

[美] 杜经宁 J. W. 迈耶 著
L. C. 费尔德曼

电子薄膜科学

微电子学系列

科学出版社

51.2281
266

电 子 薄 膜 科 学

〔美〕杜经宁 J. W. 迈耶 L. C. 费尔德曼 著

黄信凡 杜家方 陈坤基 译

陈坤基 校

科 学 出 版 社

1 9 9 7

内 容 简 介

电子薄膜科学是现代技术领域中新型材料研制的基础,与当今固态电子技术的发展密切相关.本书第一部分(第一至第四章)阐述了淀积、表面能、扩散和应力等材料科学方面的预备知识.第二部分(第五至第九章)介绍同质外延和异质外延结构及超晶格的生长,它们的电学和光学性质.第三部分(第十至第十五章)论述单层和多层薄膜结构的动力学、相变和可靠性.全书强调概念阐述与定量计算相结合,并给出计算实例及其结果.

本书可作为高等院校微电子学、材料科学和凝聚态物理学等有关专业高年级学生及研究生教材,也适于有关专业的科研、技术人员及高校师生自学使用.

King-Ning Tu J. W. Mayer L. C. Feldman

ELECTRONIC THIN FILM SCIENCES: FOR ELECTRICAL
ENGINEERS & MATERIAL SCIENTISTS

Copyright ©1992 by Macmillan College Publishing Company, Inc.

本书由 Macmillan College Publishing Company, Inc. 授权,根据英文版翻译.

版权所有,翻印必究.

电子薄膜科学

[美]杜经宁 J. W. 迈耶 L. C. 费尔德曼 著

黄信凡 杜家方 陈坤基 译

陈坤基 校

责任编辑 魏 玲

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1997年2月第一版 开本:850×1168 1/32

1997年2月第一次印刷 印张:16 1/4

印数:1—1500 字数:421 000

ISBN 7-03-005459-8/TN·182

定价:35.00元

译者序

薄膜科学和技术的发展已使我们能够人工设计和制备出与天然块状材料性质不相同的薄膜材料。它为近 30 年来各种有源、无源电子薄膜器件的迅猛发展奠定了重要的基础。它是涉及材料科学、合成化学、凝聚态物理学和电子工程学等多基础学科的一门应用性学科。其中研究原子尺度的薄膜制备、特性表征及稳定性等课题是电子薄膜科学和技术领域中的发展前沿。它正以全新的概念改变着电子器件的设计思想,并为介观物理、低维小量子系统物理等基础研究提供了有力的实验手段。

尽管当前国内外已有多本有关薄膜方面的著作,有的是专门技术方面的论著,也有的是科学论文的汇编。但由于迅速扩展的薄膜领域十分广阔,不可能在一本书中全面论述这一领域。由杜经宁教授、J. W. 迈耶教授和 L. C. 费尔德曼博士合著的《电子薄膜科学》是为美国 Cornell 大学材料科学与工程系和电子工程系的高年级学生和研究生写的教科书。该书的内容不仅介绍了为理解薄膜的形成和结构所必需的材料科学方面的预备知识,更主要的是结合他们多年来的工作经验和研究成果,阐述应用于微电子和光电子领域中的薄膜研究的重要进展和最新技术。该书取材广泛、内容新颖、物理图象直观清晰,强调概念阐述与定量计算相结合,并举有计算实例,从理论、实验到实际应用给读者一个完整的概念。因此它不仅是一本极好的理论和实践相结合的教科书,也是材料科学和电子工程领域的技术人员的一本有实践指导意义的参考书。

该书的原版是 1992 年 10 月在北京召开的第三届国际固态与集成电路技术会议上我们科研小组获得的奖品。在《微电子学丛书》主编王阳元院士和我校冯端院士的推荐下,在原作者杜经宁教授的热情支持下,我们组织翻译了本书:黄信凡翻译前言和第一、

二、三、四、十三章及附录,陈坤基翻译第五、六、七及八章,杜家方翻译第九、十、十一、十二及十五章,李志锋翻译第十四章,全书由陈坤基校阅。在本书翻译工作中,得到本科研小组徐骏、李伟及研究生的大力协助,在此一并深表感谢。

本书译稿已作为教材在南京大学物理系和材料科学系的研究生课程中试用。限于我们的水平,译文中不妥乃至错误之处,欢迎读者批评指正。

衷心感谢杜经宁教授为我们提供他们在讲课中使用的“教学指导书”和“习题解答集”,希望今后有机会译出,以飨读者。

前 言

数据和信息处理技术的高速发展是现代技术领域举世瞩目的最伟大的成就. 这样的成就是由于器件的发展达到了前所未有的高度以及具有优异性能的新型材料的研制才得以实现的. 而这些新进展的基础便是薄膜科学和工艺学. 研究原子尺度的薄膜制备、特性表征及稳定性等课题是材料科学发展的基本点. 应运而生的薄膜科学涉及多学科领域, 包含化学、电子工程、材料科学和物理学, 它的发展要求对表面科学和体单晶有充分的了解. 尽管如此, 薄膜科学仍然有其自身的固有特性. 固态电子技术的进一步发展毫无疑问将与薄膜材料的设计和精确控制密切相关. 因此, 向未来的电气工程师和材料科学家讲授与薄膜科学有关的课程已是迫在眉睫.

四年前我们就计划在 Cornell 大学开设“电子薄膜”课程, 但却找不到一本合适的教材. 于是便撰写了讲稿, 这便是本书的雏形. 尽管本书是一本教科书, 我们相信, 在该领域多年工作经验基础上写就的这本书, 对于那些渴望把薄膜技术应用到微电子技术中去的专业人员也将有参考价值.

本书是为对电子薄膜有兴趣的大学高年级学生和研究生写的. 最初该课程是在材料科学和工程系开设的, 但几乎一半学生是来自于电子工程系或其它非材料科学系, 他们所学的基础课程和训练各不相同, 因此一些学生还未能掌握本教程所必需的材料科学方面的预备知识. 为此, 本书的前四章着重对淀积、表面能、扩散和应力等主题进行了回顾. 这些主题为今后理解薄膜的形成和性能是很重要的, 它是为理解后续几章的内容打基础.

除上述四章外, 其余各章的内容可分为两部分: 第一部分(从第五章到第九章)涉及同质外延和异质外延结构和超晶格的生长

及其电学和光学性质;第二部分(从第十章到第十五章)是关于单层和多层薄膜结构的动力学、相变和可靠性。

本书强调概念阐述与定量计算相结合. 在讨论物理概念的同时, 给出简单的数学推导及有关的方程式, 数学水平不超过大学程度. 另外, 还给出一些实例进行计算, 并给出结果和计量单位.

在撰写本书时, 我们得到学生们的许多帮助, 他们对讲课内容的询问和反应使本书的内容和编排得到改进. 我们要感谢那些允许我们使用他们的图、表和照片的作者们. 感谢 David Turnbull、Che-yu Li 和 L. T. Shi 以及 H. B. Huntington 和 A. B. Pippard 分别对第三章、第四章及第十四章提出的建设性意见. 感谢应我们的要求对原始草图作审定的几位外单位专家, 感谢他们提出了一些非常好的重要意见. 我们也要感谢 Macmillan 出版公司的 David Johnstone 和 John Travis 的热情帮助和对书稿所作的编辑工作; 衷心感谢 IBM Yorktown 的 Teddy Oxton 夫人及 Cornell 大学的 Noreen Ocello 夫人对本书手稿进行的高质量的打印工作. 最后我们还要感谢 Cornell 大学的 Jane Jorgesen 和 Ali Avcisoy 以及 IBM Yorktown 的 Lou Kristiansen 为本书绘制了许多插图及技术加工工作.

杜经宁

J. W. 迈耶

L. C. 费尔德曼

标准符号

a	lattice constant 晶格常数 (nm)
A	area 面积 (cm^2), (m^2)
b	Burgers vector 伯格斯矢量 (nm)
C	concentration of atoms 原子浓度 (cm^{-3})
D	diffusion coefficient 扩散系数 (cm^2/s), (m^2/s)
D_0	pre-exponential factor of D D 的指数前因子 (cm^2/s), (m^2/s)
D_s	surface diffusion coefficient 表面扩散系数 (cm^2/s), (m^2/s)
e	charge on electron 电子电荷 (C)
E	energy (general expression) 能量 (一般表示) (eV), (J), (erg)
$\mathcal{E}$	electric field 电场 (V/cm), (V/m)
f	misfit (epitaxy) 失配 (外延)
F	force 力 (N)
F	Helmholtz free energy 亥姆霍兹自由能
G	Gibbs function or Gibbs free energy 吉布斯函数或吉布斯自由能
$\Delta G_m, \Delta G_f$	motion, formation energy of diffusion 扩散动能, 形成能 (eV), (J)
g	gravity constant 重力常数 (dyn/g)
h	height (height of monolayer) 高度, 单原子层高度 (nm)
$\hbar$	Planck's constant 普朗克常数 (eV · s), (J · s)
H	enthalpy 焓 (eV), (J)
h_c	critical thickness (epitaxy) 临界厚度 (外延) (nm)
J	flux 通量 ($1/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$)
J_s	surface flux 表面通量 ($1/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$)
k	Boltzmann's constant 玻耳兹曼常数 (eV/K)
K	Kelvin temperature unit 开尔文温度单位
L	length 长度 (m), (cm), (μm), (nm)
L_0	step spacing 台阶间距 (nm)
m	mass 质量 (g), (kg)
M	atomic mobility (D/kT) 原子迁移率, ($\text{cm}^2/\text{eV} \cdot \text{s}$)
n	atomic or carrier concentration 原子或载流子浓度 (cm^{-3}), (m^{-3})
N_A	Avogadro's number 阿伏伽德罗常数 (原子/mol)
N	surface concentration 表面浓度 (cm^{-2})

N_s	number of sites(of atoms)per unit area 单位面积格点(或原子)数
p	pressure 压力 (N/m^2), (Torr), (dyn/cm^2)
p_0	equilibrium pressure on plane surface 平坦表面上的平衡压力 (N/m^2), (dyn/cm^2)
R	gas constant 气体常数 ($\text{J/mol} \cdot \text{K}$), ($\text{cal/mol} \cdot \text{K}$)
S	entropy 熵 (eV/K)
t	time 时间 (s)
T	absolute temperature 绝对温度 (K)
T_θ	Debye temperature 德拜温度
U	internal energy 内能 (eV), (J)
v	velocity 速度 (cm/s)
V	volume 体积 (cm^3), (m^3)
W	work 功 (eV), ($\text{N} \cdot \text{m}$), ($\text{dyn} \cdot \text{cm}$)
W	total energy to remove an atom from surface 从表面移走一个原子 所需的总能量 (eV)
Y	Young's modulus 杨氏模量 (N/m^2), (dyn/cm^2)
α	thermal expansion coefficient 热膨胀系数
γ	surface energy (eV/cm^2) (J/cm^2) (eV/原子) 表面能
ϵ	strain 应变
ϵ	permittivity 介电常数、电容率
θ	contace angle 接触角
θ	shear strain 切应变
λ	characteristic length 特征长度 (Dt) ^{1/2} , (cm)
μ	chemical potential 化学势 (eV), (J)
μ	Shear modulus 切变模量 (N/m^2), (dyn/cm^2)
μ	carrier mobility 载流子迁移率 ($\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$)
ν	frequency 频率 (s^{-1})
ν	Poisson's ratio 泊松比
ν_s	surface vibration frequency 表面振动频率
ρ	resistivity 电阻率 ($\Omega \cdot \text{cm}$)
ρ	mass density 质量密度 (g/cm^3)
σ	stress 应力 (N/m^2) (dyn/cm^2)
τ	characteristic time 特征时间 (s)
ϕ	potential 电势 (V)
Ω	atomic volume 原子体积 (V/原子), (cm^3)

目 录

译者序

前言

标准符号

第一章 薄膜淀积和层状结构	(1)
1.0 引言	(1)
1.1 在电子器件中的应用	(1)
1.2 淀积和生长	(2)
1.3 表面	(6)
1.4 晶体学及其标志法	(8)
1.4.1 晶体结构	(9)
1.4.2 晶向和晶面	(12)
1.4.3 表面结构	(13)
1.4.4 多晶和非晶层	(14)
1.5 层状结构	(16)
1.5.1 外延	(16)
1.5.2 硅化物	(17)
1.5.3 稳定性与亚稳性	(17)
1.6 结论	(19)
参考文献	(20)
习题	(21)
第二章 表面能	(24)
2.0 基本概念	(24)

2.1	结合能和原子间的相互作用势能	(25)
2.2	表面能和潜热	(29)
2.3	表面张力	(30)
2.4	用毛细效应测量液体的表面能	(33)
2.5	用零蠕变法测量固体的表面能	(37)
2.6	表面能分类	(41)
2.7	表面能的大小	(43)
2.7.1	热力学计算方法	(43)
2.7.2	力学计算方法	(44)
2.7.3	原子计算方法	(46)
	参考文献	(48)
	习题	(49)
第三章	固体中的扩散	(52)
3.0	基本概念	(52)
3.1	跳跃频率和扩散通量	(54)
3.2	化学势和驱动力	(56)
3.3	菲克第一定律	(59)
3.4	非线性扩散	(61)
3.5	连续性方程(菲克第二定律)	(63)
3.6	扩散方程的解	(65)
3.7	扩散系数	(68)
3.8	扩散系数的计算	(70)
3.9	原子振动频率	(74)
3.10	激活焓	(77)
3.11	指数前因子	(78)
3.12	表面扩散	(82)
	参考文献	(84)
	习题	(84)
第四章	薄膜中的应力	(87)
4.0	引言:固体的理论强度	(87)

4.1	弹性应力-应变关系	(89)
4.2	应变能	(91)
4.3	薄膜中应力的起源	(93)
4.4	薄膜中的双轴应力	(94)
4.5	存在应力的固体中的化学势	(99)
4.6	扩散蠕变(Nabarro-Herring 方程)	(102)
4.7	失配位错的弹性能	(106)
	参考文献	(109)
	习题	(110)
第五章 表面动力学过程		(112)
5.0	引言	(112)
5.1	表面原子	(113)
5.2	原子团上的汽相压力	(115)
5.3	原子团的“熟化”生长机制	(119)
5.4	原子团生长的激活能	(124)
5.5	原子团的聚合生长机制	(126)
5.6	带有图形结构表面的质量迁移	(128)
5.7	表面台阶成核模型	(135)
	参考文献	(141)
	习题	(142)
第六章 Si 和 GaAs 单晶薄膜的同质外延生长		(145)
6.0	引言	(145)
6.1	生长技术	(145)
6.2	基本概念	(148)
6.2.1	固-气平衡	(148)
6.2.2	表面扩散和结合能	(149)
6.2.3	表面扩散路径长度	(150)
6.2.4	气压	(150)
6.2.5	超饱和度	(151)
6.2.6	表面特征能量	(151)

6.2.7	表面台阶	(152)
6.2.8	表面台阶的固有密度	(153)
6.3	同质外延的生长模式	(154)
6.4	高温外延:台阶媒体生长模式	(159)
6.4.1	表面原子密度	(159)
6.4.2	表面台阶的周期排列	(160)
6.4.3	生长速率	(161)
6.5	MBE 中的台阶周期性	(163)
6.6	低温外延	(163)
6.7	GaAs 外延生长:MBE 和 MOCVD	(165)
6.8	半导体结和电势	(171)
6.9	直接和间接带隙能带结构	(175)
	参考文献	(177)
	习题	(178)
第七章	异质外延生长和超晶格结构	(181)
7.0	引言	(181)
7.1	晶格常数和能隙	(183)
7.2	晶格失配系统的结构	(186)
7.3	异质外延层中的应变能	(189)
7.4	应变层的稳定性	(191)
7.5	位错能	(195)
7.6	临界厚度	(197)
7.7	约化应变	(202)
7.8	应变与四方畸变	(203)
7.9	应变的测量	(206)
7.10	超晶格结构	(209)
7.11	应变层超晶格	(212)
7.12	插入位错	(215)
	参考文献	(218)
	习题	(219)

第八章 异质结、量子阱和超晶格结构中的电学和光学特性	(225)
8.0 引言:材料设计	(225)
8.1 异质结构能带图	(226)
8.2 二维结构中的电子态	(230)
8.2.1 单势阱中的电子	(231)
8.2.2 二维能态密度	(232)
8.3 激子	(233)
8.4 光子的发射和输运	(237)
8.4.1 异质结光发射二极管	(238)
8.4.2 激光二极管	(240)
8.4.3 布喇格反射器超晶格	(241)
8.4.4 边缘和表面发射激光器	(245)
8.5 电子输运	(247)
8.5.1 异质结双极型晶体管(HBT)	(247)
8.5.2 掺杂:控制和调制	(249)
8.5.3 异质结构中的电子限制	(250)
参考文献	(253)
习题	(255)
第九章 肖特基势垒和界面势	(258)
9.0 引言	(258)
9.1 金属-半导体接触	(261)
9.1.1 功函数与电子亲和势	(261)
9.1.2 能带弯曲与耗尽区	(262)
9.2 肖特基势垒特性	(264)
9.3 肖特基势垒测量	(266)
9.3.1 热离子发射与电流-电压技术	(266)
9.3.2 电容-电压与光响应技术	(272)
9.4 表面态、损伤及并联接触对肖特基势垒的影响	(274)
9.5 欧姆接触	(279)

参考文献	(281)
专题参考文献	(282)
习题	(283)
第十章 固相非晶化、晶化及外延	(285)
10.0 引言	(285)
10.1 亚稳态	(286)
10.2 固相非晶化	(290)
10.3 固相晶化与 Avrami 方程	(296)
10.4 非晶薄膜晶化的测量	(303)
10.5 成核过程的临界核及界面能的计算	(308)
10.6 固相外延(无媒体)	(310)
10.7 固相外延(有媒体)	(316)
参考文献	(320)
习题	(321)
第十一章 互扩散	(323)
11.0 引言	(323)
11.1 形成固溶体的互扩散	(324)
11.2 Kirkendall 效应	(327)
11.3 Boltzmann-Matano 分析	(328)
11.4 互扩散系数	(330)
11.5 Darken 分析法	(332)
11.6 形成金属间化合物的互扩散	(335)
11.7 层状化合物生长的分析	(338)
11.8 初相形成的预测	(341)
参考文献	(342)
习题	(342)
第十二章 薄膜反应	(346)
12.0 在体偶和薄膜中化合物的形成	(346)
12.1 薄膜反应:扩散和反应控制	(351)
12.2 层状化合物的生长	(356)

12.3	两层化合物的生长	(362)
12.4	横向扩散偶	(371)
12.5	动力学参数及测量	(374)
12.6	借助恒速变温的动力学分析	(377)
	参考文献	(379)
	习题	(380)
第十三章 晶粒间界扩散		(382)
13.0	引言	(382)
13.1	晶粒间界扩散与体扩散的比较	(384)
13.2	晶粒间界扩散的 Fisher 分析法	(387)
13.3	晶粒间界扩散的 Whipple 分析法	(392)
13.4	在小角晶粒间界中的扩散	(397)
13.5	扩散导生的晶粒间界运动	(399)
	参考文献	(401)
	习题	(402)
第十四章 金属中的电迁移		(404)
14.0	引言	(404)
14.1	电迁移的驱动力	(405)
14.2	有效电荷数的计算	(409)
14.3	电迁移中的应力效应(不可逆过程)	(411)
14.4	电迁移的测量	(414)
14.5	金属超细线条中的电迁移	(416)
	参考文献	(417)
	习题	(418)
第十五章 薄膜中的貌相改变		(420)
15.0	引言	(420)
15.1	晶粒生长	(420)
15.2	小丘生长	(425)
15.3	细线条中的空洞形成	(430)
15.4	硅衬底中铝浸入形成小坑	(434)

15.5 AgPd 合金电极的腐蚀	(435)
参考文献	(441)
习题	(441)
附录 A 麦克斯韦速度分布函数	(444)
附录 B 热力学函数	(449)
附录 C 固体中的缺陷浓度	(453)
附录 D Si MBE 中平台尺寸分布	(455)
附录 E 弹性常数、弹性常数表以及单位换算	(460)
部分习题答案	(467)
用于电子材料的某些元素的物理性质	(499)
物理常数及其换算	(500)
Si、Ge、GaAs 和 SiO ₂ 的性质(300 K)	(501)
元素周期表	(502)