

半导体缺陷电子学

H.F. 马特瑞 著

科学出版社

半导体缺陷电子学

H. F. 马特瑞 著

高凤升 龚秀英 等 译
梁骏吾 魏策军 等 校

科学出版社

1987

内 容 简 介

缺陷对半导体的电学、光学、力学性质,器件的性能及成品率有着决定性的影响。本书系统地论述了载流子输运的基本原理、半导体中的各种缺陷,并着重介绍了位错的力学、电学性质,载流子输运的各向异性,位错的控制生长,以及利用位错制备特殊性能的器件。

本书是一本全面而又深入地论述半导体缺陷电子学的专著,既可供从事半导体材料、物理、器件及晶体缺陷研究的科技人员参考,也可作高等院校师生及研究生的参考书。

Herbert F. Mataré

DEFECT ELECTRONICS IN SEMICONDUCTORS

Wiley-Interscience, 1971

半导体缺陷电子学

H. F. 马特瑞 著

高凤升 龚秀英 等 译

梁骏吾 魏策军 等 校

责任编辑 王昌泰

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

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

1987 年 3 月第 一 版 开本: 787×1092 1/32

1987 年 3 月第一次印刷 印张: 22 5/8

印数: 0001—2,100 字数: 518,000

统一书号: 13031·3435

本社书号: 4556·13—3

定价: 5.45 元

译 者 的 话

本书对半导体缺陷这一非常重要的领域作了深入全面的论述，是半导体缺陷电子学方面的一本权威性专著。书中介绍了各种缺陷，并着重对半导体中位错的电学、光学、力学性质及载流子输运性质进行了具体、深入的论述。本书还介绍了位错的控制生长以及缺陷在器件制造中的应用。利用位错和其它缺陷可以改进半导体器件的性能，并能制造某些特殊性能的器件。缺陷的研究对解决半导体研究中的一些疑难问题，以及寻找和制造新性能的器件都有着广阔的前景。所以，本书对我国半导体的研究、生产和教学都有较大的参考价值。

本书的翻译工作得到了王守武教授的关怀，特此致谢。参加本书翻译的还有王占国、赵越，参加校订的还有李锦林、姜佐才同志。由于译者水平有限，翻译中的错误及不当之处在所难免，切望读者批评指正。

译 者

前 言

本书主要论述位错型缺陷的电子学性质。电子学的变革主要应归因于固态器件的超小型化，而如果没有晶体生长方面的显著进展，这是不可能实现的。今天，无位错单晶已经成为基本的材料。

但是，由于器件设计和单块工艺越来越复杂，也出现了许多困难，这些困难都来自晶体的不完整性。

这是因为在器件制作(如扩散)过程中会引进缺陷，使得原来没有缺陷的单晶变得不完整；而且还因为半导体薄膜晶体还不能制备得足够完美，而这种材料却是今天许多工艺中必须采用的原始材料。尽管减小单个器件的尺寸使我们能更好地利用位错之间的好材料，但是制作更高密度的器件和获得更大的产率，无疑是今后发展的恒定方向，因此，即使把单个器件的作用区面积减小到只有 100 微米^2 ，在位错密度为 10^6 位错/厘米^2 的材料上制作这种器件时，平均在每个结面上仍然有一个位错。

在这种情况下，详细了解缺陷(特别是位错)的影响是什么就很重要了。只有这种有缺陷的材料被埋置在重掺杂或者金属化的材料中，那么在没有电场的情况下，我们才可以不考虑这些缺陷。然而，当它们出现在内电场或者是外电场的区域中时，缺陷对于器件的工作状态、性能以及寿命等等，就会起着决定性的作用了。

因此，了解缺陷在各种电场分布情况下和在载流子输运机构中的性质，以及了解它们对器件参数的实际影响就是绝

对必要的了。即令材料不可能达到完美状态，但充分了解缺陷对器件的影响，至少可以帮助我们根据测得的数据来作出恰当的预言，并导出有用的设计资料。这对于固态器件中由辐照引入的损伤和采用离子注入方法制备的器件是特别重要的。

在固态电子学和器件物理中，绝大多数的分析都是从理想化的假设出发的，比如假设晶体结构是完全有序的。由于规则的周期性，晶格、它们的电子能带结构以及杂质-载流子交互作用形式繁多，因此即使不考虑缺陷，单晶固体本身就已经是很复杂的了。

我们在讨论其他一些问题时，例如讨论双极效应以及象 p-n 结这样具有一定几何形状的区域，为了使得数学运算易于求解，通常必须简化边界条件。为此，缺陷的特殊电学效应也常被当成可忽略的。然而，近年来，缺陷(主要是位错)电子学领域已经变得如此重要，以致有必要对处理器件中载流子输运问题的经典方法进行修改和完善。因为有缺陷的固态薄膜是制作器件的基础，并且制作器件的方法又不可避免的要引进缺陷；而且这种缺陷能导致器件退化，因此全面掌握有关缺陷的各种电子学效应的知识是完全必要的。

本书填补了理想结构和缺陷结构方法之间的空白。书中讨论的数据和实验事实现在散见于一大批很广泛的文献之中，包括化学物理学、冶金学、物理学、固态电子学、晶体生长和器件物理学直到红外以及量子电子学等许多特定方面的文献资料。本书根据的资料是作者们十多年来发表的工作以及作者于 1966 到 1967 年间作为访问教授在洛杉矶的加利福尼亚大学工程系所作的讲演，作者试图使这本书适用于固态缺陷方面的研究人员。希望能减少他们查找关于缺陷(主要是位错)的电学效应方面的基本事实和已知的结果的工作；并

且,也打算将这本书用作固态电子学方面的研究生的教材;同时,还打算将本书提供给从事于半导体工业方面的工程师,他们在估价电子材料的参数及其对器件性能的影响的困难任务中,可以把本书作为一本导引性的参考书。

本书从介绍载流子运输的基本事实入手,着重讨论了“不是那么完美的”结构或者说半周期的结构,同时讨论了位错和位错列阵的概况,也涉及了位错的控制生长和它们的行为以及对器件可能的应用。实际上,位错列阵或者晶界已经揭示了位错的绝大多数突出的性质。

随着半导体种类的不同,位错的电子学性质会有很大的变化,这是十分明显的。例如,III-V 族化合物与具有同极性晶格的 Ge 和 Si 中位错的行为就有所不同。尽管如此,由于所有这些效应都是起源于晶格受到扰乱,因此我们还是在同一个总标题下讨论了不同材料中位错的主要效应。

关于位错的电学性质方面的知识的一个重要用途,是了解薄膜在器件中的作用以及更一般地了解无定形材料的电学性质。用金属氧化物半导体制作的场效应器件已经显示出一些惊人的效应,比如迁移率随着栅极电场的增加而增加,这可以追溯到表面态,晶粒薄膜结构,以及在电场作用下晶粒间界势垒的行为。

为了从电子学的意义上估价晶体的质量,本书概述了所有重要的测试方法,并以此结束本书。

作者在工业部门和大学讲演时人们提出的问题和评论,对本书的选材有很大的影响。为了使本书成为一本在某种程度上具有一定独立性的、讲授晶体缺陷的教科书,我们把荷电载流子运输的原理部分作为引言。用这种方式,本书可以对研究生在物理学、固体物理基础或者固态电子学方面进行某些基本训练。作者希望,通过上述安排以及适时的提供本书,

将有助于使本书成为在这方面从事进一步研究的工作者所期望的参考书和将缺陷电子学的研究引入到一个引人入胜的境地的初步研究。缺陷电子学只是固态电子学的许多新兴学科之一,进行这方面的研究一直是很有价值的。

以下感谢从略。

目 录

第一章	引言	1
第二章	荷电载流子的输运原理	6
2.1	波在周期性和近于周期性结构中的传播	6
2.2	布里渊区,布洛赫波函数	14
2.3	周期场中的电子(能带论)	28
2.4	施主和受主	34
2.5	复合	39
2.6	光子、声子和电子	44
2.7	缺陷电子	49
2.8	有效质量	54
2.9	带间跃迁	61
2.10	散射	66
第三章	晶体缺陷的分类	80
第四章	线性延伸和平面延伸的不完整性——位错	95
4.1	刃型位错	97
4.2	系属和小角度晶界	104
4.3	螺型位错	107
4.4	孪生	110
4.5	位错平面	116
第五章	位错的连续性理论	121
第六章	辐照损伤与位错	127
第七章	位错平面的主要力学性质	147
7.1	应力场和应变能	147

7.2	晶粒间界能及稳定性	155
第八章	半导体中位错的基本电学性质	165
8.1	孪晶界的电学特性	168
8.2	螺型位错	176
8.3	刃型位错	179
8.4	小角度系属和晶粒间界	185
8.5	关于主晶格的差别	191
第九章	荷电载流子输运的各向异性	196
9.1	刃型位错管道	196
9.2	由位错引起的散射作用(统计分布)	207
9.3	刃型位错及其产生的空间电荷	221
9.4	位错中心的电子占有率	240
9.5	位错和非辐射复合	253
9.6	位错和辐射复合	267
9.7	电噪声和位错	276
第十章	位错间界的电学性质	285
10.1	系属间界	285
第十一章	小角度和中角度晶粒间界	295
11.1	薄片电导	295
11.2	晶粒间界势垒	317
11.3	霍尔效应数据	345
11.4	磁阻效应	352
11.5	输运的各向异性	366
11.6	场效应	380
11.7	光电效应	390
第十二章	位错的控制生长	407
12.1	范性形变	407
12.2	双籽晶技术	409

12.3	双晶的生长和完整性	423
12.4	晶粒间界扩散和杂质分布	434
第十三章	器件应用	448
13.1	光电方面(测微术)的应用	448
13.2	光电频率转换器	455
13.3	位错场效应晶体管	468
13.4	应力-应变传感器	477
第十四章	位错与半导体器件的电学性质	485
14.1	结型器件中位错概述	486
14.2	位错与半导体激光器的退化	504
14.3	体器件中的位错	508
14.4	在同质和异质外延中产生的位错	515
第十五章	无定形半导体中的位错和沟道导电	561
第十六章	结论	593
附录	半导体晶体和薄膜的电学性质的测量	596
	符号	675
	参考文献	686

第一章 引言

自从开始加强对用于电子器件的半导体晶体的研究以来，人们对晶体中位错的了解已取得了很大的进展。位错的力学模型及其对整个晶体点阵的影响，也一直是解释电输运性质显著变化的基础。这主要是指半导体晶体。至于金属，也作了类似处理，但是很明显，由于半导体具有能隙以及需要对具体的载流子输运现象作出解释，因此在研究所有有关的现象方面，半导体是特别有用的。

位错的力学理论作为冶金学的一门分支学科大步向前发展的同时，位错的电学和电子学性质的研究也已发展成为固态电子学的一个新的领域。

在论述位错的力学性质的时候，产生了“恰当地描述”的问题。作为宏观理论的位错连续性理论，看来总是没法做到对必要的细节的了解，因为我们在固态电子学中涉及到的问题，大都不是关于结晶固态的力学状态总变化的问题，而是非常局域态的问题，以及它们对载流子电输运的影响方面的问题。此外，晶体弹性的连续性理论是在形变物体(受表面力和体力的作用)的平衡条件的基础之上建立起来的。但是，总是假定应力和应变张量之间的关系是线性的(胡克定律)。在这一点上，该理论是立足在微小变化的可逆性质之上的，但位错却是永久性的变化。尽管如此，一旦由于内建位错引起的晶体总变化被视为变化的起点时，为了用弹性理论来描述物体，在胡克定律的范围内使用一小的弹性变化，就可以有效地应用连续性理论。这样，我们就可以收集有价值的资料，但是还

缺少计算的不可逆形变所引起的态变化的剩余应力同范性理论的理想的结合。从研究材料性质的角度来看，这样的弹范性理论似乎是非常合乎需要的，但它主要是用来确定宏观的力学变化。在加工硬化和冷加工等这样一些力学问题中，结构变化的总和是重要的。只要晶格取向本身是不重要的，那么在单晶和多晶之间就不存在原则的差别。

近来，点缺陷和无序对晶体性质的影响，在晶体动力学领域的总范围内已受到了注意。因为 Mössbauer 技术使我们能直接以无反冲分量或二次多卜勒相移把杂质作为共振核加以研究，因此有可能研究其动力学性质。A. A. Maradurin¹⁾ 对这一工作作出了重要的贡献，并给出了极好的描述。

然而，研究这种效应所需要的杂质浓度在 10^{18} 厘米⁻³ 或更高的范围，而这一浓度对我们研究象位错这样的永久性缺陷来说是太高了。晶格动力学方法基本上是估计整个晶体的势能和振动的一种方法，因此是一种连续性理论的方法。

就半导体晶体的电子学性质而论，基本的差别是由所考虑的晶体材料的微观层引起的。特别是在超微型化、薄膜物理和工艺中，重要的是 20 个晶格常数范围的一个薄层。即令只是因为需要在确定的晶体区域内的电子学性质能够重复，多晶体也是完全不行的。因此，每当提到和使用连续性理论时，我们都是这样做的，以便使用某些已确定的规则，在形成位错的稳定情况的近距离内计算其力学结果。

研究位错电学性质的首要任务，是根据它们的形态和对晶格的作用的有关基本事实来推导出电学性质。因此，第一个任务就是以亚宏观的方法来描述位错的产生，而为进一步微观地完善它留下余地。

1) 例如，见 F. Seitz and D. Turnbull(eds) “固态物理学” Vol. 18, pp. 273 ff.

为了使本书的各部分资料具有连贯性，第二章扼要地描述了固体(主要是半导体)中载流子运输的某些基本事实，并介绍给对处理电子运输问题的主要工具不太熟悉的读者。然而，在这样做时，着眼点是放在缺陷上的，这也是为后面讨论特殊情况时使用这些方法作准备。为了给读者一个关于晶体内可能存在的各类缺陷的更详细的图象，我们在第三章定义了不同形式的缺陷及其相互关系。

在第四章，我们挑选了线性的或平面的(它们构成晶面之间的间界并对晶体中载流子的运输具有特殊影响)位错，进行了更仔细的描述。

第五章略述连续性理论及其在处理微观位移或位移列阵的某些宏观结果方面的优点。

在第六章中，我们简短的描述由辐照损伤引起的位错。位错的更详细的力学性质则是第七章的课题。

在第八章中，我们从前面的模型导出位错的电学性质。主要位错的更详细的电子学行为是属于第九章的课题。而以系属间界形式出现的重要的平面位错则在第十章里讨论。这是一种位错结构，它把晶体区分为三个不同的区域，位错平面两边都是单晶。

在第十一章中，我们介绍更稳定的小角度和中角度位错平面。这种间界甚至可以用适当的方法接触，它强烈的影响着载流子的运输。我们详细叙述晶粒间界对电导率、迁移率、寿命和其他重要的材料常数的影响。

第十二章描述位错和位错平面的可控制(它不是偶然的)生长。

作为位错平面控制生长的结果，产生了许多新的器件结构，这在十三章中进行论述。

最后，在第十四章里，我们估价位错对器件电子学性质的

影响。由于同质外延和异质外延层在这方面的的重要性日益增加,对它们给予了特别的考虑。

第十五章最后描述了无序结构的现状,并把这些事实与位错列阵的特性联系起来。

此处所选择的方法,是把自由键和悬挂键列阵作为最重要的晶格错乱而加以强调的。

毫无疑问,悬挂键和杂质环境之间所产生的柯垂尔气团或相互作用是个复杂的问题,它取决于所讨论的晶体的种类。我们借鉴已有的事实试图估价过这个状况。对于解决键变化和相变化的复杂问题,无定形结构是个很有成果的新的研究领域。

不常见的简并的沟道导电具有似乎与位错列阵里的导电相关的特性。

在这个领域里,仍然存在着大量的没有回答的问题,而且人们并没有努力去解决是否存在着多种开关效应,或它们是否全属同一种类的问题。这个领域在不久的将来将会得到发展,我们希望本书将有助于寻求更深入的理解周期结构中的无序对载流子输运的许多影响。

确定晶体电学性质的主要测量方法以附录的形式给出。

从迄今报道过的工作中总结出来的未来的研究课题如下:

1. 用生长掺杂范围很不相同的 Si 和 III-V 族化合物双晶的办法来估价扩散对晶粒间界性质的影响。
2. 在微裂缝可能起次要作用的双晶内测量更深的杂质扩散分布。
3. 研究悬挂键列阵的电学性质对取向的依赖关系。
4. 低温下晶粒间界平面的磁阻。
5. 双晶低温场效应器件的噪声。

6. 晶粒间界面处的光电混合效应。
7. 位错平面结的复合光发射和激光作用。
8. 测量无定形半导体沟道在低温下的电导率(与悬挂键电导类似吗?)
9. 低温下无定形沟道的场效应。
10. 用 InSb 双晶的迴旋共振研究位错空间电荷层内的能带结构。

除此之外,关于热电效应和量子-电子效应的许多研究课题也是值得探索的,在这里就不一一赘述了。

第二章 荷电载流子的输运原理

2.1 波在周期性和近于周期性结构中的传播

从历史发展看，周期性结构的第一个模型是一个弹性力连结的质量为 m 的粒子链。假如在平衡时第 n 个粒子在 x 轴上的坐标为

$$x_n = nd, \quad (2.1)$$

式中 d = 粒子的间距，则第 n 个粒子由于局部位移 Δy_n (y_n 为第 n 个粒子的垂直位移) 所引起的 y_n 的正弦波为

$$\Delta y_n = A \cos 2\pi(\nu t - ax_n), \quad (2.2)$$

$$\Delta y_n = A \cos 2\pi(\nu t - and), \quad (2.3)$$

式中 ν = 频率，

a = 波数，即 $1/\lambda(2\pi \cdot a$ 是波矢量 k , $k \cdot d$ 是波的相角), A = 常数(振幅), t = 时间。

在此，波数可以换写为

$$a' = a \pm \frac{m}{d}, \quad (2.4)$$

式中 m = 整数。这一代换不会引起位移形式的任何变化。

因此，频率 ν 是 a 的周期函数（其周期为 $\frac{1}{d}$ ），而相速度 $v = \nu \times \lambda$ 是函数 $\nu(a)$ 的斜率， $\nu(a)$ 又有形式

$$\nu(a) = B |\sin \pi a d|, \quad (2.5)$$

式中 B = 常数(振幅)。为了避免在波长和运动方向上混淆不清，我们只定义正相速度的区域，这就把 a 值限制在区间