Cauchy"替代原 来的"SI_JAW"。7059 玻璃的光学常数可以代表很多种玻璃基底,对于很多玻 璃上的透明薄膜,该模型可以作为初始拟合模型。要获得更准确的结果,可以 使用在你空白玻璃基底(见3.4节)上测得的光学常数来替代7059_Cauchy材 料层。此外,由于基底是透明的,背反可能存在。为了验证背反射是否出现在 当前数据中,使用 Ctrl-Z 快捷键显示如图 3-52 所示的 Depolarization 数据。 depolarization 基本在零附近,表明为避免背反射到达探测器,背面反射已被抑 制。这些问题的详细讨论见3.4节。



图 3-52. Depolarization 数据接近零,表明尽管基底是透明的,并没有背反射光到达探测器。

Surface Roughness 表面粗糙

在当前模型中,一个有趣的功能是包含 surface roughness(表面粗糙) ("Include Surface Roughness"选项设置为"ON")。事实上,对于这个样品, 最佳 surface roughness 拟合值相当大: 11.17 nm。为了检验这一模型中 roughness(粗糙)的重要性,尝试没有 surface roughness(表面粗糙)的拟合:右 击(**OL**)"Include Surface Roughness = "后面的蓝色下划线值,将其切换为"OFF"。 既然我们已经知道厚度和折射率的的名义值,将"Use Global Fit"及"Thickness Prefit"置为 OFF 是明智之举。接着,点击'Fit'按钮,拟合时将没有 roughness – 拟合的匹配度较差,同时 MSE 较高,如图 3-53 所示。

注意: Surface Roughness (表面粗糙)自动忽略 0 厚度的任何层。这对于多层 膜结构的多样品同时拟合有重要作用。



图 3-53. 将 surface roughness (表面粗糙) 置为 OFF 时拟合"ZrO2 on Glass" 数据的结果。

Graded Index 折射率梯度

Surface roughness(表面粗糙),是在之前 3.1 中节讨论过的"non-idealities"(非理想)模型之一,这对于获得好的拟合是非常重要。另一个在 3.1 节中描述的 "non-idealities"(非理想)状况是 index grading(折射率梯度分布)。将 Surface roughness(表面粗糙度)设置为 off,尝试如下梯度分布拟合:

- 将 "% Inhomogeneity" 和 Thickness 设置为 fit (拟合)参数。
- 点击'Fit'结果将如图 3-55 所示。

Aodel: Glass with Transparent Film Open Save Open Save Open Save						
Layer Commands: <u>Add</u> <u>Delete</u> <u>Save</u> Include Surface Roughness = <u>OFF</u>						
+ Layer # 1 =	Cauchy Film Thickness #	1 = <u>91.40 nm</u> (fit)				
+ Substrate =	Graph Layer Optical Constants					
Angle Offse	Rename Layer and Fit Parameters					
+ MODEL Op	Save Layer Optical Constants					
+ FIT Options	Parameterize Layer					
+ OTHER Opt	View Layer Comment					
Configure	Convert To EMA					
Turn Off Al	Convert To Anisotropic					
	Grade Layer					
	Start Superlattice					

图 3-54. 在 Cauchy Film 上右击来访问下拉菜单,然后选择 Grade Layer。

注意: Surface roughness(表面粗糙)和 index grading (折射率梯度)往往在模拟数 据时具有相同的效果,因为它们都可以朝着表面的方向上减少材料的光学密度。如果两 者得到类似的 MSE 值,那么需要用户来判断对于自己的样品哪个模型更恰当。

虽然用眼睛看拟合曲线结果相当不错,但是 MSE 值略高于使用 surface roughness(表面粗糙)的结果。(2.1 对比 1.175)。也可以在模型中同时拟合 surface roughness(表面粗糙)和 index Grading(折射率梯度):将 surface roughness设置回 "ON"并点击'Fit'(保留"% Inhomogeneity"为拟合参数)。结果具有最低的 MSE 值(0.78),如图 3-56 所示。



图 3-55. 开启 index Grading 拟合"ZrO2 on Glass"数据。



图 3-56. 在模型中同时拟合 surface roughness 和 index Grading 得到的"ZrO2 on Glass"数 据拟合结果。

Try Alternate Models 尝试不同模型

注意:如果模型中膜层已经是梯度分布的,此命令将不会工作。要从我们当前的模型中移除 grading,在梯度层上鼠标右击(℃**R**),并选择"Remove Grading",如图 3-57 所示。NOTE: This command will not work if the film is already graded.



图 3-57. 在 Graded layer 的名字上鼠标右击并选择 "Remove Grading" 来移除折射率梯度分布。

在 SE 数据分析中,经常会尝试有或无 surface roughness(表面粗糙度)及有 或无 index grading(折射率梯度分布)的 optical models(光学模型),为此 CompleteEASE 软件中设有一个命令来自动完成这些步骤。创建完合适的初始 模型后,点击 Model>+OTHER Options>Try Alternate Models,如图 3-58 所 示。将自动执行理想模型及带有 surface roughness、index grading、 roughness + grading 的各种模型拟合。拟合结果的总结将以图表及图形格式显示,如图 3-59。基于比其他拟合有 25%的 MSE 改善,突出显示的"绿色"列是建议选择的"最好"光学模型。



图 3-58. Model 面板中将+OTHER Options 展开来来显示 Try Alternate Models 选项



图 3-59. Try Alternate Models 命令的执行结果

3.6. Log and Report a Series of Films 日志和报告

例子中使用到的功能					
• 复制到剪贴板	• 日志中比较光学常数				
(Formatted or Table)	• 复制分析结果到剪贴板				
● 拟合日志	• 日志中重分析数据				
• Open/Save Snapshot(快照)					

使用椭偏仪来测量一系列的薄膜,然后进行比较和书写报告,这是椭偏仪的常见应用之一。CompleteEASE软件能够简化 logging(日志记录),comparing (比较),reporting of results(结果报告)。这个例子中将使用 3.3 节的分析 步骤,来分析 Si上的系列 SiNx 薄膜。不过,重点是使用 CompleteEASE 记录所有的拟合结果,比较各种薄膜光学常数,并最终为结果创建一个记录(或报告)。

要开始这项练习, CompleteEASE 中打开"SiNx on Si-1"数据文件及 Analysis 主 菜单中"Si with Transparent Film"模型。接着点击'Fit',结果如图 3-60 所示。



图 3-60. 使用 "Si with Transparent Film" 模型拟合数据文件"SiNx on Si-1"

Copy to Clipboard 复制到剪贴板

CompleteEASE 软件中, *Analysis* 主菜单下的每个面板(空白区域)处可以进行鼠标右击(***®R**)来访问可选菜单。这些右键菜单的例子如图 3-61。此外, Graph 窗口也有右键菜单,如图 3-62 所示。为了帮助创建报表,model(模型),fit results(拟合结果),以及各种图表可以被复制到剪贴板,然后粘贴 到各种应用程序中,如Word, Excel 或 PowerPoint。Fit results(拟合结果) 可以选择 Formatted(格式)或 Table(表格)方式复制到剪贴板中。其中前者 适合粘贴到一个文字处理软件中,后者是粘贴到电子表格中的首选。模型可以 被完全复制或仅复制 layers(层)。





图 3-62. Graph 中鼠标右击(**OR**) 的 menu choices (选择菜单)

Fit Log 拟合日志

现在,分析所有 Examples 目录下的五个 SiNx on Si 数据。为了记录每个膜的 最终拟合结果,在拟合结果后,Fit:面板中鼠标右击(*****R)并选择"Add to Fit Log"。这将保存当前的拟合结果。为每个拟合结果键入一个适当的名称。

将结果加入到 Fit 日志的快捷键是 CTRL-L

所有五个文件拟合完并添加到 Fit Log(拟合日志)后, Fit:面板的右键菜单中选择"View Fit Log"。这将弹出带有五个条目拟合日志,如图 3-63。您可以点击各自的日志条目来查看该样品的拟合结果。

View the Fit Log(显示拟合日志)的快捷键是 CTRL-ALT-L.

Fit Log				
Log Entries	Selected Entry	Selected Entry		
SiNx - 1	Exp. Data File:	sinx on si-1		
SiNx - 2	Current Model:	Si with Transparent Film		
Silvx - 3 Silvx - 4	Fit Parameters:	MSE=3.736		
SiNx - 5		Thickness # 1 = 92.00 ± 0.022 nm		
		A = 1.802 ± 0.0012		
		$C = 0.00307 \pm 0.00002398$ $C = 0.00280 \pm 8.3010E-05$		
		n of Cauchy Film @ 632.8 nm = 1.79656		
Rename Delete				
Com <u>p</u> are Reanaly <u>z</u> e)			
Generate Reports View Repor	ts	# Fit = 5, # Times = 1		
Load Log Entry	Cl <u>e</u> ar Log <u>O</u> pen Lo	og Save Log Close		

图 3-63. Fit Log (拟合日志)中所有五个 SiNx on Si 数据文件拟合结果。

Comparing Results 比较结果

现在,用鼠标选择第一个条目,然后按住 Shift 键同时点击了最后一个日志条目,以此全选所有五个日志条目。在多个日志条目选中后,点击'Compare' (比较)按钮。这将为每一样品的结果创建表格,如图 3-64。通过点击一个简 单的选择按钮,列/行可以互换。此外,通过选择按钮可以添加统计数据。

	MSE	Thickness	Α	В	С	n of Cauchy Film @, 632.8 nm
SiNx - 1	3.736	92.00	1.802	-0.00907	0.00280	1.79656
SiNx - 2	2.651	101.28	1.735	-0.00044199	0.00149	1.74272
SiNx - 3	2.837	96.71	1.858	-0.00426	0.00280	1.86470
SiNx - 4	3.210	87.61	1.916	-0.00298	0.00281	1.92565
SiNx - 5	2.516	105.48	1.804	-0.00032067	0.00203	1.81552
<u>R</u> everse Columns/Rows Add <u>Statistics</u> Copy To Clipboard						

图 3-64. 所有五个 SiNx 膜拟合结果的比较表

Compare Optical Constants 比较光学常数

在 Comparison 弹出窗口中,点击'Compare Optical Constants'按钮将显示图 3-65 对话窗口。选择你想比较的各层,选择显示图形的类型,现在你可以比较各 SiNx 层的折射率了,如图 3-66。如果你想选择所有的 SiNx 层,点击'Select Layers by Number'并选择 1。否则,通过对代表模型的各图例里的勾选框的勾选来进行各自的选择。最终的图形可以很方便地复制到剪贴板并进而追加到报 告中。

Optical Constant Compare Dialog					×
Display Options Graph Iype: n & k ♥ Double Y Axis Name curves by Layer Name Layer Selection Options Clear Selections §elect Layers By Number	Cauchy Film	Cauchy Film SLJAW	Cauchy Film	Cauchy Film	Cauchy Film SLJAW sinx on si-5
	N	o Data To G	raph		

图 3-65. Compare Optical Constants (比较光学常数)对话框。



图 3-66. 选择比较的层及图形显示类型。

Re-analyzing Multiple Data Sets 多数据重新分析

我们刚刚完成的系列 SiNx 样品分析时间并不长,但有些重复。有一个更快的方法来分析多个数据并建立一个主报告。首先,清除 Fit Log 中之前的结果。 要清除 Fit Log,按 Ctrl - Alt-L来查看 Fit Log,然后按'Clear Log'按钮。现在,您已经准备好使用更快的方法分析这个例子了。

现在开始,若果没有打开 Fit Log 窗口,按 Ctrl - Alt-L 来查看 Fit Log (拟合日志)。因为我们刚刚清除了日志,所以当前条目为空。按'Renalyze'按钮,将打开如图 3-67 所示对话窗口。基本概念是,我们要添加一个"行"来描述我们想运行一个批量分析。每个"行"将包含三个项目:文件组(数据文件的集合),模型,和一个可选的日志名称。

注: 在旧版本中, CompleteEASE 用单一模型来分析一组数据。现在, 多个"行"可以提供不同类型的分析(不同的数据集和/或模型)。

点击'Add Row'(添加行),将需要重新分析的数据创建为一个组。这个数据 组可以是已经在 Fit Log 中的条目(在这种情况下,需要选择它们),或点击 'Add'(添加)按钮访问文件选择对话框浏览并选择多个数据,如图 3-68 所示。 接着,将我们刚刚分析的 5 SiNx 数据添加到个单一文件组中。你会被要求输 入一组名称-我选择了 SiNx。如果你想在同一时间分析其他数据文件,这里你 可以进一步添加更多的组。

接下来,点击"Choose a Model"(选择模型),并选择我们之前分析这些氮化物薄膜的"Silicon with Transparent Film"模型,如图 3-69.所示。您还可以添加 "Log Name"(日志名称),重分析后它将被添加到每个日志条目后。点击 'Reanalyze'(重分析),所有 5 个文件将被逐一分析并将各自的结果保存到 Fit Log (拟合日志)中。如图 3-70。这一步骤完成了本节前面示例的所有工作。

注: "Re-save Data"(重新保存数据)勾选项允许新的拟合结果与各自的数据文件一起保存。在 CompleteEASE 中,数据文件也可以包含分析结果,可以在以后查看。

Reanalyze Data		X
Batch Reanalysis Se	etup	
File Group	Model	Log Name
	Add Row Delete Row	
Re-save Data		Reanalyze Cancel

图 3-67. 在 Fit Log 中打开 ReAnalyze Data (数据重分析) 窗口。

Choose Files			
Choose File Group	Files in Selected Group		
Selected Log Entries SiNx	C:\CompleteEASE\dat\Examples\sinx on si-1.SE C:\CompleteEASE\dat\Examples\sinx on si-2.SE		
Add Edit	C:\CompleteEASE\dat\Examples\sinx on si-3.SE C:\CompleteEASE\dat\Examples\sinx on si-4.SE C:\CompleteEASE\dat\Examples\sinx on si-5.SE		
	<u>Ok</u> <u>Cancel</u>		

图 3-68. 创建数据文件组。

R	analyze Data				
Г	Batch Reanalysis Se	etup			
	File Group	Model	Log Name		
	SiNx	Ix C:\CompleteEASE\MOD\Basic\Si with Transparent Film.mod 1			
		Add Row Delete Row			
	Re-save Data		Reanalyze Cancel		

图 3-69. 添加 Model (模型) 和 Log Name (日志名字)

Fit Log				
Log Entries		Selected Entry		
sinx on si-1-1	sinx on si-1-1		sinx on si-1	
sinx on si-2-1	sinx on si-2-1		Si with Transparent Film	
sinx on si-4-1		Fit Parameters:	MSE=3.736	
sinx on si-5-1			Thickness # 1 = 92.00 ± 0.022 nm A = 1.802 ± 0.0012 B = -0.00907 ± 0.00062998 C = 0.00280 ± 8.3010E-05 n of Cauchy Film @ 632.8 nm = 1.79656	
<u>R</u> ename	<u>D</u> elete			
Com <u>p</u> are	Reanalyze			
Generate Reports	<u>V</u> iew Reports		# Fit = 5, # Times = 1	
Loa	Load Log Entry Clear Log Open Log Save Log Close			

图 3-70. 拟合结束后,每个数据文件显示为日志条目。注意 Log Name (日志名)"1" 被加到各条目的结尾。

'Generate Report 生成报告'

现在,使用另一个一键方法来创建所有结果的报告。显示 FitLog(CTRL-ALT-L) 并选择所有五个条目。然后,点击'Generate Reports'按钮,如图 3-71 所示。这 将每一个 log 条目的结果保存到一个 RTF 文件中,这个文件可以用微软的 WORD 打开。RTF 文件的的格式如图 3-72 所示。

Fit Log			
Log Entries		Selected Entry	
sinx on si-1		Exp. Data File:	sinx on si-1
sinx on si-2		Current Model:	Si with Transparent Film
sinx on si-3		Fit Parameters:	MSE=3.736
sinx on si-5			Thickness # 1=92.00 nm
			A=1.802
			C=0.00280
			n of Cauchy Film @ 632.8 nm=1.797
<u>R</u> ename	<u>D</u> elete		
Com <u>p</u> are	Reanalyze		
<u>G</u> enerate Reports	⊻iew Reports		# Fit = 5, # Times = 1
Load Log Entry Clear Log Open Log Save Log Close			

图 3-71.选择所有条目并点击'Generate Reports'按钮,将所有结果保存到RFT 文件中。



图 3-72. 在 Fit Log 中将所有条目生成报告后的格式。

"Add Opt. Const. to Report"在报告中增加光学常数

如果你想添加 SiNx 层的光学常数图到报告中,设置如下: Model:>+OTHER Options> "Add Optical Constants to Report"(在报告中增加光学常数),如图 3-73 所示。如果你的模型是多层的,你可能需要改变层号以匹配模型中恰当的 层,从而得到你想要层的光学常数图。你需要重新保存这个模型(已开启增加 光学常数功能),并再次重新分析所有的数据。我们将跳过这一步,但在下一 节中会对单个数据文件演示这个功能。



图 3-73. 使用"Add Opt. Const. to Report"(添加光学常数到报告中)在 CompleteEASE 拟合结果的报告中包含光学常数图。请注意,需要修改以对应你感兴趣材料层的层号。.

Copy Analysis Report to Clipboard 复制分析报告到剪 贴板

下一步,我们将演示如何创建单一拟合结果的报告。数据分析结束后,在Fit: 面板中鼠标右击,并选择"Copy Analysis Report to Clipboard"(复制分析报告到 剪贴板),如图 3-74 所示。这将复制与创建的报告相同的图形,但位置是剪 贴板。对于这个例子,光学常数也被被复制到剪贴板,如图 3-75 所示,因 Model:>+OTHER Options> "Add Optical Constants to Report"(在报告中增加光 学常数)功能是开启的。



图 3-74.在 Fit: 面板中鼠标右击访问 "Copy Analysis Report to Clipboard" 复制分析报告到 剪贴板)



图 3-75. 包含光学常数图的分析报告

Save Log File 保存日志文件

当一个项目完成后,你可能想保存结果或发送给同事。Fit Log 是一个很好的方 式来存储你已经完成的所有模拟结果。您可以按如下方法保存 Fit Log (拟合 日志),在 Fit:面板中鼠标右击,选择"View Fit Log",然后,选择**'Save Log'** 按钮,如图 3-63 所示。日志将被保存,文件扩展名为"fit"。日志将包括所有条 目,以及对应的每个数据的文件名和模型层。要打开日志,数据文件必须与 "fit"日志文件在相同的目录下。因此,如果你打算将你的日志发送给同事,他 们也需要所有的数据文件才可以打开日志文件。

Snapshot 快照

要将单一拟合结果发送给其他人,或将其保存以供将来使用,一个简易好用的 方法是将拟合结果保存成 Snapshot(快照)。Snapshot(快照)将压缩你的数 据文件、模型、拟合结果到一个"SESnap"扩展名的文件中。这样,快照文件可 以被保存或发送,在打开时你将获得保存时的原样结果。要保存一个 SiNx 数 据的拟合结果为 Snapshot(快照),只需简单的点击 Model:> 'Save Snapshot' 按钮。如图 3-76 所示。要打开 Snapshot,只需简单的点击'Open Snapshot'按钮。



图 3-76.在 Model: 面板中用'Save Snapshot' 按钮保存拟合结果的快照
4. 数据分析 2 - 中级篇

本章继续分析一系列的例子,为中级分析篇,主要集中在吸收材料上。本章中的各小节例子列在下面,并将穿插讨论 Complete EASE 中的主要功能。

Section 4.1 Metal Substrates (金属基底)

例子中的功能		
• 保存 Optical Constants	• 保存 Model	
• 建立 Model	• B-Spline 材料层(基础)	
• WvlbyWvl 材料层	Graphing <pseudo> Transforms</pseudo>	

Section 4.2	Self Assembl	ed Monolayer on .	Au(金	上的自组装单分子层)
-------------	--------------	-------------------	------	------------

例子中的功能	
Parameter Uniqueness	• Fixing B-Spline Optical Constants
(参量唯一性)	(固定 B-Spline 光学常数)

Section 4.3 Absorbing Thin Films 吸收膜(B-SPLINE)

例子中的功能	
• B-SPLINE 层	• Wvl. Range Expansion Fit
• Starting Mat = (初始材料) • 选择 Graph/Fit 范围	
• 保存 Model • Zoom All(放大)	

Section 4.4 Absorbing Thin Films 吸收薄膜 (Gen-Osc)

	例子中的功能
Gen-Osc Layer	Parameterize Layer
• Tauc-Lorentz	Cody-Lorentz

Section 4.5 Multiple Layer Film Stacks (多层膜堆栈)

例子中的新功能		
Modifying a Model Global Fit/Pre-Fit with multiple layers		
(修改模型)	(多层膜的全局/膜厚预拟合)	

Section 4.6 Multiple Data Types 多数据类型 (SE + T 透过率)

	例子中的功能
 Appending Data (合并数据) 	● 同时拟合 SE 和透过率数据
• <u>Parameter Uniqueness</u> (参量唯一性)	 Graph ScratchPad (图形便条)

4.1. Metal Substrates 金属基底



对薄膜建模分析时,基底(板)光学常数是一个重要的考虑因素。虽然某些材料,如晶体硅,其光学常数是大家熟识且基本保持不变的,然而,其他如玻璃、金属基底等的光学常数经常是变化的。在这种情况下,最好是测量一个裸基底来确定其光学常数。玻璃基底在 3.4 节有讲述。在这个例子中我们将论述金属基底。虽然被称为金属基底,它实际上是一个玻璃或硅衬底上的一层不透光的金属薄膜涂层。测量光束不会穿透金属膜,所以我们可以认为这是一个基底。对于大多数金属,100nm厚度就会完全吸收光束,没有光可以透过这层金属到达下面的层或基底。

<Pseudo> Transforms 伪光学常数转换

打开 "Au_Substrate" 数据文件。基底反射是一个特殊情况,测量只涉及单一 界面(从表面反射)。实验测量得到的 Psi 和 Delta 可以使用 pseudo-substrate (伪基底)近似计算法直接转换为 n,k。"Graph Type"中选择<Pseudo> Transforms (伪光学常数转换)并展开它,就可以伪光学常数转换绘图了,如图 4-1 所示。可以绘图的值 <n>, <k>, <e1>, 和 <e2>。需要特别注意的是它们是通 过直接转换过来的"Pseudo"optical constants (伪光学常数),这里假设了反射 是从单一的基底而来。只要有任何薄膜存在(即使几个 nm 的表面层),这些 值就不等于实际的光学常数。

注意: <Pseudo> optical constants(伪光学常数)加"<>"括号,表示它们不是 真正的光学常数,简单原始数据直接转换仅适用于没有镀膜的基底。



图 4-1. 点击"Graph Type" 并选择<Pseudo> Transforms 来展开"Pseudo" optical constant (伪光学常数)的选项。

Au 数据的<Pseudo> Transforms 如图 4-2 所示。因为金层不透明(已到光学厚度),只有从表面而来的单一反射,因此伪光学常数转换是可以接受的。我们还是需要建立一个模型,模型中的层包了含光学常数。我们将用两种不同的层来演示,这两个层是 WvlbyWvl(逐一波长)层和 B-Spline(基准样条)层。



图 4-2. Au 基底数据的<Pseudo> optical constants (伪光学常数)

WvIByWvI Layer 逐一波长

从 Basic 文件夹中打开 "Blank"(空)模型。点击"Substrate = <u>none</u>"来添加基底的材料层。在 Advanced 目录中选择"WvlByWvl"层,如图 4-3 所示,点击层左边的+来展开层,现在你的模型应该与图 4-4 一样。

Open Material			\square
Folder Links:	<u>F</u> iles:		
Recent Common Advanced Basic Dielectric Examples Metal New Mats Recent Folders Final Examples Tames-2010 Data Tom-2010 Data	Name Additive mat Biaxial.MAT Cauchy_UW.MAT Coupled mat EMA-coupled mat Sellmeier.mat Uniaxia1.01ff.MAT Uniaxia1.MAT User Defined.mat Virtual Substrate.mat WMByWW.mat	Date 71/3/10 10:24 AM 17/08 3:37 PM 11/7/07 11:58 AM 4/2201 11:58 PM 5/24/02 1:21 PM 11/4/08 9:43 AM 8/24/99 4:30 PM 2/14/03 1:36 PM 2/14/03 5:35 PM 8/11/10 11:29 AM 3/24/09 3:07 PM	Size 0 KB 0 KB
File Name: WHB/WM.mat Comment Wavelength-by-Wavelength Browse For File	fitting of optical constants		

图 4-3. 从 Advanced Folder Link 中选择 WvlByWvl.mat 文件。



图4-4.基底层为WvlByWvl的模型。

WvlByWvl 层以 n= 1.5 和 K = 0 为初始值。然而,这些值不适用于金属。因为 拟合过程中各波长点孤立的去发现与实验数据最佳匹配的光学常数,所以有一 个好的初始值是很重要的。在这一层,相邻波长是没有关联性的,所以拟合可 能会陷入局部最小值而导致它的光学常数的"lost"(丢失),也就是不正确的 光学常数。为了帮助 WvlByWvl 层找到正确的结果,最好"seed"(注入)与实 际光学常数接近的初始值。有两种方法可以做到这一点:输入"Initial Values" (初始值)或"Starting Material"(初始材料)。对于这个例子,我们可以使 用<Pseudo>Transform图来指导"Initial Values"(初始值)。"<n>的范围从 0.2 到 1.6, 而<k>范围从 1.7 到 5.8。一个不错的初始值选择来至这个范围内 的中心位置附近。由于 Au 的光学常数值覆盖了很宽的的范围,更好的方法是 使用"Starting Material"(初始材料)。在 WvlByWvl 层的"Starting Material"上 点击,并从 Metal Folder Link 中选择"Au"材料文件。在 WvlByWvl 层每个波长 上, Palik's Handbook(手册)的金的光学常数将作为初始值。你可能会问,为 什么我们不直接用手册中的值。不幸的是,金属光学常数在不同的参考上是各 不相同的,甚至 Palik 的多个引用也有不连贯。在 Au 上鼠标右击来访问它的 光学常数,它的值应该如图 4-5 所示。



图 4-5. Au 的来自 Palik's 手册的光学常数。

如果点击'Generate',你会看到 Palik Au 值与实验数据的匹配度,如图 4-6.所示。你可以看到,Palik's Au 光学常数的不连贯导致了模型生成数据的不连贯。此外,与实验数据的匹配并不完美,因为 Palik 的金与测试样品没有使用同一工艺,其光学常数会有差异。



图 4-6. 使用 Palik's Au 值产生的模型数据曲线与测量到的 Au 实验数据的比较。

现在,点击'Fit'(拟合)。WvlByWvl 层允许每个波长的 n,k 值独立变化来获 得与实验数据的最佳匹配。对于单一测量角度这将得到一个近乎完美的拟合, 如图 4-7 所示。现在,右键点击 WvlByWvl 层来显示光学常数图,如图 4-8 所 示。现在可以保存这个我们工艺的 Au 光学常数材料文件。在继续之前,复制 光学常数图到 Graph ScratchPad (图形暂存器)中。



图 4-7. 使用 WvlByWvl 层拟合 Au 数据的结果



图 4-8. 拟合 Au 数据得到的 WvlBy Wvl 层的光学常数。

B-Spline 基准样条

尽管 WvlByWvl 层对于这个简单的基底行之有效,但它不使用相邻波长的关联 来帮助确定光学常数,在特定波长的数据点的任何噪声都会被引入到光学常数 中。图 4-8 中我们可以看到在约 800nm 处的小迹象。为了使光学常数保持平 滑,一个 B-Spline 层可以加到模型中,来替代 WvlByWvl 层。我们将保存 B-Spline 层的细节,并使用到后面的例子中。在本练习中,我们将建立可以拟合 任何金属基底的模型,然后保存该模型以供将来使用。 在 Basic 目录中重新打开"Blank"模型来刷新模型到初始状态。在 Substrate = "none"鼠标左击左(~仓L),如图 4-9 所示。这将弹出"Open Material"(打开材料)对话框。在 Basic 目录中选择 B-SPLINE 材料文件并点击'Open'(打开)。展开 B-SPLINE 层,这样它可以编辑了。

- 设置 resolution (分辨率)为 0.1eV。
- 设置 Starting Mat (初始材料)为 Au (可在金属位置找到)

resolution (分辨率)定义允许光学常数变化的"nodes"密集度。nodes 节点会匹 配到初始材料以提供拟合前的预估值。初始材料无需与测量的材料相同,但是 拟合前选择接近正确值的初始点将提高获得正确解的机会。



图 4-9. 用"Blank" 模型开始对 Au_substrate 样品数据分析。

产生数据,然后尝试拟合。拟合迅速收敛并得到答案,如图图 4-10。



图 4-10. 使用 B-Spline 层拟合"Au_Substrate"数据

在 Substrate = "B-SPLINE"上鼠标右击并选择"Graph Layer Optical Constants"来显示光学常数,如图 4-11 所示。要显示如图 4-12 所示的 spline(样条)点,在 B-Spline 层中点击'Draw Node Graph'。红色和绿色曲线是 B-Spline 拟合后派生的光滑光学常数(el 和 e2),不连续的各 spline(样条)园点同时显示。



图 4-11. "Au_Substrate" 的 B-Spline 拟合光学常数结果



图 4-12. 0.1eV resolution (分辨率)的 Spline (样条) 点拟合 Au_Substrate 数据

在继续之前,将光学常数图复制到 Graph ScratchPad (图形暂存器)中。与从 WvlByWvl 拟合来的结果相比,我们得到更光滑的光学常数,如图 4-13 所示。



图 4-13. 使用 WvlByWvl 和 B-Spline 层拟合得到的折射率结果比较.

作为一个练习,改变 Spline resolution(样条分辨率)到较大或较小的值,并重 复拟合。拟合的质量有变化吗?您可以使用 Graph ScratchPad(图形暂存器) 来比较。

<u>Save</u>

对结果满意时,点击 model(模型)右上方的 <u>Save</u>来保存金的光学常数。这 将打开保存层光学常数对话框,如图 4-14 所示。选择右边的"Tabulated"(表列) 按钮。下一步,在基底层上鼠标点击。输入文件名和注释,每个波长点上的表 列 *n,k* 将被保存以供将来使用。

Save Layer Optical Constants	X
Substrate - : P. Spline	Save Type
oubstrate - , b-opine	Dispersion Parms.
	Tabulated
Cancel	

图 4-14. Save Layer Optical Constants (保存光学常数) 对话框

Save Layer Optical Constants 保存层光学常数

此外,在层的名字上(这个例子中是"B-Spline")鼠标右击也可以直接保存层的光学常数。该菜单如图图 4-15 所示。点击此选项后,用户将被询问是否要保存参量化的光学常数(用于重建光学常数方程式的值),或将其保存为在每个测量波长上的光学常数表列。



图 4-15. 在层的名字上鼠标右击并在下拉菜单中选择"Save Layer Optical Constants" (保存光学常数)

Save Layer Optical Cons	tants	X
Choose the format for sa	aving the layer's o	optical constants:
Parameterized	<u>T</u> abulated	<u>C</u> ancel

图 4-16. 选择保存成参量化光学常数(方程式及值)还是对应各波长的表列光学常数。

Au Substrate Model 金基底模型

对一个新的样品的分析进行优化后,该模型可以保存供日后使用。让我们用这 个金基底作为一个例子。如果额外的金基底将在以后被测量,一个定制的模型 将有助于减少分析时间。对于这个例子,修改两个额外的设置。

- 用这个例子中保存的光学常数(之前的步骤)来替代 B-SPLINE 中的 参考材料"Au"(金)。
- 包含派生参数'n'和'k'(确保更改 layer #为"0")。

点击 Model:(面板)上方的'Save'(保存)按钮,将最终的模型保存为"metal substrate example"。如图 4-17 所示。



图 4-17. 保存 Au 基底模型提供以后使用

4.2. Self Assembled Monolayer on Au 金上的自组装单分子膜

本例中的功能	
Parameter Uniqueness	 Fixing B-Spline Optical Constants
(参数唯一性)	(固定 B-Spline 光学常数)

这个例子使用了 4.1 节中的 Au 基底结果。因此,在学习这个例子前你需要完成 4.1 的步骤。为了确保金基底模型是可用的,重新打开"Au_substrate"数据文件并点击 fit。如果 fit 无法完成,那么重复 4.1 节的步骤。

Self-Assembled Monolayers 自组装单分子膜

自组装单分子膜(SAMs)非常薄,是单一分子层组成的有机膜层。因此,他 们一般厚度都小于 10nm,常常接近 1-2nm。光谱椭偏术中测量到的 Delta 参 数(相位信息)对膜层的厚度非常灵敏。然而,对于如此薄的膜层折射率通常 是无法得到(拟合)的。为了拟合得到厚度,名义折射率需要被指定。当膜层 厚度超过 10-20nm 时,光谱椭偏术除了对膜厚敏感外,对折射率也敏感。一 个常用方法是测量一个较厚的类似材料薄膜,作为薄层膜的折射率。对于较厚 的薄膜,折射率可以测量,在测量很薄膜层时将折射率固定下来。对于如此薄 的膜,这种近似可能并不总是真实的,SAMs 的测量往往是定性的,因此使用 多个样品的比较是最佳的。

打开"Organic on Au"数据文件,然后点击'Generate'。出现图 4-18 所示图形。 模型生成的虚线代表裸金表面,因为是从只有 Au 层的模型得来。注意到 Delta 向低值方向有一个移动(在所有波长上)。这表明一个表面薄层的存在。一个 更大的(Delta)移动表明在金表面上有更厚的薄膜。



图 4-18. "Organic on Au"数据与裸 Au 模型产生的数据之间的比较。注意到有涂层的样品数据其 Delta 往低值方向有一个移动,这表明表面有涂层存在。

点击 Model:><u>Add</u>来添加一个新层到模型中。将蓝色线移至 Au 基底上方然后 点击,即可添加层。在 Basic 目录下选择 Cauchy (柯西) 层,然后点击'Open'。 Cauchy(柯西)层的默认值与一般的有机膜层所需的光学常数值接近。因此, 我们将固定 Cauchy(柯西)层的光学常数,而只将膜厚作为 fit(拟合)参数。

在继续前,固定 Au 的光学常数是非常重要的。如果这个时候 Au 的光学常数 为 Fit 参数,那么 Au 的光学常数也会变化从而扰乱我们的整个结果。

为了防止 Au 基底光学常数拟合,请确认: To prevent the Au substrate optical constants from fitting, make sure to do the following:

- 在 B-Spline layer (层) 中将"Fit Opt. Const." 置为 OFF, 如图 4-19 所示。
- 确认 Global Fit 已置为 off。

	o" 🗹 🗵
ns	Current User is James Log Out
M	odel: metal substrate example
	Ogen Saye Clear
	Layer Commands: Add Delete Save
	Include Surface Roughness = OFF
+	Layer # 1 = Cauchy Thickness # 1 = 0.00 nm
-	Substrate = <u>B-Spline</u>
	Init. values: n = <u>1.500</u> k = <u>0.000</u> Starting Mat = <u>au_test</u>
	Resolution (eV) = 0.100 19 Pts. (1.388-3.250 eV) Draw Node Graph
	Fit Opt. Const. = OFF
	Use KK Mode = <u>OFF</u>
	Show Advanced Options = <u>OFF</u>

图 4-19. "Fit Opt. Const." 置为 OFF,保证 Au 的光学常数固定为裸金光学常数不变。

将 Cauchy (柯西) 层的厚度置为 Fit 参数(通过点击鼠标右键)。点击'Fit', 得到厚度结果为 7.48nm 的报告。如果你得到一个不同的厚度,确认金光学常 数与之前拟合得到的裸金光学常数没有变动。

Parameter Uniqueness 参数唯一性

我们将利用这一结果,演示 CompleteEASE 中可帮助判断拟合唯一性的功能。 在 Model: 面板的底部,展开 OTHER Options。在本节中,点击 Parameter <u>Uniqueness</u>命令。需要测试的拟合参数选择对话框出现。在本例中,我们只拟 合了厚度,所以选择 Thickness #1,如图 4-20 所示。

CompleteEASE Parameter Uniqueness Fit 🗵	
?	Select a parameter: Thickness # 1
	OK Cancel

图 4-20. 选择需要测试唯一性的参数。

接着,你需要输入"Minimum value"(最小值),"Maximum value"(最大值) 和"# of fit points"(拟合点数)。这些是定义测试条件用的。最小值和最大值 之间的参数区间用输入点的总数划分为相等的间隔。然后,使用测试参数(本 例中为 Thickness #1)的不同固定值来进行数据拟合。获得的各个 MSE 值将用 来作图。 在这个例子中,定义 Minimum Value (最小值)为 2.5nm, Maximum Value (最大值)为 15nm,总点数为 100。如图 4-21 所示。你会得到一个警告信息 There are no other fit parameters defined (没有其他拟合参数定义),如 Figure 4-22 所示。这个没有问题,测试将继续进行,在 Cauchy (柯西)层厚度值变 化的情况下 MSE 的剖面图将获得,如图 4-23。

Parm. Uniqueness Fit Settings	
Current value for Thickness #1 = 7.46	
Minimum Value: 2.5	
Ma <u>x</u> imum Value: 15	
# of fit <u>p</u> oints: 100	
OK Cancel	
图4-21. (参数唯一性)测试	的设置

CompleteEASE	1
There are no fit parameters defined	
OK	

Figure 4-22. 如果测试参数是唯一测拟合参数,警告信息将出现。这个是没有问题的。 忽略这个警告,对应这一变化参数的MSE 剖面图可以获得。



图 4-23. 当光学常数固定时, Au 上自组装膜厚度唯一性测试后的 MSE 剖面图。

在 graph 区域内点击右键,将 MSE 剖面数据复制到 Graph ScratchPad 中。以便 我们做完下一个测试后比较两个 MSE 曲线。

接下来,将 Cauchy(柯西)层的 A、B 和 C 参数设置为拟合参数。在相同的设置 下测试 Thickness #1 的 Parameter Uniqueness(参数唯一性)。这一次,结果将 如图 4-24 所示。将这个结果添加到 Graph ScratchPad 中,然后 view(查看) ScratchPad 来比较两个测试,如图 4-25。



图 4-24. 当薄膜的 Cauchy 参数在每点上允许变化时,膜厚唯一性测试的 MSE 剖面图



图 4-25. 在 Graph ScratchPad 中比较两个唯一性测试的 MSE 剖面图

4.3. Absorbing Thin Films 吸收膜(B-SPLINE)



与透明薄膜比较,吸收薄膜的 SE 测量数据分析更难。这是因为在测量前,对应波长上的通用结构光学常数(*n*,*k*)并不总是已知的。为了解决吸收膜的分析问题,CompleteEASE 引入了一系列的特殊层类型:"B-Spline"层可以灵活的变化不同波长的 *n*,*k*,"Gen-Osc"可以叠加标准的振子曲线形状。B-Spline 层将在这个例子中描述,而 Gen-Osc 将在下面例子中说明。

B-Spline 层应用在部分测量波长透明、部分测量波长吸收的样品上堪称完美— 这样椭偏仪可以见证吸收的出现。这种性质的几个例子实例材料包括:



Identifying an Absorbing Film 甄别一个吸收膜

从 EXAMPLES 文件夹中打开"SiC on Si"数据。请留意 Psi 和 Delta 的振荡(图 4-26)是否与我们在透明薄膜例子中看到的一样。这些振荡是从薄膜表面反射的 光与通过膜层并从膜的底部界面反射回来的光相互干涉导致的。薄膜越厚,越 多振荡将出现。



图 4-26. SiC 膜在 Silicon 的数据。数据中的振荡表明薄膜在长波长处透明,而在短波长的振荡幅度下降表明 UV 吸收的存在。

不同于我们在透明薄膜中看到的现象,干涉振荡的幅度随着波长的变短而减小。 这是一种紫外光谱吸收的有力佐证。振荡被消除,因为能够穿透薄层返回表面 的光减少,从而与表面反射光的干涉减少。这个概念如图 4-27。为了对硅基底 上的 SiC 薄膜建模,我们需要的材料文件既有长波长的透明区域又有短波长的 吸收区域。



图 4-27. 当光可以通过薄膜层并从底部界面反射回来(红色),干涉就会出现会出现。 如果光被吸收,仅来自顶面(蓝色)的光不会产生干涉。

Si with Absorbing Film Si 上的吸收膜

现在,在 BASIC 文件夹中打开"Si with Absorbing Film"模型并点击 Fit。结果应 如图 4-28 所示。要查看薄膜的光学常数,在模型的"B-Spline"层上右键点击 (℃R)并选择"Graph Layer Optical Constants"。光学常数(这是 SiC 薄膜的光学 常数)的结果如图 4-29 所示。在长波长(λ>600nm)薄膜基本上是透明的(*k*~0),在短波长上吸收逐步增加。薄膜的折射率(n-红色曲线)也随波长减小而变大。



图 4-28. 使用 Si with Absorbing Film 模型拟合 SiC on Si 数据。



图 4-29. 使用"B-Spline" 层的 SiC 薄膜光学常数。

The "B-Spline" 层

"Si with Absorbing Film"模型的设置如图 4-30;点击"Layer #1"旁边的"+"可以 展开"B-Spline"层。B-Spline 通过设置等 photon energy (eV)(光子能量)间隔 上的控制点,来指定不同波长上的光学常数。控制点的大致间隔通过对 "Resolution (eV)="的设置实现,当前光谱范围上的实际控制点数列在后面。通 过对基准 spline(样条)曲线(通过平滑和连贯第0、第1和第2点间的衍生 数据)的控制点间插值得到光学常数。



图 4-30. "Si with Absorbing Film" 光学模型设置。

点击"Draw Node Graph",显示如图 4-31 所示图形。这个图形显示了 spline 控制点的位置。B-Spline 总是对应复折射率 $\varepsilon = \varepsilon_1 + i\varepsilon_2 = (n + ik)^2$ 函数式工作,常常写作"el & e2"。其中一组控制点(和相关的 spline 曲线)用于指定的"el",第二组的控制点用来描述"e2"。使用较小的"Resolution"(分辨率)值将增加控制点,可以更灵活性的调整光谱上的介电常数的细微特征。然而,设置太高分辨率会引入不必要的噪音或光谱上的介电函数的人为非物理特征。



图 4-31. B-Spline 介电函数 "e1 & e2", 显示的等 eV 间距的"control points" (控制点) (红色和绿色点)位置。

有两种方法初始化 B-Spline 层的控制点值:

- 1. 点击"n="和/或"k="区域,将在整个光谱范围内所有的控制点设置成 这个新的值。
- 2. 点击"Starting Mat ="并选择特定的材料文件,控制点将与选择的材料 文件的光学常数匹配。

"Si with Absorbing Film"模型中使用第一中方法并结合"Global Fit"(全局拟合)选项来搜索膜的 $n \, \pi \, k$ 值的范围。"Use Global Fit"部分如图 4-30 所示,定义 n 在 1.3 - 5 范围内的 20 个值, $k \neq 0 - 0.5$ 内的 3 个值。

注: Global Fit 是一个缓慢的过程,如果你有一个好的光学常数的初始猜测,应该关闭 它。在这种方式下,可以避免"automated"(自动) recipe(处方)而节约大量的时 间-特别是处理多角度数据集时.

在 B-Spline 中, "Fit Opt. Const."(拟合光学常数)选项允许用户打开或关闭以 实现 spline 的拟合与否。因此,一个的吸收材料使用 B-Spline 拟合,然后"Fit Opt. Const."可以切换为 OFF 来固定该层的光学常数以便将来分析时使用。

注意:要固定光学常数, Global Fit 也需要置为 off

在 B-Spline 层中,"Use KK mode"是一个高级计算法,可以使结果中 e1 和 e2spline 曲线保持 Kramers-Kronig一致性。当此功能 ON (开启),光学常数 将强制吻合 physical shape (物理形状)-这样它可以为最终的光学常数正确提供进一步的保证。此功能也将减少拟合参数的总数,因为只有 e2 光谱上的 spline 点被描述,而光谱上的 e1 是通过 Kramers-Kronig 关系转换计算得来。B-Spline 层中额外的"Advanced Options"将在第 10 节中叙述。

Wavelength Range Expansion (WVL-EXPAND) Fit

波长扩展拟合

"Si with Absorbing Film"在模型 Global Fit 时使用 Wavelength Range Expansion (WVL-EXPAND) fit (波长扩展拟合)。这将在随后的一节说明。首先,让我 们演示 WVL-EXPAND 的工作程序。WVL-EXPAND fit 的原则是,相对于整个 测量波长,一个模型可以在较窄的波长更好的工作。有机薄膜是一个很好的例 子,因为它们通常是在较长的波长上透明而在紫外开始吸收。因此,对于较长 波长,往往 Cauchy (柯西)已足够,但 Cauchy 并不适用于开始吸收的短波长。 B-SPLINE 层可以同时工作在透明和吸收区域,但在透明区域找到正确初始值 会更容易。透明区域使拟合复杂性最小化,因为只有折射率需要确定。

Range-Selecting Wavelengths 波长范围选择

手动执行一个 WVL-EXPAND fit (波长扩展拟合),我们首先需要学习如何 选择一个特定波长范围的数据子集。这在 CompleteEASE 中非常简单。首先, 选择一个作为新数据子集端点的波长,在这个波长上左击(℃L)并按住鼠标按 钮的同时拖动鼠标到另一端的端点波长上。如果鼠标拖动时超出 graph 一侧的 边线,在这一方向将包括所有波长(甚至扩展到未在图形中显示的波长)。

作为一个练习,打开数据文件并尝试如下操作:



1. 使用鼠标选择波长范围 600-700nm (图 4-32) ...

图 4-32. 选择波长范围在 600 到 700nm 之间。

 选择 600nm 及以上波长范围。做到这一点,鼠标箭头在当前图型窗口中 (近 600nm 波长)然后拖动鼠标并超越图型右边界来合并所有长波长(图 e 4-33)。

当左键按下时在图形上拖 拉,将在图形上产生一个 "黑色区域"突出被选中 的波长范围。



图 e 4-33. 扩展当前波长范围到更长波长区域 Expanding the current wavelength range to longer region.

3. 最后,选择整个波长范围。完成这个范围选择可以拖动鼠标超越 graph 的左右两 个边界或点击 graph 面板右上方的'Zoom All'按钮。(图 4-34)。



图 4-34. 点击 'Zoom All' 来选择整个波长范围。

现在,让我们回到 WVL EXPAND fit 注意点上。这个 fit 工作在特定的限制波 长范围上(由用户选择),利用当前拟合,然后逐步向长波长段及短波长段扩 展,直至整个数据集被拟合。在每个波长增量上拟合将执行。

手动执行一个 WVL EXPAND fit (波长扩展拟合),您可以选择所需的初始 波长区域,然后点击 Model 面板底部的+OTHER Options>WVL. Range Expansion Fit。

在 B-SPLINE 层中使用 WVL-EXPAND Fit (波长扩展拟合)

在 B-SPLINE 层中 WVL-EXPAND fit 工作的很好。当波长范围扩大, spline 的 控制点的数量自动增加,以匹配新的波长范围。外推的现有模型的额外点被初 始化,接着来拟合实验测得的数据。如果扩展此拟合包含 Global Fitting(将在 下一节中描述),你将看到 WVL-EXPAND fit 真正的强大功能。

带有 Global Fits 全局拟合 的 WVL-EXPAND Fitting 波长 扩展拟合

WVL-EXPAND fit 可以与 Global Fit 联合使用。当这个选项置为"ON", WVL-EXPAND fit 将对每一个 global fit 的尝试进行拟合。因此,每个拟合先被限定 在一定的范围内,然后被扩展到所有波长范围。对每个拟合尝试后扩展拟合的 MSE 进行比较来确定哪个结果吻合得最好。所有全局猜测中的最佳拟合最终 被报告。

- FIT Options

- + Perform Thickness Pre-Fit = <u>ON</u>
- Use Global Fit = <u>ON</u>

of Data Points = 20 # of Iterations = 5

Parm #1 = <u>Spline Layer n</u>

Min. = <u>1.300</u> Max. = <u>5.000</u> # Guesses = <u>20</u>

Parm #2 = <u>Spline Layer k</u>

```
Min. = <u>0.000</u> Max. = <u>0.500</u> # Guesses = <u>3</u>
```

```
Parm #3 = <u>(none)</u>
```

Include WvI. Range Expansion Fits = <u>ON</u>

Limit Wvl. for Fit = <u>ON</u> Range = <u>600.0 nm - 5000.0 nm</u>

Fit Weight = <u>N,C,S</u>

Limit Wvl. for Fit = <u>OFF</u>

Include Derived Parameters = <u>ON</u>

图 4-35. 使用 B-Spline 层的吸收膜模型中的 Global Fit 和 Wavelength Range Expansion Fit regions (波长扩展拟合区域)

当 WVL-EXPAND fit 设置为"ON"时,图 4-35 中显示了额外可用的选项。

Limit Wvl Range for Fit 限制波长拟合范围

由用户选择波长范围时,这个选项应该置为(OFF),如果由模型选择波长范围 那么应该将其置为(ON)。通常情况下,在自动模型中这个选项应该置为(ON), 因为它不要求用户来确定初始位置。然而,测试一个模型以确定设置合理初始 波长范围时,可以把它置为 OFF。

Wvl. Expansion Wvl. Range

当"Limit Wvl. Range for Fit"选项设为"ON"时,这个选择指出了 WVL-EXPAND fit 的初始波长范围。此选项对自动模型有用。

带有 WVL-EXPAND fit 的 Global fit 是一个非常强大的数据分析算法,可"自动"分析范围广泛的样品。当使用默认值分析失败时,以下是一些算法"调整"的技巧:

- 。 调整"Spline Layer n"和"Spline Layer k"范围的值以接近名义光学常数。
- 对于较厚的薄膜(即数据中有许多振荡),可能有必要增加"# Guesses";更薄薄膜可以用较少的"#Guesses",这将减少数据分析时间。
- o 对于很薄的膜(<100 nm), WVL-EXPAND Fit 应该没有必要。
- 对于非常厚的薄膜(>1-2微米),它可能需要指定一个更有限的光 谱范围内(最好在限制薄膜透明的光谱范围内)
- o 除非名义层厚度准确知道(并已设置在模型中), "Perform Thickness Pre-Fit"选项应该置为 ON。
- 在开始 global fit 前,请确保所有其他模型参数值设置恰当(例如,如 果表面粗糙度包含在拟合中,其初始值应该接近零)。

4.4. Absorbing Thin Films 吸收薄膜 (Gen-Osc) 通用振 子



在前面的例子中,我们介绍了使用 B-Spline 层分析吸收薄膜的过程。另一可以 独立或以 B-Spline 为初始的建模方法并用于吸收薄膜的是 Gen-Osc(通用振子)。Gen-Osc 通过对吸收峰形状的描述进行建模。这个例子演示了 Gen-Osc 层的常见应用。

Parameterize Layer 参量化层

对于很多应用,使用"Si with Absorbing Film"模型拟合得到的 B-Spline 光学常数已完全足够。B-Spline 可以保证在对应波长上光学常数的"光滑",但它并不总是保证它们是物理的(即 Kramers-Kronig 一致)。此外,B-Spline 层需要许多的拟合参数(二倍的控制点数目),这可能导致数据拟合的相关性。一旦使用 B-Spline 层确定了光学常数的一般形状,常常替换它为具有简单解析表达式的参数化光学常数。"Parameterize Layer"命令可以方便地执行此过程。

注意: Parameterization 层的目标是使用一个色散模型来匹配 B-SPLINE 层拟合 得到的 *n*,*k* 形状。

对前面例子中 SiC 膜的 B-Spline 光学常数参量化,在 B-Spline 层上鼠标右击并在 下拉菜单中选择"Parameterize Layer",如图 4-36 所示。这将打开"Parameterize Layer"对话框,如图 4-37 显示, B-Spline 层光学常数被绘制在图中。带有一个初始 振子(本例中为 Cody-Lorentz)的默认模型(Gen-Osc)将自动在这个窗口中打开。



图 4-36. 在一个层上鼠标右击来访问下拉菜单,然后点击"Parameterize Layer"。



图 4-37. Parameterize Layer 对话框,显示了层及默认 Cody-Lorentz 振子的初始光学常数。

"Gen-Osc"材料文件(代表 General Oscillator 通用振子)允许组合不同的振子的曲线形状。我们想用一个振子来匹配 SiC 光学常数的形状。可以有很多的选

择,这将在10节中详细描述。在这个例子中,在"Cody-Lorentz"名字上鼠标左 击并从输入框中选择"Tauc-Lorentz",如图 4-38 所示。

CompleteEASE Input			
Choose the oscillator type:			
Lorentz			
Lorentz Im(Amp)			
Harmonic			
Harmonic Im(Amp) 📃			
Gaussian			
Drude(RT)			
Tauc-Lorentz			
Cody-Lorentz 🗨			
<u>O</u> k <u>C</u> ancel			

图 4-38. 有不同振子类型选择的输入框。

用一个新的振子模型匹配光学常数的基本步骤如下:

- 1. 通过调整和拟合 oscillator (振子)参数来匹配 e2。
- 2. 通过调整和拟合 eloffset 或 Pole 的值来匹配 el。
- 3. 最后调整所有参数来同时拟合 e1 和 e2。

这三个步骤将在 SiC 例子中演示,通过对 Tauc-Lorentz 振子参数的调整以匹配 到 SiC B-Spline 的结果上。

Step 1: Match Imaginary Part Only 匹配虚部.

大多数振荡子是保持 Kramers-Kronig 一致的。这提供了光学性质 real(实部) (e1, n)和 imaginary(虚部)(e2, k)之间的内部耦合。当我们调整振荡子参数去 匹配 B-Spline 结果的 e2 形状时,通过 KK 传递,el 形状被自动调整。第2步 将允许我们调整只影响 el 的其他参数,因此,先匹配 e2 是重要的。

要控制振子的参数值,左键点击 Tauc-Lorentz 振子旁边的数字,如图 4-39 所示。 这时,选中的振荡的数字号码周围会被阴影框围绕。

注意: 使用鼠标的左键来选中你想调整的振荡子,因为右键点击将从列表中删除振荡 子。如果你意外的删除了振荡,只需简单的点击 Add Oscillator 来添加。

当一个振荡子被选中,多控制点将出现,它们可以操控 center energy (中心能量), amplitude (振幅), broadening (加宽),或许还有 bandgap (带隙)。如果振荡子的某些值在绘图范围以外,若果振子参数值在画图范围以外,并非所有的灰色方块会出现。要查看所有的控制点,如图 4-40 所示,请在对话框底部点击'Expand X-Axis'(扩展 X 轴) 按钮。



图4-39. 鼠标左击振子左边的数字来选中它,从而出现控制点来操控。



图 4-40. 点击'Expand X-Axis' 按钮来显示所有供操控用的振子中的控制点,对于在测量 范围以外的光谱范围也适用。 在我们调整控制点之前,如果在 OC View/Fit Type 中选择"Imaginary Part Only" (只显示虚部),看起来会更容易。这将显示从 B-Spline 拟合而来的 e2 (或 k) 绿色曲线并伴随我们调整的振荡子灰色虚线。我们的目标是匹配这两条曲线。 如果你移动鼠标到任意一个控制点上,鼠标指针应变为一个 XY 箭头,说明你 现在可以调整该控制点。如图 4-41 所示,其中顶部控制点被选中。amplitude 和 center energy 都可以由这个顶部控制点移动。练习移动不同的控制点,以更 好地匹配虚线到 B-Spline 的绿色数据上。



图 4-41. 最上面的控制点鼠标变成一个 XY 箭头,表明该控制点可以进行调整,以改变 选中振子的形状。

当振荡子参数调整并较好地匹配到了 e2 参考形状后,在"Amp.","Br","Eo" 和 "Eg"参数上鼠标右击("R)。这将把它们置 ON 为拟合参数。点击'Fit'按钮。 这时,我们并不是拟合实验数据,而是使振荡子(通过参数)的虚部形状与参 考光学常数相匹配。

拟合改变振荡子中的参数去匹配从 B-Spline 来的虚部曲线形状。图 4-42 显示 了拟合结果,图中的黑色虚线是使用 Tauc-Lorentz 色散公式产生的。



图 4-42. 使用单一Tauc-Lorentz 振子拟合 SiC 的虚部值。

Step 2: Match Real Part Only 匹配实部.

完成振子的虚部匹配后,改变 OC View/Fit Type 为"Real Part Only"(仅实部)。 振荡子列表将隐藏,因为对"Real Part Only"进行拟合时仅 Einf 和两个 Poles 为 可变参量,如图 4-43 所示。Poles 是 unbroadened (不加宽)的振子,它处于测 量光谱范围以外,并对光学常数的实部产生影响,其效果等同于该光谱段上的 强吸收产生的影响。因此,UV (紫外) pole 会朝短波长方向推升折射率,而 NIR (近红外) pole 会朝长波长方向压低折射率。Einf 值对所有波长的折射率 增加一个常数偏移量,其影响近似与测量波长远端的显著吸收。



图 4-43. 拟合"Real Part Only"时, 仅需要拟合 Einf 和两个 Poles。

在这个例子中,最好在开始拟合前调整参数值。当Layer Parameters(层参数)的值改变时,光学常数图会自动更新。UV Pole Amplitude(振幅)中输入100,可以看到曲线向上提升。这些参数也可以"dialed in"(翻滚),方法是将鼠标放在参数上,按住"Shift"键同时滚动鼠标中间滚轮。图 4-44 显示了经过的 UV Pole Amplitude(振幅)提升后的模型曲线更接近与参考曲线。然而,曲线的"tilt"(倾斜度)不匹配。这是因为 UV Pole Position(位置)可能也需要进行调整。一般来说,UV Pole energy(能量)越接近测量范围,更多的"tilting"(倾斜)会产生。



图 4-44. 增加 UV Pole Amplitude (振幅) 会提升 Gen-Osc 的"el"值,但是蓝色曲线在 "tilt"(倾斜度)上并不匹配来自 B-Spline 的红色参考曲线。这个需要调节 UV Pole Energ (能量)。

调整 UV Pole Position(位置)和 Energy(能量)后,与 B-Spline 参考曲线更 匹配了,为了获得最佳匹配,对这两个值进行"fit"(拟合)。随后,为了获得 好的匹配,Einf 值也添加为拟合参数,如图 4-45 所示。



图 4-45. 通过变化(和拟合) UV Pole 的 Amplitude, Energy 和 Einf, 匹配参考 B-Spline el 值的结果已获得。

Step 3: Match All 匹配所有.

如果步骤#1和#2是成功的,Gen-Osc将不需要同时匹配 real和 imaginary项 到参考值。不过,也有一些用于匹配 e2的曲线和那些用来匹配 e1曲线值可能 存在相关性。因此,将 OC View/Fit Type 置为"All"的最终拟合推荐使用。当 一组振荡子的中心在测量范围以外时,对 e1 值的贡献可能不同(通过 KK 传 递),这是相关发生的最常见情况,这是因为同时改变 amplitude 和 center energy 值能得到一个在测量光谱范围上相似的"tail"(尾部)吸收。

Replace Layer 替换层

当你对 Gen-Osc 的 real (实部)和 imaginary (虚部)与参考 B-Spline 层的匹 配满意时,点击'Replace Layer'(替换层)以应用新振子模型来替换 B-SPLINE 层,如图 4-46 看到的。新的振荡子模型现在可以用来拟合数据。按'Fit'看看 Tauc-Lorentz 振子是否可以很好的描述实验数据。如果将来有类似光学常数的样品被测量,可以跳过 B-SPLINE 层步骤直接使用该模型。如果参数化没有成功,点击'Cancel'恢复到现有层光学常数。

注: 拟合数据和在 Parameterize(参数化)层对话框中的拟合是不同的。在前者,你 允许振荡子中的参数调整以达到与实验 SE 数据最佳匹配的目的,而后者则是与参考光 学常数的形状匹配以获取振荡子的初始参数值。



图 4-46. Gen-Osc 己替换 B-Spline 层到模型中。

Glass with Absorbing Film 玻璃上的吸收膜

这个例子中,我们将再演示一个沉积在玻璃基底上的吸收薄膜的分析步骤。一般来说,数据分析是相似的,仅为基底光学常数不同。透明基底需要考虑的另一点是是否存在背面反射。在这个例子中,为了避免额外的复杂性,玻璃基底背面被机械打毛。当然,如果背面反射存在,使用第 3.4 节中介绍的方法来处理透明基底。

打开"a-Si on Glass"数据文件和"Glass with Absorbing Film"模型,然后点击'Fit"按钮。结果应如图 4-47 所示。"Absorbing Film on Glass"模型使用先前描述的 "Si with Absorbing Film"模型相同的设置程序。一如以往,光学常数的描述使 用 0.3 eV 等间隔控制点的 spline。对于强色散材料,这个间距可以改变。初始 值 n 和 k 的获得是通过带有 WVL-EXPAND fitting(波长扩展拟合)的 global fit (全局拟合)。要查看薄膜的光学常数,在模型中右键点击"B-Spline"层并选 择"Graph Layer Optical Constants"。 拟合得来的"B-Spline 光学常数结果如图 4-48 所示。



图 4-47. 使用模型"Glass with Absorbing Film" 拟合 "a-Si on Glass" 数据的结果。



图 4-48. a-Si 膜的 B-SPLINE 光学常数结果。

Starting Mat 初始 Mat

在这个例子中的吸收薄膜的两个模型是非常灵活的,可用于许多不同的材料。 这主要是由于 n,k 的 Global Fit(全局拟合)。但是,数据分析时间超过平均水 平,因为 Global Fit(全局拟合)需要尝试所有 n,k 初始值的可能组合。为了减 少分析时间,global fit 的范围内可适当减少。但是,这需要相关知识来确定该 材料的恰当范围。如果材料是已知的,也可以将一个类似的材料作为这个 B-SPLINE 层的"Starting Mat"(初始材料)。

为了比较分析时间的多少,使用"Glass with Absorbing Film"模型重分析"a-Si on Glass"数据。在一个奔腾 D 的电脑上分析需要 20 至 25 秒。重新打开 "Absorbing Film on Glass"模型,并进行以下修改:

- 展开 B-SPLINE 层并在"Starting Mat = none"上鼠标左击。在 Semiconductor(半导体)目录中打开"a-si.mat"。
- 在 Model:>+FIT Options.中将 global fit 置为 OFF。
- 点击 Fit:>'Fit'。

和以前相同的数据分析结果将获得,但耗时不到一秒钟。因此,当薄膜的光学 常数与参考材料文件接近时,这个 a-Si 的分析可以用这个新的模型替代。
Parameterizing Optical Constants with Cody-Lorentz 带 有 Cody-Lorentz 的参量化光学常数

a - Si 光学常数可以被参数化,就如同在前面例子中的 SiC 值。有两种常见 oscillators(振子)被用于无定形硅: Tauc-Lorentz 和 Cody-Lorentz。要对本例 中 a-Si 膜 B-Spline 层的光学常数参数化,在 B-spline 层上用鼠标右击,然后从 下拉菜单中选择"Parameterize Layer"。

"Parameterize Layer"对话框出现,并且 B-Spline 层的光学常数绘制在 graph (图形)中。对于本例,将使用"Cody-Lorentz"单一振子。

和以前一样,完成 Gen-Osc 参数化的三个步骤,即: 1)使用振子参数匹配 e2(设置 View/Fit 到 Imaginary Part Only), 2)使用 poles 和 Einf 匹配 e1(设置 View/Fit 到 Real Part Only), 3)匹配所有并替换层。对于第 1 步,在拟合前有 两种方法来手工操控振荡子参数。作为练习,手动更改参数。

- 在每个振荡参数上,按住 Shift 键的同时使用鼠标滚轮滚动(改变)振荡 子参数。按住 Ctrl- Shift 键将减少每次滚动调整的量。
- 2. 在振荡子旁边的数字上鼠标左击来选中这个振荡。这将在图形中显示可以用鼠标拖曳调整的控制点。通常情况下,这些控制点在测量光谱范围以外,如图 4-49。要查看振荡子的控制点,点击'Expand X-Axis'按钮。这将扩展 photon energ 光子能量范围以查看整个振荡子,如图 4-50。通过移动图中的灰色控制点,尝试调整振荡子的 broadening (加宽),amplitude (振幅)和 center energy(中心能量)。这将改变振荡子的形状。



图 4-49. 点击振子旁边的数字来显示振子和它的控制点(灰色)。在很多情况下这个振 子比较难定位,因为它常常在测量能量范围以外。



图 4-50. 点击'Expand X-Axis' 以更好的显示振子(灰色),可以用鼠标对你选取的振子 中的 amplitude, center energy, broadening 参数进行调整。

图 4-51 显示了拟合结果,图中黑色虚线曲线是使用指定振荡子计算得来的。 接着,使用'Replace Layer'按钮将这个新完成的振荡子材料文件替换到模型中。 拟合 SE 数据,其结果的 MSE 值接近 1.2。

接下来,展开模型中的振子层,然后添加以下拟合参数拟合:"Ep"。这为光学 色散添加了更多的灵活性。MSE 值将减少到 0.8,如图 4-52 所示.

添加其他拟合参数(Einf, Et, 和 Eu)到模型中已来检查是否有进一步改善。问题 变成了如果 MSE 仅略有改善,建模过程中增加更多"变量"是否值得。作为 一般"rule-of-thumb"(经验法则),使这个参数成为明确的选择,这个拟合参 数的加入应减小 MSE 值 20%或以上。



图 4-51. SPLINE 拟合得到 a-Si 光学常数结果,用 Cody-Lorentz 振子与之相匹配。

注:由于振荡子参数之间的相关性,有可能你的结果不完全符合上述结果。在这种情况下,通常的做法是,尝试删除一些拟合参数,在剩余拟合参数仍然能够提供良好的拟合情况下,直到最低数量的参数被选择,



图 4-52. 使用 Cody-Lorentz 振子拟合 a-Si 数据的最终拟合结果。

Saving a Model 保存模型

对于 a-Si 膜,适当的 Cody-Lorentz 拟合参数确定后,该模型可以保存供日后使用。这个过程很简单:点击 *Analysis>*Model:>'Save',选择你想保存模型的文件夹,并给定模型的名称。"Common"文件夹是一个供所有用户方便访问的中央位置。图 4-53 演示了这个过程。



图 4-53. 在 Model: 面板中点击'Save' (保存)来访问"Save Model" (模型保存)对话框。

4.5. Multiple Layer Film Stacks 多层膜堆叠

这个例子中的新功能

修改 Model (模型)

• Global Fit/Pre-Fit with multiple layers 多层膜中的全局拟合/膜厚预拟合

打开数据文件"a-Si Multilayer"。这个例子与 4.4 节中讨论过的范例类似。基底 是硅,在 a-Si 下面有一层 SiO2 薄膜。符合这种类型样品的现成模型没有,因 此将需要创建。修改一个类似模型为首选。让我们从 4.4 节中保存的模型开始, 是使用 Cody-Lorentz 振子的生长在玻璃基底上的 a-Si 膜模型。从"Common"位 置打开这个模型。如果您没有保存模型,开始这个例子前先重复第 4.4 章的过 程,并确认保存了建议的最终模型。

注意: 确认将基底替换成 silicon (硅)

在"7059_Cauchy"层上鼠标左击,并在打开材料对话框的 Semiconductor 位置打 开材料 Si_Jaw"。

在 Model 面板的顶部选择 <u>Add</u>(添加)命令。这将弹出如图 4-54 对话框。移动鼠标使蓝色线处于两个已有层之间(如图所示)。这将是新添加层的位置。 在打开材料弹出对话框的 Semiconductor 目录下选择"SiO2_Jaw"。

Add Layer To Model		X
Layer#1=: Gen-Osc Substrate=: Si_JAW	Layer Type Standard	
Cancel		

图 4-54. Add 命令打开的对话框。蓝色线条可以上下移动来指定新加层所处的位置。

在"Thickness #1= 0.00nm"上左键单击,指定 SiO₂层的厚度为名义值的 100nm。 并且将它设定为拟合参数。Generate(生成)数据,其图形应如图 4-55 所示。 生成的数据并不匹配实验数据。如果尝试拟合,将不会成功。在 Model 中将 Global Fit 设置为 off 然后点击 Fit(拟合)。接着用'Reset'(重置)按钮重置拟 合(拟合参数初始值将回到拟合前状态),若果你忘记将 Global Fit 设置为 off, 它可能会恢复到 Global Fit 使用的光谱限制范围。在这种情况下,右键单击'Reset' (重置)按钮来选择"Show Reset List"(显示复位列表)。然后,您可以选择重置到 点击'Fit'之前的正确位置。

证实拟合质量不好后,点击 CTRL-R 重置模型参数,回到拟合前的值。

低质量的 Fit 是由于厚度值未知导致的。有两种方法来确定每一层的更恰当厚度初始值。如果先将 Cody-Lorentz 中的参数置 OFF,这两种方法都能很好工作。

• 展开 General Osc 层, 然后逐一用鼠标右键点击先前 On (开启)的拟 合参数,将它们切换为 off。

三层的膜厚参数维持 Fit (拟合)状态 (SiO2, a-Si, roughness)。



图 4-55. SiO2 层厚度设为名义 100nm, 然后产生数据的结果。

方法 1:对 Thickness #1和 Thickness #2都进行 Global fit(全局拟合)。请确 认已将 Thickness Pre-fit(厚度预拟合)置为 off(关闭)。如果搜寻的可能厚 度范围很大,这种方法可能需要很长的时间。

方法 **2**: 对 SiO₂层厚度使用 Global fit 并使 Thickness Pre-fit 处于 On (开启) 的状态。这将减少 global fit 的元(维) 而使进程快得多。

注:如果对 a - Si 层(Thickness #2)使用 Global Fit,而不是 SiO2 层(Thickness #1),方法#2 将不工作。Thickness Prefit 仅拟合模型中最厚的膜层。

图 4-56 显示对样品的成功拟合。目前的模型不拟合振荡子参数,因此 a-Si 薄膜的光学常数肯定与先前的样品相似。



图 4-56. 只拟合各膜层厚度的结果。

- Include Derived Parameters = <u>ON</u> <u>Add Derived Parameter</u>

- 1: Type = <u>n</u> Layer # = 2 Wavelength = <u>632.8 nm</u> Name = <u>n of Gen-Osc @ 632.8 nm</u> Low Spec. = <u>0.000</u> High Spec. = <u>0.000</u>
- 2: Type = <u>k</u> Layer # = 2 Wavelength = <u>632.8 nm</u> Name = <u>k of Gen-Osc @ 632.8 nm</u> Low Spec. = <u>0.000</u> High Spec. = <u>0.000</u>

图 4-57. Model: 面板下的 Fit Options 部分允许报告模型中任何层光学常数的 Derived Parameters (派生参数)。对于多层膜,务必输入正确的 layer #。

现在将 Cody-Lorentz 中的参数都 On (打开),这将允许 a-Si 光学常数变化,目的是改善数据拟合质量。图 4-56 中指出派生参数指向了错误的层数。Model面板下的 Fit Options 部分,将 Derived (派生) $n \pi k$ 都指向#2 (将#1 改为#2),如图 4-57 所示。

现在将 Cody-Lorentz 中的参数都 On (打开) (右键点击它们的值)。关闭 Global Fit 和 Thickness Prefit (因为厚度值已经知道),然后点击'Fit'按钮。结 果应如图 4-58 所示。保存新模型以便用于同类样品。



图 4-58. 多层膜的最终拟合结果。

Oxide or Roughness?氧化还是粗糙

一个经常被提出的问题有是,表面到底是氧化层还是粗糙层。在上述模型中,使用了表面粗糙层,其最终拟合值为 2.29 nm。Off(关闭) roughness(粗糙层)并在 Layer #2 层上方加"SiO2_Jaw"层,并将其厚度设为 Fit。Fit 数据。最终的结果应该是表面的 SiO2 层厚度 2.70nm 而 MSE 值为 1.25。因此,对于这个样品,使用粗糙层和氧化层之间差别不大。在薄膜厚度小于 10nm 时,这种情况比较普遍。对于硅的情况下,表面为氧化层应该比粗糙层更吻合样品,但就两种模型而言,都是可以工作的。

4.6. Multiple Data Types 多数据类型 (SE + T 透过率)

本例中的新功能	
• Appending (合并)数据	 同时拟合 SE (椭偏) 和 Transmission (透过率) 数据
 <u>Parameter Uniqueness</u> (参数唯一性) 	● Graph ScratchPad (图形暂存器)

当测量透明基底上的吸收薄膜时,一个常用的增加已知信息内容的方法是 Intensity Transmission(光强透过率)数据补充到 SE 中。这种额外的信息可以 帮助获得厚度和吸收层薄膜光学常数的唯一结果。

作为示范,从 EXAMPLES 目录打开数据 "Cr on glass_SE"。这个数据是从玻璃上的 Cr 薄膜样品上测量得来,背面贴了半透明胶带来抑制背反射。因此,我们可以打开"Glass with Absorbing Film"模型。这个模型在前面的例子描述过,该模型为在长波光谱段几乎透明,而在紫外出现吸收的样品设计。这个模型对于玻璃上的金属薄膜,如果不加修改,可能也可以工作,然而作为开始的一个更好的方法,应该在拟合前执行以下步骤:

- 将 Surface Roughness (表面粗糙) 置为 off
- 将 **Fit Options** 下的 Global Fit 置为 off
- 在 B-Spline 层中将的"starting mat="选择为 metals 目录下的 Cr.mat 文件。

Parameter Uniqueness 参数唯一性

现在,你可以点击'Fit'。初始结果应该类似于图 4-59 所示。因为有大的相关性, 重复很多次点击 fit,将得到不同的结果,而它们具有差不多的小 MSE 值。为 了显示 MSE 剖面图,使用 model 中+OTHER Options 部分下的 Parameter Uniqueness。图 4-60 显示了膜厚 10nm 到 50nm 的 Parameter Uniqueness(参 数唯一性)测试结果。在开始之前,将这条曲线复制到 Graph ScratchPad 中方 便以后比较。虽然在 45nm 膜厚处有一个 MSE 最小值,对于大部分厚度范围 MSE 值都小于 0.4。



图 4-59. 仅包含 SE 数据,用 B-Spline 层的初始拟合。



图 4-60. Parameter Uniqueness(参数唯一性)测试的 MSE 剖面图,是对玻璃上的 Cr 薄膜的分析,分析时仅包含 SE 数据。

Append Data 合并数据

为了帮助打断由于仅拟合 SE 数据导致的明显相关性,让我们加入可以提供额外信息的光强透过率到拟合中。我们想要 SE 和 Transmission Intensity (透射强度)同时出现在拟合中。为了达到这个目的,你需要在'Open'数据命令上鼠标右击(**①**R),并选择"Append Data",如图 4-61,在 EXAMPLES 目录下选择 "Cr on glass_T"数据文件来完成 append (合并)。这两个数据是从同一个样品 上测试得到的。在两个数据同时打开的情况下,可以通过 graph 窗口右上方的 data set (数据列)的选择,在 SE 和 T 数据图形中切换,如图 4-62 所示.



图 4-61. 在'Open'命令上鼠标右击并选择"Append Data"(合并数据),在已经打开的 SE 数据中合并透过率数据。



图 4-62. 对 graph 窗口上方的 data set (数据列)条目选择来确定绘图内容。这里,你可以看到玻璃上的 Cr 薄膜的 SE 和透过率数据同时打开着。这样,它们在拟合数据时 会被同时包括。

Transmission Data % Weight 透过数据权重百分比

当 Transmission Intensity(透过强度)数据参与拟合时,你应该核对 "Transmission Data % Weight"(透过强度数据权重百分比)。这个值将告知 CompleteEASE 软件,在数据拟合时与光谱椭偏数据相比透过数据所占的权重。 大多数模型设置为 100%。所以透过强度与光谱椭偏数据具有同等权重。但是, 也有些情况下它的值可以超过 100%。要查看"Transmission Data % Weight", 你需要点击 Model 窗口底部的 <u>Configure Options</u> 按钮。在 Fit Options 部分, 选中 ""Transmission Data Weighting"选项, 如图 4-63 所示。

Show Model Options	X
Available Options	Description
Multi Sample Analysis Adv. Bandwidth Options Parameter Coupling Use Previous Results Fit Options Include Depolarization Data Include Reflection Intensity Data Wransmission Data Weighting Use GenE/MM Data More Fit Options Other Options Other Options Include All Qlear All	Allows fitting for a wavelengh shift in the ellipsometer.
	Qk

图 4-63. 在 Model 的 <u>Configure Options</u> 部分添加 "Transmission Data Weighting" (透过 数据权重)选项。

On (开启) Transmission Data Weighting 后,你需要在 Model 中 Fit Options 部 分下将它的值设为 100%,如图 4-64 所示。

+ MODEL Options

- FIT Options

 Perform Thickness Pre-Fit = <u>ON</u> Use Global Fit = <u>OFF</u> Fit Weight = <u>N.C.S</u> Transmission Data % Weight = <u>100.00</u> Limit WVI. for Fit = <u>OFF</u>
 Include Derived Parameters = <u>ON</u>

图 4-64. 在 Model 的+**Fit Options** 部分改变"Transmission Data % Weight" (透过率权重) 到 100%。

再次点 Fit。如果模型中初始厚度接近正确值,拟合结果的膜厚值应接近 14nm。 这是最终结果。但是,如果 Cr 的厚度初始值远离从 14nm,拟合结果可能陷 入"local"(局部)的 MSE 最小值。重复 Parameter Uniqueness 测试,以检查的 MSE 剖面图,它应该产生如图 4-65 所示的曲线。尽管我们很容易看到在约 45nm 处有一个可能使拟合陷入的"local"(局部)最小值,很明显,仅有一个 厚度值有最好的 MSE 值。

同样,将这条曲线复制到 Graph ScratchPad。现在,我们可以通过 view(查看) Graph ScratchPad 来比先前的两个 Parameter Uniqueness 测试,如图 4-66 所示。



图 4-65. 对于玻璃上的 Cr 薄膜,同时拟合 SE 和 T 数据时的 MSE 剖面图。



图 4-66. 对于玻璃上的 Cr 薄膜,同时拟合 SE 和 T 数据以及只拟合 SE 数据的 MSE 剖面 图在 Graph ScratchPad (图形暂存器)中的比较。

5. 数据分析 3 - 高级篇

本章包括深入一步的例子,示范高级及专业的主题。高级主题包括多样品分析、 创建随组分和温度变化的材料文件、各向异性和在模型中表述非理想状态。一 些例子的数据是对样品不同点的 Mapping,这有助于示范如何处理一个样品上 采集的多点数据。但是,并不是所有椭偏有这个硬件 Mapping 功能,所以对 mapping 数据建模仅对特定系统有必要。

这一章中每小节的例子如下,将随着 Complete EASE 的主要功能逐一展开讨论。

Section 5.1 Map Data and Model Non-Idealities 地貌数据

本例中功能	
 Show Map Data(显示地貌数据) Selecting single-points from Map 	 Fit Scan Data (拟合 Scan 数据) Viewing Map Results
 (Map 甲选择単点数据) Sellmeier Layer 	 (显示 Map 结果) Model Calculation (模型考虑因素) (Non-idealities) (非理想)
 Thickness Non-Uniformity (厚度不均匀) 	• Bandwidth (nm) (线宽)
● Set Ranges (设置光谱范围)	

Section 5.2 Multi-Sample Analysis 多样品分析

本例中功能	
 Selecting Multiple Points from Map (从 Map 数据中选择多点) 	• Model: Multi-layer (empty)
• CTRL-SPACE BAR to switch views. (用 CTRL-SPACE BAR 切换显示)	 Select/Un-Select Data Set (选择/反选数据列)
• Set Symbol Size (设置符号尺寸)	• Zoom on (缩放) "Map"
 Graph All Data Sets (绘图所有数据列) 	 Clear Multi-Data Set Mode (清除多数据列模式)
 Multi-sample Analysis (多样品分析) 	 Add Fit Parameter (添加拟合参数)

Section 5.3 Creating OC Library for Composition or Temperature-dependent materials 创建光学常数库

本例中功能	
 Creating composition or temperature dependent material files (创建成分或温度相关的材料的光学 常数库) 	OC Library Mode
 Opt. Const. Compare Model (OC Compare) (光学常数比较模型) <u>Draw Graph</u> 	• <u>Build Library</u>

Section 5.4 Anisotropic Films 各项异性薄膜

本例中功能	
 Convert to Anisotropic (转变为各向异性) 	• Difference Mode (差异模式)
 Graph Anisotropic Opt. Const. (各向异性光学常数绘图) 	Biaxial Layer
 Graph Anisotropic "Differences" (各向异性光学常数差异绘图) 	

5.1. Map Data and Model Non-Idealities 地貌数据和非理 想



在这个例子中,我们将打开的数据文件是生长有厚 SiO2 膜的 silicon wafer (硅 晶圆)不同位置点的扫描。我们的目的是有效地确定整个晶圆上不同位置的薄 膜性能均匀性,即 SiO2 的厚度和折射率。

Show Map Data 显示地貌数据

在 EXAMPLES 文件夹中打开数据 file "SiO2_Map"。你应该看到一个贯穿圆形 样品中心的 Psi 数据彩图。为了更好地理解显示的是什么,在 graph 面板上右 键点击"Show Symbols"(显示符号)。这将标出各测量位置,如图 5-1。这个 均匀性 Map(地貌)数据是对晶圆 Radial scan(径向扫描)得来。我们可以观 察椭偏参量的均匀性,如果我们想观察感兴趣的薄膜特性,先要进行分析数据。





Selecting a Point from the Map 地貌中选择一个点

如果你对 map(地貌)中任意一点鼠标左击,它会加载该测量位置的光谱椭偏数据到 graph(图形)中。这是选择一个测量点的简易方法以帮助建立一个模型来分析这个 map(地貌)。用你的鼠标选择一个点。Graph(图形)转变为 Psi/Delta,如图 5-2。请注意,Graph 面板的顶部有一个额外的选项"Show Map Data"(显示地貌数据)可用。这允许你去回到 psi 和 delta 的彩色 Map 图。



图 5-2. Map 中某一单点的光谱数据。 通过鼠标左击 Map 中的一点可以得到这个显示图。

Silicon with Transparent Film 硅上的透明膜

虽然这个薄膜是 SiO2,它并不一定是热氧化的。因此,选择章节 3.3 中介绍过的 "Silicon with Transparent Film"作为未知透明膜的模型。打开这个模型,然后点击'Fit'来拟合这个被选择的单点数据。

在拟合 Map 上所有的点之前,我们需要 turn off(关闭) "Global Fit", 否者拟合 会需要很长的时间。拟合结果类似于图 5-3。MSE 相当大,暗示这个模型可能 存在问题。厚膜会有很多振荡干涉,尤其是在短波长。用这个刻度(单位), 很难看出我们的模型是否适合整个光谱。

Wavelength Units - eV 波长单位-eV

为了更好地查看短波长,转换 graph 的"Wavelength Units"(波长单位),用 photon energy (eV)(光子能量,电子伏特)代替 nm。这将扩展 UV 区域,使 振荡干涉间距基本相同。Wavelength(波长)和 photon energy(光子能量)是 倒转的。因此,最大光子能量对应最短波长。要转换为 photon energy,可以使 用快捷键 CTRL-ALT-W,也可以在 *Options* 表单里的 Display Units 面板中将 "Wavelength Units"(波长单位)改为 eV。图 5-4显示了相对光子能量的数据 和模型。为了简单化,我已经关闭了该图的 Double-Y axis(双 Y 轴)。现在 可以清楚地看到在短波长(高 eV)模型数据与实验数据不匹配。这个 Cauchy (柯西)参数被发现有问题。



图 5-3. 使用 "Silicon with Transparent Film" 模型拟合 SiO2 map 中单一数据的结果



图 5-4. 对应 photon energy (eV)的 Psi 数据拟合,以更好地查看在短波长上(大 eV)的差 异。

Fixing Cauchy Dispersion 修正柯西色散

Cauchy(柯西)参数可以很好地描述透明区域上的折射率,但 Cauchy(柯西) 实际上是有一定局限性的。它不能够覆盖非常宽的光谱范围,并且不保持 "physical"(物理)的形状。直到约 4.5eV 的数据,Cauchy(柯西)参数可以 拟合好数据。高于这个范围,色散没有符合正确的干涉振荡。要解决这个问题, 我们可以将 Cauchy 的 B 和 C 项也加入到 Global Fit(这将需要很长的时间)中, 或者选择拟合好的区域,然后慢慢地添加更宽的光谱范围。第二种方法将示范。 首先,选择低于 4.5 eV 的数据。关闭 Global Fit 和 Thickness Pre-fit。因为我们 已经接近最终模型,所以它们不再需要。点击'Fit'。Cauchy(柯西)参数将调 整以更好地匹配这个范围。你的结果应该类似于图 5-5 所示。

对于这个例子,不必寻求你的结果与手册中的结果完全一致,因为你可能选择了均匀性 Map上的不同测量点



图 5-5. 低于 4.5eV 光谱的 Cauchy 拟合

'Set Ranges' 设置范围

接着,将数据的范围扩展到 5.0eV。要添加此额外的范围,让我们尝试使用 Data: > 'Set Ranges'命令。这将允许你键入新的最大 photon energy(光子能 量)。'Set Ranges'对话框如图 5-6 所示。确认最高为 5eV 后,点击'Fit'。继续 增加 0.5eV 增量并拟合数据,直到把所有的数据被绘图。最后的拟合应该如图 5-7 所示。MSE 约为 40,相比之前拟合的超过 200 有显著改善。

Select Data Range
Wavelength Range
Min: 0.731 eV Ma <u>x</u> : 5 eV
Selected Translation Point
Selected Point: X = 0.00, Y = 0.00
Graph Angle: 70.00" 🗸 Graph WVI. 1.638 eV
<u>O</u> k <u>C</u> ancel





图 5-7. 使用 Cauchy 色散拟合整个波长的最后结果

Sellmeier 谢米尔

虽然通过少量的工作,我们使用 Cauchy (柯西)得到了较好的数据拟合。但 它不是为处理如此宽的光谱范围设计的。覆盖宽光谱范围的透明薄膜,可以使 用更好的 Sellmeier (谢米尔)关系式模型。它增加了保持 Kramers-Kronig 一致 性的优点,从而确保了折射率结果的"physical" (合理)形状。 替换模型中的 Cauchy 层,方法为,在模型中 Cauchy 名字上左击鼠标,找到 Dielectrics 目录,选择"SiO2 (Sellmeier)"材料文件来替换 Cauchy。点击 'Generate',产生的初始模型数据应接近实验数据,如图 5-8。接着,设置 SiO2 的厚度以及所有四个 Sellmeier(谢米尔)参数为拟合参量并 fit 数据。您 的 MSE 应接近 30(与使用 Cauchy 拟合时的 MSE 值约 200 和与 40 相比)。 因此,该模型在宽光谱范围上能更好地匹配 SiO2 折射率色散的真实形状。



图 5-8. 对 SiO2 使用 Sellmeier 层的 模型 Generated (产生)数据的结果(拟合前)

Fit Scan Data 拟合扫描数据

现在,我们已用一个从 Map(地貌)上来的单点数据调整好了 model(模型),我们已经准备好拟合所有数据点。请确定 OFF(关闭)以下选项以简化模型:

- the Thickness Pre-Fit (膜厚预拟合)
- the Global Fit(全局拟合)

这两选项都可以在 Model (模型) +**FIT Options** 的部分找到。关闭以上选项 后,在 **Fit**:面板中点击"Fit Scan Data"。

在全扫描数据分析时如果 thickness prefit 和 global fit 处于 On (开启)的状态,时间会相当长。但是,如果整个样品范围内膜特性变化很大,这些选项可能需要重新置为 On (开启)-谨慎的使用 Global fit 并缩小其搜索范围。

所有数据点分析完毕后,其结果将显示在 Fit:面板中,如图 5-9。现在,如果你在任何一个蓝色参数上点击鼠标左键,graph(图形)将显示这个参数的均匀性 Map(地貌)。作为一个例子,Thickness #1 参数被绘制在 graph(图形)中,如图 5-10 所示。



图 5-9. Fit: 面板中显示了扫描数据结果。点击任何列表中的"blue"(蓝色)参数来显示 该参数的 Map(地貌)。



图 5-10. SiO₂ 厚度均匀性 map (地貌)

Model Calculation 模型考虑因素

现在,让我们将注意点回到单点拟合。鼠标在图形中心附近点击。该点光谱数据绘制在 graph 中,并且使用模型对数据进行自动拟合。Psi 和 Delta 匹配得相当好。不过,这个样品可能有更多的信息需要考虑。看看 depolarization(退偏振)曲线,在当前的 MSE 计算中它是没有被包含的。用 CTRL-Z来显示 depolarization graph(退偏振图形),如图 5-11 所示。对于厚的膜,朝着短波长(大 eV)方向上 depolarization(退偏振)逐渐增加是很常见的。此 depolarization(退偏振)是由于 non-ideal(非理想)因素导致的。对于厚膜来 说最常见的 non-idealities(非理想)是膜层厚度的 non-uniformity(不均匀性) 或仪器的 bandwidth(线宽),这两个因素都可以包含在我们的模型中。



图 5-11. 厚 SiO2 膜的 Depolarization (退偏振)曲线。

Model Calculation – Thickness Non-Uniformity 模型 考虑因素-厚度不均匀

在 Model 中+MODEL Options 部分,将"Ideal"(理想)设置为"Include Thickness Non-uniformity"(包含厚度非均匀性),如图 5-12 所示。如果在测 量光斑范围内膜厚有变化,这里将计算对数据的影响。除非系统使用了聚焦光 斑,膜厚不均匀可能性是存在的。按住 Shift 键,将光标放在 Thickness Non-Uniformity 值上,并上下滚动鼠标滚轮。当值约为 2.4%时,模型曲线将较好 地匹配实验 depolarization(退偏振)量,如图 5-13 所示。这个值可以参与拟 合,鼠标右击切换为 Fit 参数并拟合数据。MSE 值应该可以减小到 20 以下 (与不考虑厚非均匀性的约 30 比较)。这是由于改善了 Psi/Delta 的拟合,因 为我们还没有将 Depolarization(退偏振)数据作为计算 MSE 的一部分。

CompleteEASE Input
Model Calculation:
Ideal
Include Bandwidth (eV)
Include Thickness Non-uniformity
Include Bandwidth (nm)
Include Thickness Non-uniformity and Bandwidth(nm)
Include Angular Spread
Include Bandwidth (eV), Thickness, and Angular Spread
Include Bandwidth (nm), Thickness, and Angular Spread
<u>O</u> k <u>C</u> ancel

图 5-12. 模型考虑因素选择项



图 5-13. 在模型中考虑 2.4% 膜厚非均匀时模型得到的 Depolarization (退偏振)数据

Model Calculation – Bandwidth (nm) 模型考虑因素-线宽 nm

接下来,尝试改变"Model Calculation"到"Include Bandwidth (nm)"(包含线宽)。 按住 SHIFT 键,滚动鼠标滚轮,直到初始值匹配 depolarization(退偏振)数 据。然后,拟合 Bandwidt(线宽)。MSE 结果甚至比 hickness Non-Uniformity (厚度不均匀性)时更好(小)。depolarization(退偏振)数据匹配更好,如 图 5-14 所示。这是由于 bandwidth(线宽)和 thickness non-uniformity(厚度非 均匀性)之间的光谱差异。因此,该模型计算似乎是最好的。最终拟合结果接 近 4nm 的线宽可以进一步证实 bandwidth(线宽)的存在,因为这些数据是 M-2000 上测量得来,这个 bandwidth(线宽)是真实合理的。



图 5-14. 模型中包含 Bandwidth (线宽)得到的 Depolarization (退偏振)数据

Include Depolarization Data 包含退偏数据

到目前为止,我们包含 Model Non-idealities 来更好匹配 depolarization 数据,但 在计算 MSE 时,depolarization 数据并没有参与计算。因此,已经表明,nonidealities(非理想)也会更好地匹配 Psi 和 Delta 的形状(因为 MSE 值减少)。 现在,我们将 depolarization 数据计算到 MSE 中。要做到这一点,点击 Model 底部的 <u>Configure Options</u>(配置选项)。此功能是隐藏的,在 Fit Options(拟 合选项)部分,选中"Include Depolarization Data"(包含退偏振数据)选项, 如图 5-15 所示。点击'Ok'。现在,我们还需要在+FIT Options 部分中将此功能 选项设置为 On。在将"Include Depolarization Data"设置为 On之后,再次点击 'Fit'。 MSE 值应进一步减小,而 bandwidth(线宽)与没有 depolarization (退 偏振)数据参与拟合时很接近。作为最后一步,重新拟合 Map(地貌)上所有 数据点。点击'Fit Scan Data'(拟合扫描数据),你应该得到类似图 5-16,图 5-17,和 图 5-18 的 Map(地貌)结果。

当 Model (模型)中包含 Non-Idealities (非理想)时,分析时间会长很多。你 会发现在我们模型中包含 Bandwidth (线宽)后,分析所有的 Map (地貌)数 据点需要相当长的时间。



图 5-15. 点击 Configure Options 来选择隐含菜单"Include Depolarization Data"(包含退 偏振数据)



图 5-16. 使用 Sellmeier 模型并包含 Bandwidth (线宽)的最终 Thickness Map (膜厚地 貌) 结果。



图 5-17. 使用 Sellmeier 模型并包含 Bandwidth (线宽)的最终 MSE Map 结果



图 5-18. 使用 Sellmeier 模型并包含 Bandwidth (线宽)的最终 633nm (1.960eV)处折射 率 Map 结果。

5.2. Multi-Sample Analysis 多样品分析

本例中功能		
•从 Map 数据中选择多点	• 模型: Multi-layer (empty)	
•用 CTRL-SPACE BAR 切换显示	•选择/反选数据列	
● 设置 Symbol (符号) 尺寸	• 缩放 "Map"	
• 所有数据列 Graph (绘图)	• 清除多数据列方式	
• 多样品分析	• 添加 Fit(拟合)参数	

再次,在"mapped"(地貌)数据中,我们将对样品上不同位置的测量点进行分析。这个例子要比前面的例子复杂得多。除了晶圆上 SiO₂镀层外,在基底上有5个图案,这些位置上有另一层 Cr 膜覆盖在 SiO2 薄膜上。Cr 层的名义膜厚分别为 10、15、20、25 和 40 纳米。这些层非常薄,足以让光线穿透到底下的 SiO2 薄膜层。椭偏测量吸收薄膜有几种特殊方法,这也是其中的一种。图 5-19 显示了 Cr 层的位置,以及它们的 nm 为单位的标称厚度。



图 5-19. 样品概述。蓝色区域代表了 100nm 的 SiO2 层。在五个橙色位置, SiO2 薄膜 层上方有额外的 Cr 层, 各位置上标有名义厚度(单位 nm)

Short-Cuts for Mapping Data 地貌数据的快捷键

在讲解这个例子之前,浏览一下操作 Mapping(地貌)数据的快捷键,这对加速分析是有帮助的。下表中列出了我们将在这个例子中使用的重要功能。

表 5-1. 可用于 mapping 数据的快捷键

快捷键	功能
CTRL-在点上点击	选择/反选该点
CTRL-ALT-在点上点击	删除点
CTRL-ALT-SHIFT 在点上点击	显示该点相机图像
	(如果有)
CTRL-SPACE Bar	切换单点数据和 Map

Blank Model 空模型

打开"Cr on SiO2 MAP"数据文件。你会看到前面描述样品的平移扫描数据 - 如 图 5-20 所示。你可以看到在 5 个镀有 Cr 层的位置其 PSI 值要低。为了拟合这 些数据,我们首先需要建立一个模型。因为我们需要加入多个层,让我们尝试 从头开始建立模型。在 Basic 目录下打开"BLANK"模型。这将如图 5-21 所示。 左 Substrate = none 上鼠标左击,然后从 Semiconductor 目录中"Si_Jaw"材料文 件。接下来,点击 Add(添加)命令,并将下一层置于硅衬底上面。作为我们 的第一层,选择一个 Cauchy 柯西层 – 它将作为 SiO₂ 层。设置"thickness", "A", "B",和 "C"为拟合参数。接下来,进入+FIT Options 部分,将 Thickness Prefit 设为 On。这个模型可以适用于没有 Cr 层的任意区域。



图 5-20. "Cr on SiO2 MAP" 的平移扫面图

	- <u>-</u> Z
otions	
Model: Blank (Blank Starting Model)	
Open Save Clear	Op <u>e</u> n Snapshot S <u>a</u> ve Snapshot
Layer Commands: <u>Add Delete Save</u> Include Surface Roughness = <u>OFF</u> Substrate = <u>none</u> Angle Offset = 0.000	
+ MODEL Options	
+ FIT Options	
+ OTHER Options	
Configure Options Turn Off All Fit Parameters	

图 5-21. 从 Blank 模型开始

Set Symbol Size 设置符号大小

在继续之前,为了更好地观察测量点的位置,让我们增加符号的大小。在 graph 面板上鼠标右击,如果"Show Symbols"(显示符号)没有被选中,现在 选中它。从右键菜单中,选择"Set Symbol Size"(设置符号的大小),如图 5-22 所示。将符号的大小从默认值 1 增加至 2 或 3。图 5-23 所示的图形符号的 大小已设置为"3"。



图 5-22. 在 graph 的右键菜单中,选择 "Set Symbol Size" 选项



图 5-23. 符号大小为"3"时的图形

Zooming on Map 缩放地貌

虽然这图示不是太复杂,在同一样品上测量上百甚至上千个点的可能性还是有的。在这种情况下,对特定的区域进行缩放是有用的,这样可以更好地分离出特定的点。出于演示的目的,用鼠标选取(框选)样品的某一区域,如图所示。放大区域如图 5-25。要恢复到所有的点,只需 graph 区域鼠标右击并选择"Zoom All"。



图 5-24. 在 graph 上想要放大的区域用鼠标框选(拖曳)。一个长方形显示了你将要放 大的区域。



图 5-25. Map 上放大了的区域

Selecting Multiple Points on a Map 地貌上选择多点

当我们准备好了拟合 SiO₂的模型后,下一步是,鼠标点击 Cr 图形外任意点(蓝,紫,墨绿的位置)。在这些点上的数据将打开并自动拟合,如图 5-26 所示。接下来,选择"Show Map Data"以返回到 Map 图形。为了同时绘图和拟合多点,我们将选择多个点的数据 - 所有这些点只包含 SiO2 薄膜。要选择多个点,按住 Ctrl 按钮同时鼠标左击不同区域上的点。在每个被选中的数据点上会有大的灰色圆圈,如图 5-27 所示。

本例中可以使用 eV 作为光谱单位 – 与前面的例子比有一个反转。我已将单位转变回 nm。



图 5-26. 使用 Cauchy 对只有 SiO₂ 膜的单点拟合



图 5-27. 多点被选中时的图形显示,可以看到有一个大的灰色园围住这些点。(左上角 部分的四个点)。

Changing the Graph 改变图形

要切换"map"图形到各自的单点光谱数据图,你可以反选"Show Map Data"菜单,或者在按住 CTRL 键同时按空格键。这也可以切换回"map"显示。多试几次。

在光谱数据显示中,我们现在选择了多个点,因此有一个新的部分来描述每个 选定点的位置,另外有一个选择框来确定同时显示所有数据还是只显示其中的 一个点的数据。这显示在图 5-28 中。在此之前,我们拟合一个单点数据时的 MSE 值接近 5。再次点击'Fit',现在 MSE 为 22。这是因为所有的 4 个点使用 同一个模型拟合,而这个相同的模型不能匹配所有的测量点(即每个点的厚度 应该不相同)



图 5-28. 当多个数据点被选中,你可以选择显示某个点,或选择"Graph All Data Sets" 来同时显示所有。

Graph All Data Sets 所有数据绘图

被选定的四个点之间应略有不同。数据差异很容易通过同时作图观察到。在继续之前,为了简化图形,关闭 double-Y axis (双Y轴)显示,并只选择 65 度的数据(在'Set Ranges'(设置范围)菜单,如图 5-29 所示)现在,可以选择 "Graph All Data Sets"选项,你可以看到四个不同测量点位的 Psi 曲线,图 5-30。

Select Data Range
Wavelength Range
Min: 192.2 nm Mag: 1697.1 nm
Selected Angles
55.00° 65.00° 75.00°
Select <u>A</u> ll Angles
Selected Translation Point
Selected Point: X=-4.67, Y= 4.67
Graph Angle: 65.00° 🗸 Graph Wvl. 756.8 nm
<u>Qk</u> <u>Cancel</u>

图 5-29. 选择'Set Ranges'并只选择 65 度的测量数据



图 5-30. 选择的所有 4 个点的 Psi 曲线图

Selecting and Unselecting Data Sets 选择和反选数据列

在 graph 上方的"Data Set"字上有一个右键菜单,可以进行 selecting (选择), unselecting (反选)和 clearing data sets (清除数据列)等操作。此菜单如图 5-31 所示。测试这些菜单的一个很好方法是,选择各个数据并拟合其厚度。如 果你只选择了单一的数据点,你的 MSE 应接近 6。此外,在数据列的下拉菜 单中,你可以查看哪个(些)数据当前被选中。请注意图 5-32,所有未选中点 的标记是这样的。



图 5-31. 在 graph 上方的"Data Set" 文字上鼠标右击,访问额外的选项 selecting (选择), unselecting (反选), deleting (删除),和 clearing data sets (清除数据列方式)


图 5-32. 显示了下拉菜单中 Not selected (未选择)的样子

Multi-sample Analysis 多样品分析

到目前为止,我们对联合组里选定的四个点进行了各自独立的数据拟合。然而, 当我们将它们一起拟合时,仅有一组拟合参数对应所有数据。Cauchy(柯西) 参数应该没有问题,因为所有的薄膜是相同的,但是每一个点的膜厚是不相 同的。CompleteEASE中一个高级选项,允许多个数据同时拟合,模型中的有 些拟合参数保持一致,而其他一些拟合参数允许对应不同数据各不相同。虽然 对于四个长有 SiO2 薄膜的点来说,并不能从这个高级选项中受益,对这些点 的示范,将有助于了解应用于 Cr 膜前的基本概念 – Cr 膜分析将受益于多样品 分析。

要使用此方法,在 Model 窗口底部并选择 <u>Configure Options</u>。在"Model Options"(模型选项)部分中,选中"Multi-Sample Analysis"(多样品分析)。 如图 5-33 所示。

Show Model Options	
Available Options	Description
Model Options Model Options Wavelength Shift Ambient > 1 Delta Offsets Azimuthal Rotations Multi Sample Analysis Adv. Bandwidth Options Parameter Coupling Use Previous Results Scattering Factor Patterning Include All	Adds multiple sample analysis capability to the model (which requires multiple appended data sets).
	QK

图 5-33. 在 Model Options 部分勾选 "Multi-Sample Analysis" 选项

接下来,在+Model Options 部分,找到并展开新的可用的+Multi-Sample Analysis 选项,点击 Add Fit Parameter (添加参数)并选择 Thickness #1。每个 被选择数据点的厚度将显示在之下的列表中(作为一个拟合参数)。现在,在 "Data Set"上鼠标右击,并选择"Select ALL Data Sets"(选择所有数据列)。这 将使我们能够在 Multi-sample analysis 部分各自拟合 4 个位置的膜厚。Cauchy (柯西)参数保持拟合-- 但对于所有数据是相同的。点击'Fit'。图 5-34 显示 了经过多样品分析的最后结果。图中可以看出模型数据匹配所有 4 条曲线 – 因 为有四个不同的膜厚及一套相同的 Cauchy (柯西)参数参与了拟合。



图 5-34. 四个不同位置 Si 上 SiO2 薄膜的多样品分析结果。使用一套相同的 Cauchy 拟 合参数值,而在模型中+Multi-Sample Analysis 部分可允许 SiO2 层的厚度各不相同。

Clear Multi-Data Set Mode 清除多数据列模式

对于四个不同位置 SiO2 薄膜进行 multi-sample(多样品)分析后, 拟合结果的 Cauchy 值应该是很好的最终结果。我们现在可以将注意力转移到镀 Cr 区域。要删除当前选中的 4 个只有 SiO₂薄膜的数据, graph 窗口上方"Data Sets"上鼠标右击,并选择"Clear Multi-Data Set Mode"(清除多数据列模式)。这将回到单一数据。点击 CTRL-SPACE BAR 来显示 Map 视图。

在开始之前,我们要关闭 SiO2 薄膜的拟合参数 - 包括厚度和 Cauchy 值。我们将选择镀 Cr 的区域,但我们不希望使用当前模型尝试"automatically"(自动)数据拟合-因为我们还没有添加 Cr 薄膜层。要关闭"auto"(自动) 拟合模式,在 Fit 面板中鼠标右击,反选顶部的"Auto Fit"(自动拟合)选项。如图 5-35 所示。现在,我们可以选择一个点,软件不会自动拟合这个点的数据。接下来,在图的中心选择一个点(如图 5-36 所示)。



图 5-35. 在 Fit 面板中鼠标右击,并关闭 (清除选择框) "Auto Fit"



图 5-36. 选择图中的中心点(显示为被灰色围绕)

图 5-37 显示了这个数据,为了同时显示 Psi 和 Delta,重新选择了 double-Y axis(双 Y),为显示中心点数据与单层 SiO2 薄膜模型生成数据的差异,用模型产生了数据。

拟合前,我们需要重新选择所有角度的数据

为了拟合这个数据,我们需要在我们的模型再添加一层。点击 Add,在 SiO₂ 薄膜层上方添加 Basic 目录下的 B-Spline 层。展开 B-Spline 层,然后在 Starting Mat = none 上点击。在 Metal (金属)目录中选择 Cr.mat。以出版在 Palik's Handbook 上的 Cr 光学常数为参考,通过计算,B-Spline 上点将与之匹配。按 住 SHIFT 键并在 thickness (厚度)上滚动鼠标滚轮,直到与数据相匹配。不 幸的是,这个薄膜的光学常数与"书"中的值不相同。这在金属中很常见,不 同的沉积方法和加工条件将导致不同的光学性质。滚动厚度到 40 纳米,这是 在这个位置上 Cr 层的名义厚度。厚度为 40nm 时模型产生的数据与实测数据 比较在图 5-38 中。



图 5-37. 中心点数据与单层 SiO2 膜模型数据比较



图 5-38.40nm Cr 层的模型数据(B-Spline 中初始材料是 Palik's 中的 Cr)与中心点实测数据的比较。

因为结果不是很接近,我们可以对 B-Spline 参数 global fit 或者先固定厚度。我 们选择后者,因为我们已知 Cr 膜的名义厚度。将厚度固定在 40nm 上,接下 来点击 'Fit'。数据拟合相当不错(见图 5-39),MSE 的值约为 4。然而,在 模型中的 3.5eV 处有一个跳跃,匹配不好。这是底下 SiO2 膜的一个 "interference enhancement"(干涉增强)。只有正确的 Cr 膜厚度才能匹配好这 个区域。现在将 Cr 厚度也置为拟合。最后结果显示在 图 5-40 中,整个光谱都 很好匹配,MSE 值约为 2。



图 5-39. B-Spline 厚度固定在 40nm 时的中心点拟合。由于底下 SiO2 膜的 interference enhancement (干涉增强)导致接近 3.5eV 处没有匹配。正确的 Cr 厚度 将使这个区域也匹配好。



图 5-40. 中心点最后拟合

Multi-Sample Analysis 多样品分析 (revisited)

现在我们已经建立了一个拟合中心点的模型- 它是 Cr 薄膜/SiO2 薄膜/Si 基底。 接着,用这个模型试着拟合镀有 Cr 层的所有点。在 map(地貌)上,按住 Ctrl 的同时用鼠标左键选取每个点。被选中的点将有灰色圆圈围绕,如图 5-41 所示。

接下来,切换到光谱图(CTRL-空格键),关闭 double-Y axis(双Y轴),设 置范围仅 65 度。这使得比较曲线更方便,如图 5-42 所示。单从数据看,我们 可以从数据的偏移量上估算最厚 Cr 膜层和最薄 Cr 膜层。最厚点是在中心(紫 色)。随着数据偏移, Cr 层变薄。

各点的排序取决于选择的顺序。因此,你的颜色顺序可能与这里的图形不一样。



图 5-41. 在 SiO2/Si 上覆盖有 Cr 层的所有 5 个点选中后的地貌显示

Spectroscopic Data At Multiple Positions



图 5-42. 各位置上的 Psi 光谱曲线图比较,只选择了 65 度数据。

现在,让我们准备 Multi-Sample Analysis(多样品分析)。在+MODEL Options 部分,您会看到 Thickness #1 参数仍处于选中状态(图 5-43(a))。点击 Delete All Parms 按钮来删除 Thickness #1,因为我们先使用相同的 SiO2 厚度并值允许 Cr 膜厚变化。接下来,点击 Add Fit Parameter 并选择 Thickness #2(图 5-43(b))。



图 5-43. (a) 点击 Delete All Parms 从 multi-sample analysis 中删除 Thickness #1 参数 (b) 接着, 点击 Add Fit Parameter 并选择 Thickness #2。

在开始拟合前,我们需要"tune"(调整)不同的厚度值以更接近其最终的结果。 为此,反选"Graph All Data Sets"。现在,选取下拉框中的数据,按 Shift 同时, Multi-Sample Analysis 部分对应点厚度上滚动鼠标滚轮,直到生成的曲线较好 地匹配对应的实验数据曲线。要更"fine"(精细)地调整厚度,按住 SHIFT-CTR L 同时滚动鼠标滚轮。这将减少厚度增量。一个例子如图 5-44,其中只有 5 号数据点选中,第 5 个 thickness 被滚动厚度来更好地匹配曲线。



图 5-44. 在 model 的 Multi-Sample Analysis 部分通过滚动厚度来匹配 5 号数据点。

在各个数据点分别匹配好后,再次选中"Graph All Data Sets"。你的图看起来应该类似于图 5-45。您应该注意到,当你滚动滚轮滚动厚度匹配曲线时,薄的层的曲线并不完全匹配。这是对的,因为厚 Cr 层的光学常数与薄 Cr 层的光学常数并不完全一致。事实上,我们稍后会在多样品分析中删除这一点。现在,继续点击'Fit'。所有五个数据点同时拟合,使用单一 B-Spline 层描述相同的 Cr 的光学常数,Cr 层的厚度不同并各自拟合。拟合结果应该如图 5-46 所示。 MSE 值应略低于 20。



图 5-45. 在多样品拟合之前,通过滚动 5 个数据的厚度值,得到各自厚度的预估值后的 初步数据匹配



图 5-46. 多样品分析拟合所有 5 个位置的结果。

现在,让我们从 multi-sample analysis(多样品分析)中删除膜厚最厚的数据。 要做到这一点,在 grap 上方的下拉列表中选中位置在中心点的数据。接下来, 在"Data Set:"上鼠标右击,并选择"Un-Select Data Set"(取消选择数据列)。中 心点的数据曲线将消失-只留下四条数据曲线及其相应模型曲线。点击'Fit', MSE 应该从上述 19下降到不足 14。中心点(厚 Cr 膜)与较薄 Cr 层有不相 同的光学常数,因此最好不加入多样品分析中。但是,问题并不仅仅局限于最 厚层。原来, Cr 层光学常数即使在不同薄层之中,也是变化的。 注意: 仅"un-selecting"(反选)值得怀疑的中心点,多样品分析中数据列是保持完整的。相反,如果我们删除了这一点,多样品分析中的厚度列表序号将指向错误的样品位置,这样的话,我们需要重新调整这些初始值

导致这种不同的原因有:微结构,可能的表面粗糙及氧化。为了验证这一理论, 在模型中将 surface roughness 设置为 On,并在 Multi-Sample Analysis 列中将 surface roughness 作为另一个拟合参数添加进来。这将允许每个点有不同的粗 糙度。点击'Fit', MSE 下降到近 9。随膜厚的增加表面粗糙的厚度增加(如图 5-47 所示)。有了这个模型,我们现在可以添加最厚 Cr 层的数据回到到模型 中,看看这种趋势(增加粗糙度)是否能较好地匹配中心点并有一致性(我们 预期的更大粗糙度)。果然,所有五点的拟合 MSE 值下降到 12,其结果如图 5-48 所示。在这一点上,深入的研究将可以用其他技术继续测试-如原子力显 微镜 – 对于这个样品,看看粗糙度结果是否确实如此。



图 5-47. 在 multi-sample analysis 中加入了 roughness 后 4 个薄 Cr 膜的拟合。注意随 Cr 膜厚度增加,拟合结果的粗糙层厚度也增加

- Multi Sample Analysis

<u>Add Fit Par</u>	<u>ameter</u> <u>Delete A</u>	<u>ll Parms</u>
<u>Data Set</u>	<u>Thickness # 2</u>	<u>Roughness</u>
<u>#1</u>	<u>35.59 nm</u>	<u>7.37 nm</u>
<u>#2</u>	<u>26.01 nm</u>	<u>3.02 nm</u>
<u>#3</u>	<u>20.30 nm</u>	<u>2.27 nm</u>
<u>#4</u>	<u>9.84 nm</u>	<u>0.86 nm</u>
<u>#5</u>	<u>15.16 nm</u>	<u>1.44 nm</u>

图 5-48. 拟合所有 5 点的数据,显示随 Cr 层厚度增加其(roughness)表面粗糙厚度增加。

作为这个数据的最后一个练习,点击'Set Ranges'(设置范围),并将所有的角度选择回来。注意,当多个数据选择时(测试数据超过1个角度),所有数据 绘图时具有相同的颜色。例如,对于数据#1的所有曲线都是洋红色,数据#2 所有曲线为蓝色。这有助于它们分组,并减少绘图时不同颜色的总数。重新拟 合之前,将 SiO₂厚度置为拟合参数,并且在 Multi-Sample 列中添加 Thickness #1 拟合参数。在所有的测量角度被选择并且有三种不同的厚度包含在 Multi-Sample Analysis(多样品分析)中,点击'Fit',结果应该如下图所示。你会发现,中心的 SiO2 厚度比其余4 个位置要大。当然,这点在另一个没有镀 Cr 膜的晶圆上得到了验证。因此,中心位置较大的 SiO₂厚度是可以预料的。最后的结果显示在图 5-49 中。



图 5-49. 在 multi-sample 中包含 Cr, SiO2, 和 Roughness 厚度,对 5 个位置拟合所有角度数据的最后拟合结果。

5.3. Creating OC Library for Composition or Temperature-dependent materials

这个例子中的功能	
Creating composition or temperature dependent material files(创建组分 或温度相关库文件)	 OC Library Mode (光学常数库模型)
Opt. Const. Compare Model (光学常数比较模型) Draw Craph (画图)	• <u>Build Library</u> (建库)

在这个例子中,我们将演示如何创建一个 composition (组分)或 temperaturedependent (温度相关)的光学常数库。此过程可用于创建任何不同系列样品的 特殊材料文件,光学特性随组分或温度(或其他材料特性或工艺条件)不同而 产生的系统变化。在创建过程中,B-splines 层将用来平滑各个已知 composition (组分)或 temperature(温度)的光学常数谱。然后基于 Snyder et al.³临界点转移算法,使用插值算法来创建库文件。在 (critical point shifting algorithm)临界点转移算法中,参考光谱波长偏移来排列临界点特征后,依据 最近的参考介电函数谱的加权总和,在任意组分或温度上的介电函数被评估。 CompleteEASE 使用非线性回归分析,通过自动确定波长位移多项式(描述与 组分/温度相对应的的临界点路径)简化这个过程。

为创建一个组分或温度变化材料文件,其全过程包括:获得已知成分或温度的 不同系列样品的光学常数。这个例子将不示范这个初始步骤,因为对于各个不 同薄膜的分析过程类似于前面的例中的讲述。对于一个特定组分/温度的样品, 成功建模实验数据并获得准确的光学常数后,保存每个文件为表列光学常数。 在这个例子中,通过拟合不同 germanium compositions (x)(Ge 组分)的系列膜 层,我们有了 Si_{1-x}Ge_x的系列材料文件。实际组分测定使用其他手段 - 在这个 案例中是 XRD(X 射线衍射)。因此,我们现在有已知不同 Si_{1-x}Ge_x组分的各 光学常数(n,k)谱。

在开始这个例子前,在 *Options* 主菜单中,改变波长单位为"eV",改变光学常数单位为"el & e2"。

Doc-To-Help Standard Template

Introduction 简介 • clxxx

³ P.G. Snyder, J.A. Woollam, S.A. Alterovitz, and B. Johs, "Modeling Al_xGa_{1-x}As Optical Constants as Functions of Composition", *J. Appl. Phys.* **68** 11 (1990) 5925.

Opt. Const. Compare Model 光学常数比较模型

为开始这个例子,在 Advanced(高级)目录中打开"Opt. Const. Compare"模型。 该模型应该如图 5-50 所示。点击 <u>ADD MATERIAL</u>(添加材料)七次添加七个 层到模型中。每个对应层保存着特定的不同 composition(组分)Si_{1-x}Ge_xd的光 学常数。在每一层的 <u>none</u>上点击并将相应材料文件添加进来。本例中在 Examples 目录下有 10 个 Si_{1-x}Ge_x材料文件,这些文件是对已知组分(用 XRD 确定)的系列薄膜测量得来的。此外,我们可以使用晶体硅和锗作为这个文件 的结束点。每个材料文件的相应组分列在表 5-2 中。

Model: Opt. Const. Compare (OC Compare)
Ogen Save Clear
ADD MATERIAL CLEAR WM Range = 1.632 eV - 4.593 eV
of Wvls = <u>300</u>
Graph Type = <u>e1 and e2</u>
Fit Type = e1 and e2
OC Library Mode = <u>OFF</u> Show Birefr. = <u>OFF</u>
Ref. Material = <u>none</u>



材料文件名字	GERMANIUM COMPOSITION % (X)
Si_jaw.mat	0% (x=0.000)
SiGe-1.mat	5.2% (x=0.052)
SiGe-2.mat	9.8% (x=0.088)
SiGe-3.mat	15.5% (x=0.155)
SiGe-4.mat	20.4% (x=0.204)
SiGe-5.mat	26.3% (x=0.263)
SiGe-6.mat	31.9% (x=0.319)
SiGe-7.mat	37.1% (x=0.371)
SiGe-8.mat	42.3% (x=0.423)
SiGe-9.mat	49.3% (x=0.493)
SiGe-10.mat	53.9% (x=0.539)
Ge.mat	100% (x=1.000)

表 5-2. 这个例子中各 Si_{1-x}Ge_x 材料文件的组分

在这个例子中,加入 Silicon, SiGe-2, SiGe-4, SiGe-6, SiGe-8, SiGe-10,和 Germanium (在上表中绿色部分)7层。为了给每个层设置组分,你必须 ON (开启)"OC Library Mode"。为每层键入相应的组分,如图 5-51 所示。可以 将所有层的温度保持在 25 摄氏度。如果我们做一个 temperature dependent (温度相关) 文件,我们将对应调整每个文件的温度。

ADD MATERIAL CLEAR

Wvl. Range = 1.632 eV - 4.593 eV# of Wvls = 300Graph Type = $\underline{e1}$ and $\underline{e2}$ Show Difference = OFFFit Type = $\underline{e1}$ and $\underline{e2}$ OC Library Mode = ON Show Birefr. = OFFMaterial = $\underline{Ge} = x = 1.000 \text{ t} = 25.00 \text{ °C}$ **DELETE** Material = $\underline{sige-10} = x = 0.539 \text{ t} = 25.00 \text{ °C}$ **DELETE** Material = $\underline{sige-8} = x = 0.423 \text{ t} = 25.00 \text{ °C}$ **DELETE** Material = $\underline{sige-6} = x = 0.319 \text{ t} = 25.00 \text{ °C}$ **DELETE** Material = $\underline{sige-4} = x = 0.204 \text{ t} = 25.00 \text{ °C}$ **DELETE** Material = $\underline{sige-4} = x = 0.204 \text{ t} = 25.00 \text{ °C}$ **DELETE** Material = $\underline{sige-2} = x = 0.088 \text{ t} = 25.00 \text{ °C}$ **DELETE** Material = $\underline{sige-2} = x = 0.088 \text{ t} = 25.00 \text{ °C}$ **DELETE** Material = $\underline{sig-3} = x = 0.000 \text{ t} = 25.00 \text{ °C}$ **DELETE** Material = $\underline{sig-3} = x = 0.000 \text{ t} = 25.00 \text{ °C}$ **DELETE** Material = $\underline{sig-3} = x = 0.000 \text{ t} = 25.00 \text{ °C}$ **DELETE**

Build Library Resolution (eV) = 0.050 Spectra Shifting Parameters

图 5-51. OC Compare model (OC 比较模型)为SiGe 不同组分薄膜建库

在使用这些参考文件构建 OC Library(OC 库)之前,设置与材料文件相相匹配的波长范围。对于 SiGe 材料文件,光学常数的测定范围是 248nm 到1240nm(1 eV 到 5 eV)。此外,有"# of Wvls"可能需要改变,使 B-Spline 在这个宽光谱范围内更准确地匹配参考文件。原始材料文件包含约 540 个不同的波长。因此,我设置"# of Wvls"为 500 - 尽管这将显著增加计算需要的时间量。准备就绪后,点击 Build Library,,将出现如图 5-52 所示 graph(图形)。在这个图中,彩色曲线为指定组分的各参考光学常数,而黑色虚线是参考材料中光谱插值及中间组分插值。因此,每个彩色图形应匹配相应的虚线黑色曲线。额外的虚线黑色曲线可以证明 "shifting" algorithm (偏移算法)是否工作。



图 5-52. 创建 SiGe OC Library (光学常数库) 后的结果

Draw Graph 画图

图形看上去可能有些拥挤,但你可以通过选择 model 窗口底部 Draw Graph 中的不同选项来改变图形的显示。点击 e1 & e2 选项将打开如图 5-53 对话框。图 5-54 和图 5-55 分别为本例中 e1 only (仅 e1)及 e2 only (仅 e2)的光谱图。此外,图形可以显示 Shifted Spectra (光谱偏移)和 Wvl Shift (波长偏移)功能,以帮助评估组分库是否创建成功。对于高级用户,Library Resolution (库分辨率)和 Spectra Shifting (光谱偏移)参数可以修改,如图 5-56 所示。

CompleteEASE Input	X
Select the graph type	81
e1 & e2	
e1 only	
e2 only	
Shifted Spectra	
WVI Shift Function	
OK	Cancel

图 5-53. 创建 SiGe OC Library (光学常数库) 后的 Graph (图形) 类型选择



图 5-54. 创建 SiGe OC Library (光学常数库) 后仅显示 el



图 5-55. 创建 SiGe OC Library (光学常数库) 后仅显示 e2



图 5-56. 高级功能的 OC Library 定制算法,包括 spectral shifting (光谱偏移)参数和 eV 为单位的分辨率。

为了进一步评估库的算法是否成功,你可以对每个图形进行放大。图 5-57 显示了已放大的 SiGe 薄膜 e2 吸收峰。可以看出,随 Si 组分的增加,吸收峰向高能量方向移动。



图 5-57. SiGe 不同组分的 e2 吸收峰放大显示,随着 Si 组分的增加,在临界点处,朝着 高能量方向,吸收峰有显著的偏移

Save OC Library 保存光学常数库

成功计算了一个组分或温度相关的光学常数文件后,在 Model 面板的底部点击 Save OC Library (保存光学常数库)。在以后的数据拟合中,这个材料文件 就可以使用了。为了演示这个文件的样子,以及它如何工作,请点击 "Reference Material = <u>none</u>",它是 OC Compare 模型中的最下面一层。添加新 创建的材料文件到此项中。改变图形显示到到 e2 only (仅 e2),并用鼠标滚 轮滚动这层参考材料的 composition (组分)。随着组分的变化,通过与参考光 学常数的比较,您很容易看到光学常数的偏移。图 5-58 显示的是其中的一个 图形,它的组分是 x=0.75,它处于跨度最大的两个参考值中间,可以看出正确 的偏移。



图 5-58. 新创建的成分相关的文件作为参考材料已被添加,通过组分变化与原始参考材料进行比较

5.4. Anisotropic Films 各向异性薄膜

这个样品的功能	
•转为 Anisotropic (各向异性)	• Difference Mode (差异模式)
 Graph Anisotropic Opt. Const. (各向异性光学常数绘图) 	• Biaxial 层
Graph Anisotropic "Differences"	
(各向异性差异绘图)	

在这个例子中,我们将允许一个层有各向异性的光学常数,垂直于样品表面的 折射率与样品面内折射率不同。这在许多聚合物薄膜很常见,这是由于沿特定 方向的加工处理导致的。

首先,从 Examples 目录打开"Aniso-Organic on Si"数据文件。这个数据应如图 5-59 所示。为简单起见,关闭 Double-Y(双Y轴),并选择查看 Psi 曲线。 Oscillations(振荡)表明,在测量光谱范围内这层薄膜是透明的。打开"Si with Transparent Film"模型并点击 Fit。拟合结果应该如图 5-60 所示。



图 5-59. Si 基底上各向异性有机薄膜的 SE 测量数据。



图 5-60. 使用标准透明薄膜模型拟合各向异性薄膜的结果。

经仔细辨认, 75度的数据显示一个了常见的各向异性薄膜的"signature"(特征)。各向异性薄膜的 interference oscillations(干扰振荡)往往会"倾斜", 振荡峰一侧的曲线会比另一侧更高些。图 5-61 中各向异性薄膜的 75 度测量曲 线示范了这一点。红色曲线为各向同性薄膜。绿色的振荡峰右侧(红外方向) 曲线要高于左侧(紫外方向)曲线。这表明是一个 Nz > Nxy 的各向异性薄膜。 蓝色的振荡峰右侧(红外方向)曲线要低于左侧(紫外方向)曲线。这表明是 一个 Nxy> Nz 的各向异性薄膜。



图 5-61. 模拟的各向异性透明薄膜对曲线的影响,分别为Nz > Nxy、Nxy > Nz 和各向 同性数据的比较。

Convert to Anisotropic 转变为各向异性

为编辑 Cauchy(柯西)层,在 <u>Cauchy Film</u>上鼠标右击访问右键菜单。从列表 中选择"Convert to Anisotropic"(转换为各向异性)。Cauchy(柯西)层现在转 变为名为"Biaxial"(双轴)的新层的嵌入层。"Biaxial"(双轴)层可以保持 Nx, Ny,和 Nz 各不相同。实际上,该层可以描述所有类型的 anistropic(各向异性) 薄膜。在 Biaxial(双轴)层内,您可以选择 Uniaxial(单轴)或 Biaxial(双轴) 各向异性。在我们的例子中,我们将使用 Uniaxial(单轴)各向异性,因为为 了研究样品可能的 Biaxial(双轴)各向异性,需要更高级的测量。这将在以后 的例子中详细介绍。



图 5-62. 在 Cauchy Film 上鼠标右击来"Convert to Anisotropic" (转变为各向异性)

Biaxial Layer 双轴层

Biaxial(双轴)层中两种不同的方式,这两种方式都适用本例。所不同的是,使用 Difference Mode = OFF(关闭差异模式),如图 5-63,还是使用 Difference Mode = ON(开启差异模式),如图 5-64。



图 5-63. Biaxial 层设置为Uniaxial anisotropy (单光轴各向异性) 且为Difference Mode OFF (差异模型关闭)。



图 5-64. Biaxial 层设置为 Uniaxial anisotropy (单光轴各向异性) 且为 Difference Mode ON (差异模型开启)

当使用 Difference Mode = OFF(差异模式关闭)时,每个方向上使用各自的层 来描述。在我们的例中,每个方向上注入了 Cauchy(柯西)层,因为这是我 们的(转变前)初始层。该层可以方便的设成 B-Spline, Gen-osc,或这些层的 混合。

当使用 Difference Mode = ON(差异模式开启)时,x方向被定义为材料层, 其他层用展开的 Cauchy 色散式的参数差异 dZ(z-差异)来描述,这些层光学 常数通过差异值和 x-方向上的光学常数的求和算法得到。当拟合对不同方向上 折射率差异很敏感,而对折射率绝对值不是很敏感时,这种方法相当有用。

在这个例子中,将 Difference Mode 置为 ON,然后在 dZ_A 上用鼠标滚轮滚动。 如果你将此参数滚为正数,模拟的曲线看起来比各向同性的拟合(在错误的方 向倾斜)更糟。但是,如果你将 dZ_A 参数滚为负值,曲线变得更好的匹配。 将 dZ_A 和 dZ_B 设为拟合参数。确认 Cauchy 参数和厚度已设置为拟合参数。 因为我们已经接近最终答案,将 Global Fit 和 Thickness Prefit 置为 off(关闭)是 明智的做法。最终的结果应该如图 5-65 所示。



图 5-65. 在 Difference Mode = ON 时的 Anisotropic (各向异性) 拟合。

现在,在 Biaxial 层上鼠标右击,有两种选择来显示光学常数,如图 5-66 所示。 若果你要看某一方向上的光学常数,可以在各自的层材料上鼠标右击,如图 5-67 所示。当然只在 Biaxial 层中 Difference Mode 为 Off 时适用。最后,如果 你想要对不同方向的折射率差异绘图,可以在 Biaxial 层上鼠标右击并选择 "Graph Layer Optical Constants (anisotropic differences)"(光学常数绘图,各向 异性差异),如图 5-66 所示。本例的绘图如图 5-68 所示。



图 5-66. 在 Biaxial 层上鼠标右击选择 graph layer optical constants (光学常数绘图)(如 图显示) 或 graph the "Anisotropic Differences"(光学常数差异绘图)

			- d 🛛
Options			
Model: Si with	Transparent Film		
Open	Save Clear	Op <u>e</u> n Snapshot	S <u>a</u> ve Snapshot
Layer Com	mands: Add Delete Save		
Include Sur	face Roughness = <u>OFF</u>		
- Layer # 1 =	Biaxial Thickness # 1 = 1181.3	<u>0 nm</u> (fit)	
Type =	<u>Uniaxial</u>		_
Optical	Constants: Difference Mode = 🤇	DEE	
+ Ex =	Cauchy Film		
+ Ez =	Graph Layer Optical Constants		
Euler Ar	Rename Laver and Fit Parameters		-
Substrate =	Save Laver Optical Constants		
Angle Offse	Paramatoriza Lavor		
+ MODEL Op	View Laver Commont		•
	view Layer Committent		

图 5-67. 当 Difference Mode 为 Off 时,各向异性"biaxial" 层下描述不同方向上的材料层 文件可以分别鼠标右击来显示其光学常数。



图 5-68. 这个例子的"Anisotropic difference"(各向异性差异)绘图

6. 数据分析 4 – In Situ 原位数据

本章包含与 *in situ* (原位/在线) 相关的数据分析例子。第一个例子讨论的是使用"Multi-Time Slice"(多时间片)模型分析,它常常用于生长或蚀刻动态测量的数据分析。另外,我们也演示了使用 Growth Rate(生长速率)和 Optical Constants model(GROC)(光学常数模型),当薄膜与要求相匹配时(持续生长速率和光学常数的吸收膜)应用非常方便。

下面列出了本章的例子,伴随着 Complete EASE 中于之相关的主要功能的讨论。

Section 6.1 In Situ Data Analysis 原位数据分析

本例中的功能	
• 查看单独的 time-slices (时间片)	• 'Dynamic Fit' (动态拟合)
 Selecting multiple-time slices from dynamic scan 从动态数据中选择多个片段 	 Multiple-Time Slice Analysis 多时间片段分析

Section 6.2 Growth Rate and Optical Constants 生长速率和光学常数

本例中的功能	
GROC Model	• Virtual Interface(虚拟界面)

6.1. In Situ Data Analysis 原位数据分析

本例中的功能		
 查看单独的 time-slices (时间片) Selecting multiple-time slices from 	 'Dynamic Fit'(动态拟合) Multiple-Time Slice Analysis 	
dynamic scan 从动态数据中选择多个片段	多时间片段分析	

原位数据是不同时间上的椭偏测量。这些数据往往包含了薄膜的变化过程。模型可能需要描述薄膜厚度,光学常数,组分,甚至温度等在不同时间上的变化。导航、处理和分析原位数据与均匀性 maps(地貌)数据及 multi-sample analysis(多样品分析)的各分析过程有许多相似之处。因此,在这个例子之前回顾下之前的例子是有帮助的。

这个例子被分为两部分。首先,我们将讨论原位的时间相关数据集中导航和选取数据。这些主题对任何用户适用。其次,我们将练习原位数据的 multi-sample analysis(多样品分析法),以及时间相关的数据分析过程。由于这一数据来自非晶硅薄膜,需要分析方法中包括 B-Spline 和 Genosc 层,在开始这个例子前,应该详细回顾那些例子。

Short-Cuts for Dynamic Data 动态数据的快捷键

在开始这个例子之前,了解处理动态数据的快捷键是有帮助的。下表列出了将 在本例中使用的重要功能的快捷键。

快捷键	功能
点击 Dynamic Graph	打开该时间点的光谱数据
CTRL-Click Dynamic Graph	选择该时间点的光谱数据
	(重复点击可选多时间数据)
CTRL-SPACE Bar	数据和光谱数据间切换

表 6-1. dynamic data (动态数据)的快捷参考

Navigating In Situ Data 原位数据导航

在 Examples 目录中打开数据"a-Si Grow Sim.iSE"。时间相关的数据将如图 6-1 所示。注意到 5 个波长被绘制在图中。这些曲线中不只是测量波长,还展示了选择波长在时间坐标上的数据形状。



图 6-1. in situ (原位) 数据相对于时间的 Graph (图形)

查看特定时间上的光谱数据

在特定的 time-slice(时间片)上左击鼠标来选择数据。该时间片将画有一条线,如图 6-2 所示。现在,你可以按 Ctrl-空格键从动态数据切换到该时间点的光谱数据,也可以用 graph 上方的 Show Dynamic Data 选择框反选来切换数据显示。光谱图在接近 3 分钟的时间数据被选择,显示在图 6-3 中。



图 6-2. 在图中接近 3 分钟位置鼠标左击来选择该点,一条垂直的灰色线条显示在图中。



图 6-3. 要查看选定时间片的光谱数据,按"CTRL-空格键"或 graph 面板上方的 Show Dynamic Data 旁的选择框取消勾选。

Turning off the "Auto-Fit" function 关闭自动拟合功能

现在,让我们建立一个模型,来拟合这个时间片。做这一步的时候你可以选择 2至3分钟内的任意时间片。在我们开始之前,你可以关闭"Auto-Fit"(自动拟 合)功能,这样当选择一个时间片或打开一个新的模型时数据不会自动拟合。 为此,在Fit面板中鼠标右击并取消勾选AutoFit(自动拟合)选项,如图6-4 所示。



图 6-4. 在 Fit 面板中鼠标右击并取消勾选 "Auto-Fit" (自动拟合)选择框

Building a Model 建立一个模型

作为一个起始,我们假定测量的是一个具有已知光学常数的镀层。使用这个模型,我们可以获得任意时间点的膜厚。对于这个模型,以 Dielectrics 目录下的 "BK7 Glass"基底模型为初始,然后从 Semiconductor 目录中 Add (添加) "a-si parameterized"层。首先仅拟合 a - Si parameterized (参数化的)层厚度。你会 发现拟合不是很好,如图 6-5 所示。



图 6-5. 约3 分钟时间片的拟合结果,这时仅拟合 a-Si 层的厚度(不包含表面粗糙层)。

为了改善拟合匹配度,我们必须考虑到,任何硅层表面会被氧化,并可能有粗糙。为了拟合表面层,我们可以添加一层 SiO2,或简单的将 surface roughness (表面粗糙度)厚度设置为拟合参数。改进后的拟合结果如图 6-6 所示。



图 6-6. 包含 surface roughness (表面粗糙)时,约3 分钟时间片的拟合结果。

'Fit Dynamic 动态拟合'

现在,让我们拟合与不同时间相对应的这两个参数,看看在整个测量时间范围 内这两个参数是如何变化的。只要点击 Fit 面板中的 Fit Dynamic 按钮,软件将 从最早的时间片开始拟合,并逐一对后面的时间片进行拟合,其结果如图 6-7 所示。

用这个模型进行 dynamic fit 时你可能会注意到一个问题,那就是我们使用了一 个较厚区域的数据进行了模型调整。如果拟合失败,它可能会如图 6-8 所示。 在这里,在约 3 分钟时拟合数据可以匹配到测量数据。为了解决这个问题,在 开始 Dynamic Fit 前,使用一个更早时间片来调整拟合初始值。选择接近 0.3 分钟的时间片。用鼠标滚轮改变 roughness 和 a - Si 层的厚度值,直到模型数 据与这个新的时间片接近。点击 Fit,对单点进行拟合,你应该得到如图 6-9 所 示的结果。现在,再次点击"Dynamic Fit",这一次应该会成功。点击"Show Dynamic Data"(显示动态数据),确保在所有时间范围内模型曲线与实验曲 线匹配,如图 6-10 所示。

注意:对于很多应用,从时间结束点开始拟合数据,比从时间起始点开始拟合更有利,因为通常在数据的结尾膜的厚度要大。为从反方向进行拟合,在'Fit Dynamic'按钮上鼠标右击,并选择"Fit Backwards in Time"(时间反向拟合)。



图 6-7. Dynamic Fit (动态拟合)所有测量时间点过程中。



图 6-8. 约 3 分钟之前拟合失败,原因是厚度初始值与早的时间片不接近



图 6-9. 约 0.3 分钟时间片的 a-Si 层和 rough (粗糙) 层厚度拟合。



图 6-10. Dynamic Fit (动态拟合) 成功后的结果

在图 6-10 中,你还会注意到在 Fit 面板中显示了最后的结果(最后时间点)。 如果用鼠标选择 MSE、Roughness 或者 Thickness #1,这些值随时间变化的曲 线将被作图,如图 6-11 和 图 6-12 所示。



图 6-11. Dynamic Fit (动态拟合) 后不同时间上的 MSE 值。



图 6-12. Dynamic Fit (动态拟合) 后膜厚随时间的变化。

Selecting Multiple Time-Slices 选择多个时间片

对于许多材料,光学常数不会是已知的,用原位数据来确定膜厚和光学常数是 非常有效的。原位数据的主要优点是它提供了不同生长阶段的样品信息。如果 多个时间片同时拟合,我们得到与 multi-sample analysis(多样品分析)(见前 节)同样的优势。要设置多时间片分析,显示 Dynamic Scan(动态扫描)数据, 按住 CTRL,用鼠标左键点选多个位置的数据。一个例子如图 6-13。现在,就 如之前的 Mapping 数据,这些点可以同时显示。取消勾选"Show Dynamic Data" (显示动态数据),在下拉框中你可以选择你想查看的时间片。通过勾选 "Graph All Data Sets"还可以同时查看所有数据。如图 6-14 所示(为了简化图 形,在这里也关闭了 double-Y)。



图6-13. 按住 CTRL 键,可以使用鼠标左键在 graph 中进行多时间片点选。



图6-14. 同时对多个时间片的光谱数据作图

Manipulating Multi-Data Sets 操作多数据

就像对"map"(地貌)的多个数据操作,在 graph 上方的"Data Set"上鼠标右击, 会有一组额外的选项, 如图 6-15 所示。例如, 这里有"Clear Multi-Data Set Mode"(清除多数据集模式)。



图 6-15. 在 graph 上方的"Data Set"字上鼠标右击可以访问与多时间片数据集相关的额外选项。

Multi-Time Slice Analysis 多时间片分析

现在,让我们设置多个时间片分析。在 Model 面板中,点击底部的 Configure Options(配置选项)菜单,然后在 Model 选项中选择"Multi Sample Analysis"(多样品分析),如图 6-16 所示。这是一个隐藏功能,因为它是为高级用户保留的。现在,当我们展开 Model Options 部分,有一个 Multiple Sample Analysis 部分,可以进一步展开。点击其中的"Add Fit Parameter",你将能够为不同的时间片定义可用的任何拟合参数。让我们来添加 Thickness #1 参数,如图 6-17 所示。它将为所有时间片注入当前厚度。这是不正确的,因此分别为每个时间片调整厚度"starting-points"(初始点)是很重要的。在 graph 中分别选择各时间片,鼠标滚轮滚动 Multi-Sample Analysis 段中相关时间片的厚度,得到接近的初始厚度,如图 6-18 所示。

Show Model Options	X	1
Available Options	Description	
Model Options Wavelength Shift Multicate States Azimuthal Rotations Multi Sample Analysis Adv. Bandwidth Options Parameter Coupling Use Previous Results Scattering Factor Fit Options Include All Clear All	Adds multiple sample analysis capability to the model (which requires multiple appended data sets).	
	Qk	

图 6-16. 在 Configure Options 下的 Model 选项中,选择"Multi Sample Analysis"。

	r 🛛	X	
		_	
Model: Multi-Layer (empty)			
Open Saye Clear		_	
Layer Commands: Add Delete Save			
Include Surface Roughness = ON Roughness = 5.01 nm (fit)			
+Layer # 1 = a-Si parameterized Thickness # 1 = 62.40 nm (MSA fit)			
Substrate = BK7 Glass			
Angle Offset = 0.000			
- MODEL Options			
Include Substrate Backside Correction = <u>OFF</u>			
Model Calculation = Ideal			
- Multi Sample Analysis			
Add Fit Parameter Delete All Parms			
<u>Data Set</u> <u>Thickness # 1</u>			
#1 <mark>62.40 nm</mark>			
#2 <u>62.40 nm</u>			
#3 <u>62.40 nm</u>			
#4 <u>62.40 nm</u>			
#5 <u>62.40 nm</u>		-	

图 6-17. Model Options 部分已展开,以查看新添加的 Multi Sample Analysis。点击"Add Fit Parameter"来指定一个各个时间片可以不同的拟合参数。



图 6-18. 所有时间片的初始厚度已调整,调整时通过鼠标滚轮滚动 Model 中 multi-sample analysis 下各自的厚度值。

现在,您可以点击'Fit',所有厚度(每个时间片)以及单一 roughness(粗糙) 值,用来拟合所有的数据。这个结果如图 6-19 所示。如果 roughness 也随时间 变化,其厚度可以在 multi-sample analysis 部分添加为时间相关的变量。



图 6-19. 允许所有五个时间片的 a-Si 厚度各自变化以及可变的单一粗糙厚度拟合,得到的最后拟合结果。
Fitting Optical Constants 拟合光学常数

多时间片分析真正的好处在于对层的光学常数进行拟合时可以获得更好的结果。 假设我们不知道这非晶硅层的光学常数。用 B-Spline 层来替换 model 中的镀层。 为了得到 B-Spline 实际光学常数的接近值,点击"Starting Mat =",然后从 Semiconductor 目录下选择 a - Si。这将为 B-Spline 注入匹配参考材料 a-Si 光学 常数的 node values(节点值),如图 6-20 所示。



图 6-20. 以 B-Spline 层为初始层, 选择"a-Si"为初始材料,将获得与这类膜形状接近的 node values (节点值)。

Generating data(产生数据)后你会发现,对于这些硅层,初始点与最终光学常并不相同,如图 6-21 所示。然而,我们有厚度不同的五个时间片,这为薄膜提供了充分信息。点击'Fit'。同时使用所有时间片,B-Spline 的节点值被调整,最终获得非晶硅数据的最佳拟合。这拟合结果显示在图 6-22 中,B-Spline 的光学常数显示在图 6-23 中。

Spectroscopic Data At Multiple Times



图 6-21. B-Spline 中使用 a-Si 文献值光学常数作为初始材料,产生的数据与实测数据不匹配。然而,作为拟合的初始值,已经足够接近。



图 6-22. B-Spline 光学常数允许变化时的拟合结果。



图 6-23. B-Spline 光学常数的最终拟合结果。

6.2. Growth Rate and Optical Constants 生长速率和光学常数



在这个例子中,我们会考虑多层钽金属和非晶硅薄膜,每一层工艺条件是不同的。在各层的沉积工过程中,生长速率是恒定的光学常数也不应该有不同。我 们的目标是从六个不同膜中确定工艺条件。

因为理想样品条件下,我们都可以应用一个简单模型(称为 GROC)的动态数据分析。这种模型只能适用于 i)生长速率恒定, ii)光学常数在生长过程中不变,及 iii)虚拟界面可以近似应用与底层结构。后者的要求表明 GROC 通常用于半导体和金属的生长,不太可能工作在介电层上。

Virtual Interface 虚拟界面

当我们忽略底层的样品结构,只考虑当前的薄膜生长,一个虚拟界面可以简化 动态数据分析。虚拟界面被放置在正在研究的薄膜靠近。例如,要确定图 6-24 中堆叠膜层 Layer #3 的光学常数,我们会在 Layer #3 层内放置虚拟界面,并忽 略这点下方的样品结构。



图 6-24. 一个虚拟界面允许底层的样品结构由一个单一的界面近似。此界面的光学常数 被称为"pseudo-substrate"(伪基底)。

有不同的方法来计算虚拟界面,但我们的讨论仅限于 Common Pseudo-Substrate Approximation (CPA)。假设一个等效的、semi-infinite(半无限)基底的 pseudodielectric(伪电解质)光学常数为虚拟界面,来替代在堆栈之下的所 有(结构)。这种近似在半导体和其他高折射率材料上工作得非常好,但并不 适用于低指数透明材料,如玻璃。

Growth Rate and Optical Constants (GROC) Model 生长速率和光学常数模型

在 Model:面板的 Advanced 目录下打开"Growth Rate and Optical Constants (GROC)"(生长速率和光学常数(GROC))模型。GROC 模型如图 6-25 所示。你可以看到,与我们通常使用的标准模型不同,它不包含"分层结构"。



图 6-25. GROC 模型示例

Growth Rate and Optical Constant (GROC)层旨简化同时提取生长速率和光学常数,其对应的是原位动态 SE 数据。GROC 利用'virtual interface (虚拟界面),这意味着用户不必为下面层/材料指定光学模型。GROC 也假定生长速率,恒定的表面粗糙度,在指定的时间内光学常数不随薄膜厚度的变化而变化。

注意:在生长的晶核形成阶段,GROC的假定是不成立的。

在 GROC 中使用的 Common Pseudo Substrate Approximation (CPA)(伪基底近 似)不适用于所有材料,但在半导体的生长中工作得非常好,它也适用于吸收 材料(如生长约 5nm 后的金属)的沉积。

注意: 当 GROC 用于金属和半导体时, virtual interface (虚拟界面) 假设可用。

Rate 速率

Rate(速率)指定层不间断的生长速率。为使拟合算法收敛,拟合前设置的速率应该接近实际值。

Fit Opt. Const. 拟合光学常数

当'ON'(开启)时

- 层光学常数的拟合使用一个分段连续的多项式描述的光学常数。多项 式的"control points"(控制点)间距由"Spectral Resolution in eV"指定。 'Draw Opt. Const.'(绘制光学常数)将绘制提取的光学常数,而'Save Opt. Const.'(保存光学常数)按钮可将提取的光学常数保存在一个表 列材料文件中。
- 多项式的初始值匹配"Layer"的条目,如果存在的话。这有助于注入的 合理的初始光学常数。

当'OFF'(关闭)时

光学常数由'Layer'层条目指定。如果层条目是空的,或在层中没有拟合参数层"on"(开启),那么光学常数是固定的,生长速率是唯一变量。如果'Layer'层条目中参数是"on"(开启)的,那么光学常数将使用这一层的色散方程获得拟合结果。

注意:无论 Fit Opt. Const 为"on"(开启)或"off"(关闭),光学常数都可以拟合。

Layer 层

当"Fit Opt. Const. = ON"(拟合光学常数开启)时,这个层注入光学常数,当 "Fit Opt. Const. = OFF"(拟合光学常数关闭)时,这个材料文件指定层的光学常数。当"Fit Opt. Const. = OFF"(拟合光学常数关闭)时,在层中定义的任何拟合参数将包含在 GROC 数据分析中。

Angle Offset 角度偏差

Feature only applied when 'Fit Opt. Const. = OFF' to avoid 100% correlation.

在名义入射角的实验数据文件中指定一个偏移。当已知参考光学常数在"Layer" 字段中被指定时, 拟合 angle offset (角度偏差)是有帮助的。

Roughness 粗糙

指定和/或拟合生长薄膜的表面粗糙,它被假定在选定的时间范围内不变。提取到的光学常数,生长速率和表面粗糙并非总是唯一的,通过选定时间范围包含唯一的生长材料的厚度(>>%波长),否则,粗糙度应固定在0。

VI Mode

用来指定 GROC 如何实现 Virtual Interface (虚拟界面)。"CPA"和"CPA – Fit VI"模型假设 common pseudo-substrate approximation,它可以典型的应用于半导体上生长半导体或金属等吸收材料的生长。

- "CPA"选择第一时间的椭偏参量Ψ和Δ参数,简单地将其转换为伪光
 学常数,然后用于计算后续薄膜生长的椭偏轨迹。
- "CPA-Fit VI": 定义 VI 伪光学常数为拟合参数,可以最小化用来 VI 倒置的 Ψ/Δ 数据的随机和系统误差的影响。

Max. Times 最大时间

为了尽量减少分析时间,GROC用数量定义在数据分析时的时间片限制,均 匀在选定时间范围上地分布。

Seed Thickness 注入厚度

以改善拟合的适应范围,GROC 在拟合所有数据之前进行一个预拟合,这个 预拟合执行在选定时间范围内的子集上。"'Seed Thickness'(注入厚度)指定 这个预拟合包含多少时间(给定注入厚度后初始生长速率用来计算时间)。对于 大多数拟合,默认值是可以接受的,但在某些情况下,若果拟合不能恰当的收 敛,可以尝试更小或更大(更可能)的值。

Surface Tracking Fit Mode 表面追踪拟合模式

当 OFF(默认时)时,GROC 分析使用选定时间范围内的动态数据。如果为 ON(开启),动态数据被即时包含到选择时间片中分析(# of points 由"Max. Times"指定)在"Fit | Dynamic Fit"过程中,由于选择的时间片自动的在数据上 移动,这种模式可以进行 GROC 对应时间的分析,它对于提取随时间变化的 生长速率或表面粗糙有用。

Multilayer Example 多层膜样品

Examples 文件夹中打开"Dynamic Ta-Si Multilayer.iSE"数据文件。这个文件是 in situ(原位)动态测量获得的,所以它的扩展名是"iSE"。在"Open Data"对话 框中有一个下拉菜单,如图 6-26 所示。

				Þ
Eiles:				
Name		Date	Size	1
Dynamic Ta-Si Multilayer.iSE		9/29/11 2:15 PM	3173 KB	
	105	1		
	ISE & SE			
h films starting at 1, 6, 11, 14, 17 Qpen Cancel	, anu 24 mms.			

图 6-26. "Dynamic Ta-Si Multilayer" 是一个原位动态测量的数据,其扩展名为"iSE"。你可以在 Data:>'Open' 弹出对话框中选择查看哪类文件。

图 6-27 显示了 Psi 相对于时间数据的图形。如表 6-1 中所描述,这个数据采集 了六个膜的连续生长。在第一分钟前没有薄膜生长的基底被监测。接下来是 Ta(钽)金属和非晶硅的 6 层交替薄膜。对于每一层,为了改变生长速率,溅 射枪电流是不同的。我们的目的是确定 6 层膜的生长速率和光学常数,用来表征溅射室的工艺条件。为此,我们将使用 GROC 层。



图 6-27. Ta-Si 多层动态数据.

Layer	Time Start	Time End	Film	Gun Current
1	1	6	Та	0.2
2	6	11	a-Si	0.3
3	11	14	Та	0.4
4	14	17	a-Si	0.5
5	17	24	Та	0.1
6	24	31	a-Si	0.15

表 6-1. Ta-Si 动态多层膜中所有 6 层的工艺条件

Advanced 目录链接中打开"Growth Rate and Opt. Const."模型。接着,我们需要选择数据分析的时间范围。Data:面板中点击'Set Ranges'(设置范围)按钮,选择从 1 到 6 分钟的第一层钽膜,如图 6-28 所示。在点击 fit(拟合)之前,为提高我们的成功率,添加一个"Layer"来注入光学常数到多项式中。点击"Layer"并从 metals 目录添加 "Ta.mat" 材料层。现在,点击'Fit',你应该得到 如图 6-29 所示的结果。



图 6-28. 点击 Data: 'Set Ranges' (设定范围) 按钮,选择第一层钽膜(1至6分钟)的时间范围。



图 6-29. 在 1-6 分钟时间范围上钽膜的 GROC 分析结果

拟合并不完美,但是记住,GROC分析需要光学常数和生长速率在整个时间 范围内不变。在薄膜沉积还没有达到1分钟的几个数据点上,可能显示了成核 效应,其光学常数与厚金属层不一致。为了提高拟合质量,选择2到6分钟的 数据范围,忽略薄膜生长的早期阶段。再次点击'Fit'(拟合),MSE应下降到 1.5 附近,如图 6-30 所示。记录这个拟合中的生长速率并将光学常数复制到 Graph Scratchpad 中。



图 6-30. 钽薄膜生长 2-6 分钟的 GROC 分析,忽略薄膜光学常数可能不同的薄膜生长的成核早期阶段。

如果图形消失,如图 6-31 所示,在图形区域的右上角点击'Show Data'(显示数据)按钮。

A.X				
Graph Type	🖌 Show Dynamic Data	Graph Hardware Parm: (none)	v	Show Data

图 6-31. 如果动态数据图消失,点击 Graph 面板右上角的 Show Data'(显示数据)按钮。

现在,让我们对钽生长的其他两个区域(11-14 分钟 17-24 分钟)重复此过程。 记得避开生长最初的成核阶段域。当开始一个新的区域, GROC 将重新计算 CPA,所以在第一时间数据将匹配。然而,我们的生长速率可能会过大或过小,因为它仍然保持以前的拟合。例如,图 6-32 显示了第三钽膜模型产生的初始曲线,但在 GROC 中的生长速率来自最快的电影 film (#2),因此产生的数据不匹配。用鼠标滚轮滚动 growth rate(生长速率)获得一个接近正确答案的值注入到 GROC 层中,然后点击'Fit'(拟合)。

第二层钽膜拟合结果(图 6-33)和第三钽膜拟合结果(图 6-34)如图示,并将最终的光学常数复制到 Graph Scratchpad 中(图 6-35 和图 6-36)。



Dynamic Data

图 6-32. 在每个新的范围上 Generate (产生)数据。这将允许你评估以前的生长速率对 于新的薄膜是否太快或太慢。



图 6-33. 钽薄膜生长 12 到 14 分钟之间的 GROC 拟合。







图 6-35. 所有三个钽薄膜的折射率在 Graph Scratchpad 中的比较。





图 6-36. 所有三个 组薄膜的消光系数的比较

继续分析 a-Si 薄膜, 钽和硅薄膜的最终生长速率应该如图 6-37 所示。



图6-37. Ta 和 a-Si 薄膜的溅射枪电流对应生长速率。

7. 参考- Graph

本章中,将用"参考"的形式来讲述 CompleteEASE 各部分的特征和功能。也就是说,各部分的特征会以屏幕上显示的次序来列出,而不是在做典型操作时的必要的步骤次序来列出。关于系统基本操作和数据分析的"步骤"已在前面章节中学习过。

7.1. 基本屏幕布局

CompleteEASE 软件的基本布局是, 横跨整个窗口上部的是主菜单栏, 窗口下部是一个一直可见的图形窗口。(图 7-1)。用标准的 Windows 的键盘和鼠标操作,可以改变窗口的大小,最大或最小化窗口。主菜单栏和图形框之间的分割条可以移动,用来调整图形框的相对大小。CompleteEASE 软件退出时, 屏幕布局会被保存, 然后在打开软件时重新装载进来。



图 7-1. CompleteEASE 软件中选中Measurement 主菜单

7.2. Graph Panel 图形面板

Graph 面板是 CompleteEASE 软件与用户之间的重要交互界面。光谱数据,模型拟合以及光学常数都在这个窗口中画出曲线。本章节中描述的特征和图形窗口中显示信息的类型无关。

如果鼠标在曲线图形上停顿一会儿,在鼠标尖端会出现一个小框,显示当前鼠标位置的 X,Y 值。鼠标移到其他位置,X,Y 值也就相应的跟着变化。

把鼠标移到图例框区域,按住鼠标左键 (*OL)并拖动,就可以把图例框放到指定的位置。

'Show Data 显示数据'

如果图形显示的是光学常数(或者其他的类型,除了椭偏数据),点击这个按钮可以回到显示椭偏数据图形。

Range-Select 范围选择

想要"放大"指定光谱范围,按住鼠标左键 (**①L**),并在想要的指定范围上拖动 鼠标 (图 7-2)。图形会重新绘制,只绘出选择光谱范围的图形。



图7-2. 选择某段光谱范围(按住鼠标左键并在想要的范围上拖动鼠标)

对于均匀性地貌同样适用,如图7-3。在一个区域上鼠标拖动(左图)将选择 这个区域绘图(右图)。



图7-3. 地貌区域拖动鼠标 (左图) 来选择该区域地貌 (右图)

Zoom All 显示全部

要绘出全部的光谱范围(或整个均匀性地貌),只需简单的点击图形窗口右上 角的'Zoom All'按钮(图 7-4)。在图形窗口中鼠标右击,访问右键菜单,其第 一条也为该选项。

注意:如果你把图形改为"Use Clipboard Aspect Ratio",那么 'Zoom All'按钮 将不出现。



图7-4. 图形窗口中的鼠标右键菜单

7.3. Right-Click Menu 右键菜单(Graph)

在图形窗口中鼠标右击(***BR**),会出现如下图 7-5 所示的菜单。



图7-5. 图形窗口中的分光数据及地貌的右键(CR)菜单

Zoom All 显示全部

点击该按钮, 画出全部数据或地貌的图形

Statistics 统计

图形中的数据可以进行多种统计计算。比如,对空气的对打测量可以用来证实测量的正确性。该测量的统计数据可以被计算,如图 7-6 所示。

Parameter Average Std. Dev. Slope Minimum Maximum Range # of Property of Propere
Psi 44.99876 0.01579 -0.00008 44.96774 45.05014 0.08239 18
Delta -0.00625 0.02119 0.00002 -0.13881 0.07593 0.21475 18

图 7-6. Graph Statistics (图形统计) 对射测量数据

Copy Graph to Clipboard 把图形拷贝到剪贴板

图形被复制到剪贴板,可以用到其他的程序中。

Copy Data to Clipboard 把数据拷贝到剪贴板

图形曲线数据被复制到剪贴板,可以用到表格软件中。信息包含与图形标题一致一的标题行,接下来就是各列信息,每列上都有一个名称。第一列是它的 X 轴信息一通常是波长,后面各列就是图形中各曲线的数据信息了。

Copy Data to Graph ScratchPad 把数据拷贝到图形 暂存器

把图形中的数据曲线复制到图形暂存器,可以查看及和其他曲线进行比较,在 查看时用户可以定制曲线。

Profile Along X and/or Y Axis

对均匀兴地貌,2D曲线不会被复制到图形暂存器中,然而你可以选择复制沿X轴或沿着或两者都有的数据点,如在图 7-7 所示。例如,图 7-9 中显示的是均匀性 map (地貌)里的 x 轴数据。

Copy to Scratchpad	×
Which data should be copied to the scratchpad? (-1.4863,4.2475	5)
Profile Along X Axis	-
Profile Along X Axis	٦
Profile Along Y Axis	
Profile Along X and Y Axes	

图7-7. 在均匀性map (地貌)中,可以复制到图形暂存器中有以上可选项

View Graph ScratchPad 查看图形暂存器

图形暂存器是 CompleteEASE 中一个可以很方便的比较不同曲线的地方。曲线 可以是任何类型被绘图的数据,包括原始数据、模型生成曲线、光学常数,甚 至是参数唯一性测试中的 MSE 轮廓线。



图 7-8. 图形暂存器可以用来比较各种类型的图形曲线,而且用户自定义显示,使得比较更容易



图7-9. 来自均匀性map (地貌) 中 x 轴的数据在 Graph Scratchpad 中的结果

Show Legend 显示图例

On(开启)/Off (关闭) 图例

Show Symbols 显示符号

将实验数据 On(开启)/Off (关闭)为符号绘图。模型曲线仍然用实线表示。图 7-10 是一个显示了符号的例子。



图 7-10. 符号绘图已开启

Set Symbol Size 设置符号大小

改变表示地貌数据点的符号大小。默认大小为1,但是可以根据显示的需要来 调整大小。

Auto X,Y,Z Scale 自动 X,Y,Z 轴比例

X,Y,Z 轴会自动调整比例以显示全部的数据。

Manual X,Y,Z-Scale 手动 X,Y,Z 轴比例

用户可以设置 X,Y,Z 轴的上下限。拟合时,所有的数据依然都会参与拟合,但 只有该范围内的数据会绘图显示。

Scale Z-Range by n-Sigma

用户可以快速选择地貌数据的Z轴高低限值,它是基于标准差倍数的。当存在 有与均匀样品不同的少量坏点时,这种设置是有帮助的。选择时,会出现一个 对话框要求输入标准偏差数,它用来计算范围,如图7-11所示。拟合时,所 有的数据依然都会参与拟合,但只有该范围内的数据会绘图显示。



图7-11. 输入用来计算 Z 轴范围的标准偏差数

Graph Points as a Line

允许用户将地貌数据展开为线形图形。例如,晶圆上二氧化硅厚度地貌的线形 绘制在图 7-12 中



图 7-12. 地貌数据绘制成线形.

Use Clipboard Aspect Ratio 使用剪贴板纵横比

标准的图形会根据图形窗口的尺寸来设置比例。然而,当图形复制到剪贴板时, 经常要用到被设置的纵横比。点击此键,可以显示当图形被复制到剪贴板时的 纵横比。选择 **Options**>Configuration Controls:> 'Edit Configuration'中的 "Graph Clipboard Parms"来编辑复制到剪贴板的纵横比。

Cancel Menu 取消菜单

关闭图形菜单

7.4. Graph Type 绘图类型

"Graph Type"(绘图类型)下拉菜单在 Graph 面板的左上角,菜单中有不同的 绘图类型,如图 7-13 所示。

Graph Type	
<u>P</u> si	Ctrl-P
<u>D</u> elta	Ctrl-D
Re(rho)	
lm(rho)	
N	Ctrl-N
<u>c</u>	Ctrl-C
<u>s</u>	Ctrl-S
<ps<u>eudo> Transforms 🕨</ps<u>	
Intensity	Ctrl-T
Depolarization	Ctrl-Z
🗹 Double <u>Y</u> Axis	
🗆 Difference Mode	
More Options	•

图7-13. 标准椭偏数据的Graph (绘图) 类型菜单选项

对于 Generalized Ellipsometry (广义椭偏)和 Mueller-Matrix (穆勒)测量, 此菜单会有额外的选项,在这种情况下, "Graph Type"(绘图类型)下拉菜单 如图 7-14 所示。

Graph Type	
<u>P</u> si	Ctrl-P
<u>D</u> elta	Ctrl-D
Re(rho)	
lm(rho)	
N	Ctrl-N
<u>c</u>	Ctrl-C
<u>s</u>	Ctrl-S
<ps<u>eudo> Transforms</ps<u>	•
M <u>u</u> eller Matrix Data	•
Generalized Ellipsometry Ratios	
Select <u>R</u> atios To Graph	
Intensity	Ctrl-T
Depolari <u>z</u> ation	Ctrl-Z
🗖 Graph <u>v</u> s. Angle	
Single Wavelength = 500.0 nm	Ctrl-W
🗹 Double <u>Y</u> Axis	
Difference Mode	
More Options	•

图7-14. Anisotropic (各向异性)和Mueller-Matrix (穆勒矩阵)数据的Graph Type 下 拉菜单

Psi, Delta

当 Psi 或 Delta 被选中时,标准椭偏参量振幅比 Psi (Ψ)和相位差 Delta (Δ)被绘制。这些值描述了传统的椭偏测量,它们是基于方程式 6-1 的。

$$\rho = \tan(\Psi)e^{i\Delta} = \frac{\widetilde{R}_p}{\widetilde{R}_s}$$
(6-1)

Re(rho), Im(rho)

椭偏测量的实部和虚部 rho 绘图,它们是基于方程式 6-1 的 rho (ρ)。基于

N, C, S

另一个查看椭偏测量的方式是基于穆勒矩阵的形式。对于没有退偏振的各项同性样品, Mueller-matrix 可以描述成如等式 6-2 所示。

$$M_{isotropic} = \begin{bmatrix} 1 & -N & 0 & 0 \\ -N & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C & S \\ 0 & 0 & -S & C \end{bmatrix}$$
(6-2)

且有

$$N = \cos(2\Psi), C = \sin(2\Psi)\cos(\Delta), \text{ and } S = \sin(2\Psi)\sin(\Delta)$$
 (6-3)

因此,NCS 是各向同性的穆勒矩阵非零元,它们是与传统椭偏 Psi-Delta 绘图 相关联的。NCS 符号有几个优点,包括: i)他们总是在-1 到 1 范围内,及 ii) 不管用何种椭偏仪测量,它们与强度谐波有线性关系。因此,它们更接近椭偏 仪的直接测量,并有 N、C、S 有基本相同的精度。

<Pseudo> Transforms (<e1>, <e2>, <n>,<k>)伪转换

<Pseudo> Transforms(伪转换)菜单展开后包括<e1>、<e2>、<n>和<k>,如 图 7-15 所示。这些被称为"Pseudo"(伪)光学性能,以示与实际材料光学性能 的差别。它们是从椭偏测量数据直接计算得来,计算时假设测量来自单一表面 反射。计算公式由 6-4 给出。任何数据都可以进行转换,但当单一表面反射假 设无效时,"Pseudo"(伪)曲线失去了意义。换句话说,单一基底数据转换才 可得到正确值。在椭偏数据测量时,任何薄膜或表面层的存在,"Pseudo"(伪) 光学常数就不等于材料的光学常数。

$$\left\langle \varepsilon \right\rangle = \left\langle \varepsilon_1 \right\rangle + i \left\langle \varepsilon_2 \right\rangle = \left\langle \widetilde{n} \right\rangle^2 = \left(\left\langle \widetilde{n} \right\rangle + i \left\langle \widetilde{k} \right\rangle \right)^2 = \sin^2(\phi) \left[1 + \tan^2(\phi) \left(\frac{1 - \rho}{1 + \rho} \right)^2 \right]$$
(6-4)

注: "Pseudo"(伪)光学常数并不代表层的光学常数。要查看层的光学常数,层上右键点击,并选择"Graph Layer Optical Constants"(层光学常数绘图)。

Graph Type		
<u>P</u> si	Ctrl-P	Spect
<u>D</u> elta	Ctrl-D	opeer
Re(rho)		
lm(rho)		
N	Ctrl-N	
<u>c</u>	Ctrl-C	
<u>s</u>	Ctrl-S	
<ps<u>eudo> Transforms</ps<u>	•	<e<u>1> Ctrl-1</e<u>
Intensity	Ctrl-T	<e<u>2> Ctrl-2</e<u>
Depolarization	Ctrl-Z	< <u>n</u> >
☑ Double <u>Y</u> Axis		< <u>k</u> >

图 7-15. < Pseudo> Transforms (伪转换)

Mueller-Matrix Data 穆勒矩阵数据

当前世穆勒矩阵数据时, "Graph Type"菜单中有额外的选项可用, 如图 7-16 所示。这些各自的选项在下面介绍, 它们是与等式 6-5 描述的样品穆勒矩阵数据相关的。



图 7-16. Mueller-Matrix (穆勒矩阵) 绘图选项

Mueller Matrix Diag 对角线和非对角线穆勒矩阵, Off Diag

对角线和非对角线选项可以选择绘图 6-5 方程定义的穆勒矩阵具体内容。对角 线元包括被测量的 m_{11} 、 m_{22} 、 m_{33} 和 m_{44} 。非对角线元将包括所有剩余的被测 量元。

Mueller Matrix NCS

当选择 Mueller-Matrix NCS(穆勒矩阵 NCS)时,各向同性样品的标准穆勒矩 阵非零元被绘图,包括以下所有被测量元: m₂₁、m₁₂、m₃₃、m₃₄、m₄₃和 m₄₄。 这些元与公式 6-2 的 NCS 相关,通过以下转换

$$\begin{bmatrix} 1 & -N & 0 & 0 \\ -N & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C & S \\ 0 & 0 & -S & C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & m_{12} & 0 & 0 \\ m_{21} & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_{33} & m_{34} \\ 0 & 0 & m_{43} & m_{44} \end{bmatrix}$$
(6-6)

Select Mueller Matrix Elements 选择穆勒矩阵元

打开一个对话框,允许你选择任意可用的各被测穆勒矩阵元来绘图,如图 7-17 所示。此对话框允许你快速选择或清除所有元,选择对角线组或非对角线组。

Mueller Ma	atrix Eleme	nt Selectio	n 🚟 🖾
Select the	desired Mu	eller Matrix	elements
Mueller	Matrix Ele	ments	
🔲 M11	M12	✓ M13	✓ M14
M21	M22	✓ M23	₩ M24
🔲 M31	M32	M33	M34
M41	M42	M43	M44
Cle	ar All	Sel	lect All
On-Dia	g. Blocks	Off-Dia	ag. Blocks
	<u>O</u> k	<u>C</u> ancel	

图7-17. 通过选中相应的元来绘制你想要的穆勒矩阵元

可用来绘图的穆勒矩阵元与实际测量值相吻合。Mueller 矩阵的最后一行/列需 要探测和检测偏振的左旋或右旋特性。这需要在样品之前或之后有补偿器。 RC2 在样品之前和之后都有旋转补偿器,因此它可以测量穆勒矩阵的所有 16 个元,但一般表示为相对于元 M₁₁的比例。其他类型椭偏仪可能在样品之前或 之后有补偿器,这使得它们各自可以测量前三行或列。旋转检偏和旋转起偏椭 偏仪(样品前/后均无补偿)无法检测到第四行或列。这些不同的配置显示在 方程(6-7a 到 6-7d)中。





MM-Jones Quality 穆勒-琼斯质量因子

这个 graph (图形) 有助于确定是否可以将穆勒矩阵转换成相应的琼斯矩阵。 穆勒矩阵可以处理没有或有退偏振的各向同性和各向异性样品。广义琼斯矩阵 也可以同时处理各向同性和各向异性样品,但不能处理 depolarization (退偏 振)。因此,只有 MM-琼斯质量因子接近于零时转换才能成功,表示退偏振 不是一个重要的问题。

MM-琼斯质量因子的基本定义是简单的 MM 测量参数和琼斯矩阵之间接近度 (最小二乘意义上)的 RMS(均方根误差)。有精确的表达式转换琼斯矩阵 (4个复数)为穆勒矩阵(16个实项)。然而,没有精确的从 MM 到琼斯的 转换(一般不能转换 16 至 8个值),所以我们执行非线性回归拟合来找到最 接近 MM 数据的琼斯矩阵,并报告 RMS 误差。在 CompleteEASE 中,RMS 误差被乘以 1000,这样 MM-琼斯质量因子为 1 时表示琼斯矩阵和 MM 数据接 近度的 RMS 差异是 0.001,这也是 MM 数据准确性的目标值。

MM Derived Parameter 穆勒派生参数

穆勒矩阵测量结果乘以指定的 Stokes 矢量来"derived"(派生)输出,如图 7-18 所示。用户可以选择 source(源)的偏振状态和探测端的偏振态,如图 7-19 所示。此外,有大量的派生参数供选择,如图 7-20 所示

Mueller Matrix Derived Parameter
Source Polarization State: Unnotarized
52.0 53.0
Derived Parameter: Detected Intensity
Polarization State Detector: Unpolarized d0:1.0000 d1:0.0000 d2:0.0000 d3:0.0000
Assume Normalized Mueller Matrix
OK Cancel

图 7-18. Mueller-Matrix (穆勒矩阵)派生参数



图 7-19. Source (源) 偏振态选择

Mueller Matrix Deriv	/ed Parameter	\boxtimes
Source Polarizatio s0:1s1:0	n State: Unpolarized 🔻	
Derived Parameter:	Detected Intensity	•
Polarization State I d0:1.0000 d1:0.00 I Assume N	Azimuth Ellipticity % Depolarization s0 s1 s2 s3 Detected Intensity	
	Degree of Polarization 'P'	-

图 7-20. Derived (派生)参数选择

Show Mueller Matrix Utility 显示穆勒矩阵

这个方便的工具,允许用户查看 Mueller 矩阵元的图形,图 7-21 显示光谱 MM 扫描(X-Y 型),图 7-22 显示了旋转 MM 扫描(Contour 型)。



图 7-21. Mueller Matrix Graphing Utility.



图 7-22. Mueller Matrix (穆勒矩阵) Contour (等高线) 绘图

除了 X-Y 和 Contour (等高线) 绘图,用户可以选择以下数据类型 i)Experimental Only ii) Exp and Gen, iii) Diff Exp and Gen (差异) 或 iv) Generated Only 三) 变化 Exp 和根,或 iv) 只生成。标准的 X-Y 轴是单一光谱 测量点的波长与角度。然而,如果配置了自动样品旋转台,记录了每次测量时 样品的方位,也可以波长 (WVL) 相对旋转角度或入射角 (AOI) 相对旋转角 度。在这两种情况下,其余的参数 (AOI 或 Wvl) 可以滑动到不同的位置。点 击'Graph Settings'(绘图设置)按钮来访问额外功能,如图 7-23 所示。最后,您可以选择"Always on Top"使这个 Graphing Utility 始终在其他窗口上,你可以将 graph(图)和 data(数据)复制到剪贴板。

Graph Settings
✓ Show Titles
🗌 Draw Grid Lines 🕑 Show Legend 📄 Draw Curves In Black
Element Label Position: Top Right 🔽
Axis Label Mode: Show All Values
Max # of WvIs. to Plot (Contour Plot) 100
Qk

图 7-23. Graph Settings within the Mueller Matrix Graphing Utility

Generalized Ellipsometry Ratios

各向异性样品的表征常常使用广义椭偏测量,其中考虑整个琼斯矩阵,如公式 6-7 所示

$$\boldsymbol{J}_{Anisotrop\dot{\boldsymbol{\epsilon}}} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\widetilde{r}}_{pp} & \boldsymbol{\widetilde{r}}_{sp} \\ \boldsymbol{\widetilde{r}}_{ps} & \boldsymbol{\widetilde{r}}_{ss} \end{bmatrix}$$
(6-7)

由于椭偏测量是琼斯矩阵各元的比例,有三个被测值可能获得整个琼斯矩阵。 这些值为 AnE、Aps、和 Asp。等式 6-8 对每个值有定义。

$$AnE = \tan(\Psi)e^{i\Delta} = \frac{\widetilde{r}_{pp}}{\widetilde{r}_{ss}}$$
 (6-8a)

$$Aps = \tan(\Psi_{ps})e^{i\Delta_{ps}} = \frac{\widetilde{r}_{ps}}{\widetilde{r}_{pp}}$$
(6-8b)

$$Asp = \tan(\Psi_{sp})e^{i\Delta_{sp}} = \frac{\widetilde{r}_{sp}}{\widetilde{r}_{ss}}$$
(6-8c)

Select Ratios to Graph

你可以从如图 7-24 所示话框中选择其中的各向异性椭偏率来显示。

Ratio Selection
Select the desired ellipsometry ratios for graphing
Generalized Ellipsometry Ratios
AnE (Rpp/Rss)
Aps (Rps/Rpp)
Asp (Rsp/Rss)
<u>Ok</u> <u>C</u> ancel

图7-24. 选择 Generalized Ellipsometry (广义椭偏) 绘图选项

Intensity 强度

使用 CompleteEASE 时,SE 数据和反射或透射强度同时被采集。在这里的强度是 P-和 S-偏振分量的平均。强度数据的准确性依赖于仪器校准。请参考相关硬件以提高强度的准确性。

因为 M-2000 和 RC2 光谱椭偏仪从交流信号采集数据,这里的强度测量值也 来自 AC 信号。同样,模型计算只考虑交流分量。Depolarization(退偏振)的 测量来自 DC(直流)信号,不会被作为 Intensity(强度)的部分被测量(或 被建模)。查看 More Options 中的 p-s (Total) Intensity 可以消除退偏振的影响。

Depolarization 退偏振

可调或旋转补偿椭偏仪上采集到的 depolarization(退偏)百分比。此信息可用于确定样品和测量的非理想状况,如厚度不均匀、光谱仪线宽、angular spread、背面反射等。

Depolarization(退偏振)存在时,各向同性样品的 Mueller 矩阵可以写成如下 所示。椭偏术中,所有的 Mueller 矩阵元与第一个元 M11 相关。

$$M_{sample} = \begin{bmatrix} 1 & -P \cdot N & 0 & 0 \\ -P \cdot N & P & 0 & 0 \\ 0 & 0 & P \cdot C & P \cdot S \\ 0 & 0 & -P \cdot S & P \cdot C \end{bmatrix}$$
(6-9)

偏振(P)定义为:

$$P = \sqrt{N^2 + C^2 + S^2} \tag{6-10}$$

由 Woollam 公司椭偏仪报告的椭偏有如下定义:

$$\% Depolarization = (1 - P^2) \cdot 100\% \tag{6-11}$$

Graph vs. Angle

大多数 SE 数据相对波长绘图。当多入角度数据已经被采集,也可以在某一波长上相对入射角绘图,这对显示 pseudo-Brewster(伪布鲁斯特角)的位置有帮助。(Psi达到最低值和 Delta 穿过 90°或 270°)。图 7-25 是 ITO 数据在1500nm 处相对于入射角的绘图。在这个长波长上,ITO 已有导电性并表现出金属特性。



图 7-25. ITO 数据相对入射角绘图

Double-Y Axis 双 Y 轴

同时显示两个不同数据的曲线,有各其的Y轴。

Difference Mode 差异模式

差异模式对实验数据和生成数据之间的差值绘图。

More Options 更多选项

其他的绘图选择被列在一个扩展区域,被称为"More Options"(更多选项), 如图图 7-26 所示。这些包括各种强度和 error bars(误差线)。



图 7-26. Graph Type 菜单中的 More Options

p-s-Intensity 强度

P-和 S-强度值从交流信号测定来。因此,这些值代表 Rp 和 Rs 的反射和 Tp 和 Ts 的透射。因为是从 M-2000 或 RC2 椭偏仪的交流信号中严格计算而来,这

些值将不包含任何退偏振光的影响。当 Complete EASE 建模这个数据时,也 计算值来对应 AC 测量。

p- s- Intensity (Total)

p-和 s-Intensity(Total)测量自交流和直流信号,它尝试测量在 p-和 s-上"total" (总)反射或透射,并包含退偏振的影响。这可以更好与大部分光度法测量进 行比较(或甚至 WVASE32 的测量),因为后者大多不区分 P-S-和沿 p-和 s-的非偏振光。

Error Bars

Psi、Delta、Depolarization、Intensity和 Mueller-Matrix的 Error Bars(误差线) 在测量时被计算,评估与每个数据点相关的随机误差。

7.5. Special Graph Items (特殊绘图项)

本节将详述 append (合并)数据, uniformity maps (均匀地貌), rotation (旋转)数据,或 dynamic (动态数据)时,显示在 Graph 面板顶部的特殊 graph (绘图)项目。这些数据类型共享一些共同的图形功能。并有额外的项目显示 在图形面板顶部,允许选择和查看特定的数据类型。大部分有一个称为"Data Set"(数据集)的下拉列表,可在不同类型的数据中选择各数据进行绘图,如图 7-27 所示。



图7-27. 下拉列表允许选择不同 data set (数据列表)中的数据。

如果鼠标右击刚才的下拉列表的左边(在"Data Set"字上),将弹出数据选择 项,如图 7-28 所示。选择项包括:

"Select Data Set"(选择数据项)为查看和拟合,添加当前列出的数据到组内。

"Un-Select Data Set"(反选数据项)将当前列出的数据从查看和拟合组里移除,但它仍保留在列表中,这样,如有需要,稍后可以重新选择这个数据。

"Select Current Data Set ONLY"(仅选择当前数据项)将取消选择所有其他的数据而只选择当前的数据项。同样,没有数据从列表中删除,使他们可以在稍后被重新选择。

"Select All Data Sets" (选择所有数据)将激活列表中的所有数据供查看和拟合。

"Delete Data Set" (删除数据项)将选定的数据从多数据列表中删除。

"Clear Multi-Data Set Mode" (清除多数据集模式)将从多数据列表中删除所有数据。



图 7-28. "Data Set"字上右键点击,访问下拉列表,可以从多数据列表中 selecting(选择), deselecting (取消选择)和 deleting (删除)数据。

Multi-Sample (Appended Data) (合并数据)

如果在多个数据文件在同一时间打开(使用 Append Data 按钮), 拟合时它们 会将同时包含。各数据项可以单独绘图,方法是在下拉列表中选择它,如图 7-29 所示。通过勾选"Graph All Data Sets"也可以绘图所有数据。



图 7-29. 多个数据项被选择的 Graph 窗口。当前只有一个数据被绘图, 但拟合时会包括 所有数据。



图 7-30. "Graph All Data Sets" (绘图所有数据)

Rotation Data 旋转数据

各向异性样品的表征往往通过测量样品的多个旋转位置,配置自动旋转台可以 方便的做到这点。当这些数据被打开时,每个测量数据有相应的旋转方位,每 个方位保持独立,如图 7-31 所示。所有数据项可以同时绘制,或单独绘制, 但所有"selected""(选择)的数据项将包含在拟合中。由于这是旋转数据,额 外的按钮"Show Rotation Data"将出现。当此复选框被选中,单一波长的相对旋 转角度的数据将显示,如图 7-32。要改变旋转数据的绘图波长,在 Data: 面板 的'Set Ranges'按钮中设置。



图 7-31. "Graph All Data Sets"选中时的旋转数据



图 7-32. "Show Rotation Data" (显示旋转数据)选中后,单一波长相对旋转方位数据 将绘图

注意:按住 Ctrl 键并在一个范围选择点上拖动鼠标,将快速选中它们

Map Data 地貌数据

当均匀性地貌数据被采集一包含跨越晶圆的多个点,图形将显示相对晶圆位置上的单一波长 Psi-Delta。当"Show Map Data"复选框被选中此图会出现,如图 7-33 所示。要改变地貌数据的绘图波长,在 Data: 面板的'Set Ranges'按钮中设

置。如果"Show Map Data"复选框被没有选中,单一测量点的光谱数据将绘制。 此外,一个滑块条将显示,如图 7-34 所示,它允许前后移动位置来显示样品 上的所有的测量点位。



图7-33. "Show Map Data" 选中时显示跨越样品位置的单一波长上的 Psi-Delta 数据



图 7-34. "Show Map Data"没有选中时,地貌数据上某一位置的光谱数据将显示,可以 滑动滑块的位置显示整个晶圆上的各不同位置的数据。

对于均匀性地貌,按住 CTRL 键并点选想要的不同点位,可以同时选中多个点。

注意: 按住 Ctrl 键并在地貌范围上拖动鼠来快速选择它们

Dynamic Data 动态数据

当"Show Dynamic Data"(显示动态数据)被选中时,整个测量光谱范围上的5 个波长随时间变化的数据被绘图,如图7-35所示。如果"Show Dynamic Data" (显示动态数据)没有选中,将出现一个滑块条,可以查看不同时间点的光谱 数据,如图7-36所示。







图 7-36. "Show Dynamic Data" (显示动态数据)未选择,单一时间点上的光谱测量被绘制。出现一个滑杆,可以移动到不同的时间片上。
7.6. Graph ScratchPad 图形暂存器

CompleteEASE 中 Graph ScratchPad (图形暂存器)用于添加更多的绘图控制。 尽管它不是一个完整的图形包,它允许你改变线条的颜色和选择几个不同的风格。此外,您可以更改每个曲线的图例名称,选择绘图的曲线,是否放在第二 Y轴上。Graph ScratchPad (图暂存器)的一个例子如图 7-37 所示。



图 7-37. Graph ScratchPad (图形暂存器)例子,比较多个数据曲线

选择任意曲线并点击'Edit'(编辑)按钮,你会得到一个扩展对话框,如图 7-38 所示。另外,所有这些条目都可以在曲线的相关区域直接点击来修改。可 以选择任意曲线,然后点击'Delete'按钮来删除它。Delete All'按钮,可以删除 所有曲线。

Edit Selected Curve	e(s)		
🗹 Graph	📃 2nd Y	Color	Style: 1 💌
Psi - Thickness #2			
	ОК	Cancel	

图 7-38. 'Edit' 按钮弹出的选择对话框,与行中列出的可编辑项类似。

默认情况下,各曲线将保持与复制图形相同的颜色。当多个相同颜色的曲线相比较时,这会比较混乱,这时需要配置多种颜色来区分。为了快速做到这点,CompleteEASE允许同时选择 Graph ScratchPad 中的多个曲线,如图 7-39 所示。然后,点击"'Edit (编辑)按钮,新的名字为"Automatically Set Colors"(自动设置颜色)复选框被添加,如图 7-40 所示。这个变化会影响所有选定的曲线,如图 7-41 所示。



图 7-39. Graph ScratchPad 中多个曲线被同时选定

Edit Selected Curve(s)	X
🖌 Graph 🗌 2nd Y	Color Style: 0 💌
🖌 Automati	cally Set Colors
Psi	
ОК	Cancel

图 7-40. 多条曲线被选择时,选中"Automaticall Set Colors"(自动设置颜色)框来改变 所有曲线的颜色。



图 7-41. "Automatically Set colors" (自动设置颜色) 后曲线绘图结果

此外,除了从图中添加的曲线外,你也可以点击'Create Curve'(创建曲线) 按钮来创建曲线。这允许你输入一个公式,使用标准的数学运算来操作现有的 曲线数据,如图 7-42 所示。点击'Add Parameter'(添加参数)按钮,现有的曲 线都被列为参数,如图 7-43 所示。

Edit Equation	X
Enter an equation:	
4*PI*[C2]*[x]/0.000124	
Add Parameter	<u>O</u> k <u>C</u> ancel

图7-42. 'Create Curve' (创建曲线) 按钮允许在已有曲线方程上编辑自有方程

Choose Parameter
Choose a Model Parameter:
C1
C2
C3
x
<u>O</u> k <u>C</u> ancel

图7-43. 'Add Parameter' (添加参数) 允许选择其他曲线或可用变量

点击'Add Trend'(添加趋势)对选择数据来拟合线条,二次或四次曲线,如 图 7-44 所示。通过"x units"的数字选择,可以扩展这条曲线到选定范围以外,关于 equation(方程)或 Y=0 intercept (Y=0 截距)的图例信息可以添加。



图 7-44. Graph Scratchpad 中趋势线编辑

此外,你可以选择两条趋势曲线,然后右键点击"Calculate Intersection"(计算 交会)点,如图 7-45 所示。曲线相交的一个例子显示在图 7-46 中,两条曲线 的直线扩展已添加,然后它们的交点被确定。

	Graph	2nd Y	Color	Style		Curve Name
C1	~			0	Thickness # 1	
T1	v			1	0.031034x + 177.57	
T2	V			1	0.10622x + 170.26	
						Calculate Intersection

图7-45. 选中两条趋势曲线鼠标右键访问"Calculate Intersection" (计算交会)



图 7-46. 曲线教会例子

点击'Graph Settings'(绘图设置)按钮来更改 Title(标题)、改变 font size (字体大小)和显示或隐藏 Grid lines(网格线),如图 7-47。

Graph Settings			
Titles			
Main <u>T</u> itle: Spectroscopic Ellipsometric (SE) Data			
X-Axis Title: Wavelength (nm)			
Y-Axis Title: Psi			
Y <u>2</u> -Axis Title: Delta			
Font Size: Main Title = 24 Axis Title = 24			
Settings			
🗹 Show Grid Lines			
<u>Q</u> k <u>C</u> ancel			

图 7-47. 'Graph Settings' 按钮允许访问 titles (标题)、font sizes (字体你大小)和 grid lines (网格线)

8. 参考- Measurement 主菜单

Measurement (测量) 主菜单如下图 8-1 所示。测量菜单包含 3 个窗口: System Status (系统状态), Measurement Controls (测量控制),和 Fit Results (拟合结果)。面板中的按钮和选项会依赖于硬件的配置有所不同, 以下将对本菜单中所有命令简要说明。

Measurement Analysis Hardware Options	Current User is jhilfiker Log Ou
System Status	Fit Results
Waiting to Acquire Data Measurement Controls Mgde: Fast Angles: Ø 65° Ø 70° Ø 75° Modej: Si with Thermal Oxide	MSE = 1.398 Angle Offset = 0.034 ± 0.0019 Total Thickness = 26.72 ± 0.006 nm
✓ Save Data after Measurement Measure	View Prev. Results

图 8-1. alpha-SE 系统的 Measurement 主菜单

8.1. System Status Panel 系统状态窗口

本窗口显示当前的硬件状态。在椭偏仪没准备好之前,会显示信息"Not Initialized"(未初始化)。如果椭偏仪已可以测量了,则显示"Waiting to Acquire Data"(等待采集数据)。

8.2. Measurement Controls: alpha-SE Systems

Mode: 模式

指定 alpha-SE 系统的测量模式类型。每一个模式在表 8-1 中有进一步详述。

Sample Alignment 样品对准:

确定测量前样品台 Z 轴高度的对准方式。表 8-1 提供了各选项的详细描述。

表 8-1. alpha-SE 的测量设置

类别	选项	描述	
Mode	Standard	大部分测量使用这个选项(~ 10 seconds)	
快 九	Fast	快速测量(~ 3 seconds)	
	Long	低反射样品或高精度测量 (~30 seconds)	
	Transmission	透射光强测量	
	M.M.	Mueller-matrix(穆勒矩阵)测量– 各向异性及退偏振样品	
	M.M. Long	高精度 Mueller-matrix(穆勒矩阵)测量	
Sample Alignment 样品对准	None	样品台位置低于光束,用于对打(90°)测量	
	Standard	用于标准反射测量。此设置执行前一次对准位置附近快速搜索反射 光束	
	Robust	在整个移动范围内搜索反射光的对准位置。用于有多个反射光斑的 玻璃基底。	
	Fixed Height	把样品台移动到硬件文件中设置好的高度。	
	Prompt Height	允许用户输入测量时样品台的高度。在测量前,应在 Hardware 主 菜单下执行一次 Z 轴扫描,以帮助确定高度。	
Model		点击"Choose from File Dialog."	
模型		所有缺省的模型保存在不同的目录中,目录包括:	
		Common, Advanced, Basic, 和 Calibration Wafers	
		只有 COMMON 目录下的模型会出现在下拉框中	

在"Standard"和"Long"模式下,在测量前和测量后都要检测马达的复位传感器。而且它们都进行 Zone-averaging (区域平均),在采集数据时,起偏器设置在+45°和-45°各采集一次数据,然后取平均值。这会提高数据的正确性。

在"M.M."模式下,设备采集穆勒矩阵的 12 个数据元。M11 的绝对强度测量 后,其他所有的元都是相对与 M11 的归一化参数。

要提高透射光强和穆勒矩阵测量的正确性,在测量样品前,进行一次"S-T baseline"或者"Off-Samplebaseline"测量。(在 *Hardware* 菜单下)。

Model

确定分析数据的模型。如果设置成"None",那么数据会被采集,但不会被分析。

Save Data after Measurement

勾上此选项以确保每次测量数据后被要求保存。该选项的默认设置为 ON,但你可以改变它并保持当前状态直至软件关闭。

'Measure'

开始一个测量,使用"Mode","Sample Alignment"中的设置来采集数据。然后用"Model"来分析数据,结果会显示在屏幕的右上角。

Common Models 常用模型

为了方便使用,可以将常用的 Model(模型)移到"Common"目录中。要执行 这个移动,在 *Analysis* 主菜单的 Model:部分点击'Open'按钮,在相应目录中 找到要移动的模型并用鼠标将模型名字(图 8-2 的右侧)拖放到"Common"目录 中(图 8-2 的左侧)。你可以同时操作多个模型。



图 8-2. 在 **Analysis** 主菜单中,点击 'Open Model',然后拖放任意目录(列在左边) 下的 model (模型)到Common 目录中(显示在左边)。

所有移动到 Common 目录下的模型现在出现在 **Measurement**>Measurement Controls>Model 下拉菜单中。如图 8-3 所示,可以看到 Common (图左边) 目录中有 5 个 (model) 模型,同名的这些模型也出现在 Model 的下拉菜单中 (图右边)。



图 8-3. 移动到 Common 目录(左边图中)下的模型可以从 **Measurement** 主菜单的 Model 下拉菜单(右边图)中快速访问。

8.3. M-2000, RC2, 和 AccuMap-SE 系统

对于 M-2000、RC2 和 AccuMap-SE 系统,数据采集有更多的选项。这个章节 中将讨论典型体统的基本选项。由于各系统配置各不相同,详细的介绍建议参 考对应配置系统的硬件手册。图 8-4 显示了配置有 mapping (地貌)和 camera (相机)的 M-2000 系统的典型 CompleteEASE *Measurement* 主菜单。对于 任一测量应有几个选项(如何测量,测量位置等等),CompleteEASE 使用一 个 Recipe (处方)来详细描述说有所有这些选项。对应特定测量或样品类型 的 Recipe (处方)可以创建和保存。

CompleteEASE		- d X
Measurement In situ Analysis Hard	vare Options	Current User is jhilfiker Log Out
System Status	Fit Results	Scan Map
Waiting to Acquire Data	No Results Available	
Measurement Controls		
Recipe: <select a="" recipe=""></select>		
Acq.:		
Scan:		
Model:		
Measure		
	View Prov. Resulte Granh Parme	View Camera Imana
		view Camera image
Graph Type		Show Data

图 8-4. 有自动变角、自动样品对准、自动样品平移台、focusing(聚焦)光学件和集成 camera (相机)的M - 2000 系统的 Measurement 主菜单

Measurement Recipe

对于这种类型的系统,测量控制可以整合到 Recipe(处方)中。每一个 Recipe (处方)描述了数据采集的三个基本元:1) Data Acquisition(数据采集),2)地 貌扫描位置设置,和3) Modeling(模型)。

Measurement>Measurement Controls>Recipe:下拉框包含下列选项:1) Prompt for Acquisition Parameters (采集参数提示) 2),提示 Recipe (处方)单元,3)常用 Recipe (处方)列表,4) Choose From File Dialog (选择文件对话框),5) Create/Edit Recipe (创建/编辑) Recipe。这些选项如图 8-5 图所示。

leteEASE			
rement	In situ	Analysis	Hard
n Status -			
ng to Acqu	uire Data		
rement Co	ontrols		
<select a="" recipe=""></select>			
<select a="" recipe=""></select>			
<prompt acquisition="" for="" parameters=""></prompt>			
<prompt to<br="">55, 65 and</prompt>	r Recipe Co 75° 3sec, 3	mponents> mm thick quick	
С	hoose From	n File Dialog	
	Create/Ed	it Recipe	
	Irement Irement In Status Ing to Acqu rement Co <select a="" r<br=""><prompt fo<br="">55, 65 and C</prompt></select>	In status In status	In situ Analysis Irement In situ Analysis In Status In Status

图8-5. Recipe (处方) 选项

<Select a Recipe>选择一个处方

这个条目不是可用选项,而是一个给用户的提示,即在进一步操作前,需要选择 一个 Recipe (处方)或改变这个设置。

<Prompt for Acquisition Parameters>采集参数提示

这个选项将忽略 Scan Pattern (扫描图形)和 Model (模型)。假设你只是想在单一位置上测量和保存数据,并在稍后建模分析,可以选用这个项。你可以在 类似于图 8-6 所示的窗口中指定数据采集参数, Acquisition Parameters box (数 据采集参数框)中列出的选项在章节 2.3 中有描述。

Acquisition Parameters Setup	
Data Acquisition Parameters	
Data Type: Standard	
Acq. Time: 2.00	
Scan Options	
Angle Scan: 55.00 To 70.00 By 15.00	
Measure In Transmission Mode	
Alignment Options	
Sample Tilt Alignment: Automatic	
Sample Height Alignment: Automatic-Quick	
Sample Thickness: 1.19 mm Set To Current Position	
Align At First Angle Alignment Angle: 65.00	
Other Options	
☑ Do Not Return To Sample Load Position	
☑ Do Not Reposition Translator	
Load Qk Cancel	

图 8-6. Acquisition Parameters Setup (采集参数设置) 对话框

<Prompt for Recipe Components>提示处方元

这个选项允许用户选择各处方单元,包括 Acquisition Parameters(采集参数)、 Scan Pattern(地貌扫描位置)和 Model(模型)-如图 8-7 所示。如果 recipe (处方)元尚未创建,他们可以在 Recipe Components(处方单元)对话框中被 创建。

Choose Recipe Components			
Recipe			
Acq. Parms: <select acquisition="" an="" parameters="" set=""></select>			
Scan Pattern: None			
Model: None			
Additional Parameters			
Folder for saving acquired data:			
Save Results Only - No Raw Data			
Export measurement results			
Load Existing Recipe			

图 8-7. 为一个 Recipe (处方) 选择不同的单元

Common Recipes

所有保存在 Common 文件夹(C:\CompleteEASE\recipes)下的 recipe 将出现在下 拉列表中,如图 8-5 如所示。在这个例子里,被称为"55,65, and 75° 3sec, 3mm thick quick"的处方已创建并已移到 Common 目录中。要移动一个 recipe 到 Common 目录中,选择将要在下面介绍的'Choose From File Dialog'选项,这将 打开 Recipe 对话框。浏览 folder "links" (文件夹"链接") 左边窗口,找到想要 添加到 Common 文件夹的 recipe (处方)。然后,将 Files 下面的 recipe 拖放到 Folder Links:下的 Common 文件夹上。

Open Recipe			X
Folder Links:	<u>F</u> iles:		
Recent	Name	Date	Size
► → James	13, 03 and 73 3560, 3mm thick quie 3	/2/03 11:03	
Add Folder Link			
	,		
File <u>N</u> ame: 55, 65 and 75° 3sec, 3mm thick	uick.recipe		
Qp	n <u>C</u> ancel		

图 8-8. Open Recipe (打开处方)对话框.

'Choose From File Dialog'从文件对话框选择

这个按钮打开一个窗口来显示计算机上可能包含处方的 Folder links(文件夹链 接)。如图 8-8。浏览并找到期望的 recipe,选择并打开它。

'Create/Edit Recipe 创建/编辑处方'

这个按钮允许创建或编辑一个 recipe(处方)。用于 recipe 的每个选项将在本 章后面描述。

任何 recipe(处方)均由三个主要单元组成,分别是 Acquisition Parameters (采集参数), Scan Pattern(地貌扫描位置)和 Model(模型),如图 8-9 所示。 这些单元的进一步细节将讨论。

Choose Recipe Components	X
Recipe	
Acq. Parms: <select acquisition="" an="" parameters="" set=""></select>	▼ E <u>d</u> it/Create
<u>S</u> can Pattern: None	▼ <u>E</u> dit/Create
Model: None	-
Additional Parameters	
Folder for saving acquired data:	
Save Results Only - No Raw Data	
Export measurement results	
Load Existing Recipe	<u>O</u> k <u>C</u> ancel

图 8-9. Components of a Recipe.

Save Data after Measurement 测量后保存数据

选中这个选择框,确保每一数据在测量后被保存。默认设置为 ON (开启),如 果改变了设置,设置会停留在新的设置上直至程序关闭。

'Measure'

'Measure'(测量)按钮开始一个测量或 recipe(处方)。'Measure'(测量)按钮还有两个右键菜单选项,如图 8-10 所示。

🔗 CompleteEASI			
Measurement	In situ	Analysis	Hardware C
System Status			Fit Re
Waiting to A	quire Da	ita	No R
Measurement	Controls-		
Recipe: <select< td=""><td>a Recipe></td><td></td><td>-</td></select<>	a Recipe>		-
Acq.:			
Model:			
✓ Save	Data after M	deasurement	
	Maaci	Iro	
	Acqui	ire Multiple Me	easurements
	Show	/ Recipe Sche	duler

图 8-10. 右键点击'Measure'按钮选择"Acquire Multiple Measurements"或 "Show Recipe Scheduler"选项。

Acquire Multiple Measurements

右键点击'Measure'(测量)按钮访问"Acquire Multiple Measurements"。

Show Recipe Scheduler

Scheduler 是一个工具,可以运行多个 recipe 而不需要用户输入。它主要为多个 样品同时装载到自动移动台上的案例而设计。Scheduler 允许每个样品使用各自 的 Recipe。要激活 Scheduler, Measurement 主菜单下 Measure 按钮上鼠标右击, 并选择"Show Recipe Scheduler"菜单条目。目前 scheduler 支持以下步骤:

- Run Recipe 运行一个预先定义的的 recipe
- Acquire Dynamic –指定时间上动态采集数据
- Delay 指定时间的暂停
- Set Temperature -- 设置温度和指定时间的等待
- Move Translator -移动移动台到指定位置

如图 8-11 所示的一个对话框出现,允许将命令建立在一个表中。

1	Scheduler				X
	Steps				
	Enabled	Step Description	Translator Offset	Save Nam	ie
	<u></u>	Double-click	k in a cell to edit its valu	le	
	[Add Delete Move L	Jp Move Down	Setup Filenames	
	L				
	Status				
	Run Schedule			Open Sav	/e Close

图8-11. Scheduler 对话框

当一个步骤被添加,它可以被设置为图 8-12 中下拉框中列出的任意"type"(类型)。每一个类型描述如下:

Run Recipe 运行处方

run recipe 步骤类型允许用户指定一个 recipe 来运行,如图 8-13。translator offset 在步骤中通过一个指定量来偏移移动台位置,此偏移相对 recipe(处方)。如图 8-14 所示。这个单一条目增加后, Scheduler 将列步骤在一个行中,如图 8-15 所示。

注意:为了使 offset 适用, recipe 必须设置, Do Not Reposition Translator 框不能 选中。

Input 👸	X
(i)	Choose the step type to add:
	Run Recipe 📃 💌
	Run Recipe
	Acquire Dynamic Data
	Delay
	Set Temperature
	Move Translator

图 8-12. Run Recipe Step.

Edit Step	Þ	×
Recipe:	<select a="" recipe=""></select>	-
	<u>O</u> k <u>C</u> ancel	

图 8-13. Edit Step to choose the Recipe.

Offset
Translator Offset: X = 0.0000 Y = 0.0000
<u>O</u> k <u>C</u> ancel

图 8-14. 添加 Translation Offset (移动台偏移)

Scheduler			X
Steps			
Enabled	Step Description	Translator Offset	Save Name
~	Run Recipe: a.RECIPE	(0.0000, 0.0000)	CICE399Idatta.SE
I	Double-click i	in a cell to edit its v	alue
	Add Delete	Move Un	Move Down
Status			
Run S	hedule		Open Save Close

图 8-15. 有单一步骤条目的 Scheduler

Acquire Dynamic 动态采集

Acquire Dynamic (动态采集)步骤允许用户指定一个 model (模型)号(在 *In Situ* 主菜单的按钮中被列出)和一个采集数据的时间,如图 8-16。

Edit Step
Acq. Time: 1.00 Model Number: 0
<u>O</u> k <u>C</u> ancel

图 8-16. dynamic (动态)数据采集步骤的编辑.

Delay 延时

Delay步骤插入一个延迟到计划表中。指定延迟时间单位为几分钟,如图 8-17。

Edit Step	\boxtimes
Wait Time in minute	s: 0.0000
<u>O</u> k	<u>C</u> ancel

图8-17. 增加一个"Delay" (延时)

Set Temperature 设置温度

Set Temperature(设置温度)步骤给支持的温度控制器改变温度,然后等待一个定量的时间使温度稳定,如图 8-18。

Edit Step	X
Setpoint Tempera	iture: 0.0 °C
Wait Time: 0.0000	minutes
<u>0</u> k	<u>C</u> ancel

图 8-18. Scheduler 的温度设置

Move Translator 移动移动台

Move Translator(移动平移台)步骤移动移动台到指定位置,如图 8-19 所示。

Edit Step		X
Translator Position: X=	0.0000	Y= 0.0000
QK	Cancel	

图 8-19. 增加一个 Move Translator (移动平移台) 步骤

Setting up Filenames 设置文件名

'Set up Filenames'"(设置文件名)按钮允许 schedule 运行时数据文件被命名。 图 8-20 显示了保存名字设置对话框。默认选项是"Automatically assign file name - <custom name><step #><time>"(自动指定文件名-〈定制的名字〉〈步骤#〉〈时 间〉)。当"Run Schedule"点击时,这个选项提示用户输入文本字符串,自动生成的文件名字已这个输入为开始。自动生成的文件名包含步骤号和当前时间。

第二个选项类似于默认项,区别是不提示用户输入文本字符串。这使文件名组成为 recipe 名称、步骤号和时间。

第三种选项是手动定义文件的名字。当这个选项被选择,用户必须为 scheduler 中每一个需要文件名的步骤指定名字,设置时双点击表格,用保存数据的标准 对话框来指定一个文件名。

Save Name Setup
File Naming Options
Automatically assign file name - <custom name=""><step #=""><time></time></step></custom>
Automatically assign file name - <recipe><step #=""><time></time></step></recipe>
\bigcirc Manually choose file name for each step (double-click in table cell)
Save Directory
Choose: c:\CompleteEASE\dat
<u>Q</u> k <u>C</u> ancel

图 8-20. Scheduler 中指派文件名

8.4. Acquisition Parameters 采集参数

Acquisition Parameters(采集参数)描述了在 Measurement Recipe 测量处方 (不管是单点还是地貌扫描)中,数据在每一个点上将如何采集。普通的 Acquisition Parameter(采集参数)选择窗口如图 8-21 所示。这些选项的详细 描述请参阅相应硬件手册。

Acquisition Parameters Setup
Data Acquisition Parameters
Data Type: Standard
Acq. <u>T</u> ime: 2.00
Scan Options
Angle Scan: 55.00 To 70.00 By 15.00
Measure In Transmission Mode
Alignment Options
Sample Tilt Alignment: Automatic
Sample Height Alignment: Automatic-Quick
Sample Thickness: 1.19 mm Set To Current Position
Align At First Angle Alignment Angle: 65.00
Other Options
🗹 Do Not Return To Sample Load Position
☑ Do Not Reposition Translator
Load <u>O</u> k <u>C</u> ancel

图 8-21. M-2000 和 RC2 系统的采集参数设置。列出的选择项在各不同系统中会有差异。

Data Type 数据类型

Data Type(数据类型)指定测量过程中采集的数据类型,如图 8-22 所示。



图 8-22. Data Typ (数据类型)的不同选项

Standard 标准

大多数应用使用"Standard"(标准)测量。这是一个简单的标准光谱椭偏测量。 采集的数据将包括对应波长和入射角上的 Psi 和 Delta。此外, depolarization (退偏振)和反射强度将被测量。然而,退偏振和反射强度的测量准确性分别 依赖与当前的 DC(直流)和强度基线校准。详情,请参考你的硬件手册。大多数 模型会忽略退偏振和强度测量,除非被建议要考虑这些额外的数据。

Generalized Ellipsometry 广义椭偏

Generalized ellipsometry(广义椭偏)测量包括一个样品的完整琼斯矩阵,包括 off-diagonal元(在标准 SE 测量中假定为零)。当各向异性样品的光轴与入射面不平行或垂直时,这种类型的测量是有用的。当样品出现退偏振时,广义 Generalized ellipsometry测量是不兼容的,因为它是基于测量光束和样品交互作用的琼斯矩阵描述。

广义椭偏测量包括三个比率,因此对应每个入射角上的测量会得到三个 Psi 曲 线和三个 Delta 曲线。

Mueller Matrix 穆勒矩阵

使用斯托克斯矢量对光束的偏振描述来测量偏振态的改变。这 Muellermatrix(穆勒矩阵)是一个4×4矩阵,但并不是每个椭偏仪都可以所有的元。 事实上,唯一的可以测量穆勒矩阵中所有16个元的是椭偏仪是 RC2系统。对于 大多数样品,穆勒矩阵中有相当的冗余,无需测量所有的16个元。对于各向同 性样品(有或无退偏振),完整的交互作用可以用4个测量元(M11, M21或 M12, M33或 M44,和 M34或 M43)来描述。如果样品也包含各向异性,需要的元的 数量升至7或8。只有最高级的样品测量需要更多的元来完整表征。因此,不 到1%的椭偏应用需要穆勒矩阵测量。

Transmission Intensity 透过强度

测量通过样品后的光强。对于 M-2000 系统, 透射强度使用探测信号的 AC 部分 计算, 非偏振不会被包含在测量中。

Reflection Intensity 反射强度

测量反射光的强度。对于 M-2000 系统,透射强度使用探测信号的 AC 部分计算, 非偏振不会被包含在测量中。

Sample Alignment 样品对准

样品对准选项取决于系统类型和配置。一般来说,有两个基本步骤来对准样品。 俯仰对准和高度对准。本节将描述各自的常用选项。

Tilt Alignment 倾斜对准

Tilt alignment (倾斜对准)涉及样品的俯仰与入射光束的相对倾角,这样反射 光束被对准到接收单元的正确入射角上。Tilt alignment 选项包含 Skip (跳过)、 Manual (手动)、 Automated (自动),如图 8-23 所示。

Sample Tilt Alignment:	Automatic	•
	Skip	
	Manual	
	Automatic	

图 8-23. Sample Tilt Alignment (样品对准)选项

使用聚焦件时,Tilt alignment 经常跳过,因为此时俯仰调节变得不灵敏。如果 经常测量的样品是平坦的,那么 Skip 也会使用。例如,如果一个系统用来持续 测量 200 毫米晶圆片,那么 Skip 将使用,因为不同样品的俯仰对准可能会非 常接近。

对于手动或自动对准,系统将研判入射到一个四象限探测器上的反射光束。通过调整俯仰,反射光束将均匀分布地在四象限探测器的中央,判断依据是所有4个探测器上有相同的光强。这种方法对于每个样品都有很高对准重复性。配置自动对准系统的 Tilt Alignment 例子如图 8-24 所示。



图8-24. 样品俯仰对准窗口

Sample Height Alignment 样品高度对准

Sample Height Alignment (样品高度对准)是调节椭偏仪光束和样品表面的相对位置,对于不同厚度的样品,保证其正确的高度位置。当系统为微光斑时(如聚焦光斑椭偏仪),这个调节尤其重要。在同一椭偏仪上测试很多种不同厚度的样品时,Sample Height Alignment (样品高度对准)也是非常重要的。 Sample Height Alignment (样品高度对准)也是非常重要的。 Sample Height Alignment (样品高度对准)的常用选项如图 8-25 所示。对于 Automated Height Alignment (自动高度对准),反射光束的不同 Z 高度高度和 接收端探测到的光强被记录。图 8-26 是一个示例。强度最高的位置即为样品 对准的正确 Z 轴高度位置。

Sample Height Alignment:	Automatic-Quick	•
	Skip	
	Manual	
	Automatic-Quick	
	Automatic-Robust	
	Use Sample Thickness	

图 8-25. Sample Height Alignment (样品高度对准)选项



图 8-26. 样品高度对准窗口.

Common Acquisition Parameters 常用采集参数

完成 Acquisition Parameter (采集参数)的设定后,你将被要求保存这些细节到 一个文件中。如果以后的测量中会使用这些采集参数,文件可以保存或移动到 Common 文件夹中。之后,他们将会出现在 Recipe (处方)单元的下拉菜单中 供选择。要移动采集参数到 Common 文件夹中, Recipe Components (处方单元) 框中选择'Edit/Create'(编辑/创建)按钮,然后,Acquisition Parameters (采集 参数)对话框中点击按'Load'按钮。这将打开文件对话框,如图 8-27 所示。适 当的文件夹中找到采集参数文件,然后用鼠标将右边 Files:下的文件拖放到右边 Folder Links:下的 Common 上。

Open Acquisition Parameter		X
Folder Links:	<u>F</u> iles:	
Recent Common	Name 55, 65, 75*, 3sec, 3mm thick, quick parms.parms	Date Size 3/2/09 11: 0 KB
🔶 🧰 James		
Add Folder Link		
File Name: 55, 65, 75*, 3sec, 3mm th	ck, quick parms.parms	
	<u>Open</u> <u>Cancel</u>	

图 8-27. 在 Open Acquisition Parameter (打开采集参数)窗口,你可以找到文件,并将窗口左边的文件拖放到右边的 COMMON 目录上,这些文件将在处方单元下拉菜单中快速访问。

8.5. Scan Pattern 扫描图案

扫描图案用来描述横贯样品的各测量点位。该选项适用于配置有自动样品移动 台的椭偏仪。要创建一个新的扫描图案, Recipe Components 窗口中 Scan Pattern 右边的 'Edit/Create' (编辑/创建) 按钮上鼠标点击。如图 8-28 所示。

Choose Recipe Components
Recipe
Acq. Parms: 55, 65, 75°, 3sec, 3mm thick, quick parms 🗾 Edit/Create
Scan Pattern: None
Model: None
Additional Parameters
Folder for saving acquired data:
Save Results Only - No Raw Data
Export measurement results
Load Existing Recipe

图 8-28. Recipe Components (处方单元) 窗口选择'Edit/Create'(编辑/创建) Scan Pattern (扫描图案)。

Scan Patter 编辑器, 如图 8-29 所示, 允许你描述圆形和矩形样品。有许多选项可以自动生成测量点位, 包括 Grid Fill(网格填充)、R-T Grid Fill(极坐标填充)、Line Fill(线填充)。大部分选择是直观的,最好的学习方法是对每个按钮多测试几次。

Scan Pattern Editor: (not saved)	X
Substrate Dimensions Circle Dia. (cm): 20.0 Draw Wafer Notch	
Point List 1: 0.0000, 8.5000 2: 38000, 8.5500 2: 8800, 8.5500 3: 8800, 8.5500 6: 0.9500, 8.5500 7: 0.9500, 8.5500 8: 1.9000, 8.5500 8: 1.9000, 8.5500 8: 1.9000, 8.5500 1: 4.2000, 8.5500 1: 4.2000, 8.5500 1: 4.2000, 7.5000 1: 4.2000, 7.6000 1: 4.2000, 7.6000 1: 4.28500, 7.6000 1: 4.28500, 7.6000 1: 4.3000, 7.6000	
Alignment Position ☆ 0.0 Y: 0.0 Align at this position only ▼	Pattern Offset X: 0.0 Y: 0.0 Theta (*): 0.0 Load Position: Default V
Deskew Points Do Deskew X1:0.0 Y1:0.0 X2:0.0 Y2:0.0 Record Image At Each Point Image Zoom: 1x	Transmission Intensity Baseline Use Point For Transmission Baseline X: 0.0 Y: 0.0
Load Save Close	

图 8-29. Scan Pattern Editor (扫描图案编辑器)

作为一个例子,如果你点击'Grid Fill'(网格填充)按钮,你会得到如图 8-30 所示的选项。Scan Pattern(扫描图形)同时描述了整体的样品对准方案。例如,你可以选择 Align at a single point only(仅在一个单点上对准)。也可以选择 alignment at the first point and then z-alignment at all other points(第一个点上做 完整的样品对准,在其他所有的点上做 Z 轴对准)。

	Grid Fill
	Grid <u>S</u> pacing (cm): 2.0 <u>G</u> rid Style: Square
Grid Fill	Grid <u>M</u> argin (¢m): 1
Grid <u>Spacing (cm):</u> 2.0 <u>G</u> rid Style: Square	
Grid Margin (cm): 1	Scan Region of Interest (cm)
Scan Region of Interest (cm)	Left 0.0 Right 0.0 Bottom: 0.0
OK Cancel	OK Cancel

图8-30. Grid Fill (网格填充)的选项

Scan Region of Interest 扫描感性趣的区域

Scan Region of Interest(扫描感兴趣的区域)允许你在部分区域上指定网格点,而不是在整个基底上。相对于基底中心 Top(顶部)、Bottom(底部)、Left(左边)、 Right(右边)的值被键入。

例如,对于一个 10x10 cm 的方形基底,通过键入下述值,你可以在基底右下方 创建网格点:

Top=0, Left=0, Right=5, Bottom=-5

Adding Common Scan Patterns 添加常用扫描图案

当创建了满足你测量要求的扫描图案后,你可以保存这些文件,供今后使用。如果它们是常用 pattern (图案),你可以添加 Scan Pattern 到 Common 文件夹中。为了做到这点, Scan Pattern Editor 中点击'Load'按钮,这将弹出"Open Scan Pattern"(打开扫描图案)对话框,如图 8-31。找到你会经常使用的这些文件,然后简单的用鼠标将它们从右边拖放到显示在左边的 COMMON 目录上。

-ojder Links:	Eiles:		
- 🚍 Recent	Name	Date	Size
⊢ ul Common julianes New Maps	49 Point, tuli aligniscan	4729709 2:17 PM	1 KB
Add Folder Link	j		
File Name: 49 Point, full align.sca	n		

图 8-31. Open Scan Pattern (打开扫描图案) 窗口, 要移动任意常用扫描图案, 简单的 用鼠标将这个窗口中右边的文件拖放到左边的 COMMON 目录上。

8.6. Fit Results Panel 拟合结果面板

数据分析结果被放置在这个文本框中,它在屏幕的右上方,图 8-32 是一个示例。



图 8-32. Measurement (测量)主菜单中的 Fit Results (拟合结果) 面板

8.7. Right-click menu 右键菜单(*Measurement*>Fit Results:)

Copy to Clipboard – Formatted

复制格式化结果到剪贴板中,适合粘贴到一个文字编辑文件中,如下所示:

MSE = 2.837 Thickness # 1 = 96.71 ±0.018 nm n of Cauchy Film @ 632.8 nm = 1.865

Copy to Clipboard - Table

复制表格化结果到剪贴板中,适合粘贴到一个表格或电子数据表中,如下所示:

		ERROR
PARAMETER	VALUE	BAR
MSE	2.837	
Thickness # 1 (nm)	96.71	0.018
n of Cauchy Film @ 632.8 nm	1.865	

8.8. 'View Previous Fit Results 显示以前的拟合结果

显示以前样品的拟合结果。这个按钮会打开一个新的对话框,如图 8-33 所示。 选择想要显示的 Location(位置)和 Files(文件), File Information 面板中 将显示拟合结果的表格。这个表格可以用'Copy Text to Clipboard'(复制文本 到剪贴板)和'Copy Table to Clipboard'(复制表格到剪贴板)按钮复制结果到 剪贴板中。

View Data			X
Location			File Information
CompleteEASE homework		-	
Files			
Name	Date		
CHROME.SE	1/7/08 [08:34]		
duv30-#1_very fine scan.SE	1/7/08 [08:34]		
latio3 tft - jun.SE	12/21/07 [15:		
nb-bulk.SE	1/7/08 [08:34]		
Sample 1.SE	9/20/07 [15:35]		
Sample 10.SE	9/20/07 [15:35]		
sample 11 PECVD SiN on Si	12/21/07 [15:		
Sample 11.SE	9/20/07 [15:35]		
Sample 12.SE	9/20/07 [15:35]		
Sample 13.SE	9/20/07 [15:35]	_	
Sample 14.SE	9/20/07 [15:35]		
Sample 15.SE	9/20/07 [15:35]		
Sample 16.SE	9/20/07 [15:35]		
Sample 17.SE	9/20/07 [15:35]		
Sample 18.SE	9/20/07 [15:35]		
Sample 19.SE	9/20/07 [15:35]		
Sample 2.SE	9/20/07 [15:35]		
Sample 20.SE	9/20/07 [15:35]		
Sample 21.SE	9/20/07 [15:35]		
Sample 22.SE	9/20/07 [15:35]		
Sample 23.SE	9/20/07 [15:35]		
Sample 24.SE	9/20/07 [15:35]		
Sample 25.SE	9/20/07 [15:35]		
Sample 3.SE	9/20/07 [15:35]		
Sample 4.SE	9/20/07 [15:35]	-	
Calc <u>M</u> ulti-Sample Stats	<u>G</u> raph Data	1	
Open File	7	_	Copy Text To Clipboard Copy Table To Clipboard
			Close

图8-33. 显示 Previous Fit Results (以前拟合结果) 对话框

在 Files 面板选择单一数据文件,可以'Open File'(打开文件)"。这将打开数据 文件,而不是与之前拟合关联的模型。

在 Files 面板中用鼠标选择多个结果,可以进行'Calc. Multi-Sample Stats'(多样品统计计算)。一个例子显示图 8-34 中。

ication		File Informa	tion					
ompleteEASE homework	-	Multipl	e Samı	ole Sta	tistics	;		
00		Recipe: N	/A .					
es			MSE	Brod.	Fo	Fa	Finf	Total Thickness I
Name	Date	Average	6.9244	0.0000	5.5310	4.5263	2.5609	931.586
mple 11.SE	9/20/07 [15:36]	Min	3.7380	0.0000	5.4722	4.4542	2.4931	873.862
ple 12.SE	9/20/07 [15:36]	Max	8.8926	0.0000	5.6145	4 5965	2.6301	1012.946
le 13.SE	9/20/07 [15:35]	Std. Dev.	2.2162	0.0000	0.0538	0.0571	0.0531	48,401
314.SE	9/20/07 [15:35]	% Range	32.0061	0	0.9731	1.2612	2.0716	5.196
/e 15.SE	9/20/07 [15:36]	Sample 3	8.893	0.000	5.496	4.550	2.534	919.29
le 16.SE	9/20/07 [15:35]	Sample 4	8.558	0.000	5.505	4.578	2.520	942.17
ple 17.SE	9/20/07 [15:36]	Sample 5	3.738	0.000	5.472	4.597	2.493	1012.95
ule 18.SE	9/20/07 [15:36]	Sample 6	8.677	0.000	5.501	4.548	2.534	927.25
ple 19.SE	9/20/07 [15:36]	Sample 7	8 483	0.000	5.534	4 502	2 606	965.61
ple 2.SE	9/20/07 [15:35]	Sample 8	5 469	0.000	5 595	4 4 5 4	2.630	873.86
le 20.SE	9/20/07 [15:35]	Sample 9	4.654	0.000	5.615	4 4 5 5	2.609	879.96
3 21.SE	9/20/07 [15:36]	41						
ple 22.SE	9/20/07 [15:35]							
ple 23.SE	9/20/07 [15:35]							
ple 24.SE	9/20/07 [15:35]							
le 25.SE	9/20/07 [15:35]							
le 3.SE	9/20/07 [15:35]							
ple 4.SE	9/20/07 [15:35]							
le 5.SE	9/20/07 [15:35]							
le 6.SE	9/20/07 [15:35]							
le 7.SE	9/20/07 [15:35]							
le 8.SE	9/20/07 [15:35]							
e 9.SE	9/20/07 [15:35]							
IK.SE	1/7/08 [08:34]							
ft - iun SE	12/21/07 [15:27]							
Calc Multi-Sample Si	ats Graph Data							
Ope	n File			Copy Text	To Clipbo	ard	Copy Tag	le To Clipboard
			- 01					

图8-34. 显示多样品结果统计

如果选择的文件是覆盖样品的地貌数据。所有的点都显示在列表中,同时显示的统计在表的顶部,包含 average (平均)、min (最小)max (最大) standard deviation (标准偏差)、%range (范围百分比)和%uniformity (均匀性百分比),如图 8-35 所示。

%RANGE(范围)

range(范围)百分比定义为:

$$\% RANGE = 100\% \left(\frac{MAX - MIN}{AVERAGE} \right)$$

%UNIFORMITY

uniformity (均匀性) 定义为:

$$\% UNIFORMITY = 100\% \left(\frac{STDEV}{AVERAGE}\right)$$

File Information FULL_MAP_FOCUSED Acq. Parameters: 2 Angle Scan.parms Scan Pattern: 1593 Point Map.scan Model: Test-Genosc.mod Thickness # 1 (nm) Signt Tilt X Average 86.268 7.6515 -0.0239 Min 71.143 6.3241 -0.7397 E Max 91.108 7.9145 0.5159 Std. Dev. 4.117 0.1027 0.4239 % Range 23.14342 20.78481 -5245.17871 % Uniformity 4.77262 1.34238 -1770.88586 (14.500,6.500) 71.84 7.807 -0.589 (13.00,6.500) 78.52 7.808 -0.584 (13.00,6.500) 79.50 7.772 -0.580 (12.500,6.500) 81.33 7.748 -0.572 (11.500,6.500) 81.33 7.748 -0.572 (11.500,6.500) 82.38 7.762 -0.573 (10.000,6.500) 83.70 7.717 -0.583 (10.000,6.500) 83.70 7.717 -0.597 <th colspan="7"></th>								
FULL_MAP_FOCUSED Recipe: Focused_FULL MAP Acq. Parameters: 2 Angle Scan.parms Scan Pattern: 1593 Point Map.scan Mode: Test-Genosc.mod Min 71.143 6.3241 -0.7397 Max 91.108 7.9145 0.5159 Std. Dev. 4.117 0.1027 0.4239 % Range 23.14342 20.78481 -5245.17871 % Uniformity 4.77262 1.34238 -1770.88586 (14.500,6.500) 76.98 7.807 -0.589 (13.000,6.500) 78.52 7.808 -0.584 (13.000,6.500) 78.52 7.72 -0.572 (11.500,6.500) 81.93 7.729 -0.575 (11.000,6.500) 82.38 7.762 -0.578 (10.000,6.500) 83.70 7.717 -0.597 (9.500,6.500) 83.70 7.717 -0.597 (9.500,6.500) 83.70 7.717 -0.597 (10.000,6.500) 85.66 7.701 -0.563	File Information							
Recipe: Focused_FULL MAP Acq. Parameters: 2 Angle Scan. parms Scan Pattern: 1593 Point Map.scan Mode: Test-Genosc.mod Image: State Scan Pattern: 1593 Point Map.scan Mode: Test-Genosc.mod Image: State Scan Pattern: 1593 Point Map.scan Min 71.143 Sight Titt X Average 86.268 7.6515 -0.0239 Min 71.143 6.3241 -0.7397 Max 91.108 7.9145 0.5159 Std. Dev. 4.117 0.1027 0.4239 % Range 23.14342 20.78481 -5245.17871 % Uniformity 4.77262 1.34238 -1770.88586 (14.000,6.500) 7.812 7.72 -0.589 (13.000,6.500) 78.52 7.808 -0.589 (12.500,6.500) 81.22 7.72 -0.580 (12.500,6.500) 81.22 7.725 -0.572 (11.500,6.500) 83.70 7.717 -0.597 (9.500,6.500) 84.62 <td colspan="7">FULL MAR FOCUSED</td>	FULL MAR FOCUSED							
Recipe: Focused_FULL MAP' Acq. Parameters: 2 Angle Scan.parms Scan Pattern: 1593 Point Map.scan Model: Test-Genosc.mod <u>Thickness # 1 (nm)</u> <u>SigInt</u> Tilt X Average 86.268 7.6515 -0.0239 2 Min 71.143 6.3241 -0.7397 9 Max 91.108 7.9145 0.5159 Std. Dev. 4.117 0.1027 0.4239 % Range 23.14342 20.78481 -5245.17871 % Uniformity 4.77262 1.34238 -1770.88586 (14.500,6.500) 71.84 7.836 -0.598 (13.500,6.500) 78.52 7.808 -0.584 (13.000,6.500) 79.50 7.772 -0.580 (12.500,6.500) 81.22 7.725 -0.572 (11.500,6.500) 81.22 7.725 -0.578 (10.000,6.500) 82.38 7.762 -0.578 (10.000,6.500) 83.70 7.717 -0.597 (9.500,6.500) 83.70 7.717 -0.597 (9.500,6.500) 85.66								
Acq. Parameters: 2 Angle Scan.parms Scan Pattern: 1593 Point Map.scan Model: Test-Genosc.mod Thickness # 1 (nm) Sight Tilt X Average 86.268 7.6515 -0.0239 A Min 71.143 6.3241 -0.7397 Max 91.108 7.9145 0.5159 Std. Dev. 4.117 0.1027 0.4239 % Range 23.14342 20.78481 -5245.17871 % Uniformity 4.77262 1.34238 -1770.88586 (14.500,6.500) 71.84 7.836 -0.598 (14.000,6.500) 76.98 7.807 -0.589 (13.500,6.500) 78.52 7.808 -0.584 (13.000,6.500) 79.50 7.772 -0.580 (12.500,6.500) 81.93 7.729 -0.575 (11.000,6.500) 81.93 7.729 -0.575 (11.000,6.500) 81.93 7.729 -0.575 (11.000,6.500) 82.78 7.743 -0.588 (10.500,6.500) 83.70 7.717 -0.597 (9.500,6.500) 83.70 7.717 -0.597 (9.500,6.500) 83.70 7.717 -0.597 (9.500,6.500) 85.22 7.684 -0.585 (8.500,6.500) 85.96 7.708 -0.533 (7.500,6.500) 85.96 7.708 -0.533 (7.500,6.500) 87.15 7.706 -0.470 (6.500,6.500) 87.15 7.706 -0.470 (6.500,6.500) 87.70 7.699 -0.428 (0.000,6.500) 87.70 7.699 -0.428 (0.000,	Recipe: Focus	ed_FULL MAP						
Scan Pattern: 1593 Point Map.scan Model: Test-Genosc.mod Thickness # 1 (nm) SigInt Tilt X Average 86.268 7.6515 -0.0239 - Min 71.143 6.3241 -0.7397 - Max 91.108 7.9145 0.5159 Std. Dev. 4.117 0.1027 0.4239 % Range 23.14342 20.78481 -5245.17871 % Uniformity 4.77262 1.34238 -1770.88586 (14.500,6.500) 71.84 7.836 -0.598 (14.000,6.500) 76.98 7.807 -0.589 (13.500,6.500) 78.52 7.808 -0.574 (13.000,6.500) 79.50 7.772 -0.580 (12.500,6.500) 81.33 7.748 -0.574 (12.000,6.500) 81.93 7.729 -0.575 (11.000,6.500) 82.78 7.743 -0.588 (10.000,6.500) 83.70 7.717 -0.597 (9.500,6.500) 83.70 7.717 -0.597 (9.500,6.500) 85.22 7.684 -0.583	Acq. Parameters: 2 A	ngle Scan.parms						
Thickness # 1 (nm) SigInt Tilt X Average 86.268 7.6515 -0.0239 Min 71.143 6.3241 -0.7397 Max 91.108 7.9145 0.5159 Std. Dev. 4.117 0.1027 0.4239 % Range 23.14342 20.78481 -5245.17871 % Uniformity 4.77262 1.34238 -1770.88586 (14.500,6.500) 71.84 7.836 -0.598 (14.000,6.500) 76.98 7.807 -0.589 (13.500,6.500) 78.52 7.808 -0.584 (13.000,6.500) 79.50 7.772 -0.580 (12.500,6.500) 81.33 7.748 -0.574 (12.000,6.500) 81.22 7.725 -0.572 (11.500,6.500) 82.78 7.743 -0.588 (10.000,6.500) 82.78 7.743 -0.588 (10.000,6.500) 83.70 7.717 -0.597 (9.500,6.500) 83.70 7.717 -0.597 (9.500,6.500) 85.66 7.701 -0.563 (8.000,6.500	Scan Pattern: 1593 P Model: Test Censes	oint Map.scan						
Average 86.268 7.6515 -0.0239 Average Min 71.143 6.3241 -0.7397 Max Max 91.108 7.9145 0.5159 Std. Dev. 4.117 0.1027 0.4239 % Range 23.14342 20.78481 -5245.17871 % Uniformity 4.77262 1.34238 -1770.88586 (14.500,6.500) 71.84 7.836 -0.598 (14.000,6.500) 76.98 7.807 -0.589 (13.500,6.500) 78.52 7.808 -0.584 (13.000,6.500) 79.50 7.772 -0.580 (12.500,6.500) 80.33 7.748 -0.574 (12.000,6.500) 81.93 7.729 -0.575 (11.000,6.500) 82.78 7.743 -0.588 (10.500,6.500) 83.70 7.717 -0.597 (9.500,6.500) 83.70 7.717 -0.578 (10.000,6.500) 85.22 7.684 -0.585 (8.500,6.500) 85.25 7	model. Test-denose.	Thickness # 1 (nm)	Cialat	Tilt V				
Average 00.200 7.0515 1.0516 1.0516 <th1.05016< th=""> <th1.05016< th=""> <th1.0501< td=""><td>Average</td><td>26 269</td><td>7 6515</td><td>-0.0220</td><td></td></th1.0501<></th1.05016<></th1.05016<>	Average	26 269	7 6515	-0.0220				
Min 71.143 0.3241 -0.7397 Max 91.108 7.9145 0.5159 Std. Dev. 4.117 0.1027 0.4239 % Range 23.14342 20.78481 -5245.17871 % Uniformity 4.77262 1.34238 -1770.88586 (14.500,6.500) 71.84 7.836 -0.598 (14.000,6.500) 76.98 7.807 -0.589 (13.500,6.500) 78.52 7.808 -0.574 (13.000,6.500) 80.33 7.748 -0.574 (12.000,6.500) 81.22 7.725 -0.572 (11.500,6.500) 81.93 7.729 -0.575 (11.000,6.500) 82.78 7.743 -0.588 (10.000,6.500) 82.78 7.743 -0.588 (10.000,6.500) 83.70 7.717 -0.597 (9.500,6.500) 85.22 7.684 -0.585 (8.500,6.500) 85.96 7.708 -0.533 (7.500,6.500) 87.70 7.699 -0.428	Min	71 1/2	6 22/1	0.0239				
Max 91.108 7.9145 0.3139 Std. Dev. 4.117 0.1027 0.4239 % Range 23.14342 20.78481 -5245.17871 % Uniformity 4.77262 1.34238 -1770.88586 (14.500,6.500) 71.84 7.836 -0.598 (14.000,6.500) 76.98 7.807 -0.589 (13.500,6.500) 78.52 7.808 -0.584 (13.000,6.500) 79.50 7.772 -0.580 (12.500,6.500) 80.33 7.748 -0.574 (12.000,6.500) 81.93 7.729 -0.575 (11.000,6.500) 82.38 7.762 -0.578 (10.500,6.500) 82.78 7.743 -0.588 (10.000,6.500) 83.70 7.717 -0.597 (9.500,6.500) 85.22 7.684 -0.585 (8.500,6.500) 85.96 7.708 -0.533 (7.500,6.500) 85.96 7.708 -0.533 (7.500,6.500) 87.75 7.06 -0.470	Mox	01 100	7.0145	0.1391	-			
300. Dev. 4.117 0.1027 0.4239 % Range 23.14342 20.78481 -5245.17871 % Uniformity 4.77262 1.34238 -1770.88586 (14.500,6.500) 71.84 7.836 -0.598 (14.000,6.500) 76.98 7.807 -0.589 (13.000,6.500) 78.52 7.808 -0.584 (13.000,6.500) 79.50 7.772 -0.580 (12.500,6.500) 80.33 7.748 -0.574 (12.000,6.500) 81.22 7.725 -0.572 (11.500,6.500) 81.93 7.729 -0.575 (11.000,6.500) 82.38 7.762 -0.578 (10.500,6.500) 82.78 7.743 -0.588 (10.000,6.500) 83.70 7.717 -0.597 (9.500,6.500) 84.62 7.680 -0.599 (9.000,6.500) 85.22 7.684 -0.585 (8.500,6.500) 85.96 7.708 -0.533 (7.500,6.500) 86.25 7.720 -0.504 (7.000,6.500) 87.15 7.706 -0.470 <td>Std Dov</td> <td>91.100 / 117</td> <td>0.1027</td> <td>0.0109</td> <td></td>	Std Dov	91.100 / 117	0.1027	0.0109				
23.14342 20.70401 -02431767 % Uniformity 4.77262 1.34238 -1770.88586 (14.500,6.500) 71.84 7.836 -0.598 (14.000,6.500) 76.98 7.807 -0.589 (13.000,6.500) 78.52 7.808 -0.584 (13.000,6.500) 79.50 7.772 -0.580 (12.500,6.500) 80.33 7.748 -0.574 (12.000,6.500) 81.93 7.729 -0.575 (11.000,6.500) 82.38 7.762 -0.578 (10.500,6.500) 82.78 7.743 -0.588 (10.000,6.500) 83.70 7.717 -0.597 (9.500,6.500) 84.62 7.680 -0.599 (9.000,6.500) 85.22 7.684 -0.585 (8.500,6.500) 85.96 7.708 -0.533 (7.500,6.500) 87.15 7.706 -0.470 (6.500,6.500) 87.70 7.699 -0.428 (0.500,6.500) 87.70 7.699 -0.428	% Pange	92 1/2/2	20 79/91	-52/5 17971				
1.34235 1.34235 1.7035360 (14.500,6.500) 71.84 7.836 -0.598 (14.000,6.500) 76.98 7.807 -0.589 (13.500,6.500) 78.52 7.808 -0.584 (13.000,6.500) 79.50 7.772 -0.580 (12.500,6.500) 80.33 7.748 -0.574 (12.000,6.500) 81.93 7.729 -0.575 (11.000,6.500) 82.38 7.762 -0.578 (10.500,6.500) 82.78 7.743 -0.588 (10.000,6.500) 83.70 7.717 -0.597 (9.500,6.500) 84.62 7.680 -0.599 (9.000,6.500) 85.22 7.684 -0.585 (8.500,6.500) 85.96 7.708 -0.533 (7.500,6.500) 86.25 7.720 -0.504 (7.000,6.500) 87.70 7.699 -0.428 (6.500,6.500) 87.70 7.699 -0.428 (6.500,6.500) 87.70 7.699 -0.428	% Uniformity	23.14342 A 77262	1 2/228	-1770 99596				
(14.500,6.500) 71.54 7.630 70.589 (14.000,6.500) 76.98 7.807 -0.589 (13.500,6.500) 78.52 7.808 -0.584 (13.000,6.500) 79.50 7.772 -0.580 (12.500,6.500) 80.33 7.748 -0.574 (12.000,6.500) 81.22 7.725 -0.572 (11.000,6.500) 81.93 7.729 -0.575 (11.000,6.500) 82.38 7.762 -0.578 (10.500,6.500) 82.78 7.743 -0.588 (10.000,6.500) 83.70 7.717 -0.597 (9.500,6.500) 84.62 7.680 -0.599 (9.000,6.500) 85.22 7.684 -0.585 (8.500,6.500) 85.96 7.708 -0.533 (7.500,6.500) 86.25 7.720 -0.504 (7.000,6.500) 87.70 7.699 -0.428 (6.500,6.500) 87.70 7.699 -0.428 (6.500,6.500) 87.70 7.699 -0.428	(14 500 6 500)	71.8/	7.836	-0.598				
(14.000,0.500) 70.50 7.007 -0.584 (13.500,6.500) 78.52 7.808 -0.584 (13.000,6.500) 79.50 7.772 -0.580 (12.500,6.500) 80.33 7.748 -0.574 (12.000,6.500) 81.22 7.725 -0.572 (11.500,6.500) 81.93 7.729 -0.575 (11.000,6.500) 82.38 7.762 -0.578 (10.500,6.500) 82.78 7.743 -0.588 (10.000,6.500) 83.70 7.717 -0.597 (9.500,6.500) 84.62 7.680 -0.599 (9.000,6.500) 85.22 7.684 -0.585 (8.500,6.500) 85.96 7.701 -0.503 (7.500,6.500) 86.25 7.720 -0.504 (7.000,6.500) 87.15 7.706 -0.470 (6.500,6.500) 87.70 7.699 -0.428 (10.500,6.500) 87.70 7.699 -0.428	(14.000,6.500)	76.08	7.807	-0.590				
(13.000,6.500) 79.50 7.772 -0.580 (12.500,6.500) 80.33 7.748 -0.574 (12.000,6.500) 81.22 7.725 -0.572 (11.500,6.500) 81.93 7.729 -0.575 (11.000,6.500) 82.38 7.762 -0.578 (10.500,6.500) 82.78 7.743 -0.588 (10.000,6.500) 82.78 7.743 -0.597 (9.500,6.500) 83.70 7.717 -0.597 (9.500,6.500) 84.62 7.680 -0.579 (9.000,6.500) 85.22 7.684 -0.585 (8.500,6.500) 85.96 7.701 -0.563 (8.000,6.500) 85.96 7.708 -0.533 (7.500,6.500) 87.15 7.706 -0.470 (6.500,6.500) 87.70 7.699 -0.428 - (10.500,6.500) 87.70 7.699 -0.428 - (10.500,6.500) 87.70 7.699 -0.428 - (10.500,6.500) 87.70 7.699 -0.428 - (10.500,6.500) 87	(13,500,6,500)	78.52	7.808	-0.584				
(12.500,6.500) 17.530 17.172 -0.500 (12.500,6.500) 80.33 7.748 -0.574 (12.000,6.500) 81.22 7.725 -0.572 (11.500,6.500) 81.93 7.729 -0.575 (11.000,6.500) 82.38 7.762 -0.578 (10.500,6.500) 82.78 7.743 -0.588 (10.000,6.500) 83.70 7.717 -0.597 (9.500,6.500) 84.62 7.680 -0.579 (9.500,6.500) 85.22 7.684 -0.585 (8.500,6.500) 85.66 7.701 -0.563 (8.000,6.500) 85.96 7.708 -0.533 (7.500,6.500) 87.15 7.706 -0.470 (6.500,6.500) 87.70 7.699 -0.428 (0.500,6.500) 87.70 7.699 -0.428 (0.500,6.500) 87.70 7.699 -0.428 (0.500,6.500) 87.70 7.699 -0.428 (0.500,6.500) 87.70 7.699 -0.428 (0.500,6.500) 87.70 7.699 -0.428 <td>(13.000,6.500)</td> <td>70.52</td> <td>7.000</td> <td>-0.580</td> <td></td>	(13.000,6.500)	70.52	7.000	-0.580				
(12.500,6.500) 81.22 7.725 -0.572 (11.500,6.500) 81.93 7.729 -0.575 (11.000,6.500) 82.38 7.762 -0.578 (10.500,6.500) 82.78 7.743 -0.588 (10.000,6.500) 82.78 7.717 -0.597 (9.500,6.500) 83.70 7.717 -0.597 (9.500,6.500) 84.62 7.680 -0.599 (9.000,6.500) 85.22 7.684 -0.585 (8.500,6.500) 85.66 7.701 -0.563 (8.000,6.500) 85.96 7.708 -0.533 (7.500,6.500) 87.15 7.706 -0.470 (6.500,6.500) 87.70 7.699 -0.428 (0.500,6.500) 87.70 7.699 -0.428 (0.500,6.500) 87.70 7.699 -0.428 (0.500,6.500) 87.70 7.699 -0.428 (0.500,6.500) 87.70 7.699 -0.428	(12,500,6,500)	80.33	7.748	-0.574				
(11.500,6.500) 81.93 7.729 -0.575 (11.000,6.500) 82.38 7.762 -0.578 (10.500,6.500) 82.78 7.743 -0.588 (10.000,6.500) 83.70 7.717 -0.597 (9.500,6.500) 84.62 7.680 -0.599 (9.000,6.500) 85.22 7.684 -0.585 (8.500,6.500) 85.66 7.701 -0.563 (8.000,6.500) 85.96 7.708 -0.533 (7.500,6.500) 87.15 7.706 -0.470 (6.500,6.500) 87.70 7.699 -0.428 (0.500,6.500) 87.70 7.699 -0.428 (0.500,6.500) 87.70 7.699 -0.428 (0.500,6.500) 87.70 7.699 -0.428 (0.500,6.500) 87.70 7.699 -0.428 (0.500,6.500) 87.70 7.699 -0.428 (0.500,6.500) 87.70 7.699 -0.428	(12.000,6.000)	81.22	7 725	-0.572				
(11.500,6.500) 82.38 7.762 -0.578 (10.500,6.500) 82.78 7.743 -0.588 (10.000,6.500) 83.70 7.717 -0.597 (9.500,6.500) 84.62 7.680 -0.579 (9.000,6.500) 85.22 7.684 -0.585 (8.500,6.500) 85.66 7.701 -0.563 (8.000,6.500) 85.96 7.708 -0.533 (7.500,6.500) 86.25 7.720 -0.504 (7.000,6.500) 87.70 7.699 -0.428 (6.500,6.500) 87.70 7.699 -0.428 (6.500,6.500) 87.70 7.699 -0.428 (7.000,6.500) 87.70 7.699 -0.428 (6.500,6.500) 87.70 7.699 -0.428 (7.000,6.500) 87.70 7.699 -0.428 (9.500,6.500) 87.70 7.699 -0.428 (9.500,6.500) 87.70 7.699 -0.428	(11,500,6,500)	81.03	7 729	-0.575				
(11.500,6.500) 82.78 7.743 -0.588 (10.000,6.500) 82.78 7.717 -0.597 (9.500,6.500) 84.62 7.680 -0.599 (9.000,6.500) 85.22 7.684 -0.585 (8.500,6.500) 85.66 7.701 -0.563 (8.000,6.500) 85.96 7.708 -0.533 (7.500,6.500) 86.25 7.720 -0.504 (7.000,6.500) 87.70 7.699 -0.428 (6.500,6.500) 87.70 7.699 -0.428 (10.000,6.500) 87.70 7.699 -0.428 (10.000,6.500) 87.70 7.699 -0.428 (10.000,6.500) 87.70 7.699 -0.428 (10.000,6.500) 87.70 7.699 -0.428 (10.000,6.500) 87.70 7.699 -0.428 (10.000,6.500) 87.70 7.699 -0.428 (10.000,6.500) 87.70 7.699 -0.428 (10.000,6.500) 87.70 7.699 -0.428 (10.000,6.500) 87.70 7.699 -0.428 <td>(11.000,6.500)</td> <td>82.38</td> <td>7 762</td> <td>-0.578</td> <td></td>	(11.000,6.500)	82.38	7 762	-0.578				
(10.500,0.500) 02.70 7.717 -0.507 (10.000,6.500) 83.70 7.717 -0.597 (9.500,6.500) 84.62 7.680 -0.599 (9.000,6.500) 85.22 7.684 -0.585 (8.500,6.500) 85.66 7.701 -0.563 (8.000,6.500) 85.96 7.708 -0.533 (7.500,6.500) 86.25 7.720 -0.504 (7.000,6.500) 87.70 7.699 -0.428 (6.500,6.500) 87.70 7.699 -0.428 (5.500,6.500) 87.70 7.699 -0.428 (5.500,6.500) 87.70 7.699 -0.428 (5.500,6.500) 87.70 7.699 -0.428 (5.500,6.500) 87.70 7.699 -0.428 (5.500,6.500) 87.70 7.699 -0.428 (5.500,6.500) 87.70 7.699 -0.428	(10,500,6,500)	82.78	7.743	-0.588				
(10.000,0.500) 84.62 7.680 -0.599 (9.500,6.500) 84.62 7.684 -0.585 (8.500,6.500) 85.22 7.684 -0.585 (8.500,6.500) 85.66 7.701 -0.563 (8.000,6.500) 85.96 7.708 -0.533 (7.500,6.500) 86.25 7.720 -0.504 (7.000,6.500) 87.15 7.706 -0.470 (6.500,6.500) 87.70 7.699 -0.428 Copy Text To Clipboard Copy Table To Clipboard Close	(10.000,6.500)	(10.000,0.000) 02.70 7.717 0.507						
(0.000,6.500) 85.22 7.684 -0.585 (8.500,6.500) 85.66 7.701 -0.563 (8.000,6.500) 85.96 7.708 -0.533 (7.500,6.500) 86.25 7.720 -0.504 (7.000,6.500) 87.15 7.706 -0.470 (6.500,6.500) 87.70 7.699 -0.428 (6.500,6.500) 87.70 7.699 -0.428 (7.000,6.500) 87.70 7.699 -0.428 (6.500,6.500) 87.70 7.699 -0.428 (7.000,6.500) 87.70 7.699 -0.428 (6.500,6.500) 87.70 7.699 -0.428 (7.000,6.500) 87.70 7.699 -0.428 (9.000,6.500) 87.70 7.699 -0.428 (10.500,6.500) 87.70 7.699 -0.428 (10.500,6.500) 87.70 7.699 -0.428 (10.500,6.500) 87.70 7.699 -0.428 (10.500,6.500) 87.70 7.699 -0.428 (10.500,6.500,700,700,700,700,700,700,700,700,700,	(9 500 6 500)	84.62	7.680	-0.599				
(0.000,0.000) 00.11 1.004 0.000 (8.500,0.6500) 85.66 7.701 -0.563 (8.000,0.500) 85.96 7.708 -0.533 (7.500,0.500) 86.25 7.720 -0.504 (7.000,0.500) 87.15 7.706 -0.470 (6.500,0.500) 87.70 7.699 -0.428 (6.500,0.500) 87.70 7.699 -0.428 (1000,0.500) 87.70 7.699 -0.428 (1000,0.500) 87.70 7.699 -0.428 (2000,0.500) 87.70 7.699 -0.428 (2000,0.500) 87.70 7.699 -0.428 (2000,0.500) 87.70 7.699 -0.428 (2000,0.500) 87.70 7.699 -0.428 (2000,0.500) 87.70 7.699 -0.428 (2000,0.500) 87.70 7.699 -0.428 (2000,0.500) 87.70 7.699 -0.428 (2000,0.500) 87.70 7.699 -0.428 (2000,0.500) 87.70 7.699 -0.428 (2000,0.50	(9,000,6,500)	85.22	7.684	-0.585				
(1000,1000) 85.96 7.708 -0.533 (7.500,6.500) 86.25 7.720 -0.504 (7.000,6.500) 87.15 7.706 -0.470 (6.500,6.500) 87.70 7.699 -0.428 (6.500,6.500) 87.70 7.699 -0.428 (7.000,6.500) 87.70 7.699 -0.428 (6.500,6.500) 87.70 7.699 -0.428 (6.500,6.500) 87.70 7.699 -0.428 (6.500,6.500) 87.70 7.699 -0.428 (6.500,6.500) 87.70 7.699 -0.428 (7.000,6.500) 87.70 7.699 -0.428	(8 500 6 500)	85.66	7 701	-0.563				
(1.000,6.500) 86.25 7.720 -0.504 (7.000,6.500) 87.15 7.706 -0.470 (6.500,6.500) 87.70 7.699 -0.428 (6.500,6.500) 87.70 7.699 -0.428 (6.500,6.500) 87.70 7.699 -0.428 (6.500,6.500) 87.70 7.699 -0.428 (6.500,6.500) 87.70 7.699 -0.428 (6.500,6.500) 87.70 7.699 -0.428 (6.500,6.500) 87.70 7.699 -0.428 (6.500,6.500) 87.70 7.699 -0.428 (7.500,6.500) 87.70 7.699 -0.428 (7.500,6.500) 87.70 7.699 -0.428 (6.500,6.500) 87.70 7.699 -0.428 (7.500,6.500) 87.70 7.699 -0.428 (8.500,6.500) 87.70 7.699 -0.428 (9.500,6.500) 87.70 7.699 -0.428 (9.500,6.500) 87.70 7.699 -0.428 (9.500,6.500) 87.70 7.699 -0.428 (9.500,6.500) 87.70 7.699 -0.428 (9.500,6.500) 87.70 7.699 -0.428 (9.500,6.500) 8	(8 000 6 500)	85.96	7 708	-0.533				
(1.100) (1.100) 0.100 1.110 0.004 (7.000,6.500) 87.15 7.706 -0.470 (6.500,6.500) 87.70 7.699 -0.428 (6.500, 6.500) 87.70 7.699 -0.428 (6.500, 6.500) 87.70 7.699 -0.428 (6.500, 6.500) 87.70 7.699 -0.428 (6.500, 6.500) 87.70 7.699 -0.428 (7.000, 6.500) 87.70 7.699 -0.428 (6.500, 6.500) 87.70 7.699 -0.428 (7.000, 6.500) 87.70 7.699 -0.428 (8.500) 87.70 7.699 -0.428 (9.500) 87.70 7.699 -0.428 (9.500) 87.70 7.699 -0.428 (9.500) 87.70 7.699 -0.428 (9.500) 87.70 7.699 -0.428 (9.500) 87.70 7.699 -0.428 (9.500) 87.70 7.699 -0.428 (9.500) 87.70 7.699 -0.428 (9.500) 87.70 7.699 -0.428 (9.500) 87.70 7.699 -0.428 (9.500) 87.70 7.699 -0.428 <	(7 500 6 500)	86.25	7 720	-0.504				
(6.500,6.500) 87.70 7.699 -0.428 (6.500,7.699 -0.428 Copy Text To Clipboard Copy Table To Clipboard	(7.000.6.500)	87.15	7.706	-0.470				
Copy Text To Clipboard Copy Table To Clipboard	(6,500,6,500)	87.70	7.699	-0.428				
Copy Text To Clipboard Copy Table To Clipboard								
Copy Text To Clipboard Copy Table To Clipboard								
Copy Text To Clipboard Copy Table To Clipboard								
Close	Copy Text To Clipboard Copy Table To Clipboard							
Close								
0000	Close							

图 8-35. 地貌结果将显示各拟合参数的 average (平均)、 min (最小) max (最大) standard deviation (标准偏差)、%range (范围百分比)和 %uniformity (均匀性百分比)于所有点结果的顶部。

对于地貌数据, 'Graph Data'按钮可以被选择并打开一个新窗口, 它允许用户选择想要显示的拟合结果, 如图 8-36 所示。



图 8-36. total thickness 的 Uniformity map (均匀性地貌)

9. 参考 - Analysis 主菜单

Analysis (分析) 主菜单如图 9-1 所示。这个主菜单包含 3 个面板: **Data** (数 据)、**Model**(模型)和 **Fit**(拟合)。



图 9-1. CompleteEASE 软件中 Analysis 主菜单已选中

9.1. Data: Panel

'Open'

(**℃L):** 打开数据文件。

(***R**): "Append Data"(合并)数据到已有的文件中,如图 9-2 所示。数据文件必须有相同波长。



(***R**):最近访问的数据列表,可以快速打开,如图 9-2 所示。

图 9-2. Data: 面板中'Open'的右键菜单,可以访问"Append Data" (合并数据)和打开 列表中最近访问的文件。

'Save'

(**①L**):保存一个数据文件。CompleteEASE保存数据为加密文件,这些文件只能由CompleteEASE打开。文件的扩展名是标准数据的".SE"或动态数据的"iSE"。

(心R): 选择"Save Data Subset"或"Export to Text File".

"Save Data Subset"保存数据子集

'Save'上鼠标右键来选择这个选项。数据子集为缩减了的当前选择(波长、角度、时间、地貌中多点等等)。

"Export to Text File"(输出文本文件)

'Save'上鼠标右键来选择这个选项。数据将输出为一个文本文件。

'Info'信息

显示 CompleteEASE 中当前打开数据的信息。一个例子的信息框如图 9-3 所示。



图9-3. 信息框显示测量数据的详细信息

'Set Ranges'

设置当前数据参与拟合的波长范围和角度。也可以选择均匀性地貌数据中的移动台位置,如图 9-4 所示。当地貌数据被绘图,这个对话框可以选择绘图角度和波长。

Select Data Range				
Wavelength Range				
Min: 191.8 nm Ma <u>x</u> : 1697.3 nm				
Selected Angles				
50.00° 60.00° 70.00°				
•				
Select <u>A</u> ll Angles				
Selected Translation Point				
Selected Point: X = -14.50, Y = 0.00				
Graph Angle: 60.00° 🗸 Graph WVI. 756.4 nm				
<u>O</u> k <u>C</u> ancel				

图 9-4. 点击'Set Ranges' (设置范围) 来选择 wavelengths (波长)、 angles (角度)、 translation point (移动台点位)和 graphing angles/wavelengths (绘图角度/波长)

9.2. Fit: 拟合面板

'Generate' 生成数据

(*** DL**): 基于当前模型和数据的设置来 Generate data (生成数据)。快捷键 Alt-G。

(***R**): "Clear Generated Data"(清除生成数据)允许从 graph 窗口中清除所有 生成数据曲线。

'Fit'拟合

基于当前模型和数据的设置来拟合数据。快捷键 Alt-F。

'Fit Scan Data' 动态拟合

当前为均匀性地貌数据时,第三个按钮'Fit Scan Data'(拟合动态数据)将显示,它可以用模型拟合均匀性地貌空间序列的每个数据点。在点击这个按钮前一定要清除 multi-sample(多样品)模式。

'Fit Dynamic'

(**℃L**): 鼠标左键, 拟合相对于时间而测得的动态数据 Fit dynamic data that has been taken versus time.

(*** R**): 鼠标右键,可以选择 "Append Fit Results", "Fit Backwards in Time", 或者 "Fit Backwards and Append"

"Append Fit Results" 添加拟合结果

在拟合动态数据时,分别拟合不同时间段的数据也许会很有帮助。在第一个时间段的数据拟合好后,用这个菜单选项,可以把新的时间段的数据拟合好并添加到先前的拟合结果中。

"Fit Backwards in Time" 向前倒推拟合

该选项用于"结尾"处的结果比"开始"处结果更好推断的动态数据。例如, 它。可以用在刻蚀研究中,最后的厚度比较容易测定

"Fit Backwards and Append" 向前倒推拟合并添加

该选项是前两个选项的组合。它从选择的时间的最远处开始,向前倒推拟合一 并且会把结果添加到先前动态数据的拟合结果中。

'Reset' 重置

(**CL**): 鼠标左键, 回复模型参数到拟合之前的设置。

(哈R): 鼠标右键,可选择 "Show Reset List"

"Show Reset List 显示重置列表"

显示一个重置时间点的列表。最近的数据/模型在每次拟合前和拟合后, CompleteEASE 会自动的保存这样的时间点。一个示例如图 9-5 所示。

Reset List
Choose a recent state to open:
13:23:33 - Before Fit
13:23:34 - After Fit
13:55:18 - Before Fit
13:55:20 - After Fit
<u>O</u> K <u>C</u> ancel

图9-5. 重置列表可以让用户选择重置的位置,这些位置在拟合前和拟合后由软件自动 保存

9.3. Analysis>Fit: 右键菜单

在 **Fit**:面板中鼠标右击访问右键菜单,如图 9-6 图 9-40 所示。可以看到,对于 拟合单一测量点、均匀性地貌或动态数据,选项会有不同。

🗹 Auto Fit		🗹 Auto Fi	it	
View Fit Stats		View Fit Stats		
Copy to Clipboard - Formatted		View Parameter Stats.		
Copy to Clipboard - Table		Copy F	Parameters to Clipbo	pard
Copy Analysis Report to Clipboa	ard Ctrl-R	Copy A	Analysis Report to Cl	ipboard Ctrl-R
Add to Fit Log	Ctrl-L	Add to	Fit Log	Ctrl-L
View Fit Log	Ctrl+Alt-L	View F	it Log	Ctrl+Alt-L
Advanced Graph Options		Advand	ced Graph Options	
Graph OCs Vs. Time		Graph	OCs Vs. Time	

图9-6. 光谱数据和均匀性地貌数据拟合后在Fit: 面板中的鼠标右键选项。

"Auto Fit" 自动拟合

当选择框被选中时,一个点被选中或新的数据打开,拟合将自动进行。当没有选中时,只有点击'Fit'(拟合)按钮时,数据分析才开始。

"View Fit Stats"显示拟合统计

各拟合完成后,每个拟合参数包括 90%置信度的统计值可查阅,拟合参数之间 的相关性矩阵也可以查阅,如图 9-7 所示。相关性值接近+1 或-1 显示两个参数 可达到拟合相同效果,因此是不唯一的。

Indi Neoulio							
MSE = 4.82031, # of Iterations = 5, nFit=6, N	fax. Correlation = 0.885	(Amp1_TiO2 : UV P	ole AmpTiO2)				
Fit Parms	Correlation Matrix						
Coughness = 35.888440.39868 JV Pole Ang072627.387774-06 45473353 tmp1_1102=681.0830.4 1846466 % Inhomogeneilty=3.9500.2 0.8410 Thickness # 1=943.3702.6 45301 # Back Reflections=0.71804±0.009090	Roughness UV Pole Amp_TiO2 Amp1_TiO2 Mi Inhomogenetly Thickness # 1 # Back Reflections	Roughness 1.000 0.449 -0.322 0.516 -0.055 0.257	UV Pole Amp. TiO2 0.49 1.000 -0.885 0.336 0.022 0.203	Amp1_TiO2 -0.322 -0.885 1.000 -0.253 -0.432 0.209	% Inhomogeneity 0.516 0.336 -0.253 1.000 0.084 0.228	Thickness # 1 -0.055 0.022 -0.432 0.084 1.000 -0.729	#Back Reflections 0.257 0.203 0.209 0.228 -0.729 1.000
	[OK	Conv Corr. Mat. to Cli	oboard			

图 9-7. "View Fit Stats" (显示拟合统计)显示完成一个拟合后的 90% 置信度等统计, 以及相关性矩阵值。

"View Parameter Stats"显示参数统计

拟合完地貌数据后,这个选项可以显示地貌上所有点拟合的统计,各位置的拟合值也显示。如图 9-8 所示。

Descrition (am)	MCC	Thickness	^	000000000000000000000000000000000000000	~	n of Couch
Position (CIII)	WISE	Thickness	A	D	C	n or Gauch
Average	295.888	70.42	2.3493	-0.0099	0.0004	2.3269
Min.	271.082	-1.00	1.3484	-0.0385	-0.0008	1.2590
Max.	316.900	138.37	3.0000	0.0433	0.0011	3.0860
Std. Dev.	22.943	66.37	0.8835	0.0327	0.0007	0.9422
% Range	15.485	197.9109	70.3005	-828.9840	513.5914	78.5154
(14.5,6.5)	304.991	138.37	2.9828	0.0433	-0.0008	3.0860
(14,6.5)	316.900	-1.00	1.4153	-0.0348	0.0009	1.3337
(13.5,6.5)	271.418	107.65	3.0000	-0.0095	0.0003	2.9783
(13,6.5)	315.050	-1.00	1.3484	-0.0385	0.0011	1.2590
(12.5,6.5)	271.082	108.07	3.0000	-0.0097	0.0003	2.9777
Copy To Clipboard Close						

图 9-8. 均匀性地貌数据所有点的"View Parameter Stats"(显示地貌统计)

"Copy to Clipboard – Formatted"

拟合完单点数据后,可以复制结果到剪贴板中,这种格式适用于字处理软件处理。

"Copy to Clipboard – Table"

拟合完单点数据后,可以复制结果到剪贴板中,这种表格格式适用于电子表单 软件处理。

"Copy Parmeters to Clipboard"复制参数到剪贴板

均匀性地貌数据拟合完后,可以复制所有测试点的结果到剪贴板中。

"Copy Analysis Report to Clipboard"复制分析报告

拟合完后,你可以很方便的将结果放置到报告中。报告的格式与数据分析的类型有关。例如,一个单点数据分析如图 9-9 所示。包含在报告中的光学常数图是一个选项,可以在 Model:>+OTHER Options 中控制。均匀性地貌分析后,地貌图是报告的一部分,而不是光谱拟合质量,如图 9-10 所示。最后,对于多样品分析,每个数据的光谱拟合都复制到报告中,如图 9-11 所示。



图9-9. 单点拟合后的分析报告, 层光学常数已添加(从 Model: +OTHER Options)



图 9-10. 均匀性地貌数据的分析报告



图9-11. multi-sample analysis (多样品分析)的分析报告

"Add to Fit Log"追加到日志

将当前的拟合结果追加到日志中,供以后查阅。CTRL-L 是 add to fit log (追加到日志)的快捷键。

"View Fit Log"显示拟合日志

View the Fit Log(显示拟合日志),将列出 CompleteEASE 启动后所有被记录的 拟合结果,如图 9-12 所示。拟合日志在 CompleteEASE 关闭后清除,但是可 以保存提供以后访问。

Fit Log			
Log Entries	Selected Entry		
2011-9-19 [0941]	Exp. Data File: 120nm Oxide on Si		
2011-9-19 [0941]	Current Model: Si with Thermal Oxide		
2011-9-19 [0941]	Fit Parameters: MSE=2.510		
	Angle Offset = 0.071 ± 0.0044 Total Thickness = 124.61 ± 0.007 nm		
Rename Delete			
Com <u>p</u> are Reanaly <u>z</u> e			
Generate Reports View Reports	# Fit = 2, # Times = 1		
Load Log Entry Clear L	Log Open Log Save Log Close		

图 9-12. Fit Log (拟合日志) 对话框

'Rename'重命名

选择一个日志条目并重命名

'Delete'删除

选择一个日志条目并从拟合日志中删除

'Compare 比较'

选择多个日志条目并比对统计,如图 9-13 所示。在 Comparison (比较)对话 框中,可以"Add Statistics"(增加统计)、"Reverse Columns/Rows"(反转列/ 行)和进一步的'Compare Optical Constants'(比较光学常数),这个按钮弹出新 的对话框,如图 9-14 所示。
Comparison					
Entry Comp	arison Tabl	е			
	MSE	Angle Offset	Total Thick		
2011-9-19 [2.510	0.071	124.61		
2011-9-19 [13.885	-0.094	1640.58		
2011-9-19 [3.673	-0.051	273.02		
Average	6.68935	-0.02467	679.403		
Std. Dev.	6.25887	0.08574	835.705		
Std. Dev. 0.25887 0.06574 835.705 Reverse Columns/Rows ✓ Add Statistics Copy To Clipboard Qlose Compare Optical Constants					

图 9-13. Fit Log Comparison (拟合结果比较)显示了各拟合日志条目的结果。



图 9-14. 'Compare Optical Consstants'(比较光学常数)弹出窗口,显示各模型,可以在 各模型中选择不同的层绘图。

'Reanalyze'重分析

数据 Reanalyze(重新分析)的对话框如图 9-15 所示。它使用一个表来指定分析 步骤,包含 File Group(文件组)、(Model)模型、Log Name(日志名)。文 件组是要分析的数据的列表。它可以由同一目录下一个或多个文件组成。 Model(模型)是一个已保存到磁盘的模型文件。当增加重分析结果到拟合日 志时,Log Name(日志名)指定的文本字符串将追加到数据文件的名字上。

Reanalyze Data		
Batch Reanalysis Setup		
File Group	Model	Log Name
I	Add Row Delete Row	
Re-save Data		Reanalyze Cancel

图 9-15. Reanalyze Data (重分析数据)对话框

要在表格中添加一个分析步骤,点击'Add Row'(添加行)。弹出 Choose Files (选择文件)对话框的,如图 9-16。缺省可用的文件组是"Selected Log Entries" (选择的日志条目),这个组里包含了点击 Reanalyze 按钮之前已选中的拟合日志中的条目。要添加一组文件使其在 Choose File Group 中可用,点击 Add 按钮。这个按钮弹出标准文件对话框,它允许多个文件同时被选中。选择所需的文件后关闭对话框,你可以给文件组命名,如图 9-17 所示。注意,如果只有一个文件被选为组,那么文件名自动设置成这个组的名称。指定组名后,现在它出现在 Choose Files (选择文件)对话框中,如图 9-18 所示。在软件关闭之前,创建的文件组一直可用。

Choose Files	
Choose File Group	Files in Selected Group
Selected Log Entries	
Add Edit	
	<u>O</u> k <u>Cancel</u>

图 9-16. 为重分析,选择文件添加到组里

CompleteEASE Input
Enter a name for the group:
Group A
<u>O</u> k <u>C</u> ancel

图9-17. 输入组名

Choose Files	
Choose File Group	Files in Selected Group
Selected Log Entries	c:\CE399\dat\123-2.SE
Group A	c:\CE399\dat\123-3.SE
	c:\CE399\dat\123- 4.SE
	c:\CE399\dat\123- 5.SE
Add	
Edit	
	<u>Ok</u> <u>Cancel</u>

图9-18. 新的组名以及相关文件显示到对话框中

在 Choose Files(选择文件)对话框中选择一个 file group(文件组)并点击 Ok, 来完成增加行。指定文件组的行出现在重分析表中,如图 9-19 所示。通过双击 你想要改变的单元格,不同的组可以被指定。这也适用于 Model(模型)和 Log Name(日志名)项。要完成分析设置,通过鼠标双击相应的项来指定一个 Model(模型)和 Log Name(日志名),如图 9-20 所示。

一旦分析设置完毕,'Reanalyze'(重分析)按钮可以点击来启动分析。软件逐一完成所有数据文件的分析,并增加结果到当前 Fit Log(拟合日志)中。拟合示例如图 9-21 所示。

R	Reanalyze Data				
Batch Reanalysis Setup					
	File Group Group A	Model <double-click choose="" to=""></double-click>	Log Name		
		Add Row Delete Row			
	🗌 Re-save Data		Reanalyze Cancel		

图 9-19. Reanalysis (重分析)对话框中的行里,已有 File Group (文件组)显示。

Reanalyze Data						
Г	Batch Reanalysis Setup					
	File Group	Model	Log Name			
	Group A	C:\CE399\MOD\Basic\Si with Thermal Oxide.mod	Thermal Oxide Model			
		Add Row Delete Row				
	🗌 Re-save Data		Reanalyze Cancel			

图 9-20. 点击相应位置来添加 Models (模型)和 Log Names (日志名)

Fit Log					
Log Entries		Selected Entry	/		
123- 2-Thermal Oxide M	odel	Exp. Data File:	123-2		
123- 3-Thermal Oxide M	odel	Current Model:	Si with Thermal Oxide		
123- 4-Thermal Oxide M 123- 5-Thermal Oxide M	odel	Fit Parameters:	MSE=1.790		
	Juci		Angle Offset = -0.029 ± 0.0041 Total Thickness = 19.72 ± 0.012 nm		
<u>R</u> ename	Delete				
Com <u>p</u> are	Reanalyze				
<u>G</u> enerate Reports	⊻iew Reports		# Fit= 2, # Times = 1		
Loa	Load Log Entry Clear Log Open Log Save Log Close				

图 9-21. 分析后的 Fit Log (拟合日志),组里每个文件作为日志条目被添加进来。

'Generate Reports'生成报告

复制选中日志条目的拟合结果到一个 RTF 格式报告中, 它被保存为一个文件。

'View Reports'显示报告

不再是可用的按钮

'Load Log Entry'装载日志条目

你可以在列表中选择一个日志,然后点击'Load Log Entry'(装载日志条目)来 打开这个结果。在日志条目上鼠标双击可以完成同样操作。

'Clear Log'清除日志

清除所有的日志条目

'Open Log' / 'Save Log'

打开一个被保存的日志。这是一个便捷的方法来储存拟合结果到计算机上,但 要求数据文件位于同一个目录下,因为数据没有作为日志的一部分被保存。

'Close'

关闭拟合日志

"Advanced Graph Options"高级绘图选项

拟合均匀性地貌数据后,"Advanced Graph Options"(高级绘图选项)可用,允 许组合不同 X-Y 参数,如图 9-22 所示。使得参数之间可能存在的相关性可以用 图形来解释。

更有用的是,动态拟合后,各参数可以相对时间绘图,如图 9-23 所示。



图 9-22. 拟合均匀性地貌数据后,"Advanced Graph Options"可用,它允许组合不同的 X-Y 参数



图 9-23. 使用 Advanced Graph Option (高级绘图选项),动态数据分析后膜厚相对时间的绘图

"Graph OCs vs. Time"光学常数相对时间绘图

这个选项允许光谱光学常数相对时间的绘图。选中后,会询问绘图哪个光学常数值,如图 9-24 所示。层的序数,绘制曲线的总数量,如图 9-25 所示。在选定范围上数据分析的这些曲线是等时间间隔的。图 9-26 显示的例子是非晶硅生长过程中的折射率。

CompleteEASE Input
Choose the optical constant type to graph:
n
k
e1
e2
<u>Ok</u> <u>Cancel</u>

图 9-24. 从 n、k、 e1、 e2 中选择

CompleteEASE Input
Enter the number of curves to draw:
10
<u>O</u> k <u>C</u> ancel

图9-25. 输入绘制的曲线数量, 在拟合时间范围内等间隔划分



图 9-26. 动态拟合的等时间间隔分布的 10 个折射率图

9.4. Model: 模型窗口

位于 Analysis 主菜单窗口的右半部分,显示当前数据分析 model (模型)的所 有选项和细节。图 9-27 所示是一个示例 model (模型)。模型中各选项详细说 明如下。

		r 🛛	X	
Options				
Model: Si with Transparent Film				
Ogen Save Clear	Op <u>e</u> n Snapshot	S <u>a</u> ve Snapshot		
Layer Commands: <u>Add Delete Save</u> Include Surface Roughness = <u>OFF</u> + Layer # 1 = <u>Cauchy Film</u> Thickness # 1 = <u>274.05 nm</u> (fit) Substrate = <u>SI JAW</u> Angle Offset = <u>0.000</u>				
+ MODEL Options + FIT Options				
OTHER Options				
Configure Options				
Turn Off All Fit Parameters				

图 9-27. Analysis 表单中的基本 Model:. 面板

'Open'

(**心L):**打开一个新的模型

(℃**R**): Merge models(合并模型) 或 View Recent List of Models to open (显示 最近使用过的模型,可以快速打开)

	±]]	X		
ption	S			
Mode	el: Si with Transparent Film			
0	pen Save Clear Onen Snanshot Save Snanshot			
	Merge Models			
Lá	C:\CompleteEASE\MOD\Basic\Si with Transparent Film.mod			
In	C:\CompleteEASE\MOD\Basic\Si with Thermal Oxide.mod			
+La	C:\CompleteEASE\MOD\Basic\a-Si on Glass.mod			
S	C:\CompleteEASE\MOD\Basic\a-Si on Glass (with Backside Reflection).mod			

图 9-28. Model 面板 'Open' 按钮上鼠标右击,访问 "Merge Models" 或得到最近打开过的 模型类表。

"Merge Models" 合并模型

在"Open"按钮上点击鼠标右键,可以合并模型。

'Save' 保存

(**℃L):**保存当前模型和所有的模型设置

'Clear'

清除当前模型

'Open Snapshot 打开快照'

(**℃L):** 打开一个(snapshot) 快照

(个R):显示最近打开过的 snapshot 来快速打开

snapshot(快照)是单一文件,压缩了 CompleteEASE 软件屏幕上所有的信息,包含测量的数据,model(模型)和拟合结果。这是一个便捷的方式来保存和存储信息。因为它包含所有的数据,如果是由大均匀性地貌数据创建而来,快照可以很大。

'Save Snapshot 保存快照'

保存 snapshot (快照) 文件。snapshot (快照) 是单一文件,压缩了 CompleteEASE 软件屏幕上所有的信息,包含测量的数据,model (模型) 和拟 合结果。这是保存和存储信息的快捷办法。文件以".SESnap"为扩展名。

<u>Add</u>添加

点击此按钮可以添加膜层,出现 Add Layer to Model 对话框。移动鼠标,移动 蓝色条来指定新层的添加位置,然后点击鼠标(图 9-29)。如果在点击蓝色条之

前,Layer Type (层类型)已变为"Intermix"(中间层),添加的层将是上下两层的 EMA 混合层。

Add Layer To Model	X
Layer # 1 = : a-Si parameterized Substrate = : 7059_Cauchy	Layer Type Standard Intermix
Cancel	

图 9-29. CompleteEASE 中"Add" (添加) 对话框.

注意:按住 CTRL 键然后点击 Add 按钮将自动加层到当前模型的最上方,而不会询问位置。

注意:在 Backside Correction (背反射) on (开启)时,可以在基底下方添加 层。

Delete

点击此按钮从模型中删除膜层。用鼠标选择要删除的膜层(让它变蓝),点 击删除(图 9-30)。

Dele	te Layer From Model 🛛 🛛 🖂	
		1
	Layer # 1 = : a-Si parameterized	
	Substrate = : 7059_Cauchy	I
		I
		I
		I
		I
		I
		I
		I
		I
		I
	Delete Model Cancel	

图 9-30. CompleteEASE 中 "Delete" (删除) 对话框.

<u>Save</u>

点击此键可以保存膜层的光学常数。在点击你要保存的膜层之前(图 9-31),先选择保存的形式(either Dispersion Parameters or Tabulated 以色散关系式参数形式或表格形式)。

Save Layer Optical Constants	X
Layer#2=: SiO2_JAW	Save Type
Layer # 1 = : a-Si parameterized	Dispersion Parms.
Substrate = : 7059_Cauchy	Tabulated
Cancel	

图9-31. CompleteEASE 中"Save" (保存) 对话框

Include Surface Roughness 包含表面粗糙

在现有模型中设置为 on,来拟合表面粗糙层。表面粗糙层使用 Bruggemann Effective Medium Approximation(等效介质近似理论)来混合 50% 的顶层薄膜和 50% 的空(孔)。表面粗糙层的厚度是唯一可以拟合的参数。如果粗糙层厚度变为负值,粗糙层中的 void 使用-50% 的混比,这将增加表面区域的光学特性(而不是降低它们)。表面粗糙层是一个"stealing"(窃取)层,它厚度的一半取自于底下的膜层。因此,对于 100nm Cauchy(柯西)层并有 20nm 表面粗糙层的情况,模型实际计算时按照 90nm Cauchy(柯西)层及 20nm 表面粗糙层来计算。

Model Pictorial 模型图例

模型的结构是一层一层膜层的叠加,每一膜层都有厚度和其他的参数。膜层前 有"+"的,可以展开,显示膜层的更详细的信息。图 9-32 是一个示例。The model is shown as a layer-by-layer picture with details regarding thickness and other parameters to describe the individual layers. Any layer with a "+" can be expanded to show more details about that layer. This is demonstrated in 图 9-32.

	Roughness = 0.00 Å (fit)
	Layer # 2 = <u>a-Si</u> Thickness # 2 = <u>480.00 Å</u>
	-Layer # 1 = <u>Cauchy Film</u> Thickness # 1 = <u>1100.00 Å</u> (fit)
Roughness = 0.00 Å (fit)	A = 1.500 (fit) $B = 0.08000$ (fit) $C = 0.00000$ (fit)
Layer # 2 = <u>a-Si</u> Thickness # 2 = <u>480.00 Å</u>	k Amplitude = 0.00000 Exponent = 1.500
+Layer # 1 = <u>Cauchy Film</u> Thickness # 1 = <u>1100.00 Å</u> (fit)	Band Edge = <u>400.0 nm</u>
Substrate = <u>SI_JAW</u>	Substrate = <u>SI_JAW</u>
(a)	(b)

图 9-32. (a) 有折叠的层的 Mode (模型) 和 (b) 已展开的 Cauchy 薄膜层

Editing Layers 编辑膜层

每个膜层都有一个名字,显示为蓝色。把你的鼠标放在膜层的名字上,你可以: (℃L): 打开一个新的材料文件来替代当前的膜层 (**⑦R**): 会显示一个菜单"Graph Layer Optical Constants", "Append Text to Layer's Fit Parameters", "Save Layer Optical Constants", "Parameterize Layer", "View Layer Comment", "Convert To EMA", "Convert to Anisotropic",及"Grade Layer". 菜单如 图 9-33 所示

Layer Comr	mands: <u>Add</u> <u>Delete</u> <u>Save</u>		
Include Surf	Include Surface Roughness = <u>OFF</u>		
+ Layer # 1 =	Cauchy Film Thickness # 1 =	2 74.05 nm (fit)	
Substrate =	Graph Layer Optical Constants		
Angle Offse	Rename Layer and Fit Parameters		
+ MODEL Op	Save Layer Optical Constants		
+ FIT Option:	Parameterize Layer		
+ OTHER Op	View Layer Comment		
<u>Configure</u>	Convert To EMA		
<u>Turn Off Al</u>	Convert To Anisotropic		
	Grade Layer		
	Start Superlattice		
	Grade Layer Start Superlattice		

图9-33. 在膜层名字上点击鼠标右键,访问到的菜单选项

"Graph Layer Optical Constants"绘图膜层材料的光学常数

在膜层上点击鼠标右键,选择该选项-会将光学常数绘图。Right-click on a layer

"Rename Layer and Fit Parameters"重命名层和拟合参数

在膜层上点击鼠标右键并选择该选项-将弹出一个对话框,如图 9-34。有三个选项可以重命名在模型中的膜层,模型中和拟合结果中层参数名,拟合结果厚度名。

Rename Layer Options
Name: Ta2O5
🖌 Rename Layer
✓ Rename Layer Parameters
Rename Thickness
<u>O</u> k <u>C</u> ancel



"Save Layer Optical Constants" 存储膜层光学常数

在膜层上点击鼠标右键,选择该选项--可以保存该膜层材料的光学常数。 系统会问你,以色散模型还是以列表形式来存储,最后要指定文件存储的位置

"Parameterize Layer"参数化膜层

在膜层上点击鼠标右键,选择该选项一一可以把膜层的光学常数用色散模型层 来参数化,例如 General Oscillator 膜层。膜层的光学常数将打开,作为 Parameterize Layer(参数化层)对话框中的参考值。如图 9-35 所示。



图9-35. Parameterize Layar (参数化层) 对话框

"View Layer Comment" 查看膜层注释

在膜层上点击鼠标右键,选择该选项--可以查看膜层的注释,常用来说明材 料文件的来源。

"Convert to EMA"转换为 EMA 层

在膜层上点击鼠标右键,选择该选项一一可以把膜层转换成 EMA 层。原先膜 层材料作为宿主材料(Material 1),第二种材料默认为 Void(空气),默认的 EMA%为 0,但可以拟合这个参数。示例如下图 9-36。

-	Layer # 1 = <u>EMA</u> Thickness # 1 = <u>124.13 nm</u> (fit)
	# of Constituents = 2
	+ Material 1 = <u>Cauchy Film</u>
	Material 2 = <u>VOID</u>
	EMA % (Mat 2)_james = <u>0.0</u> (fit)
	depolarization_james = <u>0.333</u> Analysis Mode = <u>Bruggeman</u>
	Substrate = <u>SI_JAW</u>

图 9-36. EMA 层的示例。Cauchy 层自动转换成了主材料(Material 1),第二种材料是 void (空)

"Unwrap from EMA"

当膜层转换成 EMA 后,在 EMA 层上点击鼠标右键,选择该选项,可以撤销 EMA,把宿主材料膜层重新转换成单一膜层。

"Convert to Anisotropic" 转换成各向异性材料

在膜层上点击鼠标右键,选择该选项--可以把该膜层转换成各向异性的双轴 膜层,原始膜层作为 Ex 和 Ez 方向上的初始材料。默认的设置是没有方向性 (由 Euler Angles 确定),各向异性设置成单轴的(Nxy ≠ Nz)。如图 9-37 所 示。

Layer # 1 = <u>Biaxial</u> Thickness # 1 = <u>124.13 nm</u> (fit) Type = <u>Uniaxial</u> Optical Constants: Difference Mode = <u>OFF</u> + Ex = <u>Cauchy Film</u> + Ez = <u>Cauchy Film</u> Euler Angles: Phi_james = <u>0.000</u> Theta_james = <u>0.000</u> Substrate = <u>SI_JAW</u>

图9-37. Anisotropic (各向异性) 层示例

"Convert to Isotropic" 转换成各向同性材料

当膜层转换成各向异性后,在 Biaxial 层上点击鼠标右键,可以把主材料重新 还原为各向同性层。

"Grade Layer" 梯度层

在膜层上点击鼠标右键,选择该选项一一可以把膜层转换成 Graded Layer(梯度层),原始材料作为平均的折射率。% inhomogeneity 默认值为 0%,但该值可以变化,显示膜层折射率是从底部到表面方向递增还是递减。示例如下图 9 -38 所示。

-	Graded Layer Thickness # 1 = <u>124.13 nm</u> (fit)
	Grade Type = <u>Simple</u> # of Slices = <u>5</u>
	% Inhomogeneity = <u>0.00</u> (fit)
	- Material = <u>Cauchy Film</u>
	A_james = <u>1.460</u> (fit) B_james = <u>0.00093</u> (fit) C_james = <u>0.00034</u> (fit)
	k Amplitude_james = <u>0.00000</u> Exponent_james = <u>1.500</u>
	Band Edge = <u>400.0 nm</u>
	Substrate = <u>SI_JAW</u>

图9-38. Graded Layer (梯度层) 示例

"Remove Grading 移除梯度"

当膜层转换成梯度层后,在 Graded layer 上点击鼠标右键,可以移除梯度,把 主膜层转回到没有梯度的膜层。

"Start Superlattice"开始超晶格

选择这层作为重复结构的开始层。

"End Superlattice"结束超晶格

这层指定为重复结构的顶层。选用时,额外的部分将加在这层中用来控制重复数量(superlattice counts 的简称 SL Cts),如图 9-39 所示。

	(SL End) Layer # 2 = <u>BaTiO3 O</u> Thickness # 2 = <u>20.00 nm</u> SL Cnt = <u>5</u>
+	(SL Start) Layer # 1 = <u>Cauchy Film</u> Thickness # 1 = <u>40.00 nm</u> (fit)
	Substrate = <u>SI_JAW</u>

图9-39. 有超晶格开始、结束、周期的 Model (模型)

Angle Offset 角度偏移

在模型计算时考虑角度的偏移。该参数可以被拟合。

9.5. Right-click menu (*Analysis*>Model:)

在 Model:面板中右键点击鼠标,访问如图 9-40 所示的菜单选项。

Draw Model Optical Constants Profile

Copy Model To Clipboard

Copy Model (Layers Only) To Clipboard

图9-40. 在 Model: 面板中右键点击鼠标得到的菜单

Draw Model Optical Constants Profile

显示从基底(左边)到表面(右边)膜厚剖面上的光学常数,图 9-41 中显示的 是一个梯度层和其上面的表面层。



图 9-41. 2 层堆叠膜厚度方向上的剖面图, 底层是梯度分布的。

Copy Model To Clipboard 复制模型到剪贴板

该选项把整个模型复制到剪贴板,包括 Model Options, Fit Options 和 Other Options 以及膜层结构。要查看某一段的详细内容,比如 Model Options,需要点击前面的 "+"来展开。图 9-42 是一个完整模型的示例。

Layer Commands: <u>Add Delete Save</u> Include Surface Roughness = <u>ON</u> Roughness = <u>0.00 nm</u> (fit)

+ Layer # 1 = <u>B-Spline</u> Thickness # 1 = <u>100.00 nm</u> (fit) Substrate = <u>SI_JAW</u>

Angle Offset = 0.000

- MODEL Options Include Substrate Backside Correction = <u>OFF</u> Model Calculation = <u>Ideal</u>

- FIT Options

- + Perform Thickness Pre-Fit = ON
- + Use Global Fit = <u>ON</u>
 - Fit Weight = <u>N,C,S</u>
 - Limit WvI. for Fit = OFF
- + Include Derived Parameters = <u>ON</u>

OTHER Options

Wvl. Range Expansion Fit Increment (eV) = 0.50

Try Alternate Models

Parameter Uniqueness

Add Opt. Const. to HTML Report = OFF

Configure Options Turn Off All Fit Parameters

图 9-42. 复制到剪贴板的完整的模型

Copy Model (Layers Only) To Clipboard 复制模型 (仅膜层结构)到剪贴板

该选项把模型的膜层结构拷贝到剪贴板。如果你喜欢膜层结构是折叠的,或者 是展开的,那么在复制前你要预先设置好。图 9-43 是一个示例模型。

Roughness = 0.00 nm (fit)

+ Layer # 1 = <u>B-Spline</u> Thickness # 1 = <u>100.00 nm</u> (fit) Substrate = <u>SI_JAW</u>

图 9-43. 拷贝到剪贴板的"只有膜层"的模型

9.6. Layer types 层类型

CompleteEASE[™]软件提供了许多不同的方式来描述材料对应波长上的与光学 常数。不同的光学常数描述方法包括简单的表列光学常数,复杂的色散模型光 学等等。所有这些不同的描述,在 CompleteEASE[™]程序中是不同分类的层。 表 9-1 中列出当前可用的层分类。本章的其余部分详细介绍了的不同层的典型 操作和使用。

Layer (层)名字	描述
Standard (Tabulated N,K)	包含某一材料的表列光学常数值
Void	包含空气(真空)的光学常数: n=1,k=0.
EMA	将两种材料混合在一起,创建一个复合层的光学常 数
EMA-Coupled	将两种材料混合成组分相关的复合材料层光学常数。在这里,材料#1是"Coupled"(关联)层,它的光学常数取自一个分离的层-通过层号指定这个引用层。
Cauchy	一个简单的色散式,用三个项描述折射率,一个指数衰减函数来描述消光系数。
Cauchy_Wvl	一个简单的色散式,用三个项描述折射率。这个特殊的层中,可以定义某一"design"(设计)波长上的折射率。
Cauchy_Extended	一个简单的色散式,用三个项描述折射率,一个指数衰减函数来描述消光系数。
Sellmeier	一个简单的色散层,在电介质材料建模中非常有 用。
Coupled	从分离的一个层获取光学常数
WvlByWvl	允许逐个波长确定各波长的光学常数。这个层不遵 循 Kramers-Kronig 一致性,包含了最大数量的拟合 参数。因此,应谨慎使用。
Biaxial	用来描述各向异性材料光学常数层的,对 unixial (单光轴)和 biaxial (双光轴)都适用。
Temperature/Alloy	这一层材料的光学常数是对应温度和/或组分的函数。
General Oscillator	这个层允许有多个不同类型的振荡,用来描述材料 的光学常数。
B-Spline Layer	在 eV 为单位的等间隔光谱上, B-Spline 层计算 basis spline(基础样条)得到ε1 和 ε2。

表9-1. CompleteEASE[™]中的层类型

Tabulated n,k 表列 n,k

CompleteEASE[™]材料库中大多数的材料层为标准表列光学常数。这种类型的 层使用列表方式描述不同波长上的光学常数。该表可以包含材料复介电函数(*ε*_{*l*} 和 *ε*₂)或材料复折射率(n和k)的实部和虚部。如果用户在文献中找到某一材 料的光学常数列表,并希望在 CompleteEASE[™]使用它,只需将这个列表以正 确的格式存入一个文件,它可以在 CompleteEASE[™]打开并使用了。

图 9-44 展示了模型中的典型标准层。与本章中所述其他类型的层不同,这些 层没有可以用来调整光学性质的参数,因此,用起来是最简单的。

Layer # 2 = <u>SiO2_JAW</u>	Thickness # 2 = <u>25.00 nm</u>
Layer # 1 = <u>INTR_JAW</u>	Thickness # 1 = <u>1.00 nm</u>
Substrate = <u>Si_JAW</u>	

图 9-44. 标准层的模型构造-每层的光学常数为不同波长上对应固定光学常数值的列表。

Void 空

Void (空) 层是个特殊的表列 n, k 层,其所有波长上的光学常数是固定的标称值,为空气(真空)的: n= 1, k = 0。

EMA

EMA 层使用 Effective Medium Approximation (等效介质近似理论)计算混合 材料的光学常数。计算是基于两种或三种材料的本征光学常数、每种材料的百分比、退偏振的"screening"因子和计算类型。图 9-45 显示了一个 EMA 层。

CompleteEASE 软件中的 EMA 层提供三种不同的 EMA 混合方法供用户选择。 包括一个简单的线性组合、Bruggemann EMA 和 Maxwell-Garnet EMA。线性 混合在本征层的介电函数间简单的插值得到复合材料的光学常数。Maxwell-Garnett 和 Bruggemann 的混合算法更常用。Maxwell-Garnett 法假设材料#2 和 #3 以球形夹杂方式存在于宿主材料#1 中。The Bruggemann EMA 使宿主材料 可以自洽选择。Maxwell-Garnett 和 Bruggemann EMAs 对表面和界面的混合建 模很有用,将材料的非晶和晶体的光学常数混合成多晶材料时也很有用。



图 9-45. EMA model for mixed-constituent layers.

EMA-Coupled

这是 EMA 层的特殊情况,除了第一个材料使用关联法获得外,其他与上文的 描述相同。这使得材料 # 1 可以从模型中的一个独立层获得光学常数,此独立 层由层号指定。一个 EMA-Coupled 层的例子如图 9-46 所示。



图 9-46. EMA-Coupled 层的例子, Material #1 从模型中的一个独立层获得光学常数, 这个层通过层号指定

Cauchy 柯西

Cauchy(柯西)层是一个常用的层,它用来确定一个透明或部分透明薄膜(电介质及半导体低于 fundamental bandgap(基本带隙)的光谱段)的光学常数。 在部分的光谱范围内,这些材料的光学常数中的折射率部分使用随波长缓慢变化的函数描述,消光系数为在尾部(短波长)的指数吸收。通过仅有的平滑项 逆幂系列来描述柯西层的折射率,消光系数的描述通过一个简单的指数尾部。 这些陈述如下:

Cauchy (柯西) 是一个色散层, 折射率通过一个三项方程式描述。方程式如 8-1。

注意: Cauchy 层方程式 8-1 中的λ所使用的波长单位是 microns (微米)

除了描述折射率(n)的三项外,有3个额外的项来描述 Urbach 尾部吸收,如公式8-2。Cauchy(柯西)层的光学常数如图9-47 所示。

$$n(\lambda) = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4}$$

$$k = kamp \cdot e^{\exp(E - Bandedge)}$$
(8-1)
(8-2)

$$(8-2)$$

图 9-47 显示了 CompleteEASE 软件模型中的 Cauchy (柯西) 层。A, B, C 是可变的拟合参数,用来确定折射率的色散。*k Amplitude* (K振幅)和 *Exponent* (指数)项是可变的拟合参数,用来确定消光系数色散的形状。Band Edge (带边)参数可以手动设置,但不是一个拟合参数,因为它与 *k Amplitude* (K振幅)有直接的相关性(在 Band Edge 上,消光系数等于 *k Amplitude*)



图 9-47. Complete EASE 中的 Cauchy (柯西) 色散层

Cauchy_WVL

这是一个特殊的 Cauchy(柯西)层,可以在 ADVANCED 材料目录中找到。 它的色散形状与 Cauchy(柯西)相同,但它的描述项如图 9-48 所示。这将允 许用户指定一个设计波长上的已知折射率,而不用考虑色散项。

- Substrate = <u>Cauchy_Wvl</u> n = <u>1.450</u> B = <u>0.01000</u> C = <u>0.00000</u> Design wvl = <u>632.8 nm</u>

图 9-48. Cauchy_Wvl layer 有着与 Cauchy 相同的色散形状,但允许在设计波长上输入 折射率,这个折射率输入参数 n 替代了标准 Cauchy 层的 A 参数

Cauchy_Extended

这是一个特殊的 Cauchy(柯西)层,可以在 ADVANCED 材料目录中找到。 它提供了一个类似与 Cauchy(柯西)的形状,但它增加了 IR 项,这些项可以 在朝着 NIR 光谱范围上加速折射率的减小。层的例子如图 9-49 所示,其产生 的光学常数显示在图 9-50 中。

-	Layer # 3 = <u>Cauchy_Extended</u> Thickness # 3 = <u>0.00 nm</u>
	A = <u>1.450</u> B = <u>0.00500</u> C = <u>0.00000</u>
	D = 0.00000 IR = 0.12000
	Urbach Amplitude = <u>0.30000</u> Exponent = <u>2.000</u>
	Cody Amplitude = <u>0.200</u>
	Band Edge (eV) = <u>2.400</u>

图 9-49. Cauchy_Extended 层的例子



图 9-50. Cauchy_Extended 层的光学常数

The Sellmeier Layer

Sellmeier 层是也是一个可以用来描述电介质色散层。它常常用来描述透明电介质材料的光学常数。CompleteEASE™使用一个 2 项的 Sellmeier 模型来计算 UV 和 IR 的吸收。折射率的描述为:

$$n = \left(\varepsilon(\infty) + \frac{A\lambda^2}{\lambda^2 - B^2} - E\lambda^2\right)^{\frac{1}{2}}$$
(8-3)

其中*ɛ*(∞)是一个折射率的偏移量, A 是 amplitude (振幅), B 为 (center energy) 中心能量位置, E 是在红外的 Pole 位置。这些在层中分别为'Einf', 'Amp.'、'Center En.'和'IR Pole Amp.'。 图 9-51 显示了模型中的这个层。



图9-51. CompleteEASE 模型中的 Sellmeier 层

Coupled

这个特殊的层用来镜像模型中的另一个独立层的光学常数。Coupled(关联) 层展开后通过数字号来指定光学常数的来源层,如图 9-52 所示。

-	Layer # 3 = <u>Coupled</u> Thickness # 3 = <u>200.00 nm</u>
	Coupled to Layer $\# = 1$ (Cauchy)
÷	Layer # 2 = <u>Gen-Osc</u> Thickness # 2 = <u>50.00 nm</u>
÷	Layer # 1 = <mark>Cauchy</mark> Thickness # 1 = <u>200.00 nm</u>
	Substrate = <u>Si</u>

图 9-52. "Coupled" 层从模型中的另外一个层获得光学常数,在上图中,它使用了 Layer #1 Cauchy (柯西) 层的光学常数。

WvlByWvl

如图 9-53 说是层,这个层允许在每个波长的光学常数独立变化。这个层具有最大的灵活性,拟合最大数量的参数。由于它没有保持 Kramers-Kronig 一致性,或甚至不对光学常数的色散曲线进行连续平滑处理,应谨慎使用。

```
    Layer # 3 = <u>WvIByWvI</u> Thickness # 3 = <u>100.00 nm</u>
    Init. values: n = <u>1.500</u> k = <u>0.000</u> Starting Mat = <u>none</u> 188 Pts.
    Fit Opt. Const. = <u>ON</u>
    Force E2 Positive = <u>OFF</u>
    Show Parms = <u>OFF</u>
```

图9-53. WvlByWvl 层

Biaxial

Biaxial(双轴) 层允许用户对各向异性材料建模。这一层可同时用于 uniaxial (单轴)和 biaxial(双轴)各向异性,并有 3个 Euler-angle(欧拉角)项来旋转相对于椭偏仪测量方向的光轴。Biaxial(双轴)层有两种模式可用。当 Difference Mode = OFF = OFF 时,所有方向(uniaxial 时为 2, biaxial 时为 3) 上的光学常数有独立的材料文件描述。如图 9-54 所示。当 Difference Mode = ON时,X方向上的光常数由材料文件描述,而 Cauchy的"difference"(差异) 来描述X方向和其他方向的折射率差。如图 9-55 所示。



图 9-54. Difference Mode = OFF 时的 Biaxial (双轴) 各向异性层



图 9-55. Difference Mode = ON 时的 Biaxial (双轴) 各向异性层

Graded Layer

所有其他类型的层可以转变为光学常数梯度层,来对薄膜随深度的光学性质变 化进行建模。这可以在层上鼠标右击并选择"Grade Layer"选项实现。一个 Graded 层的例子显示在图 9-56 中。有四种类型的 Grading 选择: Simple (简 单)、Linear (线性)、Non-Linear (非线性)和 Parametric (参数)。Grading 是通过将薄膜层分割成有不同光学常数的一系列 'slices' (子层),来近似折射 率梯度的剖面。'slices' (子层)的数量可以设定。主要的拟合参数是"% Inhomogeneity" (不均匀性),如果朝表面方向折射率变大,这个参数将为正 数,如果朝表面方向折射率变小,这个参数将为负数。如果你右键点击 "Graded Layer"的标题,光学常数将绘制,将同时显示 top (顶部)和 bottom (底部)的 n 和 k,如图 9-57 所示。



图 9-56. Graded 层的例子



Opt. Const. of Graded cauchy vs. nm

图 9-57. graded 层的光学常数图

Grade Type 梯度类型

有四种不同类型的梯度可用,如图 9-58 所示。为每一个类型细节描述如下:

CompleteEASE Input
Choose the grade type:
Simple
Linear
Non-Linear
Parametric
<u>Q</u> k <u>C</u> ancel

图 9-58. Grade (梯度) 可选类型包括: Simple、Linear、Non-Linear 和 Parametric

Simple Grade 简单梯度

通过"% Inhomogeneity"(非均匀性)拟合或调整,允许折射率线性变化。膜的 折射率从底面到表面可以增加也可以减少,这取决于"% Inhomogeneity"是正值 还是负值。一个 Simple Grade 的一个例子如图 9-59 所示, Cauchy 层展示了 4% 的 inhomogeneity。柯西层在梯度层中以套嵌层的形式出现,所以层的平均折射 率仍然可以通过柯西参数来调整。折射率梯度在两个方向都有,底部和顶部折 射率差异的总范围等于"% Inhomogeneity"。

注意: simple grade(简单梯度)不会影响消光系数



图 9-59. Cauchy 层的"Simple" grade 例子

Linear Grade 线性梯度

Linear Grade(线性梯度)使用 EMA 混合当前材料与 void(空)。贯穿膜的 void 数量通过线的 "Slope"和"Offset"来设置。"Offset"定义 void 趋于零的位置 (或梯度膜表现出与初始膜相同的特性)。一个"Linear" grade 的例子如图 9-60 所示,其中 slope 为 0.1, offset 为-0.2。从底部到顶部层的 EMA 中 void(空)的百分比被计算,计算基于 slope 和 offset。

EMA 百分比不一定就是一个物理的材料与 Void 的混合。相反,它是一个用来 调整光学常数上升或下降的数学算法。事实上, EMA%可以变为负数来定义折 射率和消光系数的上升(进一步远离 Void),而不是下降。Linear 和 Simple Grade 主要的区别是 Linear 同时影响折射率和消光系数,而 Simple grade 仅影 响折射率。



图 9-60. Cauchy 层"Linear" grade 的例子

Non-Linear Grade

"Non-Linear" grade(非线性梯度)与 Linear grade(线性梯度)很相似,在它使用一个 EMA 混合来变化层底部到顶部之间的光学常数。主要的区别是,它可以将线性变化修改为指数变化,它还可以设置为关于中心对称的剖面分布,或设置为剖面从底部到顶部的指数分布。

图 9-61 显示一个以柯西为嵌入层的"Non-Linear" graded(非线性梯度)。底部 和顶部 EMA 的比例可以用指数设定(或固定)来描述梯度的形状。点击"Draw Profile"文本可以看到 void 百分比在不同子层的分布。

不同的梯度分布剖面可以生成,这取决于剖面对称或不对称,以及指数低于1 或高于1,如图9-62到图9-65所示。



图 9-61. Non-Linear Grad 的例子.



[8] 9-62. Grade Profile for a 21-Slice "Non-Linear" graded layer with Exponent = 0.2 and Symmetry turned ON.



图 9-63. Grade Profile for a 21-Slice "Non-Linear" graded layer with Exponent = 2.5 and Symmetry turned ON.



 \mathbb{Z} 9-64. Grade Profile for a 21-Slice "Non-Linear" graded layer with Exponent = 0.2 and Symmetry turned OFF.



图 9-65. Grade Profile for a 21-Slice "Non-Linear graded layer with Exponent = 2.5 and Symmetry turned OFF.

Slice Value

剖面的描述使用膜层顶部到底部的一个方程式。slices(子层)的数量用来均分膜层,每个子层的值取自这个子层的中心值。

注:底部和顶部"slice"(子层)并不一定等于膜的底部和顶部的方程式值,因为它们的 值取自这个层的中心。

Parametric Grade 参数梯度

parametric grade(参数梯度)允许选择色散模型中的参数随薄膜深度变化而变化,其余参数是不变的。因此,它只工作在 Gen-Osc、Cauchy 等有色散参数的层上。parametric grade(参数梯度)的一个典型例子是 ITO 及其他透明导电氧化物。在这些膜中,由于"free-carrier"(自由载流子)浓度在膜深度上的变化导致了折射率的严重梯度。"free-carrier"(自由载流子)导致红外吸收,它可以用Drude 振子来建模。因此,用 EMA 的 Void 混合无法描述这个梯度。从薄膜底部到顶部的吸收,需要使用 Drude 振子的振幅变化。一般的,UV 振子吸收保持在膜深度上不变,一因此我们只对 Drude 梯度分层。图 9-66 是带有 Drude 的Drude(RT)振子 Resistivity(电阻系数)线性变化梯度的 ITO 层例子。

<u>Graded Layer</u> Thickness # 1 = <u>150.00 nm</u>						
Grade Type = <u>Parametric</u> # of Slices = <u>11</u>						
Grade Equa	Grade Equation = <u>Linear</u>					
- Material = 📘	- Material = <u>ITO-2 (GenOsc)</u>					
Add Osc	Add Oscillator Show Dialog Fast Gaussian Calc = ON					
Einf = <u>1.</u>	Einf = <u>1.635</u>					
UV Pole	UV Pole Amp. = <u>36.3274</u> UV Pole En. = <u>11.000</u>					
IR Pole /	IR Pole Amp. = <u>3.7038</u>					
<u>Fit All</u>	<u>lear All</u> A	dd Amp.	Add Br	r. Add E	<u>n.</u>	
<u>1:</u> Type	e = <u>Tauc-L</u> o	<u>orentz</u>				
<u>Name</u>	Value	<u>Grade</u>	<u>% Grae</u>	<u>de Gra</u>	<u>ph</u>	
Amp1	<u>33.6253</u>	<u>OFF</u>				
Br1	<u>1.195</u>	<u>OFF</u>				
Eo1	<u>4.666</u>	<u>OFF</u>				
Eg1	<u>3.515</u>	<u>OFF</u>				
Com	mon Eg = 🤇	<u>DFF</u>				
<u>2:</u> Type	e = <u>Drude(I</u>	RT)				
	<u>Name</u>	7	<u>/alue</u>	<u>Grade</u>	<u>% Grade</u>	<u>Graph</u>
Resistiv	/ity (Ohm·c	m)2 <u>0.(</u>	<u>)19903</u>	<u>ON</u>	<u>10.00</u>	<u>Draw</u>
Scat	. Time (fs);	2 (0.096	OFF		

图 9-66. 带有 Drude resistivity (电阻系数) 线性变化的 "Parametric" grade (参数梯度) 例子。

当梯度类型转为 Parametric 后,有四种梯度方程供选择,如图 9-67。Linear (线性)和 Exponential(指数)梯度方程变化可以指定在膜中参数变化的方 式为线性或指数形状。然而,当参数接近零时,这些梯度类型很难使用。

CompleteEASE Input
Choose a grade shape for the parameter:
Linear
Exponential
Two Segment
Custom
Ok Cancel

图 9-67. Parametric Grade types (参数梯度) 类型中的梯度方程式选项

Two Segment 双节/段

two segment (双节)梯度方程允许参数在底部、顶部一个中间节点之间变化-在底部-中间节点和中间节点-顶部个区间的变化是线性的。此外,中间节点的 位置可以改变。图 9-68 中显示了"two-segment"梯度方程的例子。底部及中间 节点的电阻系数设为 0.1,而顶部为 0.2。中间节点"Position"(位置)设置为 膜厚的 60%。图 9-69 给出了它的剖面图。

注:尽管剖面梯度有2个段,整个膜层还是被等分为21个子层。



图9-68. 有"Two-Segment"(双节)方程的"Parametric" grade (参数梯度)例子。底部 和中间节点的电阻系数为0.1,而顶部为0.2,中间"Position"(位置)设置为整个膜厚的60%



图9-69.有 two-segment (双节) 方程的前一个图的电阻系数梯度剖面图。

Custom Grade Profile 自定义梯度剖面

最后, Custom Grade Equation(自定义梯度方程)允许用户输入他们定义的方程以获得期望的任何参数变化。为梯度剖面内置的层位置的变量为[pos],它的值从0到1。另一个变量[value]来指定参数的梯度。图 9-70 到图 9-72 显示了自定义梯度方程如何建立一个 Cody Lorentz 振子的 amplidude 参数的线性梯度。每一子层的参数值使用 Grade(梯度)方程评估的该子层的中心值来确定。一件需要注意的事情,如果一个 Grade(梯度)方程不包含[value]变量,那么梯度参数应该关闭拟合,因为它是一个单一值。如果用户忘了这样做,拟合将正确进行,但梯度参数的误差线将为 9999。还要注意到,当增加的自定义梯度方程中有超过一个参数,任何方程中同名的拟合参数将视为相同的拟合参数。这就避免了输入方程后需要手动对参数进行关联。



图9-70.参数Amp1的equation(方程式)输入前的Custom Grade(自定义梯度)

Edit Equation	on 🛛
Equation:	[value] * (1 + ([pos]-0.5)*[% Grade]/100)
	Use [pos] for layer position (0=bottom, 1=top) Use [value] for graded parameter value
Operato	r List Qk Cancel

度9-71. Edit Equation (编辑方程式)对话框显示了参数 Amp1 的线性梯度方程



图 9-72. 参数 Amp1 方程式输入完毕后的 Custom Grade (自定义梯度)。% Grade 拟合 参数已被添加到拟合列表中。

Gen-Osc 通用振子

Gen-OSC 层是一个通用振子材料层,它允许不同的振子组合来叠加光学常数的形状。图 9-73 显示了有两个不同类型振子组合成的 Gen-Osc 层,以及由振子所产生的光学常数图形。

在 Gen- OSC 层内,您可以点击"Add Oscillator"来添加一个新的振子。要改变 振子的类型,点击"Type ="后面的选择项,这将弹出对话框,可以从中选取不 同类型的振子,如图 9-74 所示。各种不同振子的功能在第 10 章中详细介绍。



图9-73. 有一个Cody-Lorentz 和一个Gaussian 振子的Gen-Osc 色散层

CompleteEASE Input	\boxtimes
Choose the oscillator type:	
Harmonic	•
Harmonic Im(Amp)	
Gaussian	
Drude(RT)	
Tauc-Lorentz	=
Cody-Lorentz	
Tanguy -	
PSemi-M0	-
<u>O</u> k <u>C</u> ancel	

图9-74. Gen-Osc 层中可供选择的振子类型

点击"Show Dialog"按钮弹出可视且可操控的振子参数编辑器,对话框编辑器如 图 9-75 所示。



图 9-75. 可以显示和操控 Gen-Osc 参数的编辑器对话框

 对话框编辑器允许振子参数匹配到参考光学常数上。这个步骤在使用 Gen-Osc 层分析实例数据时有演示。

B-SPLINE 基准样条

B-Spline 层在相等光子强度(eV)上设置控制点,用这些控制点定义不同波长上的光学常数。通过"Resolution (eV) ="(分辨率)字段和当前光谱范围的控制点数量来确定大约的控制点间隔。B-Spline 曲线用来在控制点 control points⁴之间进行插值。

B-spline 曲线由一系列的 nodes(节点)定义,每个节点有一个 position(位置)和 amplitude(振幅)。每个节点的基本多项式函数使用相邻节点位置递归 B-spline 公式(Cheney and Kincaid, "Numerical Mathematics and Computing," Third Edition, Brooks/Cole Publishing Company, 1994)定义。对基础函数(加权每个节点的振幅)求和后产生最终曲线。对介电函数建模,B-spline 曲线有许多优点:

- b-spline 曲线及其衍生函数(up to the spline order minus one)是连续的。
 (B-Spline 层采用三阶 b-splines)
- b-spline 节点振幅仅影响曲线的"local"(本地)形状,例如,改变在 UV 上的一个节点的振幅不会影响 VIS 曲线。
- b-spline 曲线呈现一个"convex hull"(凸包)属性,例如,如果所有的 节点振幅均为非负,则 b-spline 曲线也是非负,从而避免了非物理的 负ε2 值。
- 因为基准函数仅取决于节点的位置,定义最终曲线的节点振幅线性独立,从而大大提高了计算效率。
- Kramers-Kronig (K-K) 积分可应用于 b-spline 递归公式,从而产生 K-K 一致的基础函数。(即ε1 曲线由ε2 的 K-K 传递获得)。

图 9-76 显示 CompleteEASE B-Spline 层的默认设置。通过点击"n="或"k="字段,节点振幅可以初始化为常数 n 和 k 值(对应 eV),也可以通过指定一个 "Starting Mat""初始材料"来初始化。"Resolution (eV)"字段定义节点间的名义间隔,在选定数据的光谱范围内,节点以相同的 eV 单位等分。单击"Draw Node Graph"(绘制节点图)区域,可以绘制 b-spline 节点的位置和振幅,同时 显示的是计算得到的层的介电函数(图 9-77)。"Fit Opt. Const."(拟合光学常数) 可以设置层的所有光学常数拟合参数(例如,节点振幅和位置,pole 振幅等) 为 ON(开启)或 OFF(关闭)。如果"Use KK Mode = OFF", ε_1 和 ε_2 将独立 计算及拟合 b-spline 曲线。当"Use KK Mode = ON"时,一个 b-spline 曲线用来 定义 ε_2 . ε_1 的计算是从 ε_2 中 K-K 传递过来(增加测量光谱外的吸收带来的影 响)。图 9-79 显示了 KK Mode 为 ON 时的节点位置。请注意,有节点来描述 ε_2 ,在测量光谱范围以外也有几个节点-以帮助 Kramers-Kronig 综合。

Doc-To-Help Standard Template

Introduction 简介 • cccvi

⁴ B. Johs and J.S. Hale, "Dielectric Function Representation by B-Splines", *Phys. Stat. Sol.* (*a*), (2008).

如果所选的光谱范围和/或 resolution (分辨率)改变,或 KK Mode 模式切换, B-Spline 层会自动外推/内插/注入节点的幅度和位置。

```
Substrate = <u>B-Spline</u>
Init. values: n = <u>1.500</u> k = <u>0.000</u> Starting Mat = <u>none</u>
Resolution (eV) = <u>0.300</u> 6 Pts. (1.379-3.177 eV) <u>Draw Node Graph</u>
Fit Opt. Const. = <u>ON</u>
Use KK Mode = <u>OFF</u>
Show Advanced Options = <u>OFF</u>
```

图 9-76. B-Spline 层的默认设置



图 9-77. KK Mode = OFF 时 B-Spline 层的节点图

	Layer Commands: Add Delete Save	
	Include Surface Roughness = <u>OFF</u>	
-	Substrate = <u>B-Spline</u>	
	Init. values: n = <u>1.500</u> k = <u>0.000</u> Starting Mat = <u>Ge</u>	
	Resolution (eV) = 0.100 7 Pts. (1.976-2.634 eV) Draw Node Graph	
	Fit Opt. Const. = <u>ON</u>	
	Use KK Mode = <u>OFF</u>	
	Query remote system for Opt. Const. = <u>OFF</u>	
	Show Advanced Options = <u>ON</u>	
	Show Nodes = <u>ON</u>	
	spline_e1(1.976) = <u>30.1849</u> (fit)	
	spline_e2(1.976) = <u>8.7401</u> (fit)	
	spline_e1(2.086) = <u>30.7405</u> (fit)	
	spline_e2(2.086) = <u>17.1372</u> (fit)	
	spline_e1(2.196) = 24.8025 (fit)	
	spline_e2(2.196) = 21.4102 (fit)	
	spline_e1(2.305) = 20.4348 (fit)	
	spline_e2(2.305) = <u>23.5187</u> (fit)	
	spline_e1(2.415) = <u>15.4651</u> (fit)	
	spline_e2(2.415) = <u>22.3081</u> (fit)	
	spline_e1(2.525) = <u>13.3682</u> (fit)	
	spline_e2(2.525) = 20.4173 (fit)	
	spline_e1(2.634) = <u>12.3560</u> (fit)	
	spline_e2(2.634) = <u>18.9894</u> (fit)	
	Show Parms in Fit = <u>OFF</u>	
	Force E2 Positive = <u>OFF</u>	
	PreFit when changing wavelengths = <u>ON</u>	
	Node Spacing Spectral Ranges: Add Delete Delete All	
	Assume Transparent Region = <u>ON</u>	
	Assume Band Gap = <u>ON</u> Band Gap (eV) = <u>0.800</u>	

图 9-78. 所有 advanced options (高级选项)显示时(KK mode off)的 B-Spline 层



图 9-79. KK Mode = ON 时 B-Spline 层的节点图.



图 9-80. KK Mode = On, 且所有选项显示时的 B-spline 层

B-Spline 层 KK 模式为 off 时所有的可用选项图 9-78 所示, B-Spline 层 KK 模式为 on 时所有的可用选项如图 9-80 所示。

每一个选项的简要描述如下:

Init. Values

在 Initial Values 字段输入 n 或者 k 的值后,整个光谱的所有节点值会被重置并 匹配到初始值。

Starting Mat

在"Starting Mat"字段导入一个材料文件,整个光谱的所有节点值会被重置并匹配到参考材料文件。这是 B-Spline 层获得合理"starting"(初始)节点值的有效方法。

Resolution (eV)

整个光谱上节点的间距。

Draw Node Graph

点击来显示整个光谱上的节。对于显示节点的分辨率是否能恰当地解析材料的 光谱特性它是很有用的。

E Inf

这代表ε₁值无穷大,在 KK 模式开启时,在ε₁曲线上加入一个偏移常量,来计 算远超出测量光谱范围上的吸收影响。

IR Amp

KK mode = ON 时,这个值是零能量振子的振幅,它用来计算低能量区的吸收,通常它是由自由载流子吸收(即一个 Drude 项)导致的。

IR Br

KK mode = ON 时,这是 IR (红外) 振子的加宽,通常这个参量可以固定在零,但允许变化,以改善金属性介电函数的拟合。

Fit Opt. Const.

你想让节点值变化来匹配实验数据,将这一项设置为 On。拟合完成后,为保持最终的光学常数为固定值,可以 Off(关闭)它。

Use KK Mode

当设置为 ON (开启)时,光学常数用单一 e2 来描述,并通过 KK 关系的传递 获得 e1 曲线。增加 Einf, IR Amp, IR Br 和测量范围外的额外节点(tie-offs)调节 KK 传递来确定正确的 e1 曲线。.

Query remote system for Opt. Const.

对于多个的椭偏仪系统,当拟合层而需要更新信息时,从远程系统(第一个椭 偏仪)"feed"(注入)某一层材料的光学常数。

Show Advanced Options

为避免混乱,许多其他选项是隐藏。将它置为 On 将允许查看以下的高级选项。

Show Nodes

在 B-Spline 中显示每个节点, 所以你可以对任何不同拟合参数设置 on/off。

Spline_e2(photon energy) / Spline_e1(photon energy)

在指定的光子能量上每个节点给出的 el 或 e2 值将显示。这些节点在光谱上被 等分。当 KK 模式为 Off 时, 有一套完整的 el 和 e2 节点。当 KK 模式为 On 时, 只有 e2 节点列出, 因为 el 曲线是通过 Kramers-Kronig 关系传递产生的。

Show Parms in Fit

在拟合结果中显示所有节点的位置和振幅拟合参数;为了减少参数显示,默认 设置是隐藏的。

Force E2 Positive

将此设置为 ON,防止ε₂在测量光谱范围上节点值变为负数。在测量范围以外的 tie-off 节点还是允许负数的,因此在光谱的边缘ε₂还是有可能变为负数的。 虽然这样可以强制介电函数"physical"(物理),然而,有时允许小的ε₂负值可以 提高拟合收敛。

Prefit when Changing Wavelengths

因为在选择光谱段以外位置 tie-off 对光学常数的影响,当光谱范围被修改时, optical constants 很难保持光学常数。当光谱范围被修改,tie-off 位置和"values" (值)会调节整体光学常数的形状。当此功能 On (开启)时,在调整到新的 光谱范围之前,b-spline 将保存光学常数,它可以用来"prefit"(预拟合)新的 节点以获得匹配。这不保证波长范围改变时,光学常数不稍作调整,但通过对 先前值的预拟合,可以帮助调整最小化。

Node Spacing Spectral Ranges

整个光谱上单一的节点间距可能不是所有材料的最优值。因为这个原因,在 CompleteEASE 中允许在特殊光谱范围上"added"较小或较大的节点间距。GaP 是一个很好的例子,如图 9-81,在带隙以下(高于 500nm)的光学常数没有光谱 特征,但在短波长变化很快。通过增加长波长范围上节点间距,减小短波长范 围上节点间距,并到达期望的减少节点总数的目的。点击"Add Node Spectral Spacing Range"(添加节点光谱间距),将在你面前呈现三个对话框,如图 9-82。 第一个询问最小波长范围,第二个是最大波长范围,第三个可以自定义这个范围 上使用的节点间距。对于 GaP,选择了全光谱范围上 0.5eV 的节点间距,通过自 定义在 190-500nm 光谱上节点间距为 0.1eV,在模型中如图 9-83 所示。最后的 节点图如图 9-84 所示。



图 9-81. GaP 从紫外到近红外的光学常数

CompleteEASE Input	X
Enter the minimum <u>v</u>	alue for Range in nm:
200.0	
<u>O</u> k	Cancel

图9-82. 输入 minimum (最小)/maximum (最大)和在这个光谱范围上的节点间距。



图 9-83. GaP 的 B-spline,其中190-500nm 上自定义了节点间距(0.1eV resolution)。



图 9-84. GaP 的 B-Spline 层光学常数,在高于 500nm (低于 2.48eV)上使用 0.5eV 节点间 距,在 500nm (高于 2.48eV)以下使用 0.1eV 节点间距。

Assume Transparent Region

指定ε₂固定为零的 bandgap(带隙)或 spectral region(光谱波段)位置。

Use Default TieOff Behavior

当 KK 模式时,"TieOffs"是用来计算光谱范围以外的吸收。默认行为(指定默 认 TieOff 节点的位置,以及每个节点拟合时的振幅)对于大多数应用来说是足够 的。当 TieOff Behavior = OFF 时允许 TieOff 位置和振幅有完全的灵活性。唯一 可能用到的情况是,有一个强烈的吸收特性在测量光谱波段以外导致了它对光 学常数的显著影响。

View Tie Off Positions

Tie Offs 的 position(位置)和 amplitude(振幅)可设置为拟合参数。位置的 定义与光谱范围的端点有关,并且各点相对关联保证节点位置单调增加。高于 和低于光谱范围上各定义了五个节点位置;最前和最后的各二个节点的振幅被 固定在零,而其他六个节点振幅可以拟合。

Intermix

如果你添加一个层,在指定添加位置之前,如果选择"Intermix"(混合)"层 类型(图 9-85),一个特殊的"Intermix"(混合)层将添加,这个层以 50-50%比 例混合上下两层材料得到光学常数。这一层的一个例子如图 9-86 所示。 intermix 层从上方和下方的膜层"steals"(窃取)厚度,以避免移动干涉振荡。 有一示范如图 9-87 所示。如果 Layer 1 和 Layer 的膜厚各为左图的 100nm,在 右边的模型中它们各自的膜厚将保持 100nm,中间层厚度将显示一个特定的数 量,假设是 50nm。在这种情况下,模型中 Layer 1 和 Layer 2 的厚度是 100nm, 中间层的厚度为 50nm。然而,计算时仅考虑 75nm 的 Layer 1,50nm 的 Intermix (中间层)和 75nm 的 Layer 2。注意中间层从周围层窃取厚度。左右 图的总厚度都是 200nm,这样引入中间层时干涉振荡不会在波长方向上大幅漂 移。
Add Layer To Model	
Layer # 2 = : Cauchy Film Layer # 1 = : a-si Substrate = : 7059_Cauchy	Layer Type Standard Intermix
Cancel	

图 9-85. 要在两层之间创建一层特殊的层之前,选择"Intermix""混合",在值需要的 位置加入这个层,这个特殊的层混合上下两层的光学常数

Layer # 2 = <u>SiO2</u> Thickness # 2 = <u>100.00 nm</u>
Intermix Thickness = <u>25.00 nm</u>
Layer # 1 = <u>a-si</u> Thickness # 1 = <u>50.00 nm</u>
Substrate = <u>SI_JAW</u>

图 9-86. 模型中的一个 Intermix 层例子



图 9-87. 中间层从它的周围层"steals"(窃取)层厚度。因此, 左右图的 2 层膜模型都保 持它们两层厚度不变, 即使中间层厚度会变得更大(表明两层膜有更多的渗透)上下层厚 度也不变。

Composition Library

被创建的,名字为"Comp Library"或"Comp & Temp Library"的层,可以显示光 学常数随组分或温度的变化而变化。

由 CompleteEASE[™]程序提供的几个材料文件,其文件中的包含的材料光学常数 信息是温度和/或合金组分的函数。这种类型的材料的一个例子是 Al_xGa_{1-x}As。 CompleteEASE[™]软件附带的文件 AlGaAs_T.MAT 包含了 AlxGa1-xAs 中 x 值 0 到 1 范围以及 577 ℃ 至 650 °C 温度范围内光学常数的信息。使用这种类型的 层与使用材料标准类型的层非常相似,唯一的区别是这些层中有可以编辑和拟 合的温度和/或合金组分参数。图 9-88 显示了这样的层在模型中的样子。



图 9-88. 一个 Temperature (温度) /Alloy (合金) 层在模型中的显示。组分及温度是可 编辑的拟合参数

Uniaxial and Uniaxial-Diff

用来描述各向异性材料的层。Uniaxial(单光轴)层显示在图 9-89 中。可导入 任何材料文件到 Ordinary(O光)OC(in-plane 面内光学常数)和 Extra-Ordinary(E光)OC(out-of-plane 面外光学常数)中。在这个例子中使用了 Cauchy(柯西)色散层。Uniaxial-Diff(单光轴)差异层是相似的,但你只能 导入 Ordinary(O光)的光学常数材料文件。Extra-Ordinary(E光)光学常数使 用折射率差异项和 Cauchy-like(类柯西)的求和来确定。Uniaxial-Diff(单光 轴)的一个例子显示在图 9-90 中。



图 9-89. Uniaxial (单光轴) 层的例子。可以导入任何材料文件,作为 ordinary (inplane) 和 extraordinary (out-of-plane) 的光学常数

Substrate = <u>Uniaxial-Diff</u>
Ordinary OC = <u>Cauchy_Wvl</u>
n = <u>1.450</u> B = <u>0.01000</u> C = <u>0.00000</u>
Design wvl = <u>632.8 nm</u>
A = <u>0.10000</u>
B = <u>0.00000</u>
C = <u>0.00000</u>
D = <u>0.00000</u>

图9-90. Uniaxial-Diff (单光轴差异)层的例子。输入一个材料文件作为ordinary (inplane)的光学常数,使用一个4参数色散(Cauchy-like 类柯西)来描述折射率的差异

9.7. +MODEL Options

+MODEL Options 中的所有选项显示在图 9-91 中。如果想要查看更多的项, 需要选择 Configure Options。

- MODEL Options

- Include Substrate Backside Correction = <u>OFF</u> Model Calculation = <u>Ideal</u> + Parameter Smearing Patterning = <u>OFF</u> Ambient Index >1 = <u>OFF</u> Use Scattering Factor = <u>OFF</u> WvI. Shift (nm) = <u>0.00</u> Return Path Ellipsometer = <u>OFF</u> Delta Offset: <u>None</u> Source Rot. = <u>0.000</u> Receiver Rot. = <u>0.000</u> + Multi-Model Patterning + Multi Sample Analysis + Parameter Coupling
- Use Previous Results = <u>OFF</u>

图 9-91. +MODEL Options 的列表

Include Substrate Backside Correction 包含基底背反射

模型中计算(修正)从透明基底背面反射来的非干涉光部分。当设置为 ON (开启)时,段将展开,如图 9-92。在这里,你可以指定 SE 数据采集到的是穿过 样品的透射数据,或穿过样品基底反面(镀膜面的反面)的数据。还有一个背面 反射数量的选择项,以及第一次背反(从顶面)探测到的百分比。

```
Include Substrate Backside Correction = <u>ON</u>
Transmission SE Data = <u>OFF</u> Reverse Direction = <u>OFF</u>
# Back Reflections = <u>5.000</u> % 1st Reflection = <u>100.00</u>
```

图 9-92. 当 Substrate Backside Correction 为 ON(开启)时, 有其他的选项可以考虑透射 SE 数据, reverse (反方向)测量, 以及前、后面的反射数量。

Model Calculation

选择不同的模型计算方法来处理样品的非理想状态。对于大部分样品,默认设置"Ideal"(理想)为首选。不过,也有选择"Include Bandwidth (eV)"(包含光 谱线宽),"Include Thickness Nonuniformity"(包括厚度不均匀性),和 and "Include Bandwidth(nm)"(包含光谱线宽),如图 9-93。当怀疑有这些非理想 情况时。这些选项结合 Depolarization(退偏)数据的拟合是最好的,因为一个理 想的样品/测量是不会产生 Depolarization(退偏)的。

当一个"non-Ideal"模型计算被选中,扩展选项将允许 fit (拟合)参数来表述 non-ideality 的量。如图 9-94 所示。当 advanced (高级)选项被选择,通过可选 的波长切换,甚至可以描述两个不同的线宽。当系统有两个独立的光谱仪时, 这是很有用的。不同值的交织多数据集模拟各个 non-ideality。例如,一定范 围上不同厚度值的多个模型产生数据集的 convolving (交织)来计算 thickness non-uniformity (膜厚不均匀)。用来近似"non-ideality"的 convolved (交织) 数据集的数量可以控制,如图 9-94,这里的形状设置为 Gaussian (高斯)且"# of pts"等于 9。

CompleteEASE Input
Model Calculation:
Ideal
Include Bandwidth (eV)
Include Thickness Non-uniformity
Include Bandwidth (nm)
Include Thickness Non-uniformity and Bandwidth(nm)
Include Angular Spread
Include Bandwidth (eV), Thickness, and Angular Spread
Include Bandwidth (nm), Thickness, and Angular Spread
Ok Cancel

图9-93. 不同的模型计算类型



图 9-94. 扩展的 Model Calculation (模型计算)段,包括设置 Bandwidth (线宽)、 Thickness Non-uniformity (厚度不均匀)和 Angular Spread(角度发散)。

Parameter Smearing

有一个高级功能允许其他参数的"smeared"(拖尾)。这可以包含任何拟合参数的 smearing(拖尾)。当 on (开启)时,这个段将展开,如图 9-95 所示,这 里柯西层的参数 A 被设置为 smeared。



图 9-95. Parameter Smearing 9(参数拖尾)展开后允许fit (拟合)任何参数.

Patterning

Patterning(图案)另一个高级选项,它 on (开启)时被展开,可以用来模拟 只有部分覆盖的设计层。如果基底上的所有层有 patterned (图案),你可以选 择 Layer #=0来指定它们多有 pattern (图案),如图 9-96。%Patterned 值列出 测试区域内薄层空缺的数量。因此,0%表示膜层是完整的,而 100%表示膜层 不存在。

Patterning = ON Layer # (0 for all) = O % Patterned = OOO

图 9-96. Patterning(图形)扩展后允许计算部分覆盖的任何一个单层(或所有层)

注:当"Multi-Model Patterning"为开启时,Patterning(图案)可能被屏蔽。

Ambient Index > 1

当使用环境为水或其他溶液的 liquid-cell(液体池)时,将用到这个选项。当 功能设置为 On(开启),段展开后如图 9-97 所示。可以选择材料文件来描述 环境的折射率。如果这个材料文件是色散方程(如柯西),该环境的折射率可以 拟合且光学常数在这里可以进行保存。

Ambient Index >1 = <u>ON</u>	
Material: <u>H2O Palik3</u>	
Save Ambient Optical Constants	

图 9-97. Ambient Index (环境折射率) > 1 展开后允许材料文件描述环境折射率

Wvl Shift (nm)

如果怀疑校准波长,可以用来模拟波长的偏移。

Return Path Ellipsometer

特殊配置的 M-2000,光源和探测器并排安装,光束从样品上反射,然后从镜面反射回样品,再返回到椭偏仪。

Delta Offset

用来修正由窗片引起的 Delta 偏移。CompleteEASE 软件计算来自棱镜 (Cauchy) 或窗片($1/\lambda$)的 Delta 偏移。

Source and Receive Rot.

输入相对标准入射面光源或接收单元的旋转角度。此功能通常用于在线监控或安装在腔体上的特殊硬件配置,原因是没有空间安装标准配置。

Multi-Model Patterning

当 Multi-Model Patterning(多模型图案)被 on (开启),它覆盖前面讨论的 Model Options 段中的简单 patterning 功能。Multi-Model Patterning(多模型图案) 多模型结构的混合计算。为了在样品的不同区域出现各膜层,所有的膜层需要 加到模型中来。例如,已建构一个"分层结构",如图 9-98,所需要的假设的样品 图案如图 9-99。

	Layer # 4 = <u>NTVE_JAW</u> Thickness # 4 = <u>2.00 nm</u> (fit)
÷	Layer # 3 = <u>a-Si parameterized</u> Thickness # 3 = <u>250.00 nm</u> (fit)
	Layer # 2 = <u>Cr</u> Thickness # 2 = <u>10.00 nm</u> (fit)
	Layer # 1 = <u>SIO2_JAW</u> Thickness # 1 = <u>1000.00 nm</u> (fit)
	Substrate = <u>SI_JAW</u>

图 9-98. 用于图案模型计算的分层结构



图 9-99. Patterned (图案) 样品的例子, 将在 Complete EASE 中通过 Multi-Model Patterning 来描述。

要设置这个样品的 multi-model pattern, 我们将需要三个不同的模型, 一个是每个区域不同的(在测量光斑内)。第一个区域只是硅上的 Cr 膜(假定为测量面积的 25%)。第二个区域是 Cr/Si O₂/silicon (另一个 25%区域)。最后, 是剩下的 50% 完整堆栈 surface oxide/a-Si/Cr/SiO₂/silicon。

用 Multi-Sample patterning 来建立它, 先选择"# of Models"为 3。然后, 你可以选 择不同区域百分比。接下来, 为每层添加拟合参数, 这样不同区域的值就可以 变化, 在这个例子中, 3、4 层的覆盖小于 100%。Cr 膜覆盖整个表面, 如果假设 它在所有区域有相同的厚度, 那么我们不需要加入此参数到列表中。然而, 为了 更直观, 或许将这个参数加入列表会更容易。在不同区域的的各膜厚可以设置、 固定、甚至拟合。这个样品的最终模型如图 9-100。

	Layer Commands: Add Delete Save
	Include Surface Roughness = <u>OFF</u>
	Layer # 4 = <u>NTVE_JAW</u> Thickness # 4 = <u>2.00 nm</u> (MSA)
+	Layer # 3 = <u>a-Si parameterized</u> Thickness # 3 = <u>250.00 nm</u> (MSA)
	Layer # 2 = <u>Cr</u> Thickness # 2 = <u>10.00 nm</u> (MSA)
	Layer # 1 = <u>SIO2_JAW</u> Thickness # 1 = <u>1000.00 nm</u> (MSA)
	Substrate = <u>SI_JAW</u>
	Angle Offset = <u>0.000</u>
-	MODEL Options
	Include Substrate Backside Correction = <u>OFF</u>
	Model Calculation = <u>Ideal</u>
	Patterning = <u>OFF</u>
	- Multi-Model Patterning
	# of Models = 3
	Add Fit Parameter Delete All Parms
	<u>Model % Thickness # 1 Thickness # 2 Thickness # 3 Thickness # 4</u>
	50.00 <u>1000.00 nm</u> <u>10.00 nm</u> <u>250.00 nm</u> <u>2.00 nm</u>
	<u>25.00</u> <u>1000.00 nm</u> <u>10.00 nm</u> <u>0.00 nm</u> <u>0.00 nm</u>
	<u>25.00 0.00 nm 10.00 nm 0.00 nm</u> 0.00 nm
+	FIT Options
1	
	Configure Options
	Turn Off All Fit Parameters

图9-100. 使用 Multi-Model patterning 来描述有3 不同区域的样品

Multi-Sample Analysis (MSA)

使用 Multi-Sample Analysis (MSA)可以同时拟合多数据集。这些多数据集何能 来至 i) appended (合并)的数据文件, ii) uniformity map (均匀性地貌)中选 取的多个数据点, iii)自动旋转扫描的多方位数据, iv) 动态数据中的多时间片 数据。

这些情况的关键点是,我们希望对应所有数据集的一些参数相同而其它的参数 可以各不相同。

图 9-101 显示了一个多样品分析的例子,这里 Si 氧化物使用同一个 Cauchy 层 来描述相同的折射率,但是膜层的厚度允许对应各数据各不相同。



图 9-101. Multi-Sample Analysis (多样品分析)的例子,所有三个数据集同时拟合,其中 Cauchy (柯西)光学常数相同,薄膜厚度各自不同。

Parameter Coupling

Parameter coupling (参数耦合) 允许用户强制不同拟合参数之间相关联。图 9-102 的例子中,对于同一拟合,多样品分析的第一个数据的厚度是第二个数据的两倍。这一比率强制执行,拟合时厚度同时调整。

Coupling Mode(耦合模式)可以是一个 Ratio(比)、Offset(偏移)或 Custom Equation(自定义方程)。coupled parameters(耦合参数)包含所有拟合 参数,最终的方程显示在对话框中,这样你就可以确认它的正确性。

Create/Edit Coupled Pa	arameter		X
Coupling Mode: F	Ratio 💌		
Couple Parameter	Thickness # 1 (1) 💌	to	Thickness # 1 (2) 💌
Using ratio of 2	2		
[Thick	kness # 1 (1)] = [Thickne	ess #	1 (2)] * 2
			<u>O</u> k <u>C</u> ancel

图 9-102. Parameter Coupling(参数耦合)例子,在MSA(多数据分析)中一个膜厚用 2 倍的关联因子关联另一个膜厚。

Use Previous Results

当 CompleteEASE 保存一个数据文件, 它还包含被执行(并且保存)的任何分析 结果。这些结果可用于关联样品, 假设它们需要"underlying"(下方)结构的 信息, 如图 9-103。例如, 在进一步加工前对基底上的薄膜测量了地貌均匀性。 这个地貌结果可以应用在后续工艺结束后的地貌分析中, 你可能想固定第一层 膜的厚度, 当增加第 2 层到多层样品中时, 第一层的厚度来自第一次的测量结 果。

Use Previous Results = <u>ON</u> Results File: <u>C:\CompleteEASE\DAT\205_backside_rough.SE</u>

图 9-103. "Use Previous Results" (使用以前的结果) 展开后允许输入之前的拟合结果 (包含在数据文件中的)

9.8. +FIT Options

+FIT Options 完整的列表如图 9-104 所示。要查看更多选项,你首先需要选择 <u>Configure Options</u>(配置选项)。

```
FIT Options
    Perform Thickness Pre-Fit = OFF
  - Use Global Fit = ON
       # of Data Points = 20 # of Iterations = 5
       Parm #1 = (none)
       Parm #2 = (none)
       Parm #3 = (none)
       Include WvI. Range Expansion Fits = OFF
    Selected Data = <u>Standard Ellipsometric</u>
    Fit Weight = N.C.S
    Include Depolarization Data = <u>ON</u> % Weight = <u>100.00</u>
    Include Intensity Data = ON % Weight = 100.00
    Transmission Data % Weight = 100.00
    Limit WvI. for Fit = <u>ON</u> Range = <u>380.0 nm - 900.0 nm</u>
    Limit Angles for Fit = <u>ON</u> Included Angles = <u>All</u>
    Max. Acceptable MSE = 100.000
    Skip Data Points in Fit = 0 Max. Fit Iterations = 50
    Auto Fit Parameter Reset = ON
  - Include Derived Parameters = ON
       Add Derived Parameter
       1: Type = n Layer # = 0 Wavelength = 632.8 nm Name = n of Glass_Genosc @ 632.8 nm
           Low Spec. = 0.000 High Spec. = 0.000
```

图 9-104. +FIT Options 列表

Perform Thickness Pre-Fit

开启此项时,它使用 Woollam 公司的一种专利算法,快速估算模型中最厚层的厚度。这种算法是基于由膜厚导致的数据振荡的 zero-crossings 计算。

Use Global Fit

允许拟合参数在一定范围取值并找到最匹配数据的值。Global Fit(全局拟合) 在 3.3 节的例子中有详细的描述。

Number of Data Points to Use

用于 Global Fit(全局拟合)以提高速度。这是指 Global(全局)搜索过程中 使用的波长点数。

Number of Iterations

为了从不同的初始点中找到最小 MSE,每个 global fit 将执行这个数量回归拟 合。

Parm. #1, #2, #3

在 Global Fit (全局拟合)中最多包含三个拟合参数

Min. / Max. and # Guesses

为 Global (全局) 搜索中的每个拟合参数设置"搜索"范围,以及最低和 最高值之间的猜测数量。

Include Wvl. Expansion Fits

确定 Global (全局) 拟合是否也使用 Wvl Expansion Fit。

Limit Wvl for Fit

为提高 Global Fit(全局拟合)速度,设置一个光谱范围限制。此功能只在使用 wavelength expansion fit(波长扩展拟合)时出现。

Selected Data

选择哪种类型的数据,包含在拟合中。选择包含 Standard Ellipsometry(标准 椭偏)(SE), generalized-SE(广义 SE), Mueller-matrix(穆勒矩阵),和 Intensity data only(仅强度数据),如图 9-105 所示。



图 9-105. 选择拟合时使用那类数据

Fit Weight

选择拟合权重,这些选择如图 9-106 所示。

CompleteEASE Input	× X
Select the Fit Weighting:	
N,C,S	
Exp. Std. Dev.	
Psi-only	=
Delta-only	
Complex Rho	
Re(Rho)	
Im(Rho)	
<e1> and <e2></e2></e1>	-
<e1>-only</e1>	-
<e2>-only</e2>	
<n> and <k></k></n>	
<n>-only</n>	
<k>-only</k>	
N-only	
C-only	-
S-only	
Psi & Delta	-
<u>Q</u> k <u>C</u> ancel	

图9-106. 选择Fit Weighting (拟合权重)

Include Depolarization Data

要将 depolarization (退偏)数据作为拟合权重的一部分,将这一项设为 On (开启)。然后你可以设置相对于其他数据曲线的百分比,设置成 100%为具有相同权重,减小时为次要,增大时为重要。

Include Intensity Data

这一项设为 On (开启)时, 拟合中包含 intensity (强度)数据权重。然后你可 以设置相对于其他数据曲线的百分比,设置成 100%为具有相同权重,减小时 为次要,增大时为重要。

Transmission Data % Weight

当 Transmission Intensity (透射强度)数据合并到数据集中,它们拟合时不管 上面的"Include Intensity Data"选项。这个设置允许增加或减小权重百分比来确 定 Transmission Intensity (透射强度)的重要程度。

Limit WvI. for Fit

减少拟合的波长范围。

Limit Angles for Fit

减少拟合的角度数量。你可以用逗号分隔列表来指明包含的角度。

Max Acceptable MSE

当拟合 MSE 超出这个设定值时将给予警告。

Skip Data Points in the Fit

拟合将跳过这个数字的波长点以减少拟合波长点。

Max Fit Iterations

设置拟合回归的最大次数

Auto Fit Parameter Reset

在拟合新数据前将重置所有的拟合参数到它们的初始值。这在拟合均匀性体毛 地貌数据时很有用,它可以避免当遇到单一"bad"数据点时拟合"lost"而不能恢 复正常参数。

Include Derived Parameters

在模型中增加一个派生参数,展开 Fit Options 段,然后将"Include Derived Parameters"标记置为"ON"。这将允许增加多个派生参数。下面的图 9-107 显示了加入 632nm 处折射率派生参数的样子。



图 9-107. +FIT Options 中的 Derived Parameters (派生参数)

在派生参数的 Type(类型)上鼠标点击允许改变派生参数的类型。可选的 类型如图 9-108 所示。有些类型的参数允许指定波长及层的序号。

CompleteEASE Input	
Choose the derived parameter type:	
n	
k	
Optical Thickness	=
Total Thickness	
Total Optical Thickness	
Psi	
Delta	
Depolarization <e1></e1>	
<e2></e2>	
<n></n>	
<k></k>	
Constant	
User Equation	=
Color Coordinates	
Sheet Resistance	-
<u>Q</u> k <u>C</u> ancel	

图 9-108. Derived Parameter (派生参数) Types (类型)

使用包含 derived (派生)参数的 model (模型) 拟合完数据后, 拟合结果 中将显示拟合参数及派生参数。派生参数显示为灰色而非黑色。

Fit:				
<u>G</u> enerate	<u>F</u> it	Fit <u>D</u> ynamic	<u>R</u> eset	
MSE = 1.526	ò			
Thickness #	2 = 87.0	04±0.054Å		
Angle Offset = -0.019±0.0021				
n of SIO2_JAW @ 632.0 nm = 1.462				

图 9-109. Fit Results (拟合结果) 窗口显示了 SiO2 层在 632nm 上的折射率 Derived (派生) 参数 Fit Results window showing the Derived Parameter for index of the SiO2 layer at 632nm.

User Equation

新版 CompleteEASE (3.38 之后版本)中增加了一个新的 derived (派生)参数,它的名字是"User Equation"(用户方程),因此拟合结束后,简单的运算可以运行。如果方程中出现错误,那么拟合结束后在 Fit 面板中将不显示派生参数。这个派生参数有 4 个项可以编辑-name (名字), equation (方程式), low (低值)和 high (高值)定义。图 9-110显示了 model (模型)中的这个 derived (派生)参数。



图9-110. model (模型) 中增加了 Derived (派生) 参数的显示。

点击 Edit Equation 项来编辑方程式。只将弹出如图 9-111 所示的 Edit Equation 对话框。除了定义等式外,这个对话框允许用户输入小数的显示位数。

Edit Equation
Enter an equation:
[SiO2 Thickness]+5
of <u>D</u> isplay Digits: 2
<u>O</u> k <u>C</u> ancel

图9-111. Edit Equation (等式编辑) 对话框

等式可以包含 numbers, operators, variables, 和 parentheses for grouping. 可用 operators (运算)有: '+' (add), '-' (subtract), '*' (multiply), '/' (divide), 和 '^' (power)。此外可以使用 (constants) 常数和 (functions) 函数。这些显示在 下面:

Functions

- sin
- cos
- tan
- log
- abs
- sqrt

Constants

- PI
- e

方程式中的 Variables (变量)为在方括号中的拟合参数名字。"[SiO2 Thickness]"是一个例子。任何拟合参数的名字可以定义为以上等式中的 (derived)派生参数名字。

Color Coordinates

基于最终 model (模型)的镜面反射率,这个派生参数计算 color coordinates (色坐标)。This was demonstrated by Johs et al. for specular coatings and rolled metal samples⁵。color coordinates (色坐标)的一个例子如图 9-112 所示,派生 参数在 Model:面板和 Fit:面板的拟合结果里都有显示。当"Color Coordinates" 被作为派生参数选择,可以选择额外的选项 i) type of color coordinates (色坐标

Doc-To-Help Standard Template

Introduction 简介 • cccxxv

⁵ B. Johs, H. Arwin, T. Wagner, D. Appel, and D. Peros, "Accuracy of color determination from spectroscopic ellipsometry measurements", *Thin Solid Films* **519** (2011) 2711-2714.

类型),如图 9-113, ii) 计算反射率的入射角,iii)选择 observer (观察)角度,如图 9-114, iv)选择 illumination (照明)光,如图 9-115。



图 9-112. Color Coordinates (色坐标)显示为一个派生参数,使用L*a*b*类型的派生参数一起显示在拟合结果中。

CompleteEASE Input
Choose the desired color coordinates:
L*a*b*
L*a*b*
XYZ (Tristimulus)
RGB

图9-113. 选择 Color Coordinates (色坐标) 类型

CompleteEASE Input
Choose the desired observer:
10° (1964) 👻
2° (1931)
10° (1964)

图 9-114. 选择 observer (观察) 类型

CompleteEASE Input
Choose the desired illuminant:
D65
A
С
D65

图9-115. 选择期望的 illuminant (照明)

Sheet Resistance

这个派生参数,如图 9-116,计算了开始层和结束层数字之间的 sheet resistance (方块电阻)。它将各层作为 parallel resistors(平行电阻器)对 resistivity(电 阻率)进行求和,如图图 9-117。如果有需要,"Offset"(偏移)和 "Multiplicative Corrections"(乘法修正)可用来匹配椭偏测量值与其他技术(例 如四探针)的测量值。sheet resistance(方块电阻)的计算规则如下:

- 计算假设选定范围的所有层"touch"(接触)触点。用户适当设定选择范围 (开始和结束层编号)。
- 默认情况下各层电阻系数无限大。
- 有 Drude (RT)振子的 GenOsc 层计算时使用 Resistivity(电阻率)参数。
- 有 Drude (NMu)振子的 GenOsc 层计算 Resistivity(电阻率)时使用 N 和 mu 参数。
- 使用 parametric (参数) 梯度类型的 Grade (梯度) GenOsc 层,将把子层看 作独立的层,并对各层的 Resistivity (电阻率) 求和。
- EMA 层和没有使用 parametric (参数)梯度的梯度层被认为电阻系数无限 大,即使为有 Drude 项的 GenOsc 层也一样。
- 中间层和表面粗糙层被忽略。



图 9-116. "Sheet Resistance" (方块电阻) 派生参数示例

Parallel Resistor Model



Film thickness T = t_1 + t_2 + t_3 + ...+ t_{n-1} + t_n



* i = 1,2, ...n; and T in cm

图9-117. 多层膜梯度模型中计算 sheet resistance (方块电阻)

9.9. +OTHER Options

Model:面板中还有其他的选项可用,图 9-118 显示了所有这些可选项。

OTHER Options		
WvI. Range Expansion Fit Increment (eV) = 0.50		
Try Alternate Models		
<u>Fit Parameter Uniqueness</u>		
Fit Parameter Error Estimation		
Simulate Data		
Add Opt. Const. to HTML Report = <u>OFF</u>		
# of Processor Cores to use (available:8) = <u>0</u>		
Show Color Calculation Dialog = <u>OFF</u>		
Configure Options		
TUTI OII AII FIL FATAIIIELETS		

图9-118. +OTHER Options (其他选型) 列表

Wvl. Range Expansion Fit

点击这个命令来执行 Wavelength-Range Expansion (波长范围扩展) 拟合。这 个模型先限制在长波长范围上拟合。然后,数据以一定的增量向短波长和/或 长波长方向扩展。每添加一个新的数据段,数据将拟合一次。这种方法结合 B-Spline 层的效果很好,这已在 4.3 节的例子中示范过。

Try Alternate Models

"Try Alternate Models"(尝试不同模型)命令使用理想的光学模型自动拟 合数据,然后增加 surface roughness(表面粗糙度)和 index grading(折射 率梯度)非理想状态到模型中。各种不同模型拟合的结果以表格和图形方 式总结,然后用户可以决定哪个模型最适合样品。此命令生成的报告的例 子如图 9-119 所示。



图 9-119. Try Alternate Models (尝试不同模型)产生的报告举例

Fit Parameter Uniqueness

该命令允许用户测试一个拟合参数的 uniqueness(唯一性)。一个选定的 拟合参数在给定的范围内变化。在每一个取值上,该拟合参数固定,而所 有其他拟合参数参与拟合,找到最佳拟合(最低的 MSE)。每个 MSE 被 记录,可视化的 MSE 值与该拟合参数取值的剖面图将绘制。图 9-120 显示 了一个例子的 MSE 剖面图。



图 9-120. Parameter Uniqueness (参数唯一性)测试的 MSE 剖面图

Fit Parameter Error Estimation

这个命令用来测试当前 model(模型)和数据集的 random errors(随机误差)和 systematic errors(系统误差)。当点击时,如图 9-121 所示对话框弹出。

Fit Parmeter Error Estimation	
Random Errors (Noise)	# o <u>f</u> Fits: 30
Exp. Error Bars	%: 100.00
Bootstrap Method	% Replacement: 100.00
Parm. Pert <u>u</u> rbation	% Increment: 5.0000
Systematic Errors	
Angle Offset	Degrees: 0.020000
✓ Wavelength Shift	nm: 0.10000
<mark>⊯</mark> <u>P</u> si Offset	Degrees: 0.020000
☑ Delta Offset	Degrees: 0.050000
Transmission Offset	%: 1.0000
✓ Substrate ' <u>n</u> '	dn: 0.0010000
✓ Substrate ' <u>k</u> '	dk: 0.0010000
Fit Errors <u>Magnitude</u> (+)	Fit Errors Magnitude (-)
Show Previous Results	Add Fits to Fit Log

图 9-121. Fit Parameter Error Estimation (拟合参数误差评估)对话框

Random Errors (Noise)

"true"(真正)的拟合参数的 precision(精度/重复性)可以用实验方法确定, 即同一样品上多次测量,然后计算拟合参数的标准偏差。然而,样品多次测量 是费时和不切实际的,基于单次测量来估计参数的 precision(精度/重复性) 是我们所期望的。如下所述,为评估参数的拟合 precision(精度/重复性), Random Errors (Noise)(随机误差)(噪音)将用三个可行的方法测试当前数据 集和 model(模型)。对于 native oxide on silicon⁶(硅片上的自然氧化层)测 试,这些测试的例子如图 9-122 所示。评估的不同被选入射角的 Random Errors 随机误差)被比较。通过同一样品的 50 次测量的标准偏差计算,来检查厚度 的 precision(精度/重复性)统计。单独的数据集拟合后,Fit Stats(拟合统计) 的 90%置信度 error-bars(误差线)被计算。Error Bars MC 和 Bootstrap MC 代 表"Experimental Error Bars"和"Bootstrap" Monte-Carlo"模拟,在下一节中有描 述。对于这个样品,基于单一测量,估算模型 precision(精度/重复性)中的 这些评估具有相似的 magnitude(大小)、lending credibility 值。

Doc-To-Help Standard Template

Introduction 简介 • cccxxxi

⁶ B. Johs, J.N. Hilfiker, and C.M. Herzinger, "Precision and Accuracy of SE Model Fit Parameters", poster at ICSE-V, Albany, NY, (2010).



图 9-122. Si 上自然氧化层 Random Error (随机误差)测试、所有入射角和不同入射角测试的结果进行了比较。

Expermental Error Bars

实验数据拟合多次,但在每个拟合前被操控,即基于它们测量误差线的每个波长的各数据被修改。这里列出的百分比与基于各误差线百分比的实验数据调整量 相关。

Bootstrap Method

Bootstrap method^{7.8}也多次拟合实验数据以检查"precision"(精度/重复性)。 每一个 trial-fit 所使用的 sub-set 数据点是从总实验数据点中随机选择的。顾名 思义,每一次一个单独的数据点被选中,它被替换回普通实验数据点。这意味着, 在任何单一 trial-fit 中, trial-sample 可以包含一个、两个或任意给定数据点的 更多拷贝,甚至可以没有拷贝,如果它从来没有被选择。通过输入 Refill%用 户定义与可用数据点总数相关的 trial-sample 大小。

Parameter Perturbation

实验数据拟合多次。然而,在每个 trial-fit 之前,拟合模型中参数当前值的百分 比被 perturbed (摆动),来检查拟合是否有足够能力回到同样的答案。

Systematic Errors

在模型拟合结果中, Random errors (随机错误) (precision 精度/重复性) (精密)不考虑 systematic errors (系统误差)的影响。在许多情况下, systematic errors (系统误差)可更为重要。因此, CompleteEASE 允许准确评估可能存在的不同 systematic errors (系统误差)。这些误差可能包括测量误差,如角度偏差、波长偏移或数据偏差;或者它们可能包括建模误差如基底材料光学常数的不准确。提出了一种新的分析方法,即增加拟合"errors"(误差)到数据中来评估模型的不准确。

Doc-To-Help Standard Template

Introduction 简介 • cccxxxii

⁷ R. Rosa, "The inverse problem of ellipsometry: a bootstrap approach," *Inverse Problems* **4** (1988) 887.

⁸ "Bootstrapping (statistics)". (2008, July 23). In *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. Retrieved 13:46, August 21, 2008, from http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Bootstrapping (statistics)&oldid=227408982

Systematic errors (系统误差)要么添加到实验数据集中(椭偏数据常量偏移,适 拟合误差大小)货添加到光学模型中(角度偏差、波长偏移和基底光学常数偏 差)。假定存在的 systematic errors (系统误差)的拟合参数变化被报告。

Angle Offset

拟合的结果进行了对比,没有一个角度偏移量。

Wavelength Shift

拟合的结果进行了对比,无波长偏移。

Psi Offset

标准数据集与应用了 Psi 值常量偏移操作的数据集的拟合结果进行了对比。

Delta Offset

标准数据集与应用了 Delta 值常量偏移操作的数据集的拟合结果进行了对比。

Transmission Offset

标准数据集与应用了 Transmission Intensity (透过强度)值常量偏移操作的数据集的拟合结果进行了对比。

Substrate 'n'

标准拟合与模型中基底折射率引入偏移量后的拟合进行比较。

Substrate 'k'

标准拟合与模型中基底消光系数引入偏移量后的拟合进行比较。

Fit Errors Magnitude (+/-)

一个拟合完成后,实验数据曲线和模型产生数据曲线之间会有差异。通过 "Difference Graph"可以显示这些差异。这些代表未知种类(和组合)Systematic errors(系统误差),在这里模型数据并不完美匹配实验数据。不知道类型的 Systematic errors(系统误差)产生这些差异,CompleteEASE 试图评估这些误 差对拟合参数准确性的影响,方法是加入或减去相同的"magnitude"(数量)误 差到每个现有数据集中并重新拟合被操作的数据。

举个例子,图 9-123 绘制了长有厚氧化硅的硅晶圆上的有机物薄膜的实验数据 和模型产生数据曲线之间的差异。拟合误差的大小取自这条曲线的绝对值,再 从现有实验数据集上加上或减去(给出+/-曲线),如图 9-124。

这次测试应用于 P3HT 薄膜,它在可见光谱波段为各向异性且有吸收。这使得它在 extraordinary (e)光方向上难以取得高灵敏度,也就是 out-of-plane (垂直与样本表面)。图 9-125 可以看到 ordinary (O)光方向的结果,图 9-126 可以看到 extraordinary (e)光方向的结果。



图 9-123. SiO2-Si 基底上 P3HT 薄膜的测量数据和模型数据曲线的差异绘图



图 9-124. 由拟合差异图计算来的拟合误差 Magnitudes (大小) (+/-)



图 9-125. P3HT 层 ordinary (in-sample-plane) 方向上的光学常数,同时显示的拟合误差大 小表明 ordinary 方向上的 accuracy (准确性) 很高。



图 9-126. P3HT 层 extraordinary (out-of-plane, 垂直于表面)方向上的光学常数和拟合误差 大小,展示了在这个方向上值的敏感性较差。

Simulate Data

这个选项是用来 simulate (仿真) 基于当前模型的数据。当命令被点击时,将来 处如 图 9-127 所示的仿真设置。

注:要 simulate (仿真)透过结果, Backside Correction (背面修正)需要置为 On, 且"transmission SE Data"也要置为 On。

Simulation Settings		
<u>W</u> avelength Range (nm): 250.0 - 1000.0 by 5.0		
Angle Range (degrees): 45.0 - 75.0 by 10.0		
Noise for Simulation (%): 100.0		
OK Cancel		

图 9-127. Simulation Settings (仿真设置)

Add Opt. Const. to Report

选择该选项将自动添加指定层光学常数图到报告中。

of Processor Cores to Use

CompleteEASE 可以使用多核处理器来提高计算速度。默认情况下,当设置为"0"时,所有核将被使用。

Show Color Calculation Dialog

点击这个按钮弹出如图 9-128 对话框,显示当前模型的 color coordinates (色坐标)。

Color Calculation	
Color Coordinates: L*a*b*	
L* = 56.20, a* = 1.79, b* = -12.92	
AOI: O Observer: 10° (1964) V Illuminant: D65 V	

图 9-128. Color Calculation (颜色计算)对话框,显示 color coordinates (色坐标)和信 算的"color"(颜色)图,它们是基于当前模型、指定入射角(A0I),观察角度和照明光 源的。

Configure Options

选择这个命令来设置显示那些在+MODEL Options, +FIT Options, 和 +OTHER Options 中的 "hidden" 隐藏功能到 model 段中。这些选项如下图 9-129 所示。



图 9-129. 配置哪些"hidden"(隐藏)选项将显示在 Model(模型)中

10. Gen-Osc 通用振子 函数

本章描述了 Gen-Osc 层中各种振子的功能。图 10-1 显示了 Gen-Osc 对话框。 oscillator (振子)的"type"(类型)可以从对话框中选择,如右图显示。



图10-1. 左边: Gen-Osc 层对话框。右边: 振子类型输入对对话框。

10.1. Real-Part (e1) 实部

Gen-Osc Layer Parameters 面板的顶部有四个参数,它们用来描述 dielectric function (介电函数)的 real-part(实部)。包括 Einf、 UV Pole Amplitude、UV Pole Energy 和 IR Pole Amplitude。

Einf

Einf 或 " ε_{∞} "是*加到* ε_l 上的纯实常数。在科学文献中,它常常被称为" ε_{∞} "。 "Einf = "位于 Layer Parameters 面板的顶部。

Pole

Poles 相当于 zero-broadening (零加宽)的 Lorentz 振子。它们的 position (位置)应该保持在拟合光谱范围以外。因此,他们仅会影响介电函数的实部项(ϵ_1)。他们可以描述测量光谱范围以外吸收的影响所导致的色散。它们的方程定义为:

$$\varepsilon_{pole_n} = \frac{Amp_n}{En_n^2 - E^2}$$

 $n \equiv oscillator #$

Fit Parameters (units): $En_n (eV) \& Amp_n (eV^2)$

UV Pole & IR Pole Amplitude

UV Pole (拟合参数 Amp 和 En) 和 IR Pole (拟合 Amp)位于 Layer Parameters 面 板"Einf="的下方。它们也使用 Pole 方程。对于 IR Pole, En=0 eV。

10.2. Lorentz

这是经典的 Lorentz (洛伦兹) 振子模型,描述为:

 $n \equiv oscillator \#$

$$\varepsilon_{Lorentz} = \frac{Amp_n Br_n En_n}{En_n^2 - E^2 - i \cdot EBr_n}$$

Fit Parameters (units): $En_n(eV) \& Br_n(eV)$ $Amp_n (no units)$

在这种类型的 Lorentz oscillator (洛伦兹振荡子)中, *Ampn* 约等于ε2 峰值, *Br* 约为 full width at half-maximum (FWHM)(半高宽)。

10.3. Lorentz Im(Amp)

在 Lorentz 函数中加入一个 imaginary (虚部) 振幅项,允许 ϵ 2 在 center energy, *En (中心能量)*周围不中心对称。注意,当 imaginary term (虚部项) iAmp 大于零时, ϵ 2 将成为负值。这就意味着必须添加另一个振子以强制 ϵ 2 ≥ 0,因 而 gen-osc 的总函数将保持 Kramers-Kronig consistent (KK 一致)。

 $n \equiv oscillator \#$

 $\varepsilon_{Lorentz_iAmp} = \frac{(Amp_n + i(iAmp_n))Br_nEn_n}{En_n^2 - E^2 - i \cdot EBr_n}$

Fit Parameters (units): En_n(eV) & Br_n (eV) Amp_n & iAmp_n (no units)

Ampn 约等于 £2 峰值, Br 约为 full width at half-maximum (FWHM)(半高宽)。

10.4. Harmonic

Harmonic oscillator function(谐波振子函数)类似于 derived from perturbation theory in quantum mechanical treatments of single-electron transitions(量子力学

微扰理论处理单电子转移的派生函数)。通常在文献中被写作一个 two-term sum⁹(两项求和)。它的方程式为:

$$\varepsilon_{Harmonic} = \frac{Amp_n Br_n}{2} \left(\frac{1}{En_n - E - i\frac{Br_n}{2}} + \frac{1}{En_n + E - i\frac{Br_n}{2}} \right) \qquad \begin{array}{l} n \equiv oscillator \ \# \\ Fit \ Parameters \\ En_n(eV) \ \& Br_n(eV) \ \& B$$

it Parameters (units): $En_n(eV)$ & $Br_n(eV)$

 Amp_n (no units)

Ampn 约等于ε2 峰值, Br 约为 full width at half-maximum (FWHM)(半高宽)。 当加宽变得远小于中心能量(Brn << En)时,Harmonic(谐波)振子的表现与上面 的 Lorentz(洛伦兹) 函数相同。

10.5. Harmonic Im(Amp)

在 Harmonic 函数中加入一个 imaginary (虚部) 振幅项, 允许ε2 在 center energy, En (中心能量)周围不中心对称。注意,当 imaginary term (虚部项) iAmp 大于零时, ɛ2 将成为负值。这就意味着必须添加另一个振子以强制 ε2≥0,因而 gen-osc 的总函数将保持 Kramers-Kronig consistent (KK 一致)。 $n \equiv oscillator #$ $\mathcal{E}_{Harmonic iAmp} =$ $\frac{[Amp_n + i(iAmp_n)]Br_n}{2} \left(\frac{1}{En_n - E - i\frac{Br_n}{2}} + \frac{1}{En_n + E - i\frac{Br_n}{2}}\right) \qquad Fit \ Parameters \ (units): \\ En_n(eV) \ \& \ Br_n \ (eV) \\ Amp_n \ \& \ iAmp_n \ (no \ units) \end{cases}$

Ampn 约等于ε2 (Im{ε})峰值, Br 约为 full width at half-maximum (FWHM)(半 高宽)。

10.6. Gaussian

此振子类型产生一个 ε₂的 Gaussian (高斯)曲线,以及保持 Kramers-Kronig 一致的 ɛ1 曲线:

 $\varepsilon_{Gaussian} = Amp_n \begin{cases} \left[\Gamma\left(\frac{E - En_n}{\sigma_n}\right) + \Gamma\left(\frac{E + En_n}{\sigma_n}\right) \right] + \\ i \cdot \left[\exp\left[-\left(\frac{E - En_n}{\sigma_n}\right)^2 \right] + \exp\left[-\left(\frac{E + En_n}{\sigma_n}\right)^2 \right] \right] \end{cases} \qquad n \equiv oscillator \#$ $Fit \ parameters \ (units): \\ En_n(eV) \ \& \ Br_n(eV)$ $\sigma_n = \frac{Br_n}{2\sqrt{\ln(r)}}$ $Amp_n(no \ units)$

其中 Amp 是振幅, En 是中心能量, Br 是加宽。函数Γ是一个收敛级数以产生 Kramers-Kronig 一致的线形ε₁ (see footnotes ^{10 & 11} for details)。

Ampn 等于ε2 峰值(~*En_n*)。通过定义 $\sigma_n = Br_1/2\sqrt{\ln(2)}$, *Br* 约为 full width at halfmaximum (FWHM)(半高宽)。

Doc-To-Help Standard Template

Introduction 简介 • cccxl

⁹ For example, see S. Adachi, Optical properties of crystalline and amporphous semiconductors: materials and fundamental principles," (Kluwer Achademic Publishers, Norwell, MA, USA, 1999), p. 64.

¹⁰ See section 3 of D. De Sousa Meneses, M. Malki, & P. Echegut, J. Non-Cryst. Solids **351** no.2 (2006) 769-776.

¹¹ K.-E. Peiponen and E. M. Vartiainen, *Phys. Rev. B* 44 (15) (1991) 8301-8303.

10.7. Drude(RT) & Drude(NMu)

经典 Drude 模型描述自由载流子对介电响应的影响。其表现相当于中心能量为零的 Lorentz(洛伦兹)振子。在 gen-osc 层中 Drude 振子有两种描述方法: Drude(RT)和 Drude(NMu)。

Drude (RT)由以下 equation¹² (方程式) 描述,其拟合参数为 resistivity, ρ (电 阻系数) 和 mean scattering time (τ) (平均散射时间)。

$$\varepsilon_{Drude(RT)}(E) = \frac{-\hbar^2}{\varepsilon_0 \rho_n(\tau_n \cdot E^2 + i\hbar E)}$$

 $n \equiv oscillator #$

Fit parameters (units): resistivity = $\rho(\Omega$ -cm) Scat. Time = τ (femto-sec)

where $\rho = \frac{m^* m_e}{Nq^2 \tau} = \frac{1}{q\mu N}$

物理常量为 \hbar ({Plank's constant}/ π), ε_o (vacuum dielectric constant 真空介电常数), m_e (the electron rest mass 电子静止质量)及 q (the electron charge 电子电荷).

Drude(NMu)的拟合参数是 *N* (the carrier concentration 载流子浓度 in cm⁻³)、 μ ("*mu*") (the carrier mobility 载流子迁移率 in cm²V⁻¹s⁻¹) 和 *m*^{*} (*mstar*, the carrier effective mass 载流子有效质量)。注意 *mu* 和 *mstar* 是完全相关的,因此用户只能选择拟合其中的一个,固定另一个。

 $n \equiv oscillator \#$

$$\varepsilon_{Drude(RT)}(E) = \frac{-\hbar^2 q^2 N_n m u_n}{\varepsilon_0 (m u_n m star_n m_e E^2 + iq \hbar E)}$$

Fit parameters (units): N (cm⁻³), mu (cm²V¹s⁻¹) mstar (no units)

10.8. Tauc-Lorentz & Cody-Lorentz

Tauc-Lorentz (Jellison and Modine¹³)和 Cody-Lorentz(Ferlauto, et al¹⁴)色散函数 描述 amorphous (非晶)材料的主要吸收, using a broad Lorentzian line shape with zero absorption below a defined bandgap energy (低于定义带隙能量时使用 零吸收的加宽洛伦兹线形)。两种函数之间的主要区别在于它们如何对略高于 带隙能量的吸收建模。在这个区域 Tauc-Lorentz 模型遵循 Tauc 法则公式, 而 Cody-Lorentz 遵循 Cody 公式:

Tauc Absorption Formula: $ε_2(E) \alpha [(E - Eg)^2/E^2]$ Cody Absorption Formula: $ε_2(E) \alpha (E - Eg)^2$ Cody-Lorentz 振子还包含一个 Urbach 吸收项,用来模拟能量低 *Eg* 的吸收。

Doc-To-Help Standard Template

Introduction 简介 • cccxli

¹² T.E. Tiwald, D.W. Thompson, J.A. Woollam, W. Paulson, R. Hance, *Thin Solid Films* 313-314 661 (1998).

¹³ G.E. Jellison, Jr. and F.A. Modine, "Parameterization of the optical functions of amorphous materials in the interband region," Appl. Phys. Lett. **69**, 371 (1996), Erratum, Appl. Phys. Lett. **69**, 2137 (1996).

¹⁴ A.S. Ferlauto, G.M Ferreira, J.M. Pearce, C.R. Wronski, R.W. Collins, Xunming Deng, and Gautam Ganguly, "Analytical model for the optical functions of amorphous semiconductors from the near-infrared to ultraviolet: Applications in thin film photovoltaics," J. Appl. Phys. **92**, 2424 (2002).

Tauc-Lorentz

Tauc-Lorentz 振子函数的方程式如下式给出。通过选择 *Common Eg = ON*, gen-osc 层中的第一个 Tauc-Lorentz 振子的 bandgap energies (带隙能量)可以 被约束为 *Eg*。

$$\begin{split} \varepsilon_{T-L}(E) &= \varepsilon_{n1} + i\varepsilon_{n2} & \text{where} \\ \varepsilon_{n2} &= \begin{bmatrix} Amp_n Eo_n Br_n (E - Eg_n)^2 \\ (E^2 - Eo_n^2)^2 + Br_n^2 E^2 \end{bmatrix} & E > Eg_n \\ \varepsilon_{n2} &= 0 & E \le Eg_n \\ \varepsilon_{n1} &= \frac{2}{\pi} P \int_{Eg_n}^{\infty} \frac{\xi\varepsilon_{n2}(\xi)}{\xi^2 - E^2} d\xi & [a], [b] & Brn \ (eV) \\ \varepsilon_{n1} &= \frac{2}{\pi} P \int_{Eg_n}^{\infty} \frac{\xi\varepsilon_{n2}(\xi)}{\xi^2 - E^2} d\xi & [a], [b] \\ \end{split}$$

- ^[a] CompleteEASE uses the complete analytical solution to the Kramers-Kronig integral as presented in Jellison & Modine¹⁵ (especially see the *Erratum*).
- ^[b]为了保持 $\varepsilon_2 \ge 0$, WVASE[®]内部约束 $Eg_n \cap C$, 这样 $Eg_n < E0$ 、 $C < 2Eo_n$ 。然而, 这些值在外部是受限制的——例如, 用户可以输入任何值。因此, 一系列的外部 Eg_n 和 *C* 的值将产生相同的 dielectric function(介电函数)。

Cody-Lorentz

Cody-Lorentz 振子类似于 Tauc-Lorentz, 它定义了一个 bandgap energy (带隙 能量) *Eg*, 以及一个 Lorentzian 吸收峰 (参数 *Amp*、*Eo* 和 *Br*)。However, for the Cody-Lorentz $\epsilon_2(E) \alpha (E - Eg)^2$ in the region just above *Eg*。 Cody-Lorentz 振子还定义了两个 transition energies (跃迁能量): *Ep* 和 *Et*。EP 处吸收表现从 Lorentzian 转变为 Cody, Et 处吸收表现从 Cody 转变为 Urbach。

$$\begin{split} \varepsilon_{n_{-}C-L} &= \varepsilon_{n1} + i\varepsilon_{n2}, \text{ where} \\ \varepsilon_{2}(E) &= \begin{cases} \frac{E_{1}}{E} \exp\left(\frac{\left(E - E_{gn} - E_{m}\right)}{E_{un}}\right); & 0 < E \le \left(E_{gn} + E_{m}\right) \\ G(E)L(E) &= \frac{\left(E - E_{gn}\right)^{2}}{\left(E - E_{gn}\right)^{2} + E_{pn}^{2}} \cdot \frac{A_{n}E_{on}\Gamma_{n}E}{\left(E^{2} - E_{on}^{2}\right)^{2} + \Gamma_{n}^{2}E^{2}}]; & E > \left(E_{gn} + E_{m}\right) \\ Brn \ (eV) \\ Brn \ (eV) \\ E_{1} &= \left(E_{gn} + E_{m}\right)G\left(E_{gn} + E_{m}\right)L\left(E_{gn} + E_{m}\right) \\ G(E) &= \text{near-bandgap function} \quad L(E) &= \text{Lorentz oscillator function} \\ \varepsilon_{n1} &= \frac{2}{\pi}P_{0}^{\infty}\frac{\xi\varepsilon_{n2}(\xi)}{\xi^{2} - E^{2}}d\xi \\ (\text{This is an integral in two parts}^{*}) \end{split}$$

* 为了简洁,这里提出了 Kramers-Kronig integral form (的积分形式)。在 Complete EASE (如 Ferlauto² 中)中, Kramers-Kronig integration is solved analytically (通过解析法解决 KK 整合)。

Doc-To-Help Standard Template

Introduction 简介 • cccxlii

¹⁵ G.E. Jellison, Jr. and F.A. Modine, "Parameterization of the optical functions of amorphous materials in the interband region," Appl. Phys. Lett. **69**, 371 (1996), Erratum, Appl. Phys. Lett. **69**, 2137 (1996).



图 10-2. 在 Gen-Os 中的 Cody-Lorentz 振子定义的参数

在方程中, *G*(*E*)定义了 Cody 吸收特性, 而 *L*(*E*)是一个 Lorentz 振子。*Eg* + *Ep*, 是函数从 Cody 吸收[$\varepsilon_2(E) \alpha (E - Eg)^2$]转变为 Lorentzian 吸收处的能量。注意, 当 $E \rightarrow Eg^+$ 时 *G*(*E*) $\rightarrow (E - Eg)^2/Ep^2$, 当 E >> Ep 时 *G*(*E*) $\rightarrow 1$ 。

(*Eg* + *Et*)标记 Urbach 吸收和 Cody 吸收之间的转变。值得特别注意的是, Ferlauto, et al14 和 CompletEASE 中的定义是不同的。Ferlauto et al 定义 *Et* 为一 个绝对能量, CompleteEASE 将它定义为一个差值。

 $Et_{Ferlauto} = Eg_{CompleteEASE} + Et_{CompleteEASE}$

Urbach 吸收是完全保持 Kramer-Kronig 一致的,也就是说,指数 Urbach 吸收 $\varepsilon_2(E)$ 通过 Kramers-Kronig 传递获得相应的 $\varepsilon_l(E)$ 函数。在(Eg + Et)转换点,内部 参数 E_l 保证 ε_2 函数平滑过渡。Eu 定义了指数的比率, specifically (Eg + Et) is the energy at which the Urbach absorption equals e^{-1} of its maximum value。 E_1/E 的 比值保证 Urbach 指数函数在(Eg + Et)处完全匹配 G(E)L(E)。

10.9. Tanguy

Tanguy^{16,17}将 Wannier excitons(激子)表达式发展成(analytical expression)解析 表达式,包含 bound 和 unbound 状态。函数对 bound 和 unbound 不加区分。如 下描述,函数依赖于 5 个参数:振幅 *Amp_n*、undamental bound state energy *Eg_n*, unscreened binding energy *R_n*、broadening *Br_n*和 *lng_n*(= *ln*(*g*))。参数 *g* 是

Doc-To-Help Standard Template

Introduction 简介 • cccxliii

¹⁶ Christian Tanguy, "Optical Dispersion of Wannier Excitons," Phys. Rev. Lett. **75**, 4090 (1995). Errata, Phys. Rev. Lett. **76**, 716 (1996).

¹⁷ Christian Tanguy, "Analytical expression of the complex dielectric function for the Hulthén potential," Phys. Rev. B. **60**, 10660 (1999).

screening factor (屏蔽因子),可以在 0 到∞变化, $g \to \infty$ 是一个 unscreened Coulomb potential (未屏蔽库仑电势)。 $g \to 0$ 是总 screening (屏蔽)。 $\varepsilon_{Tanguy_n} = \frac{Amp_n \sqrt{R_n}}{(E+iBr_n)^2} \{\tilde{g}(\xi(E+iBr_n)) + \tilde{g}(\xi(-E-iBr_n)) - 2\tilde{g}(\xi(0))\}$ $n \equiv oscillator \#$ $\xi(z) = \frac{2}{\sqrt{\frac{Eg_n - 2}{R_n}} + \sqrt{\frac{Eg_n - 2}{R_n}} + \frac{4}{e^{bg_n}}}{\tilde{g}(\xi) = -2\psi \left(\frac{e^{hg_n}}{\xi}\right) - \frac{\xi}{e^{hg_n}} - 2\psi(1-\xi) - 1/\xi}$ $\psi(z) = \frac{d(\ln \Gamma(z))}{dz}$ (digamma function) (dimensionless)

10.10. Psemi-M0 & Psemi-Tri

Psemi-M0 和 Psemi-Tri 函数是最初在 WVASE32[®]软件中介绍的 *psemi.mat* layer¹⁸的子集,是 more general Herzinger-Johs Parameterized Semiconductor Oscillator function(更通用 Herzinger-Johs 参量化半导体振子函数)。Psemi 振子结合了高自由度的函数形状和 Kramers-Kronig 一致性。

Doc-To-Help Standard Template

Introduction 简介 • cccxliv

¹⁸ The *psemi.mat* layer is described in detail in the WVASE32[®] software manual.

Psemi 函数的 $ε_2$ 部分由四个 polynomials splines(多项式样条)end-to-end(端到 端)连接而成。每个 spline(样条)与相邻 spline(样条)平滑连接,形成一 个单一的、连续的函数,如下所示 $n \equiv oscillator \#$



Fit parameters (units): Ampn (no units), Brn (eV), Ecn (eV), WLn (eV) WRn (eV) ALn (no units) ARn (no units)

图 10-3. Two views of Psemi-Tri oscillator. Top: ɛ2 showing the Amp, Ec, endpoints and control-points. Bottom: Psemi-Tri for 3 different Br values.

而图 10-4。通过调节 center point(中心点)Ec、端点 WL 和 WR、以及 mid-width(中间宽度) 控制点 AL 和 AR 来控制函数形状。因此整体形状是由 mid-points (中间点)和相对于 Ec 的端点位置来控制。



Endpoints (端点)附近,函数被强制等于零,gaussian broadening parameter (高斯加宽参数)Br, rounds of the endpoints 和 peak $n \equiv oscillator \#$

> Fit parameters (units): Ampn (no units), Brn (eV), Ecn (eV), WLn (eV) WRn (eV) ALn (no units) ARn (no units)

(

图 10-3. Two views of Psemi-Tri oscillator. Top: ɛ2 showing the Amp, Ec, endpoints and control-points. Bottom: Psemi-Tri for 3 different Br values.

和 图 10-4)。 这些函数的灵活性可以在图中看出,结合左右控制点的振幅可以 生成大范围可变的不对称₆₂吸收。



$n \equiv oscillator \#$

Fit parameters (units): Ampn (no units), Brn (eV), Ecn (eV), WLn (eV) WRn (eV) ALn (no units) ARn (no units)

图 10-3. Two views of Psemi-Tri oscillator. Top: ɛ2 showing the Amp, Ec, endpoints and control-points. Bottom: Psemi-Tri for 3 different Br values.

是一个通常使用的 Psemi 函数。拟合参数为: Amp、 Ec、A、B、 WL、WR、 AL和 AR。



 $n \equiv oscillator \#$

Fit parameters (units): Ampn (no units), Brn (eV), Ecn (eV), WLn (eV) WRn (eV) ALn (no units) ARn (no units)

图 10-3. Two views of Psemi-Tri oscillator. Top: ɛ2 showing the Amp, Ec, endpoints and control-points. Bottom: Psemi-Tri for 3 different Br values.

Psemi-M0 振子模拟 M₀ critical point seen in direct gap semiconductors (在直接带 隙半导体中可以看到的 M₀临界点),例如 GaAs 和 InP in the bandgap energy region(在带隙能量区域)。可变拟合参数是: Amp_w Br_w Eo_w WR_w PR_w AR_n, and $O2R_n$ 。图 10-4 显示了不同 AR 和 PR 值的三个组合对 ε_2 线形的影响。



 \mathbb{Z} 10-4. ε_2 plot showing the effects on the line-shape of the Psemi-MO oscillator for different AR and PR values (Psemi-MO 振子不同 AR 和 PR 值时 ϵ_2 图表,显示了线性的效果)。

10.11. CPPB (Critical Point Parabolic Band)

CPPB (Critical Point Parabolic Band oscillator)是由 Aspnes¹⁹开发,用来模拟半 导体 critical points (CP's)(临界点)的介电函数形状。每个 CPPB 振子的形状 取决于五个参数:振幅 Amp_n、phase projection factor Phase_n、threshold energy (临界能量) En_n、broadening parameter (加宽参数) Br_n、和 exponent (指数) Mun。Mun可以为以下三个值中任意一个。

> $\mu_n = +\frac{1}{2}$ for 1-D CP's, $\mu_{\rm n}$ = "0" (becomes ln(2E_{en} - 2E - iI)) for 2-D CP's, and $\mu_{\rm n} = -\frac{1}{2}$ for 3-D CP's.

> > $n \equiv oscillator \#$

Ampn (no units), Brn (eV) Enn (eV), Phase(no units) $Mu\mathbf{n} = (\pm 0.5 \text{ or } 0)$

$$\begin{split} \varepsilon_{n_CPPB} &= Amp_n e^{iPhase_n} \Biggl(\frac{Br_n}{2En_n - 2E - iBr_n} \Biggr)^{Mu_n}, Mu_n = \pm 1/2 \\ \varepsilon_{n_CPPB} &= Amp_n e^{iPhase_n} \ln(2En_n - 2E - iBr_n), \\ \end{split}$$

Doc-To-Help Standard Template

Introduction 简介 • cccxlviii

¹⁹ D. E. Aspnes, "Modulation Spectroscopy/Electric Field Effects on the Dielectric Function of Semiconductors," from Handbook on Semiconductors, Vol. 2, edited by M. Balkanski (North Holland, 1980), pp. 125 - 127.
(no units)

10.12. Custom

自定义振子允许客户定义一个层的 complex dielectric(复介电)或 refractive index(折射率)函数。

Edit Equation dialog box

选择 <u>Edit Equation</u>(位于 oscillator 振子列表中 Type = <u>Custom</u>下方)打开 Edit Equation dialog box(方程编辑对话框)。对话框如图 10-5 所示。用户需要做 如下选择:

- Optical Constant type (光学常数类型): *e1 & e2* 或 *n & k*.
- Wavelength [wvl] (波长单位): Å、nm、µm、eV或 1/cm.

然后用户将期望的 Real(实部)和 Imaginary(虚部)部分的函数键入到相应的文本框中。

作为一个例子,我们将从 WVASE32[®]的 genosc 层重建 Lorentz style ".1"振子,

$$\begin{split} \varepsilon_{Lor_style_1} &= \frac{Amp \cdot Eo}{Eo^2 - E^2 - iE \cdot Br} \\ &= \frac{Amp \cdot Eo}{\left(Eo^2 - E^2\right)^2 + E^2 \cdot Br^2} + i \cdot \frac{Amp \cdot Eo \cdot E \cdot Br}{\left(Eo^2 - E^2\right)^2 + E^2 \cdot Br^2} \end{split}$$

在这个版本的 Lorentz(洛仑兹)振子中, *Amp* is approximately proportional to the area under the ε_2 curve。也就是说, 当 *Eo* >> *Br*,

$$Amp \approx \frac{2}{\pi} \int_{0}^{\infty} \left(\varepsilon_{Lor_{style1}} \right) dE$$

图 10-5 显示了输入到自定义振子 Edit equation (方程式编辑)对话框中的 $\epsilon_{Lor_style_1}$ 的 Re{ ϵ } 和 Im{ ϵ }部分。

Edit Equation					
Optical Constants in e1 & e2 💌 Wavelength [wvl] in eV 💌					
[Amp]*[Eo]*([Eo]^2 - [wvl]^2) / (([Eo]^2-[wvl]^2)^2 + [wvl]^2*[Br] e1: ^2)					
[Amp]*[Eo]*[wvl]*[Br] / (([Eo]^2-[wvl]^2)^2 + [wvl]^2*[Br]^2) e2:					
Use [wvl] for wavelength					
Operator List Qk Cancel					

图10-5. *ELOT_typel* 方程式的自定义振子Edit Equation (方程式编辑)对话框。

Operator List

在自定义振子方程式中,有很多内置的运算符和函数可用。它们在下表中列出:

OPERATOR/FUNCTION NAME	描述
+	Addition
-	Subtraction
*	Multiplication
/	Division
٨	Power
sqrt(arg)	Square root(argument)
exp(arg)	Exponent(argument)
sin(arg)	Sine function(argument)
cos(arg)	Cosine function(argument)
tan(<i>arg</i>)	Tangent function(argument)
ln(arg)	Natural logorithm(argument)
log(arg)	Base 10 logorithm(argument)
real(arg)	Real part(argument)
imag(arg)	Imaginary part(argument)
parm(arg)	Argument can be any hardware parameter that is recorded during measurement. Two examples: parm(<i>Temperature</i>), parm(<i>AlignX</i>)
isPositive(<i>test_val,eq_pos,eq_neg</i>)	isPositive(test_val,eq_positive,eq_negative)
PI	π (upper case "PI" required)
e	Natural number (lower case "e" required)
h	Plank's constant 6.626069E-34 Joules·sec (lower case "h" required)
hbar	$\hbar = h/2\pi$ reduced Plank's constant. 1.0545717E-34 Joules sec (lower case "hbar" required)

表10-1. 自定义振子中可用的内置运算符和函数列表。

下面例子是修改前面例子中用到的 Lorentz 振子(见图 10-5)。对于这个方程式, Amp 用($2 \cdot Area/\pi$.)替代。现在当 Eo >> Br时, Area $\approx area(\varepsilon_2)$ 。

图 10-6 显示了 Edit Equation (方程式编辑) 对话框中 $Re\{\epsilon\}$ 和 $Im\{\epsilon\}$ 部分。注意方程式中使用了"PI"函数。

Edit Equation
Optical Constants in e1 & e2 💌 Wavelength [wvl] in eV 💌
2*[Area]/PI*[Eo]*([Eo]^2 - [wvl]^2) / (([Eo]^2-[wvl]^2)^2 + [wvl]^ e1: 2*[Br]^2)
e2: 2*[Area]/PI*[E0]*[wvl]*[Br] / (([E0]^2-[wvl]^2)^2 + [wvl]^2*[Br]^2)
Use [wvl] for wavelength
Operator List Qk Cancel

图 10-6. $\varepsilon_{Lor_{area}}$ 方程式的自定义振子 Edit Equation (方程式编辑) 对话框。注意使用 了"PI"函数。

Edit Marker Parameters

选择 <u>Edit Marker Parameters</u>(位于 oscillator 振子列表中 Type = <u>Custom</u>下方)打 开 Edit Marker Parameters(编辑参数标记)对话框(图 10-7)。为每个自定义 振子函数,用户可以选择三个标记来代表用户定义的变量。

Edit Marker Parameters
Variables for Osc. Marker Amplitude: Area1 Broadening: Br1 Center Energy: Eo1
<u>O</u> k <u>C</u> ancel

图 10-7. ε_{Lor area} 方程式自定义振子的 Edit Marker Parameters (编辑参数标记)对话框。

一旦选择,用户定义的变量可以方便的使用鼠标拖拉围绕 Graph (图 10-8)的 marker boxes (标记框)来改变。



图 10-8. Graph 面板中的 Markers (标记)识别。

11. 参考- In situ 主菜单

In situ 主菜单用于实时动态的椭偏测量,此时样品的性质可能会随时间不同而改变。它提供了大量实时动态数据采集和显示的有用选项。

11.1. 显示 the In situ tab (如果不可见)

In situ 主菜单应该与其他主菜单同时可见。如果没有显示,执行如下步骤:

- a. 选择 **Options>'Edit Configuration'**按钮 (图 11-1 左边). CompleteEASE Configuration 对话框将打开(图 11-1 右边).
- b. 选择 General>'Always Show In situ Tab = true'选项(图 11-1 右边)。
- c. 当软件询问"Do you want to apply the changes?"时,选择 'Yes'。



图 11-1. 作图: **Options** 主菜单中的'Edit Configuration' 按钮。右图: CompleteEASE™ Configuration 窗口,其中'Always Show In situ Tab = true' 选项已被选中。

注意: CompleteEASE 中,如果要在单次会话中显示 In situ 主菜单,点击 CTRL-ALT-I 组合键。

11.2. In situ 主菜单功能

CompleteEASE™ In situ 主菜单如图 11-2 所示。这个主菜单包含 Status window (状态窗口)、Data Acquisition & Alignment (数据采集及对准)部分、 Models (模型)面板、View (视图)面板和 Graph (图形)。

G CompleteEASE						° 0' 🛛
Measurement In situ A	nalysis Hardware O	ptions				
Waiting to Acquire Data		Models		Page: 1 2 3 4		
			1: Filled Liquid Cell, Cal Wafer		6: Thermal Oxide on Si	
•		Þ				
Start Acquisition	Bystern Check					
Align Hardware	Display Signal					
🛄 Fast Acqu	isition Mode					
O Parameters O Log	● Eit O Dynamic Data			No Model Selected		
Graph Type						Show Data
			No Data To Graph	1		

图 11-2. CompleteEASETM In situ 主菜单。

Status window 状态窗口

Status window (状态窗口) (图 11-2 左上角)提供有关椭偏仪的当前信息, 如 "Initializing Hardware" (初始化硬件)、"Waiting to Acquire Data" (等待采集数据)等。

Data Acquisition & Alignment Section

这个段如图 11-3 所示,是在 Status window(状态窗口)正下方。用户可以 start(启动)、stop(停止)、pause(暂停)和 trigger(触发)数据 acquisition(采集),执行一个 hardware alignment(硬件对准)和 System Check (系统校验),以及 display(显示)光谱仪上的原始信号。用户也可以选择 Fast Acquisition(快速采集)模式。

CompleteEASE			
Measurement In situ	Analysis	Hardware	Options
Waiting to Acquire Data			
III			•
Start Acquisition		System Cl	heck
Align Hardware		Display Si	gnal
🗌 Fa	st Acquisitior	n Mode	

图 11-3. 在开始数据采集前的 Data Acquisition & Alignment 部分

Start (End) Acquisition 开始采集

开始 data acquisition(数据采集)进程(图 11-3 和 图 11-4)。Acquisition(采集)开始后, 'Start Acquisition'(开始采集)按钮变成'End Acquisition'(结束 采集),它可以结束数据采集并保存数据到磁盘上。

注: 访问 *Hardware* 主菜单的 Hardware Configuration (硬件配置) 对话框,可以设置 Standard (标准)和 Fast (快速) 采集模式。

Pause (Resume) Acquisition 暂停采集

当 Standard acquisition(标准采集)模式选中时,这个键可以 pauses(暂停)或 resumes(恢复)数据采集(图 11-4 左).。

Trigger Acquisition 触发采集

当 acquisition (采集)模式设置为 Trigger (触发)模式(通过 Hardware Configuration 对话框),一个'Trigger'(触发)按钮将出现(图 11-4 右)。选择按 钮会触发单次数据采集。

CompleteEASE		CompleteEASE			
Measurement In situ A	nalysis Hardware Option	Measurement	In situ Analysis	Hardware	Options
Time: 1.271 Hardware: SigInt=12.06, X=3.9, Y= Fit:	2.8, AlignInt=0.62	Acquisition Pause Hardware: Sigint= Fit:	d 12.05, X=0.2, Y=-2.7, Ali	gnint=0.61	
End Acquisition	Pause Acquisition	End Acqui	sition	Resume Acquisitio	n
Align Hardware	Display Signal	Align Hard	ware	Display Signal	
🗌 Fast Acqu	isition Mode		Trigger Acquisitio	n	

图 11-4 动态数据采集时 Acquisition & Alignment 部分。左图: Standard (标准)采集配 置,显示'End Acquisition'和'Pause Acquisition'按钮。右图: Trigger (触发)采集配置, 显示'End Acquisition'和'Trigger Acquisition'按钮。

Align Hardware 硬件对准

选择'Align Hardware'(对准硬件)按钮,允许用户对准椭偏仪的光源和探测器 单元或者样品台。

System Check 系统检查

开始 System Check (系统检查)操作。

Display Signal 显示信号

这将显示椭偏仪的 CCD 列阵光谱仪上的原始信号输出。

Fast Acquisition Mode 快速采集模式

选中这个框将 Standard(标准)采集模式改变到 Fast(快速)采集模式。 Standard(标准)模式 ON(开启)high accuracy(高精度),采集时间更长。

注: On (开启) High Accuracy 时,测量 zone-averages (区域平均) polarizer (偏振镜),每个测量将需要超过两倍的时间,但可以显著提高准确性,因为一阶 misalignments (对准错误)可以被修正。

Fast (快速) 模式将 High Accuracy (高精度)置为 OFF,使用较短的采集时间。 访问 Hardware Configuration 对话框可以设置 Standard (标准)和 Fast (快速) acquisition (采集)模式中的额外配置。

Models Panel 模型面板

Models(模型)面板,如图 11-5,其中包含可以用于实时数据分析的模型。最多 四十个模型可以加到列表中(每页 10 个模型,共4页)。在数据采集前或采集 中点击某一个模型按钮可以加载这个模型,随后采集的任何数据将用那个模型 来拟合。

注:为了使 model (模型)面板列表中能访问到某一个模型,这个该模型必须存放在 Common 文件夹中。

	r" d' D
ns	
	Models
	Page: 1 2 3 4
	1: Filled Liquid Cell, Cal Wafer 6: Thermal Oxide on Si
	No Model Selected

图11-5. In situ 主菜单中的 Models (模型) 面板

Adding/Editing/Clearing a Models button

要 add (添加)、edit (编辑)或 delete (删除)一个 Models 按钮,在按钮上 鼠标右(全R), Models Setup 对话框将显示,如图 11-6 所示。

Model Setup	
Model File (none)	
Fit Parameters	
Offset Correction	
Multiply Correctio	
AlignX Correction	1
l	
🗌 Do thickness control 🔄 Write report 🔲 Merge with current mode	
Setup Graph Options	Model Setup
Acquisition Parameters	Model File (none)
Ulas Feet Assuisition Made	Fit Parame (none)
Se Fast Acquisition Mode	Si with Thermal Oxide
	cauchy(index 1p5) on Au in H2O ambient
OK Cancel	uncoated Au in H2O ambient

图 11-6. 左图: Models Setup 对话框。 右图: Model File (模型文件)列表(只有保存在 Common 目录下的 model files 才会显示在这个下拉列表中)。

• Selecting a Model file 选择一个模型文件 从 Model file (模型文件)列表中选择期望的 model (模型)。只有保 存在 Common 目录下的 model files 才会显示在这个下拉列表中。

- Clearing a Model button 清除一个 Model 按钮 如果要清除模型按钮,选择"(none)"
- Parameter Corrections 参数修正

一个 model (模型) 选中后, 其拟合参数会出现在 parameter (参数) 列 表中。选中 parameter (参数) 列表中任何拟合参数后, 允许包含 Offset (偏移) 、 Multiply (乘) 和 AlignX 到拟合参数中。

• Do Thickness control 厚度控制

Thickness control(厚度控制)复选框激活 CompleteEASE 将信号发送 到另一个程序或设备,这样当目标厚度达到时,可以停止生长或 etch (刻蚀)。

- Write Report 撰写报告
 选择 Write Report (撰写报告)复选框激活撰写报告功能。
- Merge 合并

'Merge'(合并)复选框允许用户将选定模型与当前 Analysis 主菜单中的模型合并起来。例如,假设当前 model(模型)包含硅上热氧化硅(图 11-7)。注意#2 层的厚度为 568.15 nm,而且是一个激活的拟合参数。

Layer # 2 = <u>SIO2_JAW</u> Thickness # 2 = <u>568.15 nm</u> (fit) Layer # 1 = <u>INTR_JAW</u> Thickness # 1 = <u>1.00 nm</u> Substrate = <u>SI_JAW</u>

图 11-7. 硅上的初始热氧化层。注意#2 层的厚度为 568.15 nm 并且是激活的拟合参数。

然后添加'Metal on thermal oxide on silicon'到 *Models* 面板按钮列表中, 作为一个 model(模型)按钮。该 model(模型)与第一个 model(模型)有相同的层,但有代表金属的额外#3 B-Spline 层。

```
+ Layer # 3 = <u>B-Spline</u> Thickness # 3 = <u>0.00 nm</u> (fit)
Layer # 2 = <u>SIO2_JAW</u> Thickness # 2 = <u>568.15 nm</u>
Layer # 1 = <u>INTR_JAW</u> Thickness # 1 = <u>1.00 nm</u>
Substrate = <u>SI_JAW</u>
```

图 11-8. Metal / thermal oxide / silicon 模型, 已与上图 11-7 的 thermal oxide / silicon 模型合并。注意#2 层厚度还是 568.15nm, 但不再是一个拟合参数。

View Panel 显示面板

View 面板,如图 11-9 所示,选择项的信息将显示在下方的 graph 窗口中。选择 'Parameters'(参数)显示参数图,选择'Log'显示运行中的日志信息,选择'Fit' 将显示最近时间片的光谱数据图及数据拟合。



Parameters

"Parameters"(参数)radial(径向)按钮可以绘图拟合参数值和数据采集时的硬件对准信息。图 11-10显示了 in situ(在线)实际测量的参数绘图,被测样品是 Si 基底上 250Å 厚度 SiO₂校准晶圆。图中也显示了 Thickness(厚度)、MSE(均方误差)和 Intensity(光强度)随时间变化。图中显示的参数是从graph上方的四个下拉列表框中选择的。左边列出的 2 个下拉列表框参数显示在左边的 y-axis(y轴)中,右边列出的 2 个下拉列表框参数显示在右边的 y-axis(y轴)中。除了最拟合参数和 MSE,硬件参数的 SigInt、Intensity(光强)、AlignX、AlignY、Hardware OK(硬件确认)和 Fit OK(拟合完成)也可以被显示。



图 11-10. Parameters (参数) graph.

Log

"log"(日志) radial(径向)按钮记录数据采集过程中的信息。记录资料包括: 模型装入或者移除的时间,以及数据停止采集的时间。(图 11-11)。

用户也可以记录信息到日志中。要添加一个注释,顶部文本框中输入信息(绿色箭头箭,图11-11)并点击'Add'(添加)按钮(红色箭头,图11-11)。'Add'(添加)按钮点击后,带时间戳的注释将添加。注释只能在数据采集过程中被添加到日志中。当数据被保存后,参数图和日志数据将与数据同时保存,所以通过打开测量数据文件,所有信息都可以找回。



图11-11. Log (日志) 屏幕

Fit 拟合

"Fit"(拟合) radial(径向)按钮径向按钮显示最后记录时间片的对应波长的 椭偏数据,拟合模型产生的数据也同时显示(如果有的话)。图 11-12 显示的是 选中的约 0.58 分钟的时间片数据。

Dynamic Data 动态数据

"Dynamic Data"(动态数据)显示对应时间的一个或多个测量数据值(Psi、 Delta、N、C、S、ntensity等等). Graph Type 菜单允许用户选择哪个测量值被 显示。图 11-13 显示了有动态数据的这个段。



图11-12. Fit data screen (数据拟合屏幕)



图11-13. Dynamic Data screen (动态数据屏幕)

12. Reference - Hardware Tab

针对不同的椭偏仪硬件配置,在 *Hardware* 主菜单中可用的控制是各不相同的。因此,本章分为两个主要部分:一个章节描述 AlphaSE 的 *Hardware* (硬件) 主菜单,另一部分描述 M-2000 和 RC2 *Hardware* (硬件) 主菜单。

详细的 Hardware 主菜单描述请参阅每台不同椭偏仪的 Hardware manual (硬件手册)。这一章仅作为通用参考。

12.1. Configuration Files 配置文件

CompleteEASE 软件基于"cnf"文件来确定硬件的配置文件,这些文件位于 C:\CompleteEASE\cnf 目录下。它们可能包含以下文件:

hardware.cnf

描述硬件的配置和当前系统中可用的选项。

CompleteEASE.cnf

用户可设置的软件参数的配置文件。这些参数可以通过 Options 主菜单下的 'Edit Configuration'按钮访问。

CompleteEASEhard.cnf

用户可设置的硬件参数的配置文件。这些参数可以通过 Hardware 主菜单下的 'Edit Hardware Config.'按钮访问。

bview.cnf

仅用在 in situ 系统中

Privileges.cnf

设置为 password-protected(密码保护)的用户 Log-in (登录)模式时的用户 权限。

rce-cal.cnf, rce-comp.cnf, rce-dc.cnf, rce-refl.cnf

描述最近的硬件校准和光强基线值,它们基于最近的 System Calibrations(体 统校准)、System Checks(系统检查)等。

12.2. Hardware Tab – AlphaSE

一个 AlphaSE 系统的 *Hardware* 主菜单如图 12-1 所示。这个主菜单包含四个面板: Hardware (硬件), Signal (信号), Calibration (校准),和 Show
 Logs (显示日志)。以下是这个主菜单中的所有命令的简要说明。

CompleteEAS	SE			් <u>වි</u> [X
Measuremen	nt Analysis	Hardware Options			
Han	rdware Re-initialize Park Z-Stage	Signal Display Max. Sig. Display Z-Stage Scan	Calibration S-T baseline Off-Sample baseline	Show Logs Hardware Error	

图 12-1. CompleteEASE 软件中选中 Hardware 主菜单

Hardware 硬件

Re-initialize 重新初始化

此按钮重新初始化椭偏仪硬件,包括通过 USB 连接初始化通讯,扫描光谱仪,移动电机到 home(初始)位置,并测试电机。硬件初始化期间发生的任何错误的详情,可在"Hardware"和/或"Error"日志文件中找到。

Park Z-Stage

移动 Z 轴位置到"park"(停放)位置,这个位置可以用内置的装运锁锁定。

Signal 信号

Display 显示

显示由光谱仪收集到的光信号强度。Average(平均),maximum(最高), UV(紫外)和IR(红外)光强值显示在窗口中,当前光谱仪的"Dark Count" (暗电流)和电子"Temperature"(温度)同时显示。图 12-2 显示了一个例子。

Max. Sig. Display 显示最大信号

与 Display 基本相同,不同点是过程中包括调整 polarizer (偏振器) compensator (补偿器)光件,以找到最大的信号强度。找到最大光强后,窗口 将如图 12-2 所示。



图 12-2. CompleteEASE 中"Signal Display"屏幕

Z-Stage Scan 轴扫描

扫描 Z 轴,得到不同 Z 轴位置上的光强曲线。将一个样品安放在样品台上,椭偏仪的入射臂和接收臂放在"Off-Sample"(90 度以外入射角)位置上,然后点击这个按钮。由此产生的对称信号强度分布曲线应类似与图 12-3 所示。黑色虚线是一个针对实测强度的多项式拟合曲线。报告的"MSE="值量化扫描曲线的对称性。如果 MSE 值大于 0.02 时,请联系 J.A. Woollam 公司的代表处。



图 12-3. 典型的 Z-Stage scan 结果

Calibration 校准

S-T Baseline

采集"Straight-Through"(直射)配置下的基线谱,这样可以获取准确的透射光 强和 Mueller matrix(穆勒矩阵)数据。为了获得最佳的数据准确性,移动椭 偏仪光学部件后或者距离上次基线扫描超过 1 小时后,执行 S-T Baseline(直 射基线扫描)。

Off-Sample Baseline

采集一个"Off-Sample"基线,以定性反射强度数据是否可以采集。此选项也校准和存储随后测量中使用的入射角角度,为了得到最佳准确性的角度,在移动光源和接收部件或重新安装样品台后,执行一次 Off-Sample Baseline。

Show Logs 显示日志

Hardware and Error Logs 硬件和错误日志

这些按钮用来显示 Hardware (硬件) 和 Error (错误) 日志,其中包含的信息 可帮助诊断和调试仪器的问题。如果仪器不能正常工作,你的 J.A. Woollam 公 司代表处可能需要此信息来诊断问题:单击"Save Debug File"按钮,保存日志 文件。用电子邮件发送 C:\CompleteEASE\CompleteEASE_Debug.zip 文件。 图 12-4显示了一个 Hardware (硬件)日志的例子,图 12-5 是 Error (错误)日志 的例子显示。

Hardware Log File	X
Oxide Thickness = 241.10 ± 0.093 Å	-
Angle Offset = -0.001 ± 0.0033	
2008-4-11 [15:52:41] S-T Baseline: MSE=0.64, Ave. Intensity=708.30, Pol Offsets=-0.029, -0.015, 0.020, -0.014	
2008-4-11 [18:57:48] HardInit: Serial #=USB4E00448, Dark Cnt=68.8, Temp=26.25C, Firmware=USB4000 0.99.1, Driver=, PI	C=1
2008-4-11 [18:58:25] Hardware Initialized	
2008-4-11 [18:59:24] S-T Baseline: MSE=0.88, Ave. Intensity=714.69, Pol Offsets=-0.031, -0.014, 0.028, -0.017	
2008-4-11 [19:19:23] S-T Baseline: MSE=0.62, Ave. Intensity=710.89, Pol Offsets=-0.031, -0.006, 0.031, -0.015	
2008-4-11 [19:26:02] Off-Sample Baseline: MSE=1.44, Ave. Intensity=354.80	
Model Fit: MSE = 1.435	
Oxide Thickness = 24.16 ± 0.010 nm	
Angle Offset = -0.008 ± 0.0035	
2008-4-11 [19:52:52] Off-Sample Baseline: MSE=0.83, Ave. Intensity=670.06	
Model Fit MSE = 0.828	
Oxide Thickness = 22.45 ± 0.005 nm	
Angle Offset = -0.010 ± 0.0020	
2008-4-14 [12:37:53] Hardinit: Serial #=US84E00448, Dark Cnt=63.7, Temp=23.5C, Firmware=US84000.0.99.1, Driver=, PIC	:=1
2008-4-14 [12/38/31] Hardware Initialized	
2008-4-14 [12:40/09] 2-Stage Scan Results: MSE=0.005, Peak Pos=14.005, Height=50.3, Width=0.68/1.85	
2008-4-14 [12/41:31] 2-Stage Scan Results: MSE=0.007, Peak Pos=14.003, Height=50.7, Width=0.671.83	=
2008-4-14 [12:43:27] Off-Sample Baseline: MSE=1.18, Ave. Intensity=658.82	
MODER FIT: MSE = 1.176	
Unite Thickness = 24.03 ± 0.000 hm	
Anglie Oliset = 0.025 ± 0.0028	
Copy to Clipboard	Close

图 12-4. Hardware Log (硬件日志)

CompleteEASE Log File	
2000-4-11 [15:41.17] - Endi. The project directory C.CompleteEADE/Comp	
2008-4-11 [15:41:18] - Version 3.59, Java 1.6.0_05-b13, Windows XP (x86)(5.1)	_
2008-4-11 [18:57:37] - Error: The project directory C:\CompleteEASE\CompleteEASE Cnf is not accessible	
2008-4-11 [18:57:38] - Version 3.59, Java 1.6.0, 05-b13, Windows XP (x86)(5.1)	
2008-4-14 (12:37:41) - Error: The project directory C1CompleteEASE/CompleteEASE Onf is not accessible	
2000 4 14 (12.31.41) End. The project discussion of the later between the control for decession	_
2008-4-14 [12.37.43] - Version 3.59, Java 1.6.0_05-b13, Windows XP (x86)(5.1)	L.
	•
	•
Copy to Clipboard	Close

图 12-5. Error Log (错误日志)

注:旧的 ErrorLog.txt 文件存档在"\CompleteEASE\cnf\Archive"文件夹中。它们是压缩以节省空。

注意:当 CompleteEASE 启动时, 它检查 ErrorLog.txt 文件的大小。如果大于 5 MB, 它将 保存到 Archive (存档) 文件夹并创建一个新文件。

12.3. Hardware Tab – M-2000 and RC2

图 12-6 显示了一个 M-2000 系统的 *Hardware* 主菜单。这个主菜单 中包含三个 面板: Hardware Status (硬件状态), System Information (系统信息),和 Controls (控制)。这个章节描述这些面板及其中的控制命令。

Hardware 主菜单中的详细内容可以在各硬件的 Hardware manual (硬件手册)中找 到。这一章仅作为通用参考。

@ CompleteEASE		- a 🛛
Measurement In situ Analysis Hardware O	ations	Current User is jhilliker Log Out
Hardware Status	System Information	
Waiting to Acquire Data	System: M-2000DI On ESM Base	
Controls	Wavelength Range: 191.8 nm to 1697.3 nm	
General Calibration System Misc.	Angle Status: 75.00 Z-Stage Status: 2.203mm	
Alignment	Sample Tilt Status: X = -0.157, Y = 0.440	
Align Sample System Check	Translator Status: X Axis = 0.00000 cm, Y Axis = 0.00000 cm(0, 0) Focus Probes: Not installed	
Digplay Signal Move To Load Pos.	Window Effects: OFF	
Routine Test Measurement		
Measure Show Results		
	Edit Hardware Config.	View Hardware Log

图 12-6. M-2000 和 RC2 的 Hardware 主菜单

Hardware Status 硬件状态

Hardware Status (硬件状态)面板上显示当前的硬件状态。这与 *Measurement* 主菜单中 Hardware Status (硬件状态)显示相同的信息。

Controls 控制

Controls(控制)面板提供了获取数据以外需要访问硬件的功能。这些硬件功能分成几组不同的标签。分组标签有 **General**(常规), **Calibration**(校准), **System**(系统),和 **Misc**(杂项)。

General

General(常规)选项卡如图 12-7 所示,几乎所有不同配置椭偏仪具有此相同选项卡。可用的控件如下:

Controls	
General Calibration	System Misc.
Alignment	Other
Align Sample	System <u>C</u> heck
Di <u>s</u> play Signal	Move To Load Pos.
Routine Test Measuren	nent
Measure	Show Resul <u>t</u> s

图 12-7. General Tab (常规选项卡)

Align Sample 对准样品

对准样品但不采集数据。对于具有 automated alignment(自动对准)功能的系统,将显示一个对话框,允许用户选择 manual alignment(手动对准)和自动 对准(如图 12-8)。对话框中选择 No,将显示手动对准对话框。有四象限探测器位置和 Z 轴光强的一个对准屏幕如图 12-9 所示。

Sample Alignment
Would you like to perform a full sample alignment?. (Choose "No" to display the alignment screen only)
Mee No

图 12-8. 用户可在 Sample Alignment (样品对准)对话框中选择 automated alignment (自动对准)或 manual alignment (手动对准)。

CompleteEASE		o [*] ⊡' ⊵
Cancel Alignment	Align Mode Detector	Motor Increments
Use Data Acquisition Time	Automatic Cookdow Manual Receiver	Tilt Stage 0.02
Sample Tilt X = -1.6 Y = -0.5 Intensity = 4.270 (4.690, 4.510, 3.986, 3.894)	Z Positi Tit Posi	on = 0.502mm tion = (-0.033,-0.003)
Max Signal Intensity = 11.04 Average Signal Intensity = 11.01		
		5



Display Signal

这个功能显示原始信号强度。这个屏幕,如图 12-10,在调试光强问题时有用。 Average AC Intensity(平均交流强度)包含 CCD 光谱仪上所有通道。DUV AC Intensity 是前 3 个通道的平均值。而 UV AC Intensity 是 CCD 上前 10%通道的 平均。IR AC Intensity 是 CCD 上最后 10%通道的平均。



图 12-10. Display Signal (显示信号) 屏幕

System Check

System Check(系统检查)是最常用的椭偏仪校准程序。系统检查程序的详细 信息,请参阅硬件手册。

Move To Load Pos.

系统中的此功能,使加载一个样品更方便。此功能仅适用于有自动 Z 轴和自动 样品移动台的系统。一般情况下,点击此按钮,Z 轴将移动到最大值,移动台 将向用户方向移出。

Routine Test Measurement

这个选项的功能是定期测量标准样品,然后绘制拟合参数和硬件参数相对日期的曲线。使用这个功能需要创建一个 recipe(处方)并且将其放置在 "\CompleteEASE\Recipe\Routine Test Measurement"目录,recipe(处方)名称需 要列入 Hardware Configuration 的 Routine Test Measurements 段中,如图 12-11。 为使这个功能更有用,需要培训所有用户总是使用同一样品,并且每次执行测 量时总是将样品放在样品台的同一位置。

Hardware Configuration		X
Hardware Configuration Configuration Parms Data Acquisition Normal Calibration Coarse Calibration System Calibration Routine Test Measurements Measurement Period = 0.0 Save Results To Database = False Database Table Name = JAWRoutine Recipe = Test Measurement Window Effects System Check Settings Parm. Return Values Channel Subsets Miscellaneous Alignment Parameters		Edit: Recipe Test Measurement Reset Parameter to Default Description Recipe to be performed when a routine test measurement is requested.
Close		

图 12-11. Hardware Configurations 中Routine Test Measurements 段

Measure

点击来执行"Routine Test"(定期测试)

Show Results

显示以前所有的"Routine Test"(定期测试)结果。通过同一样品的测试结果,这是一个跟踪系统性能的方便方法。指定测试样品的任意拟合的参数值可以绘图(厚度、折射率等),许多硬件参数,如光强和和 Alignment(对准)值等也可以绘图。

Calibration 校准

不同型号的椭偏仪有不同的 **Calibration**(校准)选项卡。图 12-12 显示了 M-2000 的 **Calibration**(校准)选项卡,图 12-13 显示了 RC2 的 **Calibration**(校准)选项卡。对于用户来说,这些控制并不常用,因为 System Check 会执行这些功能的大部分。

Controls		
General Calibration Sy	/stem Misc.	
Initialize F	Hardware	
Coarse Calibrate	Fine Calibrate	
DC Offset	Phase Sensor Info	

图 12-12. M-2000 椭偏仪的 Calibraton (校准)选项卡

Controls		
General Calibration		
Initialize Hardware	DC Offset Calibration	
Standard Calibration	System Calibration	
Light Source Intensity:		
Xe: 100% 💌 🗋 <u>A</u> uto		
	System Status	

图 12-13. RC2 椭偏仪的 Calibraton (校准)选项卡

Initialize Hardware 初始化硬件

此按钮重新初始化椭偏仪硬件,包括初始化通过 USB / TCPIP 的通讯链接, 扫描光谱仪和移动电机到 home(初始)位置。硬件初始化期间发生的任何错误的详情可在"Error"(错误)日志中找到。

Coarse Calibrate and Fine Calibrate (M-2000 Only)

当无法使用与仪器同时提供的标准校准 wafer (晶圆)时,这些校准可以替代 System Check (系统检查)。这种情况有时在 in situ 测量时会发生,例如一个 沉积腔需要一个特定尺寸的样品时。这些校准将无法确定 in-plane (面内)的 窗口效应。在条件允许的情况下,应该执行 System Check(系统检查),而不是 一个 Coarse 或者 Fine 校准。

DC Offset 直流偏移

测量周围环境光和电子噪声,以确定测量的原始强度中包含的这些分量。为了 提高测量准确性,在采集 depolarization(退偏振)数据前需要使用这个按钮, 因为 depolarization(退偏振)数据是从测量信号的 DC 部分提取的。执行一个 System Check(系统检查)可以达到同样目的。

Phase Sensor Info (M-2000 Only)

这个诊断功能显示的信息用来确定 phase sensor (相传感器)是否工作,以及补偿器马达是否旋转。当故障排查时, J.A. Woollam 公司的代理可能会要求提供这些信息。

Standard Calibration (RC2 Only)

一个 Standard (标准) 校准相当于 M- 2000 的 Coarse 校准。当标准校准 wafer (晶圆)可用时, System Check (系统检查) 是校准仪器的首选方法。

System Calibration

System Calibration(系统校准)的相关信息请参考 hardware manual(硬件手册)

Light Intensity (RC2 Only)

光强度框允许用户改变当前的光强度。通常情况下,是使用自动模式调节光强的。

System Status (RC2 Only)

System Status (系统状态)按钮,将显示一个有 phase (相)传感器和 USB 通讯信息的诊断对话框。当故障排查时,J.A. Woollam 公司的代理可能会要求提供这些信息。

System

System t(系统)选项卡中的控制命令与椭偏仪安装在哪种基座上有关。基座的主要类型有 ESM(水平样品台,自动 Z 轴和自动变角), ES130(水平样品台,手动 Z 轴高度和手动变角),带聚焦的固定角(水平样品台,自动 Z 轴),垂直(垂直样品台,自动变角)和 Accumap。有些基座有多个附件,在 System(系统)选项卡中有可用的控制命令来更换附件。图 12-14 到图 12-16 显示了一些基底的 System(系统)选项卡。以下是这个面板中不同按钮的简要说明。使用这些功能的详细描述,请参阅硬件手册。

Controls			
General Calib	oration Sy	<mark>rstem </mark> Misc.]
Position Cont	rols		
Angle	9	<u>Z</u> -Sta	ge
Translator		<u>S</u> ample	e Tilt
Install New Sample Stage]
	Install Focus Probes		

图 12-14. ESM, ES130, 和 Fixed (固定)角度基座的 System 选项卡

Controls		
General Calibration	System Misc.	
Angle	Translator	
Move Angle	Move Translator	
Set Angle	Home Translator	
Set Angle Home Translator		

图 12-15. Vertical (垂直) 基座的 System 选项卡

<mark>/stem</mark> Misc.
Translator
cial Position
Get Lamp Hours

图 12-16. AccuMap 系统的 System 选项卡

Angle, Z-Stage, Translator, Sample Tilt

这些按钮允许用户改变基座上电动组件的位置。例如,改变Z轴高度的位置, 点击 Z-Stage 按钮,输入位置。Z轴将移动到指定位置。

Set Angle (Vertical base)

垂直样品台的基座没有探测 home(初始)角度位置的传感器,因此 Set Angle (设置角度)功能允许用户设置当前角度值。

Install New Sample Stage (ESM, ES130 and Fixed Angle)

此功能一步一步地指导用户安装一个样品台附件。这些附件包括 Translator (移动台)、Heat Cell(加热台)、Liquid Cell(液体池),等等。基座上有自动 检测传感器,软件会自动检测安装的样品台类型。其他基座可能显示有不同样 品台选项的对话框,用户可以选择一个将要安装的样品台。

Select New Stage
Sample Stage Options
Translator Heat Cell
 Heated Liquid Cell
<u>O</u> k <u>C</u> ancel

图 12-17. 选择新样品台对话框

Install/Remove Focus Probes (ESM, ES130 and Fixed Angle Focused)

逐步指导用户安装/卸载 focus probe(聚焦光学件)的步骤。

Configure System Components (Vertical base)

此按钮会显示一个对话框,允许用户指定目前已安装的附件。这些附件包括 translator(移动台)、focus probes(聚焦光学件)、camera(摄像机)、rotator(旋转台)等。

Installed Components	X
Focus Probes	
Probes Installed	✓ Camera Installed
Sample Stage Opti	ions
 Rotator 	Standard
🔾 Heat Cell	🔾 Insitu
🔲 Show Insitu Tab	
Qk	<u>C</u> ancel

图 12-18. vertical 基座已安装组件的对话框

Change Lamp (AccuMap)

用户更换灯泡的步骤。此过程的说明,请参阅硬件手册。

Get Lamp Hours (AccuMap)

显示灯安装后的使用小时数

Misc.

不适合放置在 General, Calibration 和 System 选项卡中的其他控制命令将放置 在 Misc.(杂项)选项卡中,这些控制命令与基座类型及附件的安装情况有关。 有些系统没有 Misc.(杂项)选项卡。



图 12-19. ESM 基座的 Misc. (杂项) 选项卡

Controls General Calibration Sy	/stem Misc.
Z-Stage Scan	Display Sample Image
Disable MMC	Reset MMC
Show Routine Meas.	

图 12-20. AccuMap 系统的 Misc. (杂项) 选项卡

Z-Stage Scan (Systems with motorized z-stages)

此功能可在指定 Z 轴范围内扫描,并绘制光强对应 Z 轴位置的图形。对于透明 基底,这个特别有用,可以确定是否有背面反射到达探测器。

Display Sample Image (Systems with USB camera installed)

在一个对话框中显示样品的图像。进行其他操作时,该对话框可以保持打开。

Additional Camera Functions

额外的 camera (相机)功能可能包含 'Mark Measurement Beam Location'(标记光斑位置)和'Measure Camera Field of View',如图 12-21 所示。

Camera Functions
Mark Measurement Beam Location
Measure Camera Field Of View
Close

图 12-21. 额外的 Camera Functions (相机功能).

Mark Meas. Spot Location (Systems with USB camera installed)

当样品对准好之后,此功能可以用 camera 图像来标记椭偏仪的测量光斑位置。 执行此功能后, camera 对话框中的"Show Beam"(显示光束)复选框将提供一 个准确的测量光束与样品相交的位置。

Measure Camera Field of View (Systems with USB camera installed)

这个功能用来确定数码 camera(相机)的视野,以及通过鼠标点击一幅图像来 校准自动平移台的自动移动。

Disable MMC (AccuMap)

点击此按钮,导致用户初始化移动台移动失效。当此项可用时,此功能的详细 信息,请参阅硬件手册。

Reset MMC (AccuMap)

点击此按钮,尝试重置所有移动台失效。点击此按钮后,移动台被激活,当门 和所有安全锁锁定,并发送移动命令时,移动台将动作。

Show Routine Meas. (AccuMap)

弹出一个对话框,显示 Accumap 的定期测量结果。日常测量必须在 hardware configuration (硬件配置)对话框中设置。

Additional Hardware Functions 其他硬件功能

可能包括各自特定系统的其他硬件功能。例如,一个自动变角的基座可能有一个'Angle Correction'(角度修正)按钮,如图 12-22。

Hardware Functions 🔛 🔀
Angle Offset Correction
Close

图 12-22. 自动变角基座的 Angle Offset Correction (角度偏移修正)

Angle Offset Correction

对于一个自动变角的系统,在一个角度范围上测量校准样品,然后应用机械位 置修正,在将来的测量中可以获得更准确的入射角。

System Information

System Information 面板显示椭偏仪的详细配置,并可访问 hardware configuration(硬件配置)对话框和硬件 log(日志)。所提供的信息包括椭偏 仪的类型、波长范围和当前电机的位置。当寻求 J.A. Woollam 公司帮助时请提 供这些信息。

'Edit Hardware Config'

点击这个按钮将弹出 Hardware Configuration (硬件配置)对话框。如图 12-23 所示。对话框中包含许多硬件动作的配置。这个对话框中会显示各参数的功能 描述,因此这里仅对"categories"(目录)进行此讨。

Hardware Configuration	X
Hardware Configuration Configuration Parms Data Acquisition Normal Calibration Coarse Calibration System Calibration Routine Test Measurements Window Effects System Check Settings Parm. Return Values Channel Subsets Miscellaneous Alignment Parameters Pattern Rec. Parameters	Data Acquisition Reset Parameters to Defaults Description Default parameters for data acquisition
Camera Settings Simple Ex situ Meas. Modes Liquid Cell Attachment Heat Cell Attachment Transmission Attachment Focus Option Show Advanced Config. Options Close	

图 12-23. Hardware Configuration (硬件配置) 窗口.

'View Hardware Log'

这个按钮显示 Hardware log(硬件日志),日志中包含校准和初始化的信息。

Data Acquisition 数据采集

Data acquisition(数据采集)的默认参数,包含如图 12-24 所示选项。



图 12-24. Data Acquisition (数据采集) 配置参数

Normal Calibration

Normal Calibration(标准校准)的配置参数描述,如图 12-25。



图 12-25. Normal (标准) 和 Coarse Calibration (校准) 参数.

Coarse Calibration

Coarse Calibration 的配置参数描述,如图 12-25 所示。

System Calibration 系统校准

与 System Calibration (系统校准)相关的配置参数,如图 12-26 所示。



图 12-26. System Calibration 和 Routine Test Measurement 参数

Routine Test Measurements

与 Routine Test Measurements (定期检测测量)相关的参数配置,如图 12-26 所示。

Window Effects 窗片影响

指定 Window effects (窗片影响)设置,如图 12-27 所示。



图 12-27. Window Effects 和 System Check 设置参数.

System Check Settings

指定 System Check (系统检查)参数的设置,如图 12-27 所示。

Parm. Return Values 参数返回值

硬件和 analysis (分析) 如何从"get()"函数中返回参数值的配置设置,如图 12-28 所示。





Channel Subsets 通道子集

指定 data acquisition(数据采集)时波长通道子集,如图 12-29 所示。



图 12-29. Channel Subsets (通道子集) Miscellaneous (杂项) 和 Alignment (对准) 参数。

Miscellaneous 杂项配置

包含没有在其他目录中的额外硬件参数,如图12-29。

Alignment Parameters 样品对准

描述 sample alignment(样品对准)的参数,如图 12-29 所示。

Pattern Rec. Parameters 图案识别参数

描述 Pattern Recognition (图案识别)功能的设置,如图 12-30 所示。



图 12-30. Hardware Configuration (硬件配置)中 Pattern Recognition (图案识别) Camera Settings (相机设置) Simple Ex Situ Measurement Modes (离线简易测量模式) 和 Liquid Cell Attachment (液体池附件)段。

Camera Settings 相机设置

当系统中包含 Camera (相机)时的设置描述,如图 12-30 所示。

Simple Ex Situ Measu. Modes

ex situ measurement modes (离线简易测量模式)的详细描述,如图 12-30 所示。

Liquid Cell Attachment

与 Liquid Cell(液体池)相关的硬件和窗片描述,如图 12-30 所示。

Heat Cell Attachment 加热池附件

与 Heat Cell(加热池)相关的硬件和窗片描述,如图 12-31 所示。



图 12-31. Heat Cell (加热池) 和 Transmission Attachment (透射附件)

Transmission Attachment 透射附件

Transmission attachment(透射附件)的描述,如图 12-31 所示。

Focus Option

与 Focusing Probes (聚焦探测部件)相关的硬件和窗片描述,如图 12-32 所示。

👇 Focus Option
— Max. Angle Allowed = 75
Probes Have Lenses = true
— Windows: Enabled = True
— Windows: WinRet1 = 0.10316
- Windows: WinRet2 = -0.052296
- Windows: Delta Offset Mode = 2
- Windows: Delta Offset1 = 0.323332
- Windows: Delta Offset2 = -0.143634
- Windows: Delta Offset3 = 0.007529
— Windows: Delta Offset4 = 0
- Windows: Delta Offset Err. Tolerance = 0.5
 Windows: Min. Delta Offset1 Limit = 0.2
— Windows: # of Higher Order Terms = 2
— Windows: WinDisp1 = 0.024822
— Windows: WinDisp2 = 0.000036
— Windows: WinDisp1-2 = 0.001116
— Windows: WinDisp2-2 = 0.000121
— Windows: RotDisp1 = -0.008942
— Windows: RotDisp2 = 0.000705
— Windows: RotDisp1-2 = -0.003371
Windows: RotDisp2-2 = -0.000814
i i i i i i i i i i i i i i i i i i i

图 12-32. Focusing Option (聚焦选项)

13. Reference - Options Tab

Options 主菜单如 图 13-1 所示。这个主菜单中包括以下四个面板: **Display Units**(显示单位), **Configuration Controls**(配置控制), **Miscellaneous**(杂项), 和 **About CompleteEASE**(关于)。以下是这个主菜单中所有命令的简要说明。



图 13-1. Options 主菜单选中后的 CompleteEASE 软件

13.1. Display Units 显示单位

设置"Wavelength Units:"(波长单位)、"Thickness Units"(厚度单位)、 "Optical Constants"(光学常数单位)、和"Graph Ellipsometric Data:"(椭偏数 据图)的显示单位。

Wavelength Units 波长单位

选择Å、nm、µm、eV、和1/cm作为波长的单位。

波长是一个电磁波的相邻两个波峰之间的距离,一般以 Angstroms (Å)、 nanometers (nm)或 microns (μm)为单位给出。Wavenumber (波数)是指在 1 centimeter (厘米)距离之间包含的波的数量,单位是厘米的倒数(1/cm)。

如果光被当作一个 quantum of radiant energy (photon) (量子辐射能量)(光子), 它的能量以电子伏特 (eV)给出,它与频率成正比。单位的选择在很大程度上取 决于光谱范围和应用。下面显示的是 wavelength (波长)和 photon energy (光 子能量)之间转换的关系。

$$\lambda_{nm} = \frac{1240}{E_{eV}} \tag{13-1}$$

Thickness Units 厚度单位

选择 Å、 nm、µm、和 mm 作为厚度单位。、

Optical Constants 光学常数

显示和报告光学常数为复折射率"n & k" 或复介电常数 "el & e2"。两种不同的 光学常数之间有如下关系:

$$\widetilde{\varepsilon} = \widetilde{n}^2$$
 (13-2)

这些设置在退出程序时会保存下来,重新启动软件时可以恢复这些保存了的设置。

'Use Defaults' 使用默认值

所有的设置返回到它们的默认值,其中波长为 nm 纳米,厚度为 nm,光学常数为"n & k"。

13.2. Miscellaneous 杂项

Miscellaneous 面板包含四个按钮,如图 13-2 所示。

Reset Win. Siz	ze	Manage <u>U</u> sers	Show Manu	ial (F1)
	View C	ompleteEASE Sh	ortcuts	

图 13-2. Options 主菜单中的 Miscellaneous 面板

Reset Win. Size 重置窗口尺寸

返回 CompleteEASE 窗口为默认大小。

Manage Users 管理用户

点击'Manage Users'(管理用户)来设置用户列表,以及 access level(访问级 别)和 password(密码),如图 13-3 所示。通过点击'Define User Privileges''(定义用户权限),用户可以被定义为 Engineer(工程师)级别权限,这个按 钮将打开图 13-4 所示的窗口。Complete EASE Configuration 中可以作进一步自 定义(下一节)。

User Management		X
Current Users		
User Name	Password	Access Level
Default		SysOp
Bob	bobby	Engineer
Jill	Jillian	Technician
Add New User	Edit User Define User Privileges	Delete User

图13-3. Manage Users (用户管理) 窗口, 多用户、passwords (密码) 和权限可以在 这里建立。

Edit	User Privileges	
	Editable Privileges	
	Description	Engineer
	Save Models	V
	Access Advanced Hardware Tabs	
	Access Configuration Dialogs	
	Access User Management Dialog	
	Create New Folders	V
	Close	

图 13-4. 定义 Engineer 级别用户的 Privileges (权限)

Show Manual (F1)显示手册

点击后, PDF的 CompleteEASE 手册将显示在 PDF 综合查看器中。图 13-5 显示 了这个例子。本手册也可以点击按下 F1 键来显示。

注:PDF 手册文件位于计算机的 C:/CompleteEASE 目录下。它可使用 Adobe PDF 查看器更容易地阅读。



图13-5. 点击'Show Manual'来显示 PDF 文件的手册

View CompleteEASE Shortcuts

点击这个按钮来查看 CompleteEASE 中的快捷键列表,如图 13-6 所示。

Shortcut	Function	
CTRL-M	Go to Measurement Tab	
CTRL-A	Go to Analysis Tab	
CTRL-H	Go to Hardware Tab	
CTRL-O	Go to Options Tab	
CTRL-P	Graph the Psi data curves	
CTRL-D	Graph the Delta data curves	
CTRL-N	Graph the "N" data curves (N,C,S format)	
CTRL-C	Graph the "C" data curves (N,C,S format)	
CTRL-S	Graph the "S" data curves (N,C,S format)	
CTRL-1	Graph the pseudo e1 data curves	
CTRL-2	Graph the pseudo e2 data curves	
CTRL-T	Graph the Intensity data	
CTRL-Z	Graph the Depolarization data	
CTRL-L	Add to Fit Log	
CTRL-ALT-L	View Fit Log	
CTRL-R	Add Analysis Report to Clipboard	
CTRL-ALT-O	Toggle Default Optical Constant units between "e1 & e2" and "n & k"	
CTRL-ALT-W	Toggle Default wavelength units between "nm" and "eV"	
CTRL-ALT-S	Show graph statistics	
CTRL-ALT-SHIFT-I	Add the In Situ Tab	
SHIFT-Mouse roller	When positioned over model parameter, it will increase or decrease this parameter.	
CTRL-SHIFT-Mouse rolle	r Same as SHIFT-Mouse roller, but with smaller parameter increments.	
f you are working with Un	iformity Mapping data, the following short-cuts can help manipulate the data and graphs.	
Shortcut	Function	
CTRL-Click on Point	Select/De-Select Point	
CTRL-ALT-Click on Point	Delete Point	
CTRL-ALT-SHIFT Click	on Point Show camera image from point (when available)	
CTRL-SPACE BAR	Switch view from single-point to Map	

图 13-6. CompleteEASE 中快捷键列表

13.3. Configuration Controls 配置控制

'Edit Configuration 编辑配置'

'Edit Configuration'(编辑配置)允许对 CompleteEASE 软件配置进行定制。 点击此按钮,打开图 13-7 所示的窗口。点击各项目名字左边的圆圈,可以扩 展选项内容。此外,还有许多隐藏的及高级选项将不会出现,若果要显示它们, 可以勾选窗口底部的"Show Advanced Config. Options"(显示高级配置)。包含 了高级选项的列表如图 13-8 所示。
CompleteEASE Configuration	X
Configuration Parms	General
 General Memory Management Display Units Hardware Simulation Mode In Situ Tab Parameters 	Reset Parameters to Defaults Description General purpose configuration parameters.
Show Advanced Config. Options	Close

图 13-7. Edit Configuration (编辑配置) 窗口

Configuration Parms	
 General Memory Management Display Units Remote Communications Window Setup Graph Clipboard Parms Hardware Simulation Mode In Situ Tab Parameters Data Export Parameters Shutter Controls 	
Show Advanced Config. Options	

图 13-8. 包含有 Advanced (高级)选项的 Edit Configuration 窗口

CompleteEASE 配置中的大部分设置是不言自明的,并对软件的默认设置有说明。若果你点击一个项,右边窗口将出现它的简要描述。每个项将在本章列出,一部分特别值得关注的项目将在本章中讨论。

General Configuration Parameters

General(常规)配置参数显示在图 13-9 中。当你选中某一条目时,相应的描述将出现。当管理多用户时,有 User Log-In Mode(用户登录方式)和 Users Have Own Folders(用户有自己的文件夹)两个选项。



图 13-9. General (常规) 配置参数

Font Name 字体名字

CompleteEASE 字体家族的名称。通过下拉框选择来改变字体,如图 13-10 所示。

E	dit: Font Name	
	SansSerif	-
	SansSerif	
	Script MT Bold	
_	Segoe Print	
D	Segoe Script	
N	Segoe UI	
	Segoe UI Light	
	Segoe UI Semibold	
	Segoe UI Symbol	-

图13-10. 从下拉框中选择 Font Name (字体名字)

Font Size 字体大小

CompleteEASE 字体的点阵尺寸

Graph Font Size 图形字体尺寸

图形中文本的字体点阵尺寸

Look & Feel

通过选择下拉菜单中选项,指定用户界面元素的 look & feel (观感),如图 13-11 所示。

			X
Edit: Look	& Feel		_
	Metal	-	
R	Metal Nimbus	ult	
Descriptior Specifies t interface e	CDE/Motif Windows Windows Classic	er]

图13-11."Look and Feel"(观感)下拉选择框中的不同选项。

System Time Mode

指定 CompleteEASE 确定时间所使用的方法,包含以下选项:

- 0. Java time call
- 1. Windows GetTickCount
- 2. Windows timeGetTime
- 3. Windows Performance Counter
- 4. CPU Counter

User Log-In Mode 用户登录模式

指定用户如何登录和访问软件功能。当设置多用户时,此功能重要,如章节 1.5 所述。

Auto Fit Enabled 启用自动拟合

CompleteEASE 启动时指定"Auto-Fit"(自动拟合)是否启用。Analysis>Fit: 面板中的"Auto Fit"(自动拟合)复选框是相关联的。

Always Add CE Folders

当 CompleteEASE 被启动时,指定在基础目录(通常是 C:\CompleteEASE)下的目录是否总是添加到用户位置列表。当设置多用户时,此功能重要,如章节1.5 所述。

User Have Own Folders List

当需要用户Log-in(登录)时,CompleteEASE保持每个用户位置各自独立。 当设置多用户时,此功能重要,如章节1.5所述。

Clear Data on Logout 退出时清除数据

需要用户 Log-in(登录)时,当一个当用户 logs out 时,CompleteEASE 将清除数据、model(模型)和选择的 recipe(处方)。这一点很重要,当一个用户 logs out(退出)时,它可以防止私有结果保留在 CompleteEASE 中。

Always Show In situ Tab 始终显示 In situ 主菜单

当这个选项被选中, insitu 主菜单将总是显示。当这个选项没有选中时, insitu 主菜单只在安装的样品台支持 insitu 测量时显示(Heat Cell, Liquid Cell,...)。

注意:如果 In situ 主菜单未一直显示,而用户想基于个案来显示它。点击 CTRL-ALT-I 组合键即可访问 In situ 主菜单。

Use Unicode

指定字符编码来保存配置文件和 models(模型)。要使用扩展(非拉丁文)字符 集,必须设置它为'ON',设置为'Off'可以提高与 CompleteEASE 早期版本的兼 容性。

Force Read of Tabulated Mat Files

指定所有表列材料文件要从磁盘读取,而非模型文件。这个项几乎一直应该设置为FALSE(非)。

of Cores for Data Analysis

指定数据分析时使用哪个处理器内核。'0'表明使用所有可用的内核。这个值可以被模型选项 over-ridden (屏蔽)。

Memory Management Configuration Parameters

in-situ(在线/原位)数据中定义的最大波长数和允许的最大时间片确定了内存 空间。参见图 13-12。



图 13-12. Configuration Parameters (参数设置) 窗口中的 Memory Management (内存管理)和 Display Units (显示单位)段。

Max Wavelengths 最大波长数据

CompleteEASE通过设置最大波长数量来控制内存的需求量。

Max Time Slices 最大时间片

CompleteEASE通过设置动态数据的最大时间片数量来控制内存的需求量。

Display Units Configuration Parameters

Display Units(显示单位)部分设置 CompleteEASE 中的默认单位,参见图 13-12。

Light Units 光波单位

显示光波长或光子能量的单位,可以选择 Å、nm、µm、 1/cm 或 eV.

Time Units 时间单位

时间的单位,可以选择 seconds、 minutes 和 hours

Rate Units 速率单位

Growth (生长) / etch (刻蚀)的动态速率单位,可以选择 Å/s、Å/min、Å/hr、nm/min、nm/hour、µm/min 和µm/hour。

Thickness Units 厚度单位

厚度的单位,可以选择 Å、nm、 µm 和 mm。

Opt. Const. Units 光学常数单位

Optical Constants(光学常数)单位,可以选择"n&k"或"e1&e2"。

Temperature Units 温度单位

Temperature(温度)单位,可以选择℃或K.

Translator Units 移动台单位

移动台坐标单位,可以选择 cm 或 mm.

File Save Prompt 文件保存提示

每个测量结束后自动提示保存与否。

Remote Communications Configuration Parameters

Remote Communications(远程通讯)部分帮助与 CompleteEASE 软件建立通讯。 参见 图 13-13 中此段的参数项。



图 13-13.Configuration Parameters (参数配置) 窗口中的 Remote Communications (远程 通讯)段。

Communication Type 通讯类型

远程计算机与 CompleteEASE 程序之间的通讯方法。选择 None 表示没有通讯 发生。其它选项包括 TCP/IP 和 RS232。

TCP/IP Port

CompleteEASE服务器侦听的端口号。

RS232 Baud Rate 波特率

串口通讯的波特率。Baud rate for serial communications.

Serial Port 串口

使用与串行通讯的串口号。

Auto Report 自动报告

将 Auto Report 设置为 on 时,将导致字符串被发送,字符串中包含 Asynchronous (异步)TCP/IP 端口数据采集和拟合后当前模型中的拟合参数 值。这只有将 communication type (通讯类型)设为TCP/IP 时有用。

Auto Report Format 自动报告格式

指定使用 Auto Report 时的数据格式。Status Text(状态文本)将返回如 Simple Mode status box 列表中的参数。All Parms 将返回包括那些隐含参数的所有参数。 退还参数状态列在简单的模式地位盒子。

Allow Parameter Query 允许参数队列

当置为"true"时, 拟合参数对话框中出现额外的复选框。当这个参数被选中时 model 在拟合前将尝试通过 TCP/IP 询问(远程计算机必须连接到端口"TCP/IP Port #"加 2)参数的值。

Save Results to Database 将结果保存到数据库

当置为 true 时, recipe(处方)测量的拟合结果将被添加到一个数据库中。数据库的 URL 需要在 cnf 目录下 DB-URL.cnf 文件中设置。

RunRecipe – Out of Spec

指定当接收到 RunRecipe 命令时,返回字符串将包含:OOS 表示各参数超出定 义范围,或 EEL 表示各参数哪个 error bar (误差线)超出限制范围,这些范围 是在模型中设定的。

Window Setup Configuration Parameters

Window Setup (窗口设置)部分设置窗口的默认值,包括 shape (形状)、size (尺寸)和 location (位置)。参见图 13-14。

Configuration Parms	
P Window Setup	
- Title Text =	
- Title Bar Color =	
— Start Up Tab = Ex Situ	
- Width = 1214	=
— Height = 1154	
— Top Left Corner X = 204	
— Top Left Corner Y = 32	
Divider Position = 415	-

图 13-14. Window Setup (窗口设置) 配置参数.

Title Text 标题文本

显示在 CompleteEASE 程序标题栏中的文本。

Title Bar Color 标题栏颜色

程序激活时标题栏的颜色;如果要指定,必须是'blue'(蓝色)、'green'(绿色)、'red(红色)、'orange'(橙色)、'yellow'(黄色)、'purple'(紫色)或者3个用空格分开的 RGB 整数值。(例如, '160 250 240'是 cyan 青色)。

Start Up Tab 启动标签/主菜单

CompleteEASE 启动时默认被选的标签/主菜单。如果用户需要登陆,当选择 technician level(技术员级别)时,这个模式为默认模式。

Width 宽度

以像素为单位的窗口宽度。

Height 高度

以像素为单位的窗口高度。

Top Left Corner X

以像素为单位的左上角窗口 X 位置。

Top Left Corner Y

以像素为单位的左上角窗口 Y 位置。的 Y position of top left corner of window in pixels.

Divider Position 分割位置

以像素为单位的 graph 分割位置。

Graph Clipboard Configuration Parameters

Graph Clipboard (图形剪贴板)参数部分设置将 graphs (图形)复制到剪贴板 中时的 dimensions (尺寸)和 resolution (分辨率)默认值。参见图 13-15。

Configuration Parms	
- Graph Clipboard Parms	-
- Width in Pixels = 540	
— Aspect Ratio = 1.8	
— Resolution Factor = 3	=
– Auto Legend Position = True	
— RTF Left/Right Margin = 1	
RTF Top/Bottom Margin = 1	-

图 13-15. Graph Clipboard (图形剪贴板) 配置参数

Width in Pixels

以像素为单位的在 Clipboard 中的 Graph 宽度。

Aspect Ratio 长宽比

复制到 Clipboard 中时的 Graph 长宽比。

Resolution Factor 分辨率因子

Graph 的密度因子。这个数值乘以宽度和长宽比来确定图像存储时的像素总量。

Auto Legend Position 自动图例位置

当复制 graph (图形)到剪贴板时自动放置图例以最小化数据覆盖范围。

RTF Left/Right Margin

为剪贴板创建 RTF 内容时, 左和右的页边距。

RTF Top/Bottom Margin

为剪贴板创建 RTF 内容时,上和下的页边距。

Hardware Simulation Mode Configuration Parameters

Hardware Simulation (硬件模拟)模式部分设置如果硬件没有连接时是否使用 硬件模拟方式。参见 图 13-16。

Configuration Parms	
- Hardware Simulation Mode	٠
 Simulation Enabled = false 	
Simulation Data File =	
 Show Error Bars in Parameter Graph = False 	
 System Check Button on In Situ panel = True 	
- # of Model pages-Insitu = 4	
- Rep. Converter Name =	=
Show Received Cmds = False	
— Allow Second Model = False	
— Single Model Mode = 0	
Show Fast Acq. box = True	•

图 13-16. Hardware Simulation Mode 和 In Situ 主菜单配置参数

Simulation Enabled 启用仿真

当选中时,CompleteEASE 使用 simulation (仿真)模式,而不是使用物理的 椭偏仪采集数据。

Simulation Data File

指定使用 simulation (仿真)模式时自动载入的 CompleteEASE 数据文件。

In Situ Tab Configuration Parameters

In Situ(在线、原位)主菜单参数部分, In Situ 相关参数的详细设置,如果硬件系统不是为 in situ 设计时此项一般隐藏。参见图 13-16。

Show Error Bars in Parameter Graph

当这个设置打开置为 on (开启)时,参数图将显示 4 条曲线而不是原来的 2 条, 右边的 Y 轴将显示曲线 1 和 2 的 error bars (误差线)。

System Check Button on In Situ panel

当被设置为 true(真)时, *In Situ* 主菜单中将出现 System Check(系统检查) 按钮。当被设置为 false(非)时, Check Substrate(检查基底)按钮将出现。

of Model pages - Insitu

In Situ 主菜单中 model (模型)页的可用数量。每一个页面包含个 model (模型)。最大页数为 8,最小页数为 4。

Rep. Converter Name

如果程序的名称列在这里,一个 model report (模型报告)(由 simple insitu 模式产生)被写到磁盘后,该程序将运行。作为一个命令行参数的报告文件名将 传送给程序。这个程序需要放置在 CompleteEASE 目录下。

Show Received Cmds 显示接收命令

在 In Situ 主菜单的 status (状态) 框中显示接收到的命令的文本。

Allow Second Model 允许第二模型

当这个设置置为0n时,用户可以指派第二个 model(模型)为一个按钮,它 可像第一个模型一样以用来拟合数据,但不会生成报告。第二个模型的参数将 出现在参数图中,提供不同于第一个模型参数的名字。

Single Model Mode 单模型模式

指定当 CompleteEASE 启动时,哪种 model(模型)按钮将被激活。设置为"0" 关闭这种模式。

Show Fast Acq. Box

In Situ 主菜单中包含"Fast Acquisition"(快速采集)选择框。

Data Export Parameters 数据输出参数

数据输出参数与自定义应用有关,在 CompleteEASE 中完成的分析发送到外部 程序中。不同的设置参数列在图 13-17 中。

Custom Export Application

该条目指定用户提供的自定义应用,每次测量后该程序运行以输出结果到外部 程序或数据库中。"Export Meas. Results"选项应该被选中,应用程序必须放置 在 CompleteEASE 目录中。

Append Timestamp to Data File

当选中时,当前时间将被加到通过 recipe(处方)测量获得的数据的文件名中。

Export Recipe Data as Text

当这个参数置为 true(真)时,执行一个 recipe(处方)测量后,软件将保存 额外的 text(文本)格式的数据。

Include Hardware in 1Pt Export Format

新的输出格式,仅适用于输出单点 recipe(处方)测量(无地貌)的结果。当这个参数设置为 True(真),硬件相关参数将被添加到输出文本文件中。当这个参数为 false(非)(默认值),只有拟合参数被添加。

Shutter Controls Configuration Parameters

Shutter Controls(控制)参数设置部分,设置实时进程测量中与在线 shutter 控制相关的细节。参见图 13-17。



图 13-17. Configuration Parameters (参数配置) 窗口中 Data Export (数据输出)和 Shutter Controls 部分。

Treat as Signal

Treat the shutters as signals instead of shutters. The difference is that in process control conditions, a signal remains off until the target thickness is reached whereas the shutter opens (turns on) when the growth starts and closes (turns off) when the target thickness is reached.

of Shutters

软件中配置的 shutter 数量。最大数量是 4。

Import and Save Configuration

要从一台计算上机复制配置文件到另一台上,您可以'Save Configuration'(保存配置),然后'Import Configuration'(导入配置)。这有助于在多台计算机上建立相同的 CompleteEASE 设置。

13.4. About CompleteEASE

图 13-18 显示了"About"(关于)弹出窗。其中包含软件的版本号,可用内存,和版权信息。

Create Debug File

点击此按钮来创建一个详细的调试文件,然后将文件发送到 Woollam 公司。 调试文件名字是: C: \CompleteEASE\CompleteEASE_Debug.zip。将这个 文件 Email(发送电子邮件)给 J.A. Woollam 有限责任公司的代表处,以帮助 对你的椭偏仪系统排错。

View Error Log

显示错误日志。

About C	CompleteEASE	
P	Version: 4.62 © 1999-2011 J.A. Woollam Co., Inc.	This software is only for use by J.A. Woollam Co. Customers
Authors	: Jeff Hale and Blaine Johs	
Loaded	Configuration: Default (Modifie	ed)
Hardwa Heap M Non He	are Firmware Version: 17.034 (1 lemory: Used = 551.72MB, Ma: ap Memory: Used = 26.02MB,	17.037) x = 1013.6MB Max = 100.7MB
<u>C</u> reat	te Debug File	Vi <u>e</u> w Error Log

图 13-18. About 窗口.

14. Appendices

14.1. Troubleshooting Guide 故障排除指南

任何有关 CompleteEASE 或您椭偏仪系统的问题,请与您所在地的 J.A. Woollam 公司代表处联系。为了减少支持响应时间,在联系代表处之前,请创 建下面描述的调试文件并发送电子邮件。

你最近的 J.A. Woollam 公司的代表处可以在 Section 14.4 中找到。

Reporting Problems to the J. A. Woollam Co.

如果在软件或硬件方面有问题,可以很方便的收集你当前设置的信息,然后发送到 Woollam 公司。执行以下步骤,你当前的配置、log(日志)文件、近期的校准数据将被压缩成一个名为 Complete EASE_Debug.zip 的文件,你可以将这个文件以及问题描述和联系信息发送电子邮件给我们。通过您提供的所有完整信息,我们能够帮助您快速确定问题。

Creating a Debug file 创建调试文件

- 1. 点击 Options 主菜单
- 2. 点击'Creatae Debug File'按钮
- 3. Debug (调试) 文件的名字和位置: *C:\CompleteEASE\CompleteEASE_Debug.zip.*

注意: Debug 文件包将所有的硬件和软件配置文件,以及当前的 Error Log (错误日志) 打包成单一的 ZIP 文件。

将这个文件发送电子邮件到 J.A. Woollam Co., Inc 代表处,以帮助调试椭偏仪 系统的问题。

14.2. CompleteEASE Data Transfer (to/from WVASE32)

CompleteEASE[™]和 WVASE32[™]数据文件不能直接兼容,因为它们的文件格式不同。WVASE32 的文件用 ASCII 文本写成,而 CompleteEASE 文件是 "encrypted"(加密)的。CompleteEASE 文件加密是一种"copy-protection" (复制保护)措施,因为这个软件运行时不需要"activator key"(激活密钥), 而 WVASE32 是需要的。

如果你有一份 WVASE32 软件和与之配套的 software key (activator)(加密狗), 你可以很方便的 import(导入)和 export(导出)数据文件来改变它们的格式 以兼容 WVASE32 或 CompleteEASE 软件。

Experimental (实验)数据窗口中可以执行已保存文件的数据转换。当前打开 的数据不会被修改。

执行以下步骤,任何在 Experimental (实验)数据窗口中的数据被移除(如果没有保存,会被删除)。

Importing CompleteEASE Data to WVASE32:

 在 WVASE32 软件 Experimental (实验)数据窗口的 FILE 菜单下选择 "CompleteEASE Data Transfer",并点击"Import Data from CompleteEASE"。



Figure 14-1. 从 Experimental (实验)数据窗口的 FILE (文件) 菜单中选择 CompleteEASE Data Transfer。

2. 导航并选择你想从 CompleteEASE 格式导入的数据文件。可以选择多 个文件。



图14-2. 选择你想导入的文件。

3. 导航并选择你想保存新文件的目录。导入的文件将以 WVASE32 的格 式保存在所选择的目录中。

Browse For Folder	? 🗙
Directory for Data Import from CompleteEASE:	
BACKUP.10	~
BACKUP.11	_
BACKUP.12	
BACKUP.13	
CompleteEASE Data Transfer	
🗄 🚞 DAT	
🚞 Drivers	
EXAMPLES	
표 🧰 Mat	~
C 100 C 1	3
Make New Folder	ocel

图14-3. 选择导入数据文件保存位置。

4. 导入文件后,将出现一条消息,如图 14-4。之前的".SE"和".iSE"文件 现在保存为 WVASE32 的 ".dat"格式。

Complet	eEASE Data Import 🛛 🛛 🔀
(į)	56 out of 56 files successfully imported
	OK

图14-4. 所有文件正确导入后的信息。

Exporting WVASE32 Data to CompleteEASE:

1. 在 WVASE32 软件 Experimental (实验)数据窗口的 FILE 菜单下选择 "CompleteEASE Data Transfer",并点击"Export Data to CompleteEASE" 选项。如图 14-5。



图 14-5. 选择 "Export Data to CompleteEASE"

2. 导航并选择要导出到 CompleteEASE 的 WVASE32 数据,如图 14-6。 多个文件可以同时选中。



图 14-6. 选择要导出的 WVASE32 数据文件。

3. 导航并选择目录,导出到 CompleteEASE 的数据将保存在这个目录中, 如图 14-7。导出的文件将以 CompleteEASE 格式保存。

Browse for Folder	? 🗙
Directory for Data Export to CompleteEASE:	
🖃 🥪 Local Disk (C:)	~
🗈 🧰 ANDREA	
🗈 🛅 backup	
😑 🚞 CompleteEASE	=
😟 💼 💼 cnf	
🖨 🧰 DAT	
Examples	
iar	
🗈 👝 MAT	
🕀 🛅 MOD	
in recipe	~
	2
ОК Са	incel

图 14-7. 浏览用来保存新创建的 Complete EASE 文件的位置。

4. 文件导出后,会出现以下信息。之前的".dat"和".bdt"文件将保存为 CompleteEASE 格式的".SE"和".iSE。

Complet	eEASE Data Export 🛛 🛛 🔀
(į)	24 out of 27 files successfully exported
	ОК

图14-8. 所有数据文件导出成功后的信息。若果有文件无法导出,所有成功导出的文件 数量被列出。

14.3. Comparing Results between CompleteEASE and WVASE32

对于熟悉 WVASE32 软件的用户,为发现 CompeleteEASE 的功能,他们或许 需要一定时间的学习。比较 WVASE32 和 CompleteEASE 的分析结果时,请考 虑以下的差异。

Fit Weighting

确认在两个软件中的数据分析使用相同的拟合权重。WVASE默认使用 "Experimental Standard Deviations",而 CompleteEASE 使用默认 NCS。

Depolarization Data

如果数据中包含 depolarization(退偏振)测量,WVASE32 将其包括到 MSE 计算和拟合中。除非在"Fit Option"中指定,否者 CE 将不使用 depolarization(退偏振)数据到 MSE 计算和拟合中。

Intensity Data

如果数据是 CompleteEASE 采集的, Intensity(强度)也被记录(但不用于拟合除非在 Fit Option 中指定开启)。如果将这个 CompleteEASE 数据导入到 WVASE32 中, Intensity(强度)数据同时导入, WVASE32 将自动拟合这个数据,因此,为匹配 CompleteEASE 的标准拟合,需要从 Experimental Data(实验数据)中移除 Intensity(强度)数据(使用范围选择)。

Surface Roughness

在 CompleteEASE 中 Surface Roughness (表面粗糙) 层是"stealing"(窃取) 层, 它将底下的层减去粗糙层一半的厚度。因此,如果你的层显示 100nm 厚度,并 有 2nm Surface Roughness (表面粗糙),模型实际计算 99nm 层厚度和 2nm 粗 糙层。在 WVASE32 中不是这样计算:它将计算 100nm 层厚度和 2nm 粗糙层。 对于 INTERMIX (混合) 层,WVASE 使用"stealing"(窃取)方式。

14.4. Contacting the J.A. Woollam Co., Inc.

J.A. Woollam Co., Inc.

645 M Street, Suite 102 Lincoln, NE 68508 USA PHONE: 402-477-7501 FAX: 402-477-8214 Sales@jawoollam.com or Support@jawoollam.com www.jawoollam.com

Germany & Europe

L.O.T.-Oriel GmbH Im Tiefen See 58 Darmstadt 64293 Germany PH: 49-6151-880668 FX: 49-6151-896667 wagner@lot-oriel.de www.lot-oriel.com

United Kingdom

L.O.T.-Oriel UK & Ireland 1 Mole Business Park Leatherhead, Surrey United Kingdom KT227 BA PH: 44-1372-378822 FX: 44-1372-375353 heath@lotoriel.co.uk www.lotoriel.co.uk

France

L.O.T. Oriel France 4, Allee des Garays Palaiseau, France 91120 PH: 33-1-69194949 FX: 33-1-69194930 sudrie@lot-oriel.fr www.lot-oriel.fr

Italy

L.O.T. Oriel Italy Via Francesco Sapori 27 Rome, Italy 00143 PH: 39-06-5004204 FX: 39-06-5010389 schutzmann@lot-oriel.it www.lot-oriel.it

Japan

J.A. Woollam Japan Fuji 2F 5-22-9 Ogikubo Suginami-ku Tokyo 167-0051 Japan PH: 81-3-3220-5871 FX: 81-3-3220-5876 info@jawjapan.com www.jawjapan.com

Korea

Wizoptics #501, Taebo B/D 240-5 Gocheon-Dong Uiwang-si, Gyeonggi-do 437-801 Korea PH: 82-31-477-3785 FX: 82-31-477-3786 info@wizoptics.com www.wizoptics.com

Singapore

Crest Technology 4 Loyang Street Loyang Industrial Estate 508839 Singapore PH: 65-6546-4811 FX: 65-6546-4822 marcus@crest-technology.com www.crest-technology.com

India

Sinsil International New Bramhand Annex Phase 8, G7/G2 Thane (W) 400607 Mumbai, India PH: 91-22-2489-5077 FX: 91-90-2722-5513 sinsilmumbai@gmail.com www.sinsilinternational.com

China

Genuine Optronic Room 906, Block C No. 70 CaoBao Rd. Shanghai, 200235, China PH: 86-21-64325169 FX: 86-21-64326125 sales@gen-opt.com www.gen-opt.com

Taiwan

Titan Electro-Optics Co. 14 Fl., No. 19-11 San-Chung Road Taipei 115, Taiwan PH: 886-2-2655-2200 FX: 886-2-2655-2233 sales@teo.com.tw www.teo.com.tw

Australia

Scientific Solutions P.O. Box 196 Nambour Queensland, Australia 4560 PH: 61-7-5472-7288 info@scisol.com.au www.scisol.com.au

Israel

VST Service Ltd. P.O. Box 4137 19 Imber Street Petach-Tikva, 49130 Israel PH: 972-3-92477-10 FX: 972-3-92477-11 angel@vacuumltd.com www.vacuumltd.com

15. Index

#

of Cores · 13-388

%

%RANGE · 8-265 %UNIFORMITY · 8-265

<

<e1> · 7-226 <e2> · 7-226 <k> · 7-226 <n> · 7-226 <Pseudo> Transforms · 7-226

Α

Absorbing Thin Films · 4-97, <u>4-113</u>, 4-122 AccuMap-SE · 2-29, 8-249 Acquire Dynamic · 8-254 Acquire Multiple Measurements · 8-253 Acquisition Parameters · 2-32, 8-256 Add · 4-137, 9-283 Add Layer Below Substrate · 9-284 Add Opt. Const. to Report · 3-93 Add Row \cdot 3-90 Add Trend · 7-244 Align Sample · 12-365 Allow Parameter Query · 13-390 Alloy Files · 5-180 Alloy layer · 9-314 alpha-SE · 2-26 Ambient Index > $1 \cdot 9-316$ Analysis Tab · 9-268 Angle Offset · 9-289

Angle Offset Correction · 12-373 anisotropic differences graph · 5-190 Anisotropic Films · 5-186 Append Data · 3-69, 4-143 Append Timestamp to Data File · 13-394 Aspect Ratio · 13-392 Auto Report · 13-390 Auto X,Y,Z-Scale · 7-222 Auto-Fit · 6-196 Average AC Intensity · 12-366

В

Backside reflections · 3-74 Backside Reflections · 3-68 Bandwidth (nm) · 5-157 Biaxial · 9-296 Biaxial Layer · 5-188 Blank Model · 5-162 Bootstrap Method · 9-332 Bounding Fit Parameters · 3-55 Browse for File · 1-19 B-Spline · 4-116 B-SPLINE · 9-306 Build Library · 5-182

С

Calculate Intersection \cdot 7-244 **Calibration** \cdot **12-363**, 12-367 Camera Functions \cdot 12-372 Cauchy \cdot 3-60, 3-62, 5-152, 9-293 Cauchy_Extended \cdot 9-294 Cauchy_WVL \cdot 9-294 Changing the Graph \cdot 5-167 Choose From File Dialog' \cdot 8-252 Clear Multi-Data Set Mode \cdot 5-170, 7-236 Clipboard Aspect Ratio \cdot 7-223 Cody-Lorentz \cdot 4-133, **10-341**, **10-342** Color Calculation \cdot 9-336 Common Acquisition Parameters \cdot 8-260 COMMON Location · 1-13 Common Models · 8-248 Common Pseudo Substrate Approximation · 6-209 Common Pseudo-Substrate Approximation (CPA) · 6-207 Common Recipes · 8-251 Common Scan Patterns · 8-262 Communication Type · 13-389 Compare Optical Constants · 3-89 Comparing Results · 3-88 CompleteEASE.cnf · 12-360 CompleteEASEhard.cnf · 12-360 Composition Library · 9-313 Configuration Controls · 13-384 Configure Options · 9-337 Contacting Woollam Co. · 14-402 Convert to Anisotropic · 5-188, 9-288 Convert to EMA · 9-287 Convert to Isotropic · 9-288 Copy Analysis Report to Clipboard · 3-94 Copy to Clipboard · 3-87 Coupled · 9-296 CPA · 6-209 CPA-Fit VI · 6-209 CPPB · 10-348 Create Curve · 7-243 Create Debug File · 13-395 Create/Edit Recipe · 2-31, 8-252 Critical Point Parabolic Band · 10-348 Custom Export Application · 13-394 Custom Grade Equation · 9-303 Custom oscillator · 10-350

D

Data Analysis · 3-40, 3-42 Data Collection · 2-26 Data Export · 13-394 Data Transfer (to/from WVASE32) · 14-397 Data Type · 2-32, 8-257 DC Offset · 12-368 Debug file · 14-396 Default Save Directory · 1-18 Default TieOff Behavior · 9-312 Define User Privileges · 13-381 Delay · 8-255 Delete · 9-284 Delete Data Set · 7-236 Delta · 7-225 Delta Offset · 9-317 Depolarization · 3-72, 3-75, 7-233 Derived Parameters · 3-54, 9-323 Difference Mode · 7-234 Display Sample Image · 12-372 Display Signal · 12-366 Display Units · 13-380 Double-Y Axis · 7-234 Draw Graph · 5-183

Draw Profile · 9-299 **Drude(NMu)** · **10-341 Drude(RT)** · **10-341** DUV AC Intensity · 12-366 Dynamic Data · 7-239

Ε

Edit Configuration · 13-384 Edit Equation · 10-350 Edit Hardware Config · 12-373 Edit Marker Parameters · 10-352 Editing Layers · 9-285 Effective Medium Approximation · 3-44, 9-292 Einf · 10-338 Ellipsometry · 1-24 EMA · See Effective Medium Approximation EMA-Coupled · 9-292 Error Bars · 7-235 Error Log · 13-395 Error Logs · 12-363 Evaluating Fit Results · 3-46 Expermental Error Bars · 9-332 Export Recipe Data as Text · 13-394 Exporting WVASE32 Data · 14-399

F

File Structure · 1-12 Filenames · 8-255 Fit · 9-271 Fit Dynamic · 6-198, 9-271 Fit Errors Magnitude (+/-) · 9-333 Fit Log · 3-88 FIT Options · 9-320 Fit Parameter Error Estimation · 9-331 Fit Results · 3-52 Fit Scan Data · 5-154 Fit Weight · 9-321 Fitting Data · 3-46 Folder "Links" · 1-13 Folder Links Adding · 1-14 Creating Sub-Folders · 1-15 Drag-and-Drop · 1-16 SubFolders · 1-17 Font · 13-386

G

Gaussian · **10-340** Generalized Ellipsometry · 7-232, 8-257 Generate · 9-271 Generate Report · 3-92 Gen-Osc · 4-123, 9-304, **10-338** Glass with Absorbing Film model \cdot 4-131 Glass with Transparent Film model · 3-79 Global Fits · 3-63, 4-120, 9-320 Grade Layer · 3-45, 3-81, 9-288 Graded Layer · 9-297 Graph · 6-193, 7-217 Graph All Data Sets · 5-167 Graph Clipboard · 13-391 Graph Points as a Line · 7-223 Graph ScratchPad · 3-69, 4-145, 7-220, 7-241 Graph Settings · 7-245 Graph Type · 7-224 Graph vs. Angle · 7-234 Graphing Multiple Data Sets · 3-68 Grid Fill · 8-261 GROC Model · 6-208 Growth Rate and Optical Constants Model · 6-208

Η

Hardware Configuration Alignment Parameters · 12-378 Camera Settings · 12-378 Channel Subsets · 12-377 Coarse Calibration · 12-375 Data Acquisition · 12-374 Focus Option · 12-379 Heat Cell Attachment · 12-379 Liquid Cell Attachment · 12-378 Miscellaneous · 12-377 Normal Calibration · 12-375 Parm. Return Values · 12-377 Pattern Rec. Parameters · 12-378 Routine Test Measurements · 12-376 Simple Ex Situ Measu. Modes · 12-378 System Calibration · 12-376 System Check Settings · 12-376 Transmission Attachment · 12-379 Window Effects · 12-376 Hardware Simulation · 13-392 Hardware Status · 12-364 Hardware Tab · 12-360 hardware.cnf · 12-360 Harmonic · 10-339 Harmonic Im(Amp) · 10-340 Hiding Fit Parameters · 3-55

I

Im(rho) · 7-225 Imaginary Part Only · 4-124 Importing CompleteEASE Data · 14-397 In Situ Data Analysis · 6-194 *In situ* tab · 11-353 Align Hardware · 11-355 Display Signal · 11-355

Fast Acquisition Mode · 11-355 Pause (Resume) Acquisition · 11-355 Start (End) Acquisition · 11-355 Status window · 11-354 System Check · 11-355 Trigger Acquisition · 11-355 Include Depolarization Data · 5-158, 9-322 Include Hardware in 1Pt Export Format · 13-394 Include Intensity Data · 9-322 Include Substrate Backside Correction · 9-315 Include Surface Roughness · 9-285 Initialize Hardware · 12-368 Install/Remove Focus Probes · 12-371 Installing the Software · 1-4 Intensity · 7-233 Intensity (Total) · 7-235 Intermix · 9-312 IR AC Intensity · 12-366 IR Pole Amp · 10-339

L

Limit Wvl Range for Fit · 4-120 Linear Grade · 9-298 Look & Feel · 13-386 Lorentz · 10-339 Lorentz Im(Amp) · 10-339

Μ

M-2000 · 2-29, 8-249 Manage Users · 13-381 Manual · 13-382 Manual Conventions · 1-9 Manual X,Y,Z-Scale · 7-223 Map Data · 5-147, 5-149, 7-238 Mark Meas. Spot Location · 12-372 Match All · 4-130 Max Time Slices · 13-388 Max Wavelengths · 13-388 Measure Camera Field of View · 12-372 Measurement Recipe · 8-250 Measurement Tab · 8-246 Measuring a Sample · 2-27 Memory Management · 13-388 Metal Substrates · 4-99 MM Derived Parameter · 7-229 MM-Jones Quality · 7-229 Mode: · 8-246 Model · 3-43, 9-285 Model Calculation · 5-155, 9-315 Model Non-Idealities · 5-149 MODEL Options · 9-315 Models · 2-36 Models button Adding/Editing/Deleting · 11-356 Models Panel · 11-356

More Options · 7-234 Move Translator · 8-255 MSE · 3-45 Mueller Matrix · 8-257 Mueller Matrix Diag · 7-227 Mueller Matrix NCS · 7-227 Mueller Matrix Off Diag · 7-227 Mueller Matrix Utility · 7-230 Mueller-Matrix Data · 7-227 Multi-Data Sets · 6-202 Multi-Model Patterning · 9-317 Multiple Data Types · 4-98, 4-142 Multiple Users · 1-19 Multi-Sample Analysis · 5-161, 5-169, 5-174, 9-318 Multi-Time Slice Analysis · 6-203

Ν

N, C, & S · 3-46 N, C, S · 7-225 Non-Linear Grade · 9-299

0

OC Library \cdot 5-148, 5-180 **Off-Sample Baseline** \cdot **12-363** Offset \cdot 9-298 **Operator List** \cdot **10-351** Opt. Const. Compare Model \cdot 5-181 Optical Constant type (Custom Osc.) \cdot 10-350 Optical Constants \cdot 3-48, 13-381 Options Tab \cdot 13-380

Ρ

Parameter Error Bars · 3-52 Parameter Perturbation · 9-332 Parameter Uniqueness · 4-110, 4-142, 9-330 Parameterize · 4-122 Parameterize Layer · 9-286 Parametric Grade · 9-301 Park Z-Stage · 12-361 Perform Thickness Pre-Fit · 9-320 p-Intensity · 7-234 p-Intensity (Total) · 7-235 Pole · 10-339 Profile Along X and/or Y Axis · 7-221 Prompt for Acquisition Parameters · 2-30, 8-250 Prompt for Recipe Components · 2-30, 8-251 Psemi-M0 · 10-344 Psemi-Tri · 10-344 Pseudo optical constants · 7-226 Pseudo Optical Constants · 3-43 Pseudo Transforms · 4-99 Psi · 7-225

R

Random Errors (Noise) · 9-331 Range-Select · 7-218 Range-Selecting Wavelengths · 4-118 RC2 · 2-29, 8-249 Re(rho) · 7-225 Real Part Only · 4-127 Re-analyzing Multiple Data Sets · 3-90 Recent Folders · 1-13 Recent List · 1-13 Recipe · 2-29 Recipe Scheduler · 8-253 Reflection Intensity · 8-258 Re-initialize · 12-361 Remote Communications · 13-389 Remove Grading · 9-288 Rename Layer & Fit Parameters · 3-65 Renaming Fit Parameters · 3-55 Reset List · 9-272 Reset Win. Size · 13-381 Resolution Factor · 13-392 Return Path Ellipsometer · 9-317 Rotation Data · 7-238 Roughness · 4-141 Routine Test Measurement · 12-366 RS232 · 13-390 Running a Recipe · 2-37

S

Sample Alignment · 2-32, 8-258 Sample Alignment: · 8-246 Sample Height Alignment · 2-33, 8-259 Save · 4-106, 9-285 Save Layer Optical Constants · 4-107 Save Log File · 3-95 Save OC Library · 5-185 Saving a Model · 4-136 Scale Z-Range by n-Sigma · 7-223 Scan Pattern · 2-34, 8-261 Scan Region of Interest · 8-262 Screen Layout · 7-217 SE + T · 4-98, 4-142, 6 Select a Recipe · 8-250 Select All Data Sets · 7-236 Select Current Data Set ONLY · 7-236 Select Data Set · 7-236 Select Mueller Matrix Elements · 7-228 Select Ratios to Graph · 7-232 Selecting a Map Point · 5-150 Selecting Multiple Points on a Map · 5-165 Self-Assembled Monolayers · 4-109 Sellmeier · 5-153, 9-295 Set Ranges · 5-152, 9-270 Set Symbol Size · 5-163, 7-222

Set Temperature · 8-255 SETUP Program · 1-4 Shortcuts · 13-383 Short-cuts · 1-22 Short-Cuts · 5-161, 6-194 Show Data · 7-218 Show Map Data · 5-149 Show Symbols · 7-222 Shutter Controls · 13-394 Si with Absorbing Film model · 4-114 Si with Transparent Film model · 3-61 Signal · 12-361 Silicon Model · 3-54 Simple Grade · 9-298 Simulate Data · 9-336 s-Intensity · 7-234 s-Intensity (Total) · 7-235 Slice Value · 9-301 Slope · 9-298 Snapshot · 3-95, 9-283 Source and Receive Rot. · 9-317 Spectroscopic Ellipsometry · 1-24 S-T Baseline · 12-363 Standard SE Measurement · 8-257 Starting Mat · 4-132 Statistics · 7-220 Surface Roughness · 3-81 Surface Tracking Fit Mode · 6-210 symmetric profile · 9-299 System Check · 12-366 System Status · 8-246 Systematic Errors · 9-332

T

Tabulated n,k · 9-292 Tanguy · 10-343 Tauc-Lorentz · 10-341, 10-342 TCP/IP · 13-390 Temperature Layer · 9-314 Thickness Non-Uniformity · 5-156 Thickness Pre-fitting · 3-56 Thickness Units · 13-381 Tie Off Positions · 9-312 Tilt Alignment · 2-33, 8-258 Time Mode · 13-387 Time-Slices · 6-201 Transmission Data % Weight · 4-144, 9-322 Transmission Intensity · 8-257 Transparent Films · 3-40, 3-79 Transparent Substrates · 3-68 Transparent Thin Films · 3-40, 3-60 Troubleshooting · 14-396 Try Alternate Models · 3-84, 9-329 two segment grade equation \cdot 9-302

U

Uniaxial · 9-314 Uniaxial-Diff · 9-314 Units · 13-388 Light · 13-388 Optical Constants · 13-389 Rate · 13-389 Temperature · 13-389 Thickness · 13-389 Time · 13-389 Translator · 13-389 Un-Select Data Set · 7-236 Unwrap from EMA · 9-288 Upgrading Software · 1-4 User Log In · 1-21 UV AC Intensity · 12-366 UV Pole · 10-339

V

VI Mode · 6-209 View panel Dynamic Data · 11-359 Fit · 11-358 Log · 11-358 Parameters · 11-358 View Previous Fit Results · 8-264 Viewing Results · 2-37 Virtual Interface · 6-207 Visualizing Model Changes · 3-59 Void · 9-292

W

Wavelength **[wvl]** (Custom Osc.) \cdot 10-350 Wavelength Range Expansion \cdot 4-118 Wavelength Range Expansion Fit \cdot 9-329 Wavelength Units \cdot 13-380 Wavelength Units – eV \cdot 5-150 Window Setup \cdot 13-390 Wvl Shift (nm) \cdot 9-317 WvlByWvl \cdot 9-296 WvlbyWvl Layer \cdot 4-100

Ζ

Zoom All · 7-219 Zooming on Map · 5-164 Z-Stage Scan · 12-362, 12-372 Theory - 1 - 2 (Gen-Osc) (SE + T) and Model Non-Idealities for Composition or Temperature-dependent materials