

国家科普知识重点图书

高新技术科普丛书

半导体 光电子技术

余金中
编著

半导体所

社



国家科普知识重点图书

高新技术科普丛书

半导体光电电子技术

余金中 编著

化学工业出版社

· 北 京 ·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

半导体光电子技术/余金中编著. —北京: 化学工业出版社, 2003. 4

(高新技术科普丛书)

ISBN 7-5025-4323-6

I. 半… II. 余… III. 半导体技术: 光电子技术-普及读物 IV. TN301-49

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 013770 号

高新技术科普丛书

半导体光电子技术

余金中 编著

总策划: 陈逢阳 周伟斌

特邀策划: 赵 萱

责任编辑: 刘 哲 周国庆

责任校对: 李 林

封面设计: 于 兵

*

化学工业出版社出版发行

(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

北京云浩印刷有限责任公司印刷

三河市东柳装订厂装订

开本 850 毫米×1168 毫米 1/32 印张 8 $\frac{1}{4}$ 字数 229 千字

2003 年 4 月第 1 版 2003 年 4 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-4323-6/TN·8

定 价: 20.00 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

《高新技术科普丛书》编委会

主任

路甬祥 中国科学院院长，中国科学院院士，
中国工程院院士

委员

汪家鼎 清华大学教授，中国科学院院士
闵恩泽 中国石油化工集团公司石油化工科学研究院教授，
中国科学院院士，中国工程院院士
袁 权 中国科学院大连化学物理研究所研究员，中国科学院院士
朱清时 中国科学技术大学教授，中国科学院院士
孙优贤 浙江大学教授，中国工程院院士
张立德 中国科学院固体物理研究所研究员
徐静安 上海化工研究院（教授级）高级工程师
冯孝庭 西南化工研究设计院（教授级）高级工程师

序

数万年来，人类一直在了解、开发、利用我们周围的自然界，同时不断地认识着自身，科学技术也从一开始就随着人类的生存需求而产生和发展着。人类发展史充分验证了邓小平“科学技术是第一生产力”的论断。科学技术的发展，促进了人类文明和社会的发展。

21 世纪是信息时代，21 世纪是生命科技的世纪，21 世纪是新材料和先进制造技术迅速发展和广泛应用的年代，21 世纪是高效、洁净和安全利用新能源的年代，21 世纪是人类向空间、海洋、地球内部不断拓展的世纪，21 世纪是自然科学发生重大变革、取得突破性进展的年代。科学技术的发展、新技术的不断涌现，必将引起新的产业革命，对我国这样的发展中国家来说，既是挑战，也是机遇，而能否抓住发展机遇，关键在于提高全民族的科学文化水平，造就一支具有科学精神、懂得科学方法、具有知识创新和技术创新能力的高素质劳动者队伍。所以，发展教育和普及科学知识、弘扬科学精神、提倡科学方法是我们应对世纪挑战的首要策略。为此，1999 年 8 月，江总书记在视察中国科学院大连化学物理研究所时进一步强调了科普工作的重要性：“在加强科技进步和创新的同时，我们应该大力加强全社会的科学普及工作，努力提高全民族的科学文化素质。这项工作做好了，就可以为科技进步和创新提供广泛的群众基础。”

为了普及和推广高新技术，化学工业出版社组织几位两院院士和专家编写了《高新技术科普丛书》。本套丛书的特点是：介绍当今科学产业中的一些高新技术原理、特点、重要地位、应用及产业化的现状与发展前景；突出“新”，介绍的新技术、新理论和新方法不仅经实践证明是成熟、可靠的，而且是有应用前景的实用技

术；力求深入浅出，图文并茂，知识性、科学性与通俗性、可读性及趣味性的统一，并充分体现科学思想和科学精神对开拓创新的重要作用。

《高新技术科普丛书》涉及与我国经济和社会可持续发展密切相关的高新技术，第一批9个分册包括绿色化学与化工、基因工程技术、纳米技术、高效环境友好的发电方式——燃料电池、最新分离技术（如超临界流体萃取、吸附分离技术、膜技术）、化学激光、生物农药等。本套丛书以后还将陆续组织出版多种高新技术分册。相信该套科普丛书对宣传普及科技知识、科学方法和科学精神，正确地理解、掌握科学，提高全民族的素质将会起到积极的作用。

浩角祥

2000年9月

前 言

人类先知道光，然后才知道电；科学先研究光，然后才研究电；然而，近代先发现电子，然后才发现光子；理论是先有电子学，然后才有光子学；集成是先有电子集成，然后才有光电子集成。这些一“先”一“后”说明的是一个道理：“光”先于“电”被人们所认识，但“电”的发展与应用都先于“光”。光电子技术是建立在电子技术基础上的高新技术，同时，光电子技术又是电子技术的延伸与发展，它的起点更高，技术更复杂，作用也更大。

广义而言，光电子技术内容很丰富，既包罗了固体、气体、液体等各类激光器、探测器，又包罗各种电与光的产生、转换、传输、检测和应用，因此，更全面地介绍光电子技术是一件很难的课题。我们将本书的内容锁定在半导体光电子技术的范围，重点介绍半导体光电材料、器件和应用，使读者对这一充满活力的高技术有一个全面的了解。

在固体材料中，半导体是一类很特殊的材料，有许多独到的特性，利用它们的光电性质可以实现许多光电功能，从而成为光电家族中器件种类最多、功能特性最齐全、应用面最广的一族。了解了半导体光电子技术，有助于全面了解光电子技术及其重要作用。

可以毫不夸张地说，半导体光电子技术已经无处不在、无人不用了。打电话，也许是通过光纤通信系统传过去的，它的光发射与探测都是半导体光电子器件；看电视，你手里拿的遥控器、电视中的许多部件也都是半导体光电子产品；天上飞的飞机、卫星，地面上跑的火车、汽车，地铁的电车和江河海上的轮船，都用上了半导体光电的信号控制和信息的传输；现代武器的引信、核聚变的控制、卫星火箭的发射与回收、激光医疗等也都有半导体光电子技术的身影。因此有必要了解这一技术、应用这一技术。本书就是专门

为此而写作的。

本书共 11 章，可分为四大部分：第一部分即第 1 章，介绍半导体光电子技术的由来和发展史，并概略地描述这一技术的应用和发展趋势；第二部分为基础知识，包括第 2、3 章，重点介绍半导体光电材料和器件工作原理，为以后各章的阅读提供铺垫；第三部分为半导体光电器件、光电集成以及制造技术，包括第 4 章到第 9 章，这是本书的核心，重点介绍半导体激光器、探测器、光波导器件、光电子集成以及外延生长、微细加工等制造技术，同时也介绍了 CCD、太阳能电池等器件，这一部分的六章内容为我们了解半导体光电子技术提供了一个大的展示厅，将它们的结构、原理、特性一一陈列出来，会对读者全面了解半导体光电子技术有所帮助；第四部分为半导体光电子技术的应用，介绍了光纤通信、光盘存储、光纤传感等许多用途，为我们了解半导体光电子技术的巨大作用提供了一个窗口。

作为高技术的一本科普读物，它应当具有知识性、科学性、通俗性、趣味性、可读性，既要正确介绍有关高技术知识，又要让非专业人士看得懂；既要普及深奥的原理和复杂的结构，又要让读者有兴趣读下去，这便是科普读物的基本要求，也是笔者所追求的目标。然而把深奥的东西讲明白本身也是一门学问，虽然尽力了，但仍有一些难懂之处。建议读者阅读第二、三部分时耐心一点，通读完了之后会有所收获的。对于从事半导体光电子技术研究和开发的同行来说，本书也应该是有益的，笔者系统地介绍半导体光电子和一些应用，也许有助于他们全方位地了解这一高技术。

笔者从事光电子技术研究 38 年，还在研究生院兼职讲授《半导体量子器件物理》多年，本书是在此基础上写成的。在写作过程中，王启明院士给予了热情的鼓励和切实的帮助，中科院半导体研究所段维新处长给予了大力的支持，我的同事王莉、王良臣、郑义霞和学生严清峰、夏金松、王小龙、刘敬伟、樊中朝、李艳萍、王章涛、杨笛和陈媛媛等在审稿、文字输入和图片整理等方面给予了许多帮助，中科院高技术局信息处的赵萱女士给予了许多鼓励和协

助。特别值得一提的是我的夫人王杏华为本书付出了许多心血，她反复同我一起讨论提纲、审改书稿、精心校对。对于上述各位的鼓励、支持和帮助，笔者一并感谢。

由于写作时间仓促，加之科普介绍半导体光电子技术难度很大，本人又缺乏科普写作的经验，错误和遗漏在所难免，恳请读者批评指正。

余金中

2003 年 2 月 18 日

内 容 提 要

本书是“高新技术科普丛书”之一。作为信息领域的核心技术，半导体光电子技术在光通信、光盘存储、光纤传感、激光加工以及医疗、军事等方面有着重要的应用，它的发展将直接影响世界经济的进展和人类生活水平的提高。

全书共 11 章，第 1 章介绍半导体光电子技术的由来和发展趋势；第 2、3 章重点介绍半导体光电子材料和器件工作原理；第 4 到第 9 章介绍半导体激光器、探测器、光波导器件、光电子集成的结构和特性以及外延生长、微细加工等制造技术，同时介绍了 CCD、太阳能电池等器件；最后两章介绍半导体光电子技术的应用。

本书适合从事高技术和信息产业的研究人员、技术人员、生产人员、管理人员阅读，也可供大专院校师生阅读参考。

目 录

第1章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 半导体光电子技术的发展史	3
1.3 信息时代的支柱——光电子技术	6
1.4 半导体光电子技术的应用	9
1.5 半导体光电子技术的发展趋势	14
参考文献	17
第2章 半导体光电材料	18
2.1 光波和光子	18
2.1.1 光的波动性——光波	19
2.1.2 光的粒子性——光子	20
2.2 半导体光电子材料	21
2.3 异质结构	24
2.4 异质结的能带结构	27
2.5 半导体材料的折射率	30
2.6 异质结的特性	33
参考文献	36
第3章 半导体光电子技术基础	37
3.1 激光器的三大要素	37
3.2 半导体中的光发射	38
3.2.1 辐射复合和非辐射复合	38
3.2.2 自发辐射和受激辐射	41
3.3 半导体中的光吸收	43
3.3.1 本征光吸收	43
3.3.2 自由载流子光吸收	45
3.4 阈值条件	45
3.5 介质波导	48

3.5.1 平板介质波导	48
3.5.2 条形波导	51
3.5.3 波导模式	52
参考文献	53
第4章 半导体发光二极管	54
4.1 发光二极管的分类	54
4.2 发光二极管的材料	57
4.3 发光二极管的基本结构	59
4.4 超辐射发光二极管	62
4.5 发光二极管的基本特征	67
4.6 超辐射发光二极管的器件特性	68
4.7 发光二极管组件	72
参考文献	74
第5章 半导体激光器	76
5.1 半导体激光器的分类	76
5.2 激光二极管的基本结构	81
5.2.1 双异质结 (DH) 激光器	81
5.2.2 大光腔 (LOC) 激光器和分离限制异质结 (SCH) 激光器	83
5.2.3 半导体激光器的条形结构	85
5.3 分布反馈 (DFB) 激光器、分布布拉格反射 (DBR) 激光 器和垂直腔面发射激光器 (VCSEL)	88
5.3.1 DFB 激光器和 DBR 激光器	88
5.3.2 垂直腔面发射激光器 (VCSEL)	90
5.4 量子阱激光器	93
5.5 可见光激光器和大功率激光器	97
5.6 半导体激光二极管的特性	99
参考文献	104
第6章 光电探测器、光电池和 CCD	106
6.1 光电探测器的分类	106
6.2 光电探测器的工作原理	107
6.3 光电探测器的结构	112
6.3.1 PIN 光电二极管结构	113

6.3.2	雪崩光电二极管	115
6.3.3	MSM 光电探测器	117
6.4	探测器的性能	119
6.5	光电池	124
6.5.1	光电池的分类	125
6.5.2	光电池的结构和特性	125
6.5.3	光电池的应用	126
6.6	CCD 摄像器件	126
6.6.1	CCD 分类和结构	127
6.6.2	CCD 特性	129
6.6.3	CCD 的应用	130
	参考文献	132
第 7 章	半导体光波导器件	133
7.1	光波导	133
7.1.1	光波导材料	133
7.1.2	平面光波导	135
7.1.3	脊形光波导	137
7.2	硅基光波导	138
7.2.1	SOI 的材料制备	139
7.2.2	SOI 光波导	140
7.3	光波导耦合器	141
7.4	光开关	143
7.4.1	光开关的种类	144
7.4.2	光开关的结构和特性	144
7.4.3	光开关阵列	147
7.5	AWG 波分复用/解复用器	148
7.6	OXC (光交叉) 互连结构	152
	参考文献	155
第 8 章	半导体光电子集成	157
8.1	OEIC	158
8.2	半导体激光器阵列	160
8.2.1	锁相激光器阵列	160
8.2.2	增益导引阵列和折射率导引阵列	162

8.2.3	强耦合的激光器阵列	164
8.2.4	多波长激光器阵列	167
8.2.5	VCSEL 阵列	168
8.3	光电探测器阵列	171
8.4	激光器同电子器件、光电子器件的集成	171
8.5	光电子集成的发展与未来	176
	参考文献	179
第 9 章	半导体光电子器件的制造技术	181
9.1	半导体光电子器件的制造工艺流程	182
9.2	外延生长技术	185
9.2.1	MBE (分子束外延)	188
9.2.2	MOCVD	191
9.2.3	HUV/CVD	193
9.3	微细加工技术	195
9.4	干法刻蚀技术	199
9.4.1	干法刻蚀	199
9.4.2	ICP 等离子体刻蚀	201
9.5	光纤耦合技术	203
	参考文献	206
第 10 章	光纤通信	207
10.1	光学领域的三大发明	207
10.2	光纤通信的发展史和概况	209
10.3	光纤和光缆	215
10.3.1	光纤结构和分类	215
10.3.2	光纤的特性	216
10.4	光纤通信系统	222
10.4.1	信息的调制	222
10.4.2	光学发射机、接收机和中继机	224
10.5	多路复用光通信	230
10.5.1	光时分复用 (OTDM)	230
10.5.2	波分复用 (WDM)	231
10.6	光通信系统和半导体光电子技术	232
	参考文献	234

第 11 章 光盘存储、光纤传感及其他	235
11.1 光盘存储	235
11.1.1 光盘的种类	236
11.1.2 光盘存储原理	238
11.1.3 光盘存储的未来	242
11.2 光纤传感	245
11.2.1 光纤传感器分类	245
11.2.2 光纤陀螺	248
11.2.3 其他光纤传感器	251
11.3 半导体光电子技术的其他应用	257
11.4 半导体光电子技术——高科技竞争的焦点	260
参考文献	262

第 1 章 绪 论

1.1 引言

历史翻开了新一页，人类进入了新时代。

21 世纪是高技术世纪，是信息时代。这个新世纪是以信息科学、生命科学等的飞速进步为标志，以信息工程、材料工程、基因工程等为基础，以信息化、自动化、智能化为目标，构成一个全新的高科技的新时代。

信息时代的特征是：信息量大爆炸、信息传递非常快捷、信息处理十分迅速。其量化的标志为三“T”：

光通信速率 $> 1\text{T}$ 比特/秒 (bits/s)

计算机速度 $> 1\text{T}$ 比特/秒 (bits/s)

光盘存储密度 $> 1\text{T}$ 比特/英寸² (bits/in²)

所谓“T”，是英文“Tera”的缩写，即 10^{12} ，为万亿，一个巨大的天文数目。随着高科技的发展，一根光纤可以在 1 秒的时间内传输 10T 比特的信息，这已在实验室中实现了，用于实际的光路中的高速传输也为期不远。目前的亿次计算机多是并行运转的，就是说，将要计算的课题分解为许多子课题，让不同的计算机并列地运算，然后再综合运算。如果要实行串行计算，就需要将信息的处理速度、传输速度大为提高；现今的处理速度已经相当快了，但处理速度还不够，特别是在互联上存在电子瓶颈，限制了传输速度，因此，非常有必要实现光运算、光互联。信息存储是信息资料保存、处理的重要环节，磁盘存储等方式适于当前的许多计算机，已显落后；半导体存储有了许多进步，但仍显不足；光盘存储已开始显示出其巨大潜力，用“光”作为“写”和“读”的工具，在一张高密度的 3 英寸光盘上，足以将我国最大的中国图书馆的全部图

书资料包容下，这将是多么令人兴奋的事情啊！

要实现光通信、计算机和光盘存储三个信息应用领域的三“T”，必须依赖于 20 世纪为开端、21 世纪将进一步发展的半导体光电子技术。

光电子学是电子学在光波波段的延伸，是 20 世纪 60 年代激光器发明之后，信息科学领域中发展迅速、日新月异的高科技前沿领域。从学科体系和历史沿革上看，光电子学是近代光学和近代电子学的融合，它研究相干光波的产生及其与物质的相互作用。光电子学的发展得益于固体物理学、材料科学、微电子学、计算科学、机械加工技术、近代化学等学科和技术（“光、机、电、计、材”）的发展成就，它的发展又为其他学科提供了支撑，极大地促进了相邻学科的交叉与发展。

光电子技术是由电子技术（与微电子技术）和光学技术结合而成的一门高技术、新技术，是光电子学的工程研究和应用。光电子技术以量子理论为理论基础，以物质的固体、气体、液体、等离子体等形态为对象，以光和电的能量与信息的转换、传播、接收为目标，以光通信、光计算、光存储、光传感、激光医疗、激光武器等等为应用领域，集“光、机、电、计、材”于一身，是一种最先进、最前沿、最实用的高新技术。

自从 1960 年美国梅曼（Thewodore H. Haiman）研制成功第一台红宝石激光器，至今已有 40 多年了。40 多年来，已经采用固体、气体、液体、半导体、等离子体和自由电子等各种形态的物质产生激光，其激励（泵浦）的形成有光泵浦、电注入泵浦（通过半导体 pn 结注入电流）、电子束或离子泵浦、太阳能泵浦、化学能泵浦、核能泵浦等多种方式，最为普遍的是光泵浦和电注入泵浦。在众多的激光器中，半导体激光器独树一帜，具有体积小、效率高、光波覆盖面宽、应用范围广、价格便宜等许多优点。与此同时，半导体光电探测器也获得相应的发展，其性能、应用范围、价格等也同样具有优势，因而半导体激光器、半导体光电探测器连同半导体光波导器件（例如光耦合器、光分路器、光开关、光栅阵列