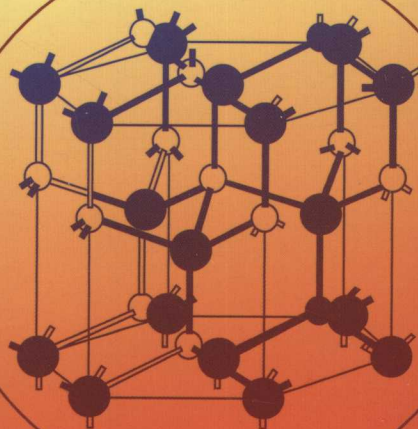
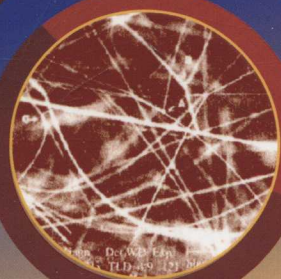


一维纳米 电子技术

One Dimensional Nanoelectronic Technology

..... 彭英才 王英龙 编著



化学工业出版社

一维纳米 电子技术

One Dimensional Nanoelectronic Technology

..... 彭英才 王英龙 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

一维纳米电子技术是纳米科学技术中的重要分支,其在电子、光电子、数据存储、通信、生物、医学、能源、交通与国家安全等领域有重要应用价值,具有很好的发展前景。

本书全面、系统地介绍了各种纳米线的制备方法,纳米线的生长机制,纳米线的形貌特征与可控生长,纳米线的电子性质,以及纳米线场效应器件、纳米线场发射器件、纳米线传感器器件、纳米线发光器件、纳米线光伏器件、纳米线太阳电池等最新应用技术、现状及其研究进展。

本书可供从事纳米科学技术领域研究与开发的科技工作者,以及纳米半导体技术、纳米光电子技术和光伏器件制作的科技工作者和技术人员参考,同时可作为高等学校相关专业教师、研究生和本科生的教学参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

一维纳米电子技术/彭英才,王英龙编著. —北京:

化学工业出版社, 2015.9

ISBN 978-7-122-24845-9

I. ①一… II. ①彭…②王… III. ①纳米材料-电子材料-研究 IV. ①TN04

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 180100 号

责任编辑: 朱 彤
责任校对: 宋 玮

文字编辑: 杨欣欣
装帧设计: 刘丽华

出版发行: 化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 刷: 北京永鑫印刷有限责任公司

装 订: 三河市宇新装订厂

710mm×1000mm 1/16 印张12 $\frac{3}{4}$ 字数222千字 2016年1月北京第1版第1次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价: 68.00 元

版权所有 违者必究

发端于 20 世纪末的纳米科学技术，历经 20 年的蓬勃发展，已经取得了令世人瞩目的成就。如同 20 世纪 60 年代崛起的信息科学技术一样，纳米科学与技术不仅有力地促进了当代科学技术的迅速发展，而且正在深刻地改变着人们的社会生活面貌。毫无疑问，随着时间的不断推移，它对科技进步和社会变革所产生的深远影响将会进一步凸显出来。

我们知道，当材料体系的尺寸进入纳米量级以后，会呈现出许多相异于体材料的新颖电学、光学、化学、力学与磁学性质，这使得它们在电子、光电子、数据存储、通信、生物、医学、能源、交通与国家安全等领域具有潜在的重要价值。发展纳米科学技术的目的，就是通过对纳米尺度物质的操纵，获得具有各类物理与化学功能的材料、器件、装置与系统，并使其造福于人类。

纳米电子学或纳米电子技术是纳米科学技术的一个重要侧面，旨在研究各类纳米结构与材料的制备方法、物理与化学性质及其在各种纳米器件中的应用。这些器件主要包括以单电子器件、量子点器件、单光子器件等为主的低维量子器件。而一维纳米电子技术则是研究各类一维纳米材料与结构，如纳米线、纳米棒、纳米带、纳米管的制备生长及其在纳米电子器件与纳米光电子器件中应用。这些器件主要包括：纳米线场效应器件、纳米线场发射器件、纳米线传感器件、纳米线发光器件以及纳米线光伏器件等。

我国的纳米科学技术是与国际同步发展起来的。我国政府与科技界，从一开始就充分认识到发展纳米科学技术的重要

要性，相继启动了多项与纳米技术相关的重大研究计划，并取得了具有国际领先水平的原创性成果。但是，由于整体实力还较弱，因此在纳米电子技术研究方面与世界先进水平相比仍有较大差距。

为了提升我国在一维纳米电子技术方面的研究与发展水平，我们依据自己近年在这方面的一些研究成果，并参考了国内外最新文献编写了此书。全书共由10章组成：第1章简要介绍了纳米线的研究兴起、材料类型和器件应用；第2章主要介绍了基于金属催化的纳米线气相沉积生长和基于模板的纳米线溶液合成；第3章从动力学和热力学角度出发，分析并讨论了纳米线的生长与合成机制；第4章主要介绍了各类纳米线的形貌特征与可控生长；第5章主要介绍了Si、Ge、GaN、ZnO及TiO₂纳米线的电子性质；第6~10章分门别类地介绍了各种纳米线器件的工作原理与器件性能，如纳米线场效应器件、纳米线场发射器件、纳米线化学传感器、纳米线发光器件以及纳米线太阳能电池等。

碳纳米管也是一类重要的一维纳米材料。鉴于它的制备方法与器件应用的研究已有专门书籍进行了具体介绍，本书将不再涉及与讨论。

由于时间紧迫，书中不妥之处在所难免，恳请同行、专家批评指正。

编著者
2015年5月

第 1 章 绪论 1

1.1 纳米线的研究兴起	1
1.2 纳米线的材料类型	2
1.3 纳米线的器件应用	4
参考文献	5

第 2 章 纳米线的制备方法 7

2.1 纳米线的气相生长法	7
2.1.1 纳米线的金属催化 VLS 生长	7
2.1.2 纳米线的金属催化 VS 生长	10
2.2 纳米线的溶液合成法	13
2.2.1 基于模板的溶液合成	13
2.2.2 无模板的溶液合成	16
2.3 纳米线的固相生长法	18
2.3.1 纳米线的氧化物辅助生长	18
2.3.2 纳米线的 SLS 生长	19
2.4 纳米线的宏量制备方法	20
2.4.1 热丝化学气相沉积法	20
2.4.2 超临界流体法	21
2.4.3 等离子体直接氧化法	22
参考文献	22

第 3 章 纳米线的生长机制 24

3.1 纳米线的金属催化 VLS 生长过程	24
-----------------------------	----

3.2 纳米线的 VLS 生长热力学	25
3.2.1 VLS 生长中的过饱和现象	25
3.2.2 从金属合金液滴成核	26
3.2.3 过饱和和极限的热力学估计	27
3.2.4 典型二元系统的相图	28
3.2.5 纳米线生长中的界面能作用	29
3.3 纳米线的 VLS 生长动力学	30
3.3.1 VLS 平衡动力学描述	30
3.3.2 直接碰撞在生长动力学中的作用	31
3.3.3 表面扩散在生长动力学中的作用	33
3.3.4 表面扩散在金属液滴中的作用	34
参考文献	35

第 4 章 纳米线的形貌特征与可控生长

36

4.1 纳米线形貌特征与生长工艺之间相关性的唯象描述	36
4.1.1 金属催化剂的影响	36
4.1.2 生长速率的影响	37
4.1.3 环境气压的影响	38
4.2 具有各种形貌特征的纳米线	39
4.2.1 垂直排列纳米线	39
4.2.2 交叉网络纳米线	39
4.2.3 絮状缠绕纳米线	41
4.2.4 分支分叉纳米线	42
4.3 纳米线的可控生长	43
4.3.1 纳米线生长方向的控制	44
4.3.2 纳米线生长直径的控制	45
4.3.3 纳米线生长长度的控制	46
4.3.4 纳米线生长形貌的控制	47
参考文献	48

5.1 纳米线中的电子状态	51
5.1.1 矩形截面纳米线的电子能量	51
5.1.2 圆形截面纳米线的电子能量	52
5.1.3 纳米线的态密度	52
5.2 电子结构的第一性原理计算	54
5.2.1 第一性原理的计算优势	54
5.2.2 第一性原理的计算方法	54
5.3 Si 纳米线的电子性质	55
5.3.1 单晶 Si 纳米线的电子性质	55
5.3.2 H 原子饱和 Si 纳米线的电子性质	56
5.3.3 价键弛豫 Si 纳米线的电子性质	57
5.4 Ge 纳米线的电子性质	58
5.4.1 单晶 Ge 纳米线的电子性质	58
5.4.2 应变调制 Ge 纳米线的电子结构	60
5.4.3 Ge (112) 纳米线的电子性质	61
5.5 GaN 纳米线的电子性质	62
5.5.1 (0001) GaN 纳米线的电子性质	62
5.5.2 具有 Ga 和 N 空位 GaN 纳米线的电子性质	63
5.5.3 H 原子终端 (0001) GaN 纳米线的电子性质	66
5.6 ZnO 纳米线的电子性质	66
5.6.1 ZnO 纳米线与纳米管的电子性质	66
5.6.2 掺杂 ZnO 纳米线的电子性质	67
5.6.3 具有 O 空位 ZnO 纳米线的电子性质	69
5.7 TiO ₂ 纳米线的电子性质	70
参考文献	71

6.1 NWFET 中的载流子输运	73
6.1.1 NWFET 的场效应迁移率	73
6.1.2 NWFET 的单电子输运	75

6.1.3 NWFET 的噪声特性	77
6.2 NWFET 的工作原理	79
6.2.1 NWFET 的性能特点	79
6.2.2 NWFET 的沟道电势分布	79
6.2.3 NWFET 的亚阈值斜率	80
6.3 NWFET 的转移特性	81
6.3.1 场效应晶体管的转移特性	81
6.3.2 隧穿 NWFET 的转移特性	82
6.3.3 多栅 NWFET 的转移特性	85
6.3.4 肖特基势垒 NWFET 的转移特性	87
6.4 NWFET 的器件应用	89
6.4.1 NWFET 存储器	89
6.4.2 NWFET 探测器	90
6.4.3 NWFET 传感器	92
6.5 Si-NWFET 的器件集成	93
参考文献	94

第 7 章 纳米线场发射器件

97

7.1 场发射的基本原理	97
7.1.1 场发射电子源	97
7.1.2 场发射电流	98
7.1.3 电子发射的功函数	98
7.2 Si 与 Si 化物纳米线的场发射特性	99
7.2.1 Si 纳米线的场发射	99
7.2.2 Si 化物纳米线的场发射	102
7.3 ZnO 与 GaN 纳米线的场发射特性	105
7.3.1 ZnO 纳米线的场发射	105
7.3.2 GaN 纳米线的场发射	108
7.4 金属与金属氧化物纳米线的场发射特性	109
7.4.1 金属纳米线的场发射	109
7.4.2 金属氧化物纳米线的场发射	112

参考文献	116
------------	-----

第 8 章 纳米线传感器件

120

8.1 纳米线传感器的灵敏度	120
8.2 纳米线化学传感器	122
8.2.1 纳米线 H_2 传感器	122
8.2.2 纳米线 O_2 传感器	126
8.2.3 纳米线 CO 传感器	128
8.2.4 纳米线 NO_2 传感器	129
8.2.5 纳米线其他化学传感器	132
8.3 纳米线生物传感器	135
8.3.1 Si 纳米线 DNA 传感器	135
8.3.2 纳米线病毒传感器	135
8.3.3 纳米线其他生物传感器	136
参考文献	137

第 9 章 纳米线发光器件

141

9.1 光学区域的电磁波谱	141
9.2 LED 的工作原理与性能参数	142
9.2.1 LED 的工作原理	142
9.2.2 LED 的特性参数	143
9.3 GaN 和 ZnO 材料的物理性质	145
9.3.1 GaN 的物理性质	145
9.3.2 ZnO 的物理性质	145
9.4 InGaN/GaN 纳米线发光器件	146
9.4.1 InGaN/GaN 纳米线白光 LED	146
9.4.2 InGaN/GaN 纳米线绿光 LED	148
9.4.3 InGaN/GaN 纳米线蓝紫光 LED	149
9.4.4 GaN 纳米线激光器	150
9.5 ZnO 纳米线发光器件	152
9.5.1 ZnO 纳米线 LED	152
9.5.2 ZnO 纳米线激光器	155

9.5.3 ZnO 纳米线光探测器	155
9.6 GaAs 纳米线发光器件	157
参考文献	157

第 10 章 纳米线光伏器件

161

10.1 太阳电池的光伏参数	161
10.1.1 短路电流密度	162
10.1.2 开路电压	162
10.1.3 填充因子	162
10.1.4 转换效率	162
10.1.5 载流子收集效率	163
10.2 纳米线的光伏特性	163
10.2.1 高效能量转换性能	163
10.2.2 低反射率特性	163
10.2.3 直线电子输运性质	164
10.3 Si 纳米线太阳电池	164
10.3.1 Si 纳米线的低反射率特性	164
10.3.2 Si 纳米线径向 pn 结太阳电池	165
10.3.3 大面积 Si 纳米线 pn 结太阳电池	168
10.3.4 Si 纳米线/聚合物混合太阳电池	170
10.3.5 Si 纳米线/肖特基结太阳电池	172
10.4 ZnO 纳米线太阳电池	173
10.4.1 ZnO 纳米线混合异质结太阳电池	173
10.4.2 ZnO 纳米线染料敏化太阳电池	175
10.5 TiO ₂ 纳米线染料敏化太阳电池	178
10.5.1 有序单晶 TiO ₂ 纳米线染料敏化太阳电池	178
10.5.2 复合结构 TiO ₂ 纳米线染料敏化太阳电池	180
10.6 InP 纳米线太阳电池	182
参考文献	183

中英文名词对照表

187

第1章

绪 论

近十余年来,随着纳米科学技术的迅速发展,一门新的分支学科正在应运而生,这就是人们广泛关注的一维纳米电子技术。所谓一维纳米电子技术就是研究各种准一维纳米材料与结构的生长制备、物理与化学性质及其在新型电子运输器件和光电子器件中应用的学科。具体而言,它包括以下三个主要方面:一是各类准一维纳米材料,如纳米线、纳米带、纳米棒与纳米晶须的制备方法、生长机制与结构表征;二是各类纳米线材料所呈现出的新颖物理性质,如良好的力学性质、热力学性质、场发射性质、电子运输性质、气敏性质、光电性质以及磁学性质等;三是基于纳米线所具有的各种优异性质设计和制作场发射器件、场效应晶体管、化学传感器、发光二极管、激光二极管、光探测器以及光伏器件等。

为了使读者对一维纳米电子技术有一个更清晰的认识与理解,本章将概要地介绍纳米线的研究历史、材料类型及器件应用等相关内容。

1.1 纳米线的研究兴起

关于纳米线的早期研究,应追溯到 20 世纪 60 年代初。1964 年, Wagner 与 Ellis 首次采用气-液-固(VLS)反应机制,在单晶 Si(111)衬底上外延生长出 Si 单晶须状物,由此开创了 Si 纳米线研究的先河^[1]。1971 年, Givargizov 和 Sheftal 共同实验研究了 VLS 生长纳米线的工艺过程,进而合理给出了纳米线的 VLS 生长机制^[2]。可以说, VLS 制备方法的提出与生长机制的圆满解释,为后来纳米线研究的兴起奠定了重要技术基础。

20 世纪 90 年代伊始,一场纳米科学技术的风暴席卷全球。而在这场重大技术

变革中,有两项具有划时代意义的工作与纳米线的研究密切相关:一是英国科学家 Canham 于 1990 年首次采用电化学阳极氧化方法制备了丝状的纳米多孔 Si,在室温条件下观测到了它所呈现出的可见光发射现象,并基于二维量子限制效应成功解释了这种光致发光特性^[3];二是日本科学家 Iijima 在电弧放电法的阴极沉积物中发现了碳纳米管,随后又观测到具有层状结构的 BN、MoS₂ 和 WS₂ 等也同样可以形成纳米管^[4]。恰逢此时,以扫描隧道显微镜 (STM)、原子力显微镜 (AFM) 和高分辨率透射电子显微镜 (HRTEM) 等为代表的具有原子级检测水平的结构表征技术相继出现。应该说,纳米多孔 Si 的可见发光、碳纳米管的发现及纳米结构表征技术所取得的重大进展,极大地刺激了纳米线研究的兴起。

然而,真正给纳米线研究带来新鲜活力的则是 20 世纪末所发表的几篇具有里程碑意义的研究成果。1998 年, Morales^[5]、Tang^[6] 和 Yu^[7] 三个研究小组,几乎同时各自独立采用激光烧蚀沉积 (LAD) 方法成功生长出了 Si 纳米线。2000 年, Holmes 等报道了利用溶液法生长无缺陷 Si 纳米线的研究成果,并实验观测到了基于二维量子限制效应的可见光致发光现象^[8]。至此,关于纳米线制备与应用研究的序幕悄然拉开。

进入 21 世纪以来,纳米线的研究开始呈现出蓬勃发展的崭新局面,这是技术推动和需求牵引所导致的一个必然结果。在工艺技术层面,各类纳米线的生长方法不断涌现。其中,基于金属催化的激光烧蚀沉积、热化学气相沉积、真空蒸发沉积、热丝化学气相沉积以及基于模板的溶液生长和固相生长方法等,为各类纳米线的制备提供了强有力的技术支撑;在器件应用方面,单电子输运器件、蓝紫光发射器件、大容量信息存储器件、场发射器件、化学传感器以及高效率太阳电池的制作,又为纳米线的实际应用提供了广阔的发展空间。目前,关于纳米线的沉积生长与器件应用的研究蓬勃发展,并展现出良好的发展前景。

1.2 纳米线的材料类型

纳米线种类繁多。按材料性质,纳米线可分为 Si 基纳米线、化合物纳米线、氧化物纳米线及金属纳米线等;按结构形态,纳米线可分为纳米棒、纳米带、纳米管及纳米晶须等;按生长形状,纳米线又可分为垂直排列型、弯曲交叉型、核-壳复合型及絮状缠绕型等。下面,我们将从材料性质的角度出发,对几种有代表性的纳米线进行简要介绍。

Si 基纳米线主要包括 Si 纳米线、Ge 纳米线及 SiC 纳米线。其中, Si 纳米线是

目前研究的主攻方向。众所周知, Si 是一种最重要的半导体材料, 已在各类微电子器件和集成电路中获得了广泛而成功的应用。与此同时, 先于 Si 纳米线的 Si 纳米晶粒与量子点的自组织生长及其在纳米电子器件与光电子器件中应用的研究, 业已取得了令世人瞩目的显著进展^[9]。毫无疑问, 由于 Si 纳米线具有明显的二维量子限制效应与良好的光学特性, 其制备方法也已日渐成熟, 自身又与 Si 微电子工艺有着很好的兼容性, 预计在未来的一维纳米电子器件与光电子器件中具有诱人的应用前景。Ge 与 Si 一起被称为第一代半导体材料。与 Si 相比, Ge 具有更小的电子和空穴有效质量、更高的载流子迁移率与更低的介电常数, 故可广泛应用于各类高速微电子器件。此外, 由于 Ge 的禁带宽度比 Si 窄, 室温下为 0.67eV, 因而尤其适合于红外线探测器的制作^[10]。SiC 是另一种重要的 Si 基半导体材料, 它的宽带隙性质、高临界击穿电场、高热导率、高载流子饱和漂移速率等优异特性, 使其在高频、高温、大功率、抗辐射条件下及蓝光发射器件中有着巨大的应用潜力。无疑, 这为 SiC 纳米线的发展带来了无限生机^[11]。

属于 III A-V A 族化合物半导体的 GaAs 纳米线、InAs 纳米线与 GaN 纳米线也是一维纳米结构与材料的重要研究方向。被称为第二代半导体的 GaAs, 因其固有的直接带隙性质, 使其在发光器件中占有不可动摇的主导地位。它所呈现的高载流子迁移率特点, 使其无可争辩地成为高速逻辑器件的自然候选者。而它所具有的 1.42eV 禁带宽度, 又使其在高效率太阳能电池中具有潜在的应用价值^[12]。InAs 是另一种 III A-V A 族化合物材料, 它与 GaAs 一样具有直接带隙性质和高电子迁移率特点。而它所具有的窄禁带宽度和与 GaAs 具有约 6% 的晶格失配度这一特点, 使其可以采用自组织方法制备 InAs/GaAs 量子点及其阵列结构, 并在量子点激光器、量子点光探测器与量子点中间带太阳能电池中获得了广泛应用^[13]。GaN 是由 III A 族的 Ga 与 V A 族的 N 形成的化合物半导体, 被称为第三代半导体。它所具有的直接带隙结构和宽带隙特征, 使其在蓝光发射器件中占有得天独厚的优势, 世界上首例蓝光发射二极管就是采用 GaN 制作成功的^[14]。这使人们充分意识到, III A-V A 族化合物和 III A 族氮化物纳米线的研究, 具有不可估量的发展潜力。

以 ZnO、SnO₂ 和 TiO₂ 为代表的氧化物半导体, 各自具有独特的物理性质, 由它们所沉积生长的纳米线也在—维纳米电子技术中占有重要的一席之地。ZnO 具有 3.37eV 的禁带宽度, 它的直接带隙性质与高达 60meV 的激子束缚能, 使其在蓝光和蓝紫光发光二极管、激光器与探测器等光电子器件方面备受青睐。此外, ZnO 还具有优异的场发射特性、良好的化学稳定性与敏感性, 这使其在场发射器件与气敏传感器方面具有十分重要的应用^[15]。毋庸置疑, ZnO 与 GaN 作为第三

代半导体的优秀代表,其发展前途不可限量。标准的 SnO_2 为四方晶系的金红石结构,它具有 3.62eV 的禁带宽度,高达 130meV 的室温激子束缚能, $10^{-4}\Omega\cdot\text{cm}$ 的低电阻率和高达 97% 的透光率。这些独特的电学与光学性质,十分适合于透明导电玻璃、太阳电池、场发射器件、高温电子器件与化学传感器件的制作^[16]。 TiO_2 具有带隙宽、折射率高、介电常数大、韧性好、化学性能稳定和光催化活性优良等特点,已被广泛应用于光催化、电致变色、氧敏器件、太阳电池与精细陶瓷等众多领域,是当前国际上材料科学研究的热点之一。尤其是在染料敏化太阳电池方面,由纳米结构 TiO_2 作为其光阳极可使其光伏性能得到大幅度改善^[17]。

1.3 纳米线的器件应用

如上所述,发展一维纳米电子技术的宗旨是基于—维纳米材料与结构所具有的优异电子输运性质与光学性质,可用于设计和制作各类高性能电子器件与光电子器件。这些器件主要包括场发射器件、场效应器件、传感器件、发光器件以及光伏器件等。这些器件将与先前发展起来的单电子器件、量子点器件与单光子器件等一起,为纳米电子学的发展增光添彩,使之更加熠熠生辉。

纳米场发射材料在真空微电子学和场发射显示领域中具有广阔的应用前景。纳米线与纳米管所特有的结构形状,使其呈现出优异的场发射特性,因此特别适合于场发射器件的制作。尤其是 Si 纳米线与 Si 纳米管的制备与 Si 工艺具有很好的兼容性,故采用它们制作场发射显示屏将比碳纳米管更具有优势,而且它能克服碳纳米管遇氧后会从半导体性向金属性转变的这种不稳定性,这对制作性价比高的场发射显示屏十分有利^[18]。场效应晶体管是组成超大规模集成电路的基本单元,基于库仑阻塞效应的单电子器件在大容量信息存储中具有潜在应用。由于纳米线具有良好的电子输运性质,因此利用掺杂纳米线可以制作性能优异的场效应晶体管。利用纳米线在一定温度下呈现的库仑阻塞原理可以制作单电子晶体管,从而为纳米电子器件的高集成和超小型化开辟了一条新思路^[19]。此外,由于纳米线具有很大的比表面积,会呈现出高的表面活性,故可应用于传感器的制作,由此可以对化学、生物和医学领域的多种物质进行高灵敏度、高选择性和高可靠性的检测。

纳米线是一种具有二维量子限制效应的低维纳米结构材料,它所具有的强量子限制效应和带隙宽化现象,使其在高性能发光器件和高灵敏光探测器件中有着巨大的潜在应用。尤其是像 GaN 与 ZnO 这类宽带隙材料具有较大的激子束缚能,因而更适合于蓝光和紫光发射器件的制作。例如,人们已采用 GaN 和 ZnO 纳米线制作

了高效率的蓝色发光二极管和低阈值电流密度的激光器^[20-21]。随着现代光伏技术的迅速发展,尤其是新概念太阳电池研究的兴起,纳米线与纳米管在新一代高效太阳电池中的应用研究也日益引起人们的浓厚兴趣,这是因为纳米线具有强光吸收特性、低反射率特性和良好的载流子输运与收集特性,这对改善太阳电池的光伏性能极为有利。目前,关于这方面的研究已成为新概念太阳电池中的一个重要发展方向^[22]。

参考文献

- [1] Wagner R S, Ellis W C. Vapor-Liquid-Solid Mechanism of Single Crystal Growth. *Appl Phys Lett*, 1964, 4: 89.
- [2] Givargizov E I, Sheftal N N. Morphology of Silicon Whiskers Grown by the VLS-Technique. *J Cryst Growth*, 1971, 9: 326.
- [3] Canham L T. Silicon Quantum Wire Array Fabrication by Electrochemical and Chemical Dissolution of Wafer. *Appl Phys Lett*, 1990, 57: 1246.
- [4] Iijima S. Helical Microtubules of Graphitic Carbon. *Nature*, 1991, 354: 56.
- [5] Morales A M, Lieber C M. Laser Ablation Method for the Synthesis of Crystalline Semiconductor Nanowires. *Science*, 1998, 279: 209.
- [6] Tang Y H, Zhang Y E, Wang N, et al. Morphology of Si Nanowires Synthesized by High Temperature Laser Ablation. *J Appl Phys*, 1998, 85: 7981.
- [7] Yu D P, Lee C S, Bello I, et al. Synthesis of Nano-Scale Silicon Wires by Excimer Laser Solution at High Temperature. *Solid State Commun*, 1998, 105: 403.
- [8] Holmes J D, Johnston K P, Doty R C, et al. Control of Thickness and Orientation of Solution Grown Silicon Nanowires. *Science*, 2000, 287: 1471.
- [9] 彭英才, 赵新为, 傅广生. 硅基纳米光电子技术. 保定: 河北大学出版社, 2009.
- [10] Kasper J. 硅锗的性质. 余金中译. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [11] 何杰, 夏建白主编. 半导体科学与技术. 北京: 科学出版社, 2007.
- [12] 彭英才, 傅广生. 纳米光电子器件. 北京: 科学出版社, 2010.
- [13] 王占国, 陈涌海, 叶小玲. 纳米半导体技术. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [14] Nakamura T, Mukai T, Senoh M. Candela-Class High-Brightness InGaN/AlGaIn Double Heterostructure Blue-Light-Emitting Diodes. *Appl Phys Lett*, 1994, 64: 1687.
- [15] 彭英才, Zhao X W. 气相法制备 ZnO 纳米线及其阵列的生长机制. *人工晶体学报*, 2008, 37: 450.
- [16] 马洪磊, 薛成山. 纳米半导体. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- [17] 彭英才, Miyazaki S, 徐骏. TiO₂ 纳米结构在染料敏化太阳电池中的应用. *真空科学与技术*

学报, 2009, 29: 411.

- [18] 唐元洪. 硅纳米线及硅纳米管. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [19] 朱静, 等. 纳米材料和纳米器件. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [20] Gratecak S, Qian F, Li Y, et al. GaN Nanowire Lasers with Low Lasing Thresholds. *Appl Phys Lett*, 2005, 87: 173111.
- [21] Zhang Y F, Russo E, Mao S S. Quantum Efficiency of ZnO Nanowire Nanolasers. *Appl Phys Lett*, 2005, 87: 043106.
- [22] 彭英才, 傅广生. 新概念太阳能电池. 北京: 科学出版社, 2014.