

先进半导体材料 性能与数据手册

[俄] Michael E. Levinshtein

[俄] Sergey L. Rumyantsev 编

[美] Michael S. Shur

杨树人 殷景志 译

62



化学工业出版社

材料科学与工程出版中心

先进半导体材料性能与数据手册

[俄]Michael E. Levinshtein

[俄]Sergey L. Rumyantsev 编

[美]Michael S. Shur

杨树人 殷景志 译

化学工业出版社

材料科学与工程出版中心

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

先进半导体材料性能与数据手册/[俄]莱文斯坦(Levinshtein, M. E.) 等编; 杨树人等译. —北京: 化学工业出版社, 2003. 9
书名原文: Properties of Advanced Semiconductor Materials
ISBN 7-5025-4746-0

I. 先… II. ①莱…②杨… III. 半导体材料-手册 IV. TN304-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 082216 号

Properties of Advanced Semiconductor Materials/by Michael E. Levinshtein, Sergey L. Rumyantsev, Michael S. Shur.

ISBN 0471-35827-4

Copyright©2001 by John Wiley & Sons All Rights Reserved.

本书中文简体翻译版由 John Wiley & Sons 出版公司授权化学工业出版社独家出版发行。

未经出版者许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

北京市版权局著作权合同登记号: 01-2003-3160

先进半导体材料性能与数据手册

[俄] Michael E. Levinshtein, Sergey L. Rumyantsev

[美] Michael S. Shur 编

杨树人 殷景志 译

责任编辑: 丁尚林

文字编辑: 于 岚

责任校对: 郑 捷

封面设计: 潘 峰

*

化学工业出版社 出版发行
材料科学与工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京市彩桥印刷厂印刷

北京市彩桥印刷厂装订

开本 787 毫米×960 毫米 1/16 印张 17 $\frac{1}{4}$ 字数 210 千字

2003 年 9 月第 1 版 2003 年 9 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-4746-0/TN·9

定 价: 35.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

前 言

本书介绍了新出现的一些半导体材料系特性的信息，其范围从宽带隙半导体，如 SiC 和 AlN-GaN-InN-BN 半导体，到 SiGe 化合物和异质结。GaN、SiC 和 SiGe 看上去有所不同，然而它们共有的是近年来对它们特性的大量研究和需要一部内容简明且相当完整的手册来描述它们的最重要的特性。

GaN 基及其相关材料已经证实具有高功率和低噪声微波特性，这些特性优于工艺成熟的 GaAs 特性。但最使人们感兴趣的可能是在 GaN 基器件的光电应用方面。中村（Nakamura）发明了蓝光激光器，潘柯夫（Pankove）发明了高效率的蓝、绿、淡黄、白光发光管，按照他们的设计，固态发光将来可能取代效率不高、可靠性差，从爱迪生（Thomas Alva Edison）时代开始使用的白炽灯。GaN 基技术的其他潜在的应用领域包括农业、医药、生物、显示、雷达、国防和其他未知的领域。第一个商品化的 SiC 电子器件已出现在市场上。阻塞电压达 6.2kV 的高压 4H-SiC 整流二极管和击穿电压为 3.1kV 的硅可控整流器已经成功地被制作出来。SiGe 异质结双极晶体管在低功率、超高速和无线通信技术中已显示出优势。

我们希望此手册能帮助那些为了实现这些材料的巨大潜力而努力工作的研究人员和工程师。

本书中讨论的半导体材料的技术和特性仍在发展中，这可从材料参数实验数据的不断变化和复杂性中观察到。有时不同作者测得的材料参数值的误差超过了规定的测量精度，在这种情况下，我们选择了认为更可靠的值。除了图外，我们也试图提供一些内插公式

法来使信息定量化。总之，我们试图给从事材料和相关器件工作的研究人员或工程师提供一本有用的手册。

M. S. Shur (John Wiley & Sons, New York, 1996) 所著的《电子器件导论》对半导体材料的基本特性进行了讨论，书中包含了总结基本半导体方程的图表和基本半导体参数的定义。更详细的讨论可在 Karl Boer (Van Nostrand, New York, 1990) 编写的《半导体物理概论》一套两卷中找到。

一般情况下，张量参数（例如压电常数或弹性模量）可以用不同（但相关）的形式来表示，R. E. Newnham 编写的《结构-特性关系》(Springer-Verlag, New York, 1975) 一书能够帮助读者从本手册给出的参数形式转变成任何其他形式。

在附加参考文献中列出了处理本书讨论的化合物特性的重要参考文献，我们希望它对想要了解详细信息的读者能有所帮助。同时也表明了严格选择参数的简明手册可能会有助于迅速查找到所需信息，这也正是本手册所要达到的目的。

我们感谢本书的撰稿人，V. Bougrov 博士，Yu. A. Goldberg 和 A. Zubrilov (The Ioffe Institute, St. Petersburg, Russia)，G. L. Harris, A. D. Jackson, S. N. Mohammad, 和 M. G. Spencer (Howard University, Washington, D. C.) 和 F. Schäffler (Johannes Kepler University, Linz, Austria)，并感谢在 A. F. Ioffe Institute 和 Rensselaer Polytechnic Institute 的同事，Leo Showalter 教授，Glenn Slack, A. Andreev 博士，A. Bykhovski, Pavel Ivanov, Sergey Karpov, W. V. Lundin, Anatoly Strel'chuk，他们帮助我们查询信息，提出许多很好的建议，并在某种程度上，提供给我们更精确的材料参数值。如果任何荣誉归属我们，他们应该分享这份荣誉。但可能有的错误的责任只应由我们来承担。

在此，我们也十分欢迎读者对本书提出意见或建议，这些意见和建议可发信给 M. E. Levinshtein 和 S. Romyantsev (melev@nimis.ioffe.rssi.ru) 或 M. S. Shur (shurm@rpi.edu)。

Michael E. Levinshtein

Sergey L. Romyantsev

Michael S. Shur

St. Petersburg, Russia

Troy, New York

September 2000

译者前言

本书涉及的 GaN 等六种半导体材料是当前半导体材料领域研究的热点，因此，称它们为先进半导体材料，对它们开展深入研究具有重大科学意义和应用价值。以 GaN 为首的氮化物和碳化硅作为宽带半导体材料可用来制作短波长发光器件和高温下工作的电子器件。有人把它们与 Si 和 GaAs 相比，分别称 Si 为第一代，GaAs 为第二代半导体材料，而把它们称为第三代半导体材料，可见其重要性。当前利用 GaN 基材料制作近紫外、蓝色、绿色发光二极管已经产业化，制作的激光器也达到实用化水平。特别应指出它们还是“半导体照明工程”的首选材料，如果这一工程得以实现，将引起人类生活发生重大变革。

Si 和 Ge 都是间接带隙元素半导体，利用它们很难制作出高效率的发光器件，但它们的合金 SiGe 却有可能实现光学直接跃迁。尽管由 SiGe 合金熔体很难拉制出组成均匀的单晶，然而随着“能带工程”的发展，可以用 Si 单晶片作为衬底，用外延的方法生长应变的或弛豫的 SiGe/Si 材料。这种 Si 基半导体材料是非常重要的微电子集成电路和光电子集成电路材料，在 SiGe 上做良好的发光器件，利用成熟的硅集成技术在衬底上制作集成电路，两者结合起来形成光电集成电路。虽然现在还没有实现这一目标，但已经取得相当大的进展，利用这种材料制作的 HBT 已经应用到无线通信系统中。

到目前为止，对这些材料的基本特性已经做了很多研究，发表了大量的论文。为了今后更好更深入地开展这方面的研究工作，应

将以前的工作加以总结，把重要数据、图表、公式筛选出来编辑成一本手册，供研究人员参考，以节省他们到浩瀚的文献中查找所需资料的时间，这是本书作者的意愿。过去，在我国也有很多人从事这方面的研究工作，相信今后随着这些材料的发展和对它们认识的加深会有更多的人想了解它们、研究它们。为此我们在化学工业出版社的支持下翻译了本书，供读者参考。

本书是多个撰稿人合作的成果，书中的内容是他们从大量文献中选取的，因此在写作风格、量纲使用的一致性等方面存在着不足。此外，英文不是大多数撰稿人的母语，这给翻译也带来一些困难，有时不得不查阅原始文献。翻译中为尊重原文没有进行改动，有明显差异处用译者注标明。

在译文整理过程中得到吉林大学电子科学与工程学院的仲莉同学的大力帮助，在此对她表示感谢。

由于译者水平有限，对原文理解不深，译文中不足之处在所难免，敬请批评指正。

译者

2003年6月于长春

撰 稿 人

- V. Boutgrov**, The Ioffe Institute, Russian Academy of Sciences. St. Petersburg, Russia
- Yu. Goldberg**, The Ioffe Institute, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia
- G. L. Harris**, Howard University, Washington, D. C.
- A. D. Jackson**, Howard University, Washington, D. C.
- M. Levinshtein**, The Ioffe Institute, Russian Academy of Sciences. St. Petersburg, Russia
- S. N. Mohammad**, Howard University, Washington, D. C.
- S. Rumyantsev**, The Ioffe Institute, Russian Academy of Sciences. St. Petersburg, Russia
- F. Schäffler**, Johannes Kepler University, Linz, Austria
- M. Shur**, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, New York
- M. G. Spencer**, Howard University, Washington, D. C.
- A. Zubrilov**, The Ioffe Institute, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

内 容 提 要

本书内容是由多名撰稿人从大量文献资料中选取编写而成。重点汇集了 GaN、AlN、InN、BN、SiC、SiGe 种先进半导体材料的性能与数据，包括光学、电学、热学、晶体学及其他特性等，是一本内容新、数据全面的参考工具书。

本手册可供从事半导体材料的研究与器件开发的技术人员、管理人员、销售人员及相关专业的师生查阅和参考。

目 录

第 1 章 氮化镓 (GaN)	1
1.1 300K 时的基本参数	1
1.2 能带结构和载流子浓度	3
1.2.1 能带结构与温度的关系	4
1.2.2 能带与静水压力的关系	7
1.2.3 异质界面能带的不连续	8
1.2.4 有效质量	8
1.2.5 施主和受主	9
1.3 电特性	11
1.3.1 迁移率和 Hall 效应	11
1.3.2 在 AlGaN/GaN 界面二维电子气的迁移率	16
1.3.3 高电场中的输运性质	18
1.3.4 碰撞电离	21
1.3.5 复合参数	22
1.4 光学特性	23
1.5 热特性	30
1.6 力学性质, 弹性常数, 晶格振动, 其他特性	33
参考文献	38
第 2 章 氮化铝 (AlN)	42
2.1 300K 时的基本参数	42
2.2 能带结构和载流子浓度	44
2.2.1 能带结构与温度的关系	45

2.2.2	能带与静水压力的关系	46
2.2.3	异质界面能带的不连续	46
2.2.4	有效质量	47
2.2.5	施主和受主	47
2.3	电特性	49
2.3.1	迁移率和 Hall 效应	49
2.3.2	复合参数	51
2.4	光学特性	52
2.5	热特性	55
2.6	力学性质, 弹性常数, 晶格振动, 其他特性	59
	参考文献	62

第3章 氮化铟 (InN)

3.1	300K 时的基本参数	66
3.2	能带结构和载流子浓度	68
3.2.1	能带结构与温度的关系	68
3.2.2	能带与静水压力的关系	71
3.2.3	异质界面能带的不连续	71
3.2.4	有效质量	72
3.2.5	施主和受主	73
3.3	电特性	73
3.3.1	迁移率和 Hall 效应	73
3.3.2	高电场中的输运性质	77
3.3.3	碰撞电离	79
3.3.4	复合参数	79
3.4	光学特性	80
3.5	热特性	85
3.6	力学性质, 弹性常数, 晶格振动, 其他特性	87
	参考文献	90

第 4 章 氮化硼 (BN)	93
4.1 300K 时的基本参数	94
4.2 能带结构和载流子浓度	96
4.2.1 能带与静水压力的关系	100
4.2.2 有效质量	100
4.2.3 施主和受主	102
4.3 电特性	103
4.4 光学特性	103
4.5 热特性	110
4.6 力学性质, 弹性常数, 晶格振动, 其他特性	119
参考文献	125
 第 5 章 碳化硅 (SiC)	 129
5.1 300K 时的基本参数	129
5.2 能带结构和载流子浓度	132
5.2.1 能带结构与温度的关系	134
5.2.2 能带与静水压力的关系	137
5.2.3 高掺杂浓度时能隙窄化	138
5.2.4 有效质量	141
5.2.5 施主和受主	142
5.3 电特性	146
5.3.1 迁移率和 Hall 效应	146
5.3.2 高电场中的输运性质	153
5.3.3 碰撞电离	158
5.3.4 复合参数	165
5.4 光学特性	169
5.5 热特性	188
5.6 力学性质, 弹性常数, 晶格振动, 其他特性	198
参考文献	204

第 6 章 锗化硅 ($\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$)	211
6.1 300K 时无应力体材料的基本参数	213
6.2 能带结构和载流子浓度	216
6.2.1 能带结构与温度的关系	219
6.2.2 带隙与静水压力的关系	222
6.2.3 应变引起的带偏移	222
6.2.4 有效质量	228
6.3 电特性	233
6.3.1 迁移率和 Hall 效应	233
6.3.2 二维电子气	234
6.3.3 二维空穴气	237
6.4 光学特性	239
6.5 热特性	244
6.6 力学性质, 弹性常数, 晶格振动, 其他特性	249
参考文献	257
 附录 1 基本物理常数	 261
附录 2 元素周期表	262
附录 3 六方晶体的直角坐标	263
附录 4 纤锌矿晶体的第一布里渊区	264
附录 5 闪锌矿结构	265
附录 6 闪锌矿晶体的第一布里渊区	266
附加参考文献	267

第 1 章 氮化镓 (GaN)

V. Bougrov, M. Levinshtein, S. Rumyantsev, A. Zubrilov

The Ioffe Institute, St. Petersburg, Russia

1.1 300K 时的基本参数

项 目	纤锌矿结构	闪锌矿结构
对称群	$C_{6v}^4 P6_3 mc$	$T_d^2 - F\bar{4}3m$
1cm ³ 中的原子数	8.9×10^{22}	8.9×10^{22}
德拜温度/K	600	600
密度/(g · cm ⁻³)	6.15	6.15
静态的介电常数	8.9	9.7
高频的介电常数	5.35	5.3
有效电子质量(m_0 为单位)	0.20	0.13
有效空穴质量(m_0 为单位)		
重空穴	1.4	1.3
轻空穴	0.3	0.2
能带劈裂	0.6	0.3
电子亲和势/eV	4.1	4.1
晶格常数/nm	$a=0.3189$ $c=0.5186$	0.452
光学光子能量/meV	91.2	87.3

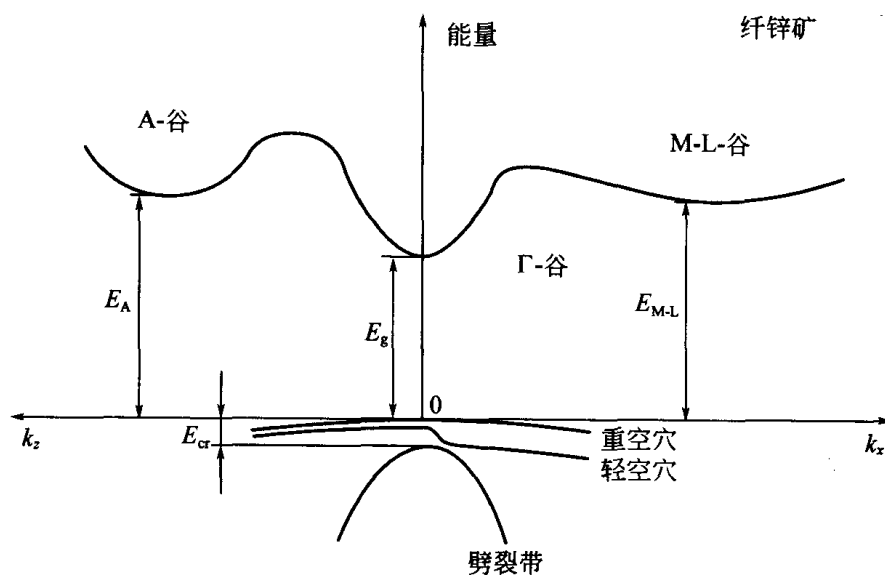
续表

项 目	纤锌矿结构	闪锌矿结构
能带结构和载流子浓度		
带隙/eV	3.39	3.2
导带		
Γ 谷和 M-L 谷的能量间距/eV	1.1~1.9	
M-L 谷的简并度	6	
Γ 谷和 A 谷的能量间距/eV	1.3~2.1	
A 谷的简并度	1	
Γ 谷和 X 谷的能量间距/eV		1.4
Γ 谷和 L 谷的能量间距/eV		1.6~1.9
导带有效态密度/cm ⁻³	2.3×10^{18}	1.2×10^{18}
价带		
自旋-轨道劈裂能 E_{so} /eV	0.008	0.02
晶体-场劈裂能 E_{cr} /eV	0.04	
价带有效态密度/cm ⁻³	4.6×10^{19}	4.1×10^{19}
电特性		
击穿电场/(V · cm ⁻¹)	$\sim 5 \times 10^6$	$\sim 5 \times 10^6$
电子迁移率/(cm ² · V ⁻¹ · s ⁻¹)	≤ 1000	≤ 1000
空穴迁移率/(cm ² · V ⁻¹ · s ⁻¹)	≤ 200	≤ 350
电子扩散系数/(cm ² · s ⁻¹)	25	25
空穴扩散系数/(cm ² · s ⁻¹)	5	9
电子热速度/(m · s ⁻¹)	2.6×10^5	3.2×10^5
空穴热速度/(m · s ⁻¹)	9.4×10^4	9.5×10^4
光学特性		
红外折射率		2.3
辐射复合系数/(cm ³ · s ⁻¹)		10^{-8}
热和力学特性		
体积模量/Pa		20.4×10^{10}

续表

项 目	纤锌矿结构	闪锌矿结构
熔点/℃	2500(参看图 1.5.5)	
比热容/(J · g ⁻¹ · °C ⁻¹)	0.49	
热导率/(W · cm ⁻¹ · °C ⁻¹)	1.3	
热扩散系数/(cm ² · s ⁻¹)	0.43	
线性热膨胀系数/°C ⁻¹	$\alpha_a = 5.59 \times 10^{-6}$	
	$\alpha_c = 3.17 \times 10^{-6}$	

1.2 能带结构和载流子浓度



300K

$$E_g = 3.39\text{eV} \quad E_{M-L} = 4.5 \sim 5.3\text{eV} \quad E_A = 4.7 \sim 5.5\text{eV}$$

$$E_{so} = 0.008\text{eV} \quad E_{cr} = 0.04\text{eV}$$

图 1.2.1 纤锌矿 GaN 的能带结构, 导带最小和价带最大。价带有三个劈裂的能带, 它来自于自旋轨道的相互作用和晶体的对称性 [细节参看 Suzuki 和 Uenoyama (1995)]