



国家出版基金资助项目
“十三五”国家重点图书
材料研究与应用著作

III-V氮化物纳米材料的 制备及性能研究

STUDY ON PREPARATION
AND PROPERTIES OF
III-V NITRIDE
NANOMATERIALS

曹传宝 著

哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS



国家出版基金资助项目
“十三五”国家重点图书
材料研究与应用著作

III-V 氮化物纳米材料的 制备及性能研究

STUDY ON PREPARATION
AND PROPERTIES OF
III-V NITRIDE
NANOMATERIALS

曹传宝 著

哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 提 要

Ⅲ-V 氮化物属于第三代半导体,具有独特的性能及应用领域,现在得以广泛应用的蓝光 LED 就是以氮化镓为基材制备出来的。本书内容主要是Ⅲ-V 氮化物纳米材料的研究,包括零维量子点的制备及性能,一维纳米材料的制备及性能,纳米阵列的制备及性能,以及对于Ⅲ-V 氮化物的理论模拟研究等。

本书对于从事Ⅲ-V 氮化物纳米材料研究的学者具有一定的参考作用。

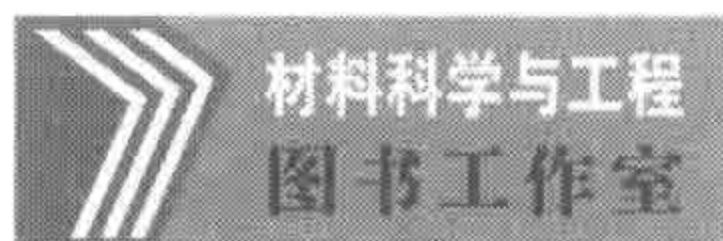
图书在版编目(CIP)数据

Ⅲ-V 氮化物纳米材料的制备及性能研究/曹传宝著. —哈尔滨:
哈尔滨工业大学出版社,2017.6

ISBN 978-7-5603-5802-4

I. ①Ⅲ… II. ①曹… III. ①氮化物-纳米材料-制备-
研究②氮化物-纳米材料-性能-研究 IV. ①TB383

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 003947 号



策划编辑 杨 桦 张秀华

责任编辑 范业婷 高婉秋

封面设计 卞秉利

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006

传 真 0451-86414749

网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>

印 刷 哈尔滨圣铂印刷有限公司

开 本 660mm×980mm 1/16 印张 21 字数 334 千字

版 次 2017 年 6 月第 1 版 2017 年 6 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5603-5802-4

定 价 98.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

《材料研究与应用著作》

编写委员会

(按姓氏音序排列)

毕见强	曹传宝	程伟东	傅恒志
胡巧玲	黄龙男	贾宏葛	姜 越
兰天宇	李保强	刘爱国	刘仲武
钱春香	强亮生	单丽岩	苏彦庆
谭忆秋	王 铀	王超会	王雅珍
王振廷	王忠金	徐亦冬	杨玉林
叶 枫	于德湖	藏 雨	湛永钟
张东兴	张金升	赵九蓬	郑文忠
周 玉	朱 晶	祝英杰	

前 言

Ⅲ-V 氮化物是继第一代硅半导体、第二代砷化镓半导体之后的第三代半导体。与前两代半导体相比,第三代半导体具有独特的性能及应用领域,其中蓝光 LED 就是在氮化镓半导体的深入研究基础上实现的,并已得到了广泛的应用。日本的中村修二(Nakamura Shuji)等人因此项研究成果获得了 2014 年度的诺贝尔物理学奖,这极大地证明和展现了Ⅲ-V 氮化物研究的重要性及其应用的广阔发展前景。目前关于Ⅲ-V 氮化物的研究方兴未艾,但对于其应用的探索还远未达到期望值。特别是纳米研究热潮出现后,关于Ⅲ-V 氮化物纳米材料的研究成为了新的热点。

本书的撰写基础是北京理工大学低维功能材料课题组从 21 世纪初开始的Ⅲ-V 氮化物的研究工作,内容是其多年研究成果的总结。Ⅲ-V 氮化物领域的研究发展非常之快,因此,一些十几年前的工作现在看起来可能显得比较简单,但本书将其集合在一起是为方便读者了解作者对Ⅲ-V 氮化物研究的历程,如果对于读者的研究工作能有所借鉴就达到了作者的目的。

本书所呈现的研究成果以氮化镓为主,也包含了对氮化铝以及氮化铟的部分研究成果;除了包括实验上的研究,也包括了一些理论上的模拟研究。本书共分 13 章,包含博士生项项、陈卓、邱海林、李亚楠、乌斯曼的研究工作,其中项项的工作包含了各种形貌氮化镓的不同制备方法

以及性能研究;陈卓的工作则主要包含氮化镓、氮化铝等阵列纳米材料的制备及性能研究;邱海林的工作则主要集中于氮化镓纳米晶及其复合物的制备;李亚楠的工作则包含氮化铟、氮化镓量子点以及稀磁半导体的研究;乌斯曼的工作是集中于Ⅲ-V 氮化物的理论模拟研究。作者在此对他们的辛勤工作表示感谢。

成书过程比较仓促,不足之处在所难免,欢迎大家批评指正。

作者

2016 年 7 月

目 录

第 1 章	III-V 氮化物半导体材料简介	1
1.1	GaN、AlN 和 InN 的结构与性能	1
1.2	一维 III-V 氮化物半导体纳米材料研究现状	3
1.3	本章小结	7
	参考文献	7
第 2 章	气相反应制备 GaN 纳米线的催化效应	15
2.1	引言	15
2.2	金属催化的化学气相沉积制备 GaN 纳米线	17
2.3	催化剂前驱体浓度与 GaN 纳米线生长的关系	24
2.4	以金膜作为催化剂前驱体生长 GaN 纳米线	27
2.5	本章小结	35
	参考文献	36
第 3 章	GaN 纳米带和纳米带环的生长与形成机理	40
3.1	引言	40
3.2	GaN 纳米带与纳米带环结构的生长	41
3.3	纳米带的形成机理	51
3.4	纳米带环的形成机理	53
3.5	生长条件对最终产物形貌的影响	54
3.6	不同纳米结构所受内应力对比	57
3.7	本章小结	59
	参考文献	60
第 4 章	碳热辅助法控制生长 GaN 低维结构	65
4.1	引言	65

4.2	利用碳热还原路线大量制备 GaN 纳米线	66
4.3	反应温度对纳米线生长取向的影响	73
4.4	碳含量对纳米线生长的影响	75
4.5	GaN 微棱锥的生长与表征	78
4.6	反应条件对产物结构的影响	84
4.7	GaN 棱锥的大量控制制备与表征	86
4.8	本章小结	102
	参考文献	104
第 5 章	定向排列的孪晶 GaN 纳米线的制备与表征	110
5.1	引言	110
5.2	实验部分	111
5.3	结果与讨论	113
5.4	本章小结	120
	参考文献	121
第 6 章	GaN 纳米柱阵列的制备及表征	124
6.1	引言	124
6.2	实验部分	125
6.3	结果与讨论	126
6.4	本章小结	135
	参考文献	135
第 7 章	Fe、Co 掺杂 GaN 纳米线的制备及性能研究	139
7.1	引言	139
7.2	实验部分	140
7.3	Fe 掺杂 GaN 纳米线的结果分析	142
7.4	Co 掺杂 GaN 纳米线的结果分析	151
7.5	本章小结	158
	参考文献	159
第 8 章	GaN 及其稀磁半导体纳米晶的制备与性能研究	162
8.1	引言	162

8.2	实验部分	164
8.3	GaN 纳米晶的结果分析	165
8.4	GaN:Mn 纳米晶的结果分析	171
8.5	其他 GaN:TM 纳米晶的结果分析	178
8.6	本章小结	182
	参考文献	183
第 9 章	GaN 纳米晶体及其复合材料的制备及性能	186
9.1	溶胶凝胶方法制备 GaN 纳米晶	186
9.2	GaN 量子点/PMMA 复合材料的制备与光学性质	197
9.3	GaN 量子点/二氧化硅干凝胶复合材料的制备及表征	207
9.4	本章小结	216
	参考文献	217
第 10 章	GaN 的理论模拟研究	227
10.1	立方 GaN 的结构、弹性常数及振动性能的模拟计算	227
10.2	六方 GaN 的电学、力学、光学性能的理论计算	236
10.3	Co 掺杂的立方 GaN 的电、磁、光性能模拟	248
10.4	本章小结	253
	参考文献	255
第 11 章	AlN 纳米结构的可控制备与表征	268
11.1	引言	268
11.2	实验部分	269
11.3	结果与讨论	271
11.4	本章小结	279
	参考文献	280
第 12 章	单晶 InN 纳米线的制备及表征	283
12.1	引言	283
12.2	实验部分	284
12.3	结果与讨论	286
12.4	本章小结	290

参考文献	290
第 13 章 InN 及其稀磁半导体纳米晶的制备与性能研究	293
13.1 引言	293
13.2 实验部分	295
13.3 InN 纳米晶的结果分析	298
13.4 InN:Mn 纳米晶的结果分析	304
13.5 其他 InN:TM 纳米晶的结果分析	311
13.6 本章小结	316
参考文献	317
名词索引	320

第 1 章 III-V 氮化物半导体材料简介

以硅和砷化镓为代表的第一代及第二代半导体材料的发展,极大地推动了微电子技术、光电子技术及以此为基础的信息技术的长足发展。但由于材料本身性能的限制,第一代、第二代半导体材料只能在 200 °C 以下的环境中工作,而且抗辐射、耐高压击穿性能以及发射可见光波长范围都不能完全满足现代电子技术对高温、大功率、高频、高压及抗辐射、发射蓝光等的新要求。在这种情况下,III-V 氮化物由于具有以下特点:其一,具有禁带宽度大、热导率高、介电常数低、电子漂移饱和速度高等特性,适合于制作高频、大功率、高温、抗辐射和高密度集成的电子器件;其二,GaN、AlN 和 InN 可以在全组成范围形成完全互溶合金,使其直接带隙可以在很宽的范围内变化并连续跨过可见光的大部分区域到紫外光区,因而可以制作蓝光、绿光、紫外光的发光器件(如 LEDs)和光探测器件等^[1],从而成为各国研究人员竞相开展的研究热点之一。同样,在纳米材料研究领域,以 GaN 为主的 III-V 氮化物纳米结构亦成为该领域的前沿课题之一。

1.1 GaN、AlN 和 InN 的结构与性能

宽带隙半导体的 III-V 氮化物有纤锌矿和闪锌矿两种晶体结构。纤锌矿结构属于六方结构,具有两个晶格常数 a 和 c 。每个晶胞包含 6 个原子,空间群为 $P6_3mc(C_{6v}^4)_4$ 。纤锌矿结构包含两个相互穿插的六方密堆亚晶格,沿 c 轴方向错位 $5/8$ 个晶胞高度。闪锌矿结构为立方晶胞,每个包含 4 个 III 族元素和 4 个氮原子,空间群为 $F4-3m(Td^2)$,晶胞中的原子位置与金刚石结构完全一样,包含两个相互穿插的面心立方亚晶格,沿体对角线方向错开 $1/4$ 的距离,每个原子都可视为八面体的中心。纤锌矿和闪锌矿的结构是相似的,两种结构中 III 族原子都与 4 个氮原子配位,每个氮原子与 4 个 III 族原子配位。两种结构的主要不同是在双原子面上紧密堆积的堆积顺序不同。对于纤锌矿结构,其(0001)面的堆积顺序在 $\langle 0001 \rangle$ 方向

上为 ABABAB;对于闪锌矿结构,(111)面的堆积顺序在 $\langle 111 \rangle$ 方向上为 ABCABC。它们沿各个不同晶向的原子结构如图 1.1、图 1.2 所示,其中 M 代表 Ga、Al 和 In^[2]。

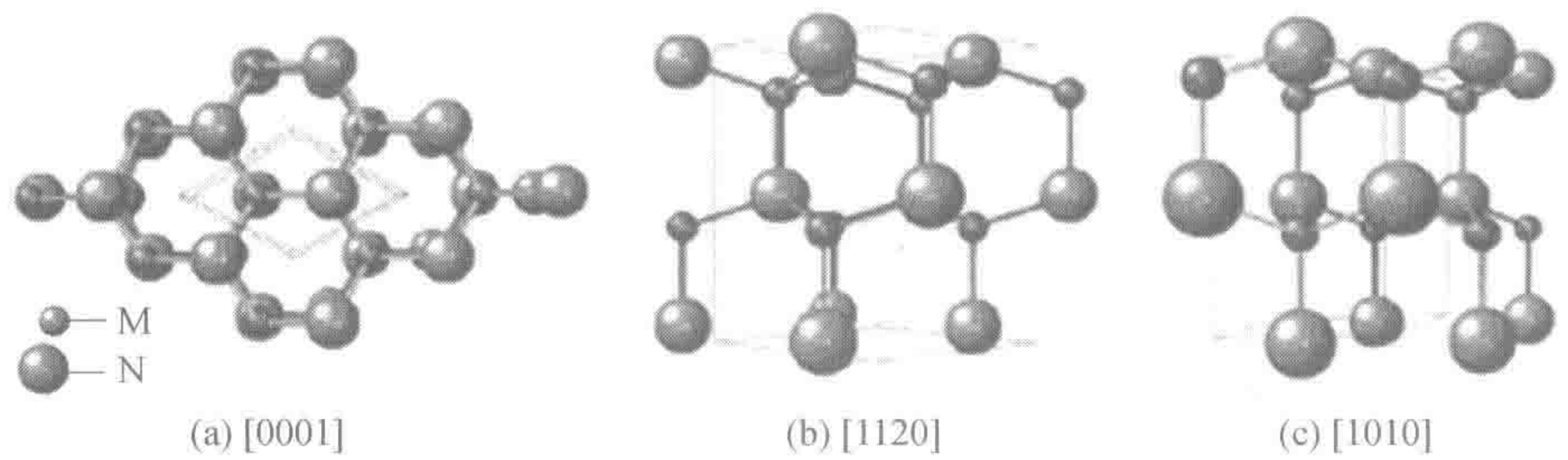


图 1.1 纤锌矿 MN 沿不同方向的原子结构示意图

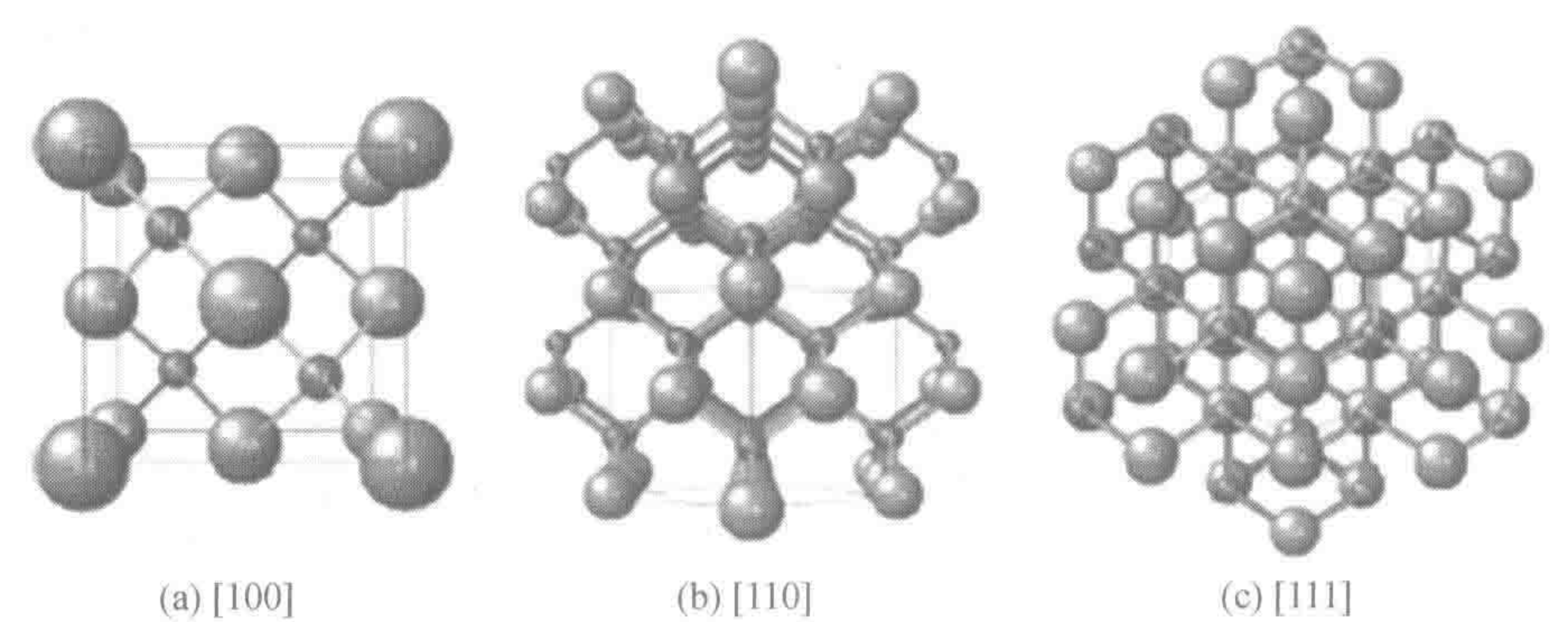


图 1.2 闪锌矿 MN 沿不同方向的原子结构示意图

纤锌矿结构的 GaN、AlN、InN 在室温下均为直接带隙,其值分别为 3.4 eV、6.2 eV 和 1.9 eV,而闪锌矿结构的 GaN、InN 同样为直接带隙,只有 AlN 为间接带隙。III-V 氮化物通常以纤锌矿形式存在,表 1.1 列出了纤锌矿结构的 GaN、AlN 和 InN 的基本物理性能^[1]。

表 1.1 纤锌矿结构的 GaN、AlN 和 InN 的基本物理性能^[1]

物理性能	GaN	参考文献	AlN	参考文献	InN	参考文献
带隙/eV ($T=300\text{ K}$)	3.39	3	6.2	10	1.89	15
带隙温度系数/($\text{eV} \cdot \text{K}^{-1}$) ($T>180\text{ K}$)	$dE_g/dT=-6.0\times 10^{-4}$	4	—	—	$dE_g/dT=-1.8\times 10^{-4}$	16

续表 1.1

物理性能	GaN	参考文献	AlN	参考文献	InN	参考文献
带隙压力系数 /(eV · kbar ⁻¹) (T=300 K)	$dE_g/dp=4.2\times10^{-3}$	5	—	—	—	—
晶格常数/nm (T=300 K)	$a=0.318\,9,$ $c=0.518\,55$	3	$a=0.311\,2,$ $c=0.498\,2$	10	$a=0.354\,8,$ $c=0.576\,0$	15
热膨胀系数/K ⁻¹ . (T=300 K)	$\Delta a/a=5.59\times10^{-6}$ $\Delta c/c=3.17\times10^{-6}$	3	$\Delta a/a=4.2\times10^{-6}$ $\Delta c/c=5.3\times10^{-6}$	11	—	—
热导率 /(W · cm ⁻¹ · K ⁻¹)	$K=1.3$	6	$K=2$	12	—	—
介电常数	$\varepsilon_0=9.5,\varepsilon_\infty=5.35$	7	$\varepsilon_0=8.5,\varepsilon_\infty=4.68$	13	—	—
电子有效质量	$m_e^*=0.20\pm0.02m_0$	7	—	—	$m_e^*=0.11m_0$	15
声子模式 (T=300 K)	$A_1(\text{TO})=532\text{ cm}^{-1}$	8	$A_1(\text{TO})=667\text{ cm}^{-1}$	14	$A_1(\text{TO})=478\text{ cm}^{-1}$	16
	$E_1(\text{TO})=560\text{ cm}^{-1}$	8	$A_1(E_2)=665\text{ cm}^{-1}$		$A_1(\text{LO})=694\text{ cm}^{-1}$	
	$E_2=144.569\text{ cm}^{-1}$	8	$A_1(\text{LO})=910\text{ cm}^{-1}$			
	$A_1(\text{LO})=710\text{ cm}^{-1}$	9				
	$E_1(\text{LO})=740\text{ cm}^{-1}$	9				

注 1 bar=10⁵ kPa

1.2 一维Ⅲ-V氮化物半导体纳米材料研究现状

近年来,一维纳米结构(诸如纳米线、纳米棒、纳米带及纳米管等)由于其独特的物理化学性质以及在未来微纳电子器件中的潜在应用价值而倍受人们关注^[17-20]。一维纳米结构不仅是人们研究材料尺度和尺寸对其光、电、热及力学性能影响的理想体系,同时在未来纳米尺度下它还对制造电子、光电子及电力耦合等器件起着关键性作用。但由于在合成制备一维纳米结构材料过程中难以实现对其维度、形貌、杂质成分、结晶度以及生长方向等重要因素进行调控,因而与零维量子点、二维量子阱相比,一维纳米结构研究进展显得更为缓慢。尽管在目前实验水平下,通过大量高级复杂

的微/纳米加工技术的应用(诸如电子束曝光技术(EBL)^[21]、聚焦离子束直写系统(FIB)^[22]、X 射线或远紫外光刻技术^[23]),同样可以实现一维纳米结构的制备,然而基于上述微/纳米加工技术,既要实现一维纳米结构的大量制备,适应不同材料,同时又要降低经济成本以便使其具有实用价值,目前这还是巨大的挑战。与此相反,基于化学合成的非传统加工方法却提供了一条很好的途径,不仅适用于不同材料,还大大降低了制备成本^[24]。在各种不同一维纳米材料的研究中,一维 III-V 氮化物半导体纳米材料由于其具有诸多优异性能而倍受人们关注。

1.2.1 一维 GaN 纳米材料

目前在一维 III-V 氮化物半导体纳米材料的研究中以 GaN 居多。1997 年, Han 等人以 Ga_2O_3 、Ga 为原料在 NH_3 气氛中,以碳纳米管为模板成功制备了一维 GaN 纳米线^[25]。1999 年 Cheng 等人同样以 Ga_2O_3 、Ga 为原料并在 NH_3 气氛中,改用多孔氧化铝为模板,在模板表面合成了单晶 GaN 纳米线^[26]。随后,他们将金属 In 镀在多孔氧化铝模板底部作为催化剂,并在孔中合成了取向一致的 GaN 纳米线^[27]。

2000 年, Chen 等人用 In 作为催化剂,以金属 Ga 为原料,于 NH_3 气氛中合成了大量 GaN 纳米线,同时对产物进行了场发射性能研究,结果表明 GaN 纳米线有较低的开启电压、较高的发射电流,因此具有良好的应用前景^[28,29]。同年, Li 等人将球磨后的 GaN 粉体于高温下升华制备了 GaN 纳米线、纳米带及纳米环^[30]。此外, Peng 等人采用热丝化学气相沉积法制备了大量 GaN 纳米线^[31]。他们还采用激光烧蚀法,以 GaN 和 Ga_2O_3 为靶材,在不使用催化剂的条件下合成了 GaN 纳米线,该法制备的纳米线表面被一层氧化层包覆,并对纳米线生长起催化作用,即所谓的氧化物辅助法^[32]。

美国哈佛大学 Charles 领导的研究小组不仅在制备方面取得进步,还在将一维纳米半导体材料组装成各种光电器件方面取得了重大进展。他们于 2000 年采用激光烧蚀法,以 GaN 和 Fe 为靶材,在 900 °C 环境下制备出大量 GaN 纳米线^[33]。随后,他们采用气液固法,通过控制催化剂颗粒的大小,实现了对纳米线直径的控制生长^[34,35]以及分岔的纳米线结构的生长^[36]。在此基础上,他们将 GaN 纳米线组装成场效应晶体管(FET),该 FET 显示出良好的开关行为,其电子迁移率可达 $650 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$,高于碳

纳米管 FET;同时采用 n 型 GaN 纳米线和 p 型 Si 纳米线组装成 p-n 结,该 p-n 结具有高度可重复性整流行为^[37]。另外,他们成功合成了 Mg 掺杂的 p 型 GaN 纳米线并将其组装成 FET 及发光二极管(LED)^[38],同样采用化学气相沉积法实现了对 GaN 纳米线进行 Mn 的磁性掺杂^[39]。在基于 GaN 纳米结构的器件组装方面,他们已经实现了激光二极管^[40]、采用多根不同 n 型 GaN 纳米线与 p 型 Si 纳米线建构的纳米全彩发光二极管(LED)^[41]以及基于 n 型 GaN 纳米线和 p 型 Si 纳米线建构的逻辑门与计算电路。

2002 年, Kim 等人采用氢化物气相外延法(HVPE)于 480 °C 下在 [0001]取向的蓝宝石衬底上合成了 GaN 纳米棒阵^[42,43]。在此基础上,他们进一步实现了对 GaN 纳米棒进行 Si 的 n 型掺杂和 Mg 的 p 型掺杂^[44]。2003 年,美国加州大学 Berkeley 分校的杨培东研究小组采用金属有机物气相沉积(MOCVD)法,并以 ZnO 纳米线阵列为模板,成功外延生长出一层 GaN,最后通过 H₂ 还原 ZnO 得到 GaN 纳米管的阵列^[45]。随后他们再次采用 MOCVD 法,没有采用模板,分别在(100)面 γ -LiAlO₂ 和(111)面 MgO 衬底实现了六方相结构的单晶 GaN 纳米线阵列,其生长方向分别为 [1100]和[0001],其截面形貌分别为三角形和六边形,实现了通过衬底晶格取向控制 GaN 纳米线生长方向^[46]。此外,他们还成功制得了单根 GaN 纳米线激光器^[47]和环形激光谐振器^[48]。

此外,2003 年 Hu 等人采用两步法先制得 Ga₂O₃ 纳米管,然后再将其转化为 GaN 纳米管。具体步骤为:首先以 Ga₂O₃ 为原料,将其在 1 250 °C 下 N 气中保温 1.5 h,然后将 N 气切换成氨气于 1 400 °C 继续保温 1 h,便可得到 GaN 纳米管^[49]。随后,于 2004 年,他们再次以 Ga₂O₃ 为原料,将其置于石墨坩埚中,在氨气中 1 600 °C 保温 1.5 h,得到截面为矩形的单晶立方相 GaN 纳米管^[50]。2003 年, Bae 等人以 Ga 和 GaN 为原料,将其在 1 100 °C 下保温 1 h,得到截面为三角形的六方相单晶 GaN 纳米线^[51]。2005 年, Zhou 等人以 Ga 和 Ga₂O₃ 为原料,将其在氨气和 Ar 气 2 : 3 混合流中于 1 080 °C 下保温 2 h,得到奇特的一维 Z 字形 GaN 纳米线^[52]。2003 年, Elahl 等人对以 Ga 为原料于氨气中制备各种维度和形貌的 GaN 纳米结构进行了详细的实验研究。他们提出了由 Ga 原子表面扩散长度和 GaN 分子表面扩散长度构成的有效表面扩散长度的概念,并以此概念为基础对在不同实验条件下得到的各种不同尺寸、不同形貌的 GaN 纳米结构进行

了定性解释^[53]。

1.2.2 一维 AlN 纳米材料

1997 年, Haber 等人在 1 000 ~ 1 100 °C 环境下, 通过向 N 气中氮化纳米级铝粉中加入 AlCl₃ 成功获得了 AlN 纳米晶须^[54]。2001 年, Zhang 等人在氨气中, 用碳纳米管同 Al 与 Al₂O₃ 反应合成了 AlN 纳米线^[55]。2003 年, 南京大学 Wu 等人采用 N 气中蒸发铝粉的方法制得 AlN 纳米带^[56]。同年, 他们在铝粉中负载一定量的 CoSO₄, 然后在氨气中进行氮化便得到六方相的 AlN 纳米管^[57]。随后, 该小组以 AlCl₃ 为反应前驱物, 于 700 °C 的氨气中, 在 Fe、Co、Ni 催化剂存在的条件下制得 AlN 纳米锥的阵列^[58]。此外, 该小组还以铝锰合金为原料, 于氨气中在 1 100 °C 下保温 1 h 获得了 Z 字形的 AlN 纳米线^[59]。2005 年, Yin 等人采用氨气下直接 AlN 粉的方法获得了一种新奇的层状堆砌纳米结构^[60]。随后, 他们以多壁碳纳米管诱导 Al₂O₃ 反应得到了包覆碳的单晶 AlN 纳米管^[61]。北京大学 Zhao 等人在 2004 和 2005 年, 以铝粉为原料, 分别在硅和单晶蓝宝石衬底上沉积得到 AlN 纳米锥状阵列^[62,63]。此外, 还有一些不同研究小组分别以铝粉或铝片为原料于氨气中合成得到各种 AlN 纳米锥状阵列^[64-67]。

1.2.3 一维 InN 纳米材料

2000 年, Dingman 等人采用液-液-固(SLS)的方法在 203 °C 环境下合成了单晶 InN 纳米线^[68]。2002 年, Liang 等人在图案化金膜的 Si 衬底上, 以 In 箔为原料, 于氨气中 500 °C 环境下反应 8 h, 得到 InN 纳米线^[69]。2005 年, Vaddiraju 等人以金属 In 为原料, 通过反应气相输运得到不同形貌的 InN 纳米线^[70]。Luo 等人以 In₂O₃ 为起始反应物, 在温度为 680 ~ 720 °C 之间的氨气中得到 InN 纳米线^[71]。Sardar 等人以 InCl₃ 和 Li₃N 为反应物, 于 250 °C 下合成了 InN 纳米晶、纳米线及纳米管, 产物中既有立方相又有六方相^[72]。Hu 等人以 In 粉为原料, 将其于 560 °C 下的氨气中保温 3 h 获得单晶 InN 纳米带^[73]。此外, Chang 等人还对单根 InN 纳米线的输运性能进行了研究^[74]。

1.2.4 一维 III-V 氮化物纳米超晶格结构

目前, 均相一维半导体纳米材料制备已经取得了长足进展, 并且作为

建构纳米光、电器件的基本模块已经在场效应晶体管、发光二极管、激光器、光探测器以及生物、化学传感器乃至逻辑门器件等多方面都取得了重大突破性进展。如果能够通过化学成分的调制实现一维纳米半导体材料轴向或径向的超晶格结构,那么将极大地促进并拓展一维纳米半导体材料作为基本模块在未来微纳电子器件中的应用。因此,这已经成为当前研究的主要焦点之一^[75,76]。目前,由 $n\text{-Si}/p\text{-Si}$ 、 Si/SiGe 、 InAs/InP 、 GaP/GaAs 等构成的一维超晶格结构已经被成功实现^[77-80]。然而,在 III-V 氮化物纳米超晶格结构研究方面,目前只有极少的几篇文献进行报道。

2004 年, Kim 等人采用 MO-HVPE 法成功制备了无位错的 InGaN/GaN 多量子阱纳米棒阵列,并在此基础上将其成功组装为高亮发光二极管器件^[81]。同年, Qian 等人采用 MOCVD 法成功获得了无位错 $n\text{-GaN}/\text{InGaN}/p\text{-GaN}$ 核/壳/壳纳米线结构,并将其组装成蓝光发光二极管和激光器^[82]。随后,于 2005 年,他们同样采用 MOCVD 法成功制备了以 $n\text{-GaN}$ 为核而以 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}/p\text{-AlGaIn}/p\text{-GaN}$ 为壳的核/壳纳米线异质结构,在此基础上实现了二极管的高效多彩发光^[83]。由此可见,在 III-V 氮化物纳米超晶格结构研究方面有待进一步地深入研究。

1.3 本章小结

本章对 III-V 氮化物的结构及基本性能进行了简要介绍,同时对 III-V 氮化物早期的纳米结构的研究进行了介绍,目的是了解在 III-V 氮化物纳米结构方面早期的开创性的工作。

参考文献

- [1] STRITE S, MORKOC H. GaN, AlN and InN: A review [J]. J. Vac. Sci. Technol. B, 1992, 10(4):1237-1266.
- [2] HELLMAN E S. The polarity of GaN; a critical review [J]. MRS Internet Journal of Nitride Semiconductor Research, 1998, 3:11-15.
- [3] MARUSKA H P, TIETJEN J J. The preparation and properties of vapor-deposition single-crystal-line GaN [J]. Appl. Phys. Lett., 1969, 15: