



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 1894771 B

(45) 授权公告日 2012.07.04

(21) 申请号 200380110999.5

(22) 申请日 2003.12.11

(85) PCT申请进入国家阶段日  
2006.07.20

(86) PCT申请的申请数据  
PCT/US2003/039355 2003.12.11

(87) PCT申请的公布数据  
W02005/064643 EN 2005.07.14

(73) 专利权人 加利福尼亚大学董事会  
地址 美国加利福尼亚州  
专利权人 独立行政法人科学技术振兴机构

(72) 发明人 迈克尔·D·科雷文  
斯蒂芬·P·登巴尔斯

(74) 专利代理机构 北京律盟知识产权代理有限  
责任公司 11287  
代理人 王允方 刘国伟

(51) Int. Cl.  
H01L 21/00(2006.01)  
H01L 21/20(2006.01)

(56) 对比文件

R. Langer. Giant electric fields in unstrained GaN single quantum wells. Applied Physics Letters 74 25. 1999, 74(25), 3827-3829.

Craven et. al.. Structural characterization of nonpolar a-plane GaN thinfilms grown on r-plane sapphire. Applied Physics Letters 81 3. 2002, 81(3), 469-471.

H. M. Ng. Molecular beam epitaxy of GaN/AlGaN multiple quantumwells on R-plane sapphire substrates. Applied Physics Letters 80 23. 2002, 80(23), 4369-4371.

审查员 韩冰

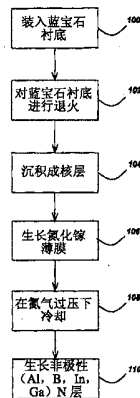
权利要求书 1 页 说明书 8 页 附图 4 页

(54) 发明名称

非极性 (Al, B, In, Ga)N 量子阱

(57) 摘要

本发明公开一种制作非极性 a-平面 GaN/(Al, B, In, Ga)N 多量子阱 (MQW) 的方法。a-平面 MQW 通过有机金属化学气相沉积 (MOCVD) 在适当的 GaN/蓝宝石模板层上生长, 阱宽度范围介于 20 Å 至 70 Å 之间。来自 a-平面 MQW 的室温光致发光 (PL) 发射能量遵循一使用自相容泊松薛定谔 (self-consistent Poisson-Schrodinger, SCPS) 计算来建模的方阱趋势。在 a-平面 MQW 的量子阱宽度为 52 Å 时获得最佳 PL 发射强度。



1. 一种用于形成一氮化物半导体装置的方法,其包括:
  - (a) 在一衬底上生长一个或多个非极性氮化镓 (GaN) 层,使得所述非极性 GaN 层的生长表面是一个非极性平面;及
  - (b) 在所述非极性 GaN 层的所述生长表面上生长一个或多个非极性 a- 平面 (Al, B, In, Ga)N 层,以形成至少一个非极性 a- 平面量子阱,其中所述非极性 a- 平面量子阱的最佳发射所需的量子阱宽度比一极性 c- 平面量子阱的最佳发射所需的量子阱宽度更大。
2. 如权利要求 1 所述的方法,其中为了优化自所述非极性 a- 平面量子阱的发射强度,所述非极性 a- 平面量子阱的宽度范围从大于**40Å**到**70Å**。
3. 如权利要求 2 所述的方法,其中自非极性 a- 平面量子阱的最大发射强度与约**50Å**的非极性 a- 平面量子阱宽度相关联。
4. 如权利要求 3 所述的方法,其中所述非极性 a- 平面量子阱具有**52Å**的最佳量子阱宽度。
5. 如权利要求 1 所述的方法,其中所述衬底为一 r- 平面蓝宝石衬底。
6. 如权利要求 1 所述的方法,其中所述生长步骤 (a) 包括:
  - (1) 对所述衬底进行退火;
  - (2) 在所述衬底上沉积一基于氮化物的成核层;
  - (3) 在所述成核层上生长所述 GaN 层;及
  - (4) 在氮气过压下对所述 GaN 进行冷却。
7. 如权利要求 1 所述的方法,其中所述非极性 a- 平面量子阱具有一掺杂势垒,其中所述掺杂势垒使用具有  $2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$  掺杂浓度的硅进行掺杂。
8. 如权利要求 1 所述的方法,其中所述非极性 a- 平面量子阱是一 GaN/AlGaIn 量子阱。
9. 如权利要求 1 所述的方法,其中相较于一极性 c- 平面量子阱所需的量子阱宽度,最大发射强度与所述非极性 a- 平面量子阱的一较厚的量子阱宽度相关联。
10. 如权利要求 1 所述的方法,其中所述非极性 a- 平面量子阱的最佳量子阱宽度主要取决于材料质量、界面粗糙度和激子的玻尔半径。
11. 如权利要求 1 所述的方法,其中所述非极性 a- 平面量子阱的宽度范围从**20Å**到**70Å**。
12. 一种氮化物半导体装置,其包括:
  - (a) 在一衬底上生长的一个或多个非极性氮化镓 (GaN) 层,使得所述非极性 GaN 层的生长表面是一个非极性平面;及
  - (b) 在所述非极性 (GaN) 层的所述生长表面上生长的一个或多个非极性 a- 平面 (Al, B, In, Ga)N 层所形成的一个或多个非极性 a- 平面量子阱,其中对于所述非极性 a- 平面量子阱的最佳发射所需的量子阱宽度比一极性 c- 平面量子阱的最佳发射所需的量子阱宽度更大。

## 非极性 (Al, B, In, Ga)N 量子阱

[0001] 相关申请案交叉参考

[0002] 本申请案是下列同在申请中且共同受让的专利申请案的部分接续申请案：

[0003] 由 Benjamin A. Haskell、Michael D. Craven、Paul T. Fini、Steven P. DenBaars、James S. Speck 及 Shuji Nakamura 于 2003 年 7 月 15 日提出申请且名称为“通过氢化物气相外延来生长位错密度减小的非极性氮化镓 (GROWTH OF REDUCED DISLOCATION DENSITY NON-POLAR GALLIUM NITRIDE BY HYDRIDE VAPOR PHASE EPITAXY)”的第 PCT/US03/21918 号国际专利申请案 (代理档号为 30794.93-WO-U1)，该申请案主张基于由 Benjamin A. Haskell、Michael D. Craven、Paul T. Fini、Steven P. DenBaars、James S. Speck 及 Shuji Nakamura 于 2002 年 12 月 16 日提出申请且名称为“通过氢化物气相外延来生长位错密度减小的非极性氮化镓 (GROWTH OF REDUCED DISLOCATION DENSITY NON-POLAR GALLIUM NITRIDE BY HYDRIDE VAPOR PHASE EPITAXY)”的第 60/433,843 号美国临时专利申请案 (代理档号为 30794.93-US-P1) 的优先权；

[0004] 由 Benjamin A. Haskell、Paul T. Fini、Shigemasa Matsuda、Michael D. Craven、Steven P. DenBaars、James S. Speck 及 Shuji Nakamura 于 2003 年 7 月 15 日提出申请且名称为“通过氢化物气相外延来生长平坦的非极性 A 平面氮化镓 (GROWTH OF PLANAR, NON-POLAR A-PLANE GALLIUM NITRIDE BY HYDRIDE VAPOR PHASE EPITAXY)”的第 PCT/US03/21916 号国际专利申请案 (代理档号为 30794.94-WO-U1)，该申请主张基于由 Benjamin A. Haskell、Paul T. Fini、Shigemasa Matsuda、Michael D. Craven、Steven P. DenBaars、James S. Speck 及 Shuji Nakamura 于 2002 年 12 月 16 日提出申请且名称为“用于通过氢化物气相外延来生长平坦的非极性 A 平面氮化镓的技术 (TECHNIQUE FOR THE GROWTH OF PLANAR, NON-POLAR A-PLANE GALLIUM NITRIDE BY HYDRIDE VAPOR PHASE EPITAXY)”的第 60/433,844 号美国临时专利申请案 (代理档号为 30794.94-US-P1) 的优先权；

[0005] 由 Michael D. Craven 及 James S. Speck 于 2003 年 4 月 15 日提出申请且名称为“通过有机金属化学气相沉积生长的非极性 A 平面氮化镓薄膜 (NON-POLAR A-PLANE GALLIUM NITRIDE THIN FILMS GROWN BY METAL ORGANIC CHEMICAL VAPOR DEPOSITION)”的第 10/413,691 号美国实用新型专利申请案 (代理档号为 30794.100-US-U1)，该申请案主张基于由 Michael D. Craven、Stacia Keller、Steven P. DenBaars、Tal Margalith、James S. Speck、Shuji Nakamura 及 Umesh K. Mishra 于 2002 年 4 月 15 日提出申请且名称为“基于非极性氮化镓的薄膜及异质结构材料 (NON-POLAR GALLIUM NITRIDE BASED THIN FILMS AND HETEROSTRUCTURE MATERIALS)”的第 60/372,909 号美国临时专利申请案 (代理档号为 30794.95-US-P1) 的优先权；

[0006] 由 Michael D. Craven、Stacia Keller、Steven P. DenBaars、Tal Margalith、James S. Speck、Shuji Nakamura 及 Umesh K. Mishra 于 2003 年 4 月 15 日提出申请且名称为“非极性 (Al, B, In, Ga)N 量子阱及异质结构材料与装置 (NON-POLAR (Al, B, In, Ga)N QUANTUM WELL AND HETEROSTRUCTURE MATERIALS AND DEVICES)”的第 10/413,690 号美国实用新型专利申请案 (代理档号为 30794.101-US-U1)，该申请案主张基于由 Michael D. Craven、

Stacia Keller、Steven P. DenBaars、Tal Margalith、James S. Speck、Shuji Nakamura 及 Umesh K. Mishra 于 2002 年 4 月 15 日提出申请且名称为“基于非极性氮化镓的薄膜及异质结构材料 (NON-POLAR GALLIUM NITRIDE BASED THIN FILMS AND HETEROSTRUCTURE MATERIALS)”的第 60/372,909 号美国临时专利申请案 (代理档号为 30794.95-US-P1) 的优先权；

[0007] 由 Michael D. Craven、Stacia Keller、Steven P. DenBaars、Tal Margalith、James S. Speck、Shuji Nakamura 及 Umesh K. Mishra 于 2003 年 4 月 15 日提出申请且名称为“非极性氮化镓薄膜中位错的减少 (DISLOCATION REDUCTION IN NON-POLAR GALLIUM NITRIDE THIN FILMS)”的第 10/413,913 号美国实用新型专利申请案 (代理档号为 30794.102-US-U1)，该申请案主张基于由 Michael D. Craven、Stacia Keller、Steven P. DenBaars、Tal Margalith、James S. Speck、Shuji Nakamura 及 Umesh K. Mishra 于 2002 年 4 月 15 日提出申请且名称为“基于非极性氮化镓的薄膜及异质结构材料 (NON-POLAR GALLIUM NITRIDE BASED THIN FILMS AND HETEROSTRUCTURE MATERIALS)”的第 60/372,909 号美国临时专利申请案 (代理档号为 30794.95-US-P1) 的优先权；

[0008] 所有这些申请案均以引用方式并入本文中。

## 技术领域

[0009] 本发明涉及半导体材料、方法及装置，且更具体而言涉及非极性 (Al, B, In, Ga)N 量子阱。

## 背景技术

[0010] (注意：本申请案引用多个不同的出版物，这些出版物在本说明书中自始至终由一个或多个参考编号指示。这些不同出版物按照这些参考编号排序而形成的列表可见于下文中标题为“参考文献”的部分中。所有这些出版物均以引用方式并入本文中。)

[0011] 目前，现有技术水平的基于氮化物的外延装置结构是沿在热力学上稳定的纤维锌矿 (Al, Ga, In)N 单位晶胞的极性 c 轴生长。因氮化物 [1] 具有强的极化常数，故异质结构内的界面极化间断性会产生强内部电场的固定片电荷相关联。这些“内建”的极化感应电场会限制采用量子阱有源区的光电装置的性能。具体而言，由内部场引起的电子与空穴波动函数在空间上的分离，即量子约束斯塔克效应 (QCSE)，会减小振荡器跃迁强度且最终限制量子阱 [2] 的再结合效率。沿非极化方向生长氮化物晶体会提供一种制成不受这些强极化感应电场影响的基于氮化物的量子结构的有效方法，这是因为极轴位于薄膜的生长平面内。

[0012] 最初是通过使用铝酸锂衬底进行等离子体辅助的分子束外延 (MBE) 来证实 (1  $\bar{1}00$ )<sub>m</sub>-平面 GaN/AlGa<sub>n</sub>N 多量子阱 (MQW) 结构 [3]。自从该第一次证实以后，又将通过氮化物气相外延 (HVPE) 而生长的独立 m-平面 GaN 衬底用于通过 MBE [4] 及有机金属化学气相沉积 (MOCVD) [5] 两种方式进行的后续外延 GaN/AlGa<sub>n</sub>N MQW 生长。除 m-平面外，还对通过 MBE [6] 及 MOCVD [7] 两种方式在 r-平面蓝宝石衬底上生长的 a-平面 GaN/AlGa<sub>n</sub>N MQW 结构进行了研究。这些结构的光学特性已表明，非极性量子阱不受极化感应电场的影响。

[0013] 本发明阐述 a-平面 GaN/AlGa<sub>n</sub>N MQW 发射对 GaN 量子阱宽度的相依性。此外，对通

过 MOCVD 生长的 a- 平面及 c- 平面 MQW 的 GaN 阱宽度范围的研究还表明了非极性取向所独有的发射特征。

### 发明内容

[0014] 本发明阐述一种制作非极性 a- 平面 GaN/(Al, B, In, Ga)N 多量子阱 (MQW) 的方法。就此而言, a- 平面 MQW 通过有机金属化学气相沉积 (MOCVD) 在适当的 GaN/ 蓝宝石模板层上生长, 阱宽度范围介于 20Å 至 70Å 之间。来自 a- 平面 MQW 的室温光致发光 (PL) 发射能量遵循一使用自相容泊松薛定谔 (self-consistent Poisson-Schrodinger, SCPS) 计算来建模的方阱趋势。在 a- 平面 MQW 的量子阱宽度为 52Å 时获得最佳 PL 发射强度。

### 附图说明

[0015] 现参见图式, 在所有图式中, 相同的参考标记均代表对应的部分:

[0016] 图 1 为一图解说一种根据本发明一较佳实施例用于形成非极性 a- 平面 GaN/(Al, B, In, Ga)N 量子阱的方法的各步骤的流程图。

[0017] 图 2 为一对同时再生长的 a- 平面 (69 Å 的 GaN)/(96 Å 的 Al<sub>0.16</sub>Ga<sub>0.84</sub>N) 及 c- 平面 (72 Å 的 GaN)/(98 Å 的 Al<sub>0.16</sub>Ga<sub>0.84</sub>N)MQW 堆叠进行高分辨率 x 射线衍射 (HRXRD) 扫描的曲线图。除量子阱尺寸外, HRXRD 曲线还提供贯穿半峰全宽 (FWHM) 卫星峰值的 MQW 界面质量的定性比较。

[0018] 图 3(a) 及 (b) 为阱宽度范围从 20 Å 至 70 Å 的 (a) a- 平面及 (b) c- 平面 GaN/(100 Å 的 Al<sub>0.16</sub>Ga<sub>0.84</sub>N)MQW 的室温 PL 谱的曲线图。每一曲线上的垂直灰线均表示 GaN 块材层的能带边缘。

[0019] 图 4 为一表示 a- 平面与 c- 平面 MQW 的室温 PL 发射能量对阱宽度的相依性的曲线图。虚线为对一平带 GaN/(100 Å 的 Al<sub>0.16</sub>Ga<sub>0.84</sub>N)MQW 进行自相容泊松薛定谔 (SCPS) 计算的结果。对于这两个生长取向而言, 发射能量均随着阱宽度的增加而减小, 但在临界阱宽度以上, c- 平面 MQW 发射能量红移至 GaN 层的能带边缘以下。

[0020] 图 5 为在 a- 平面及 c- 平面两种生长取向情况下归一化室温 PL 强度随 GaN 量子阱宽度变化的曲线图。每一种取向的数据均分别归一化, 因此无法在 a- 平面与 c- 平面 MQW 的相对强度之间进行直接比较。

### 具体实施方式

[0021] 在下文对较佳实施例的说明中, 将参照附图, 这些附图构成本发明的一部分且以举例说明方式显示其中可实践本发明的具体实施例。

[0022] 应了解, 亦可使用其它实施例且可作出结构改变, 此并不背离本发明的范围。

[0023] 概述

[0024] 基于非极性氮化物的半导体晶体不会受到能支配基于极性氮化物的量子结构特性的极化感应电场的影响。由于纤维锌矿氮化物单位晶胞的极化轴与极性氮化物晶体的生长方向平行对齐, 因此在极性氮化物异质结构中存在内部电场。这些“内建”的场对现有技术水平的光电及电子装置存在有害的影响。而通过沿非极性方向生长氮化物晶体, 就能实现不受极化感应电场影响的量子结构。由于一给定量子阱的能带会根据生长方向而变化,

因此必须应用不同的科学原理来设计高性能非极性量子阱。本发明阐述用于制作最佳化非极性量子阱的设计原理。

#### [0025] 过程步骤

[0026] 图 1 为一流程图,其图解说明一种根据本发明一较佳实施例用于形成量子阱的方法的各步骤。此方法的各步骤会在 a- 平面 GaN/r- 平面蓝宝石模板层上生长非极性 a- 平面 GaN/AlGaN MQW。

[0027] 方块 100 代表将一蓝宝石衬底装入一垂直且紧密排列的淋浴头型 MOCVD 反应器中。对此步骤而言,可从商家购得表面晶体取向处于蓝宝石 r- 平面的  $\pm 2^\circ$  内的开盒即用的蓝宝石衬底。不需要在将蓝宝石衬底装入 MOCVD 反应器之前实施离场制备,但可使用对蓝宝石衬底的离场清理作为一预防措施。

[0028] 方块 102 代表在高温 ( $> 1000^\circ\text{C}$ ) 下就地对蓝宝石衬底进行退火,这会提高衬底表面在原子规模上的质量。在退火后,降低衬底温度以便进行随后的低温成核层沉积。

[0029] 方块 104 代表沉积一薄的低温、低压、基于氮化物的成核层作为蓝宝石衬底上的缓冲层。此类层通常用于 c- 平面 (0001) 氮化物半导体的异质外延生长。在该较佳实施例中,所述成核层是由 (但不限于) 在约  $400\text{--}900^\circ\text{C}$  及 1 个大气压下沉积的 1-100 纳米 (nm) 的 GaN 构成。

[0030] 在沉积所述成核层后,使反应器温度升至一高温,且方块 106 代表在沉积在衬底上的成核层上一次或多次生长经无意掺杂 (UID) 的 a- 平面 GaN 层至约  $1.5\ \mu\text{m}$  的厚度。高温生长条件包括 (但不限于) 约  $1100^\circ\text{C}$  的生长温度、0.2 个大气压或更低的生长压力、每分钟  $30\ \mu\text{mol}$  的 Ga 流量及每分钟  $40,000\ \mu\text{mol}$  的 N 流量,由此提供约等于 1300 的 V/III 比率。在该较佳实施例中,用作 III 族及 V 族源的前驱物为三甲基镓、氨及乙硅烷,但亦可使用替代前驱物。另外,在不偏离本发明范围的情况下,可改变生长条件来产生不同的生长速率,例如每秒 5 与  $9\ \text{\AA}$  之间。

[0031] 在完成高温生长步骤后,方块 108 代表在氮气过压情况下对外延 a- 平面 GaN 层进行冷却。

[0032] 最后,方块 110 代表正在 a- 平面 GaN 层上生长的一个或多个 (Al, B, In, Ga)N 层。较佳地,这些生长层包括以  $\sim 2 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$  的 Si 浓度掺杂的  $\sim 100\ \text{\AA}$   $\text{Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{N}$  障壁层。此外,可视需要重复上述方块。在一个实施例中,将方块 110 重复 10 次来形成宽度范围从约  $20\ \text{\AA}$  至约  $70\ \text{\AA}$  的 UID GaN 阱。

#### [0033] 实验结果

[0034] 对于非极性氮化物量子阱而言,存在平能带分布但不存在 QCSE。因此,与极性量子阱相比,预计非极性量子阱发射会遵循不同的趋势。主要是,非极性量子阱表现出提高的再结合效率,且可自更厚的量子阱进行强发射。此外,最佳非极性量子阱发射所需的量子阱宽度大于极性量子阱发射所需的量子阱宽度。

[0035] 下文阐述非极性 GaN/ ( $\sim 100\ \text{\AA}$   $\text{Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{N}$ ) MQW 与 c- 平面结构相比较的随量子阱宽度变化的室温 PL 特性。为实现此目的,通过 MOCVD 以介于约  $20\ \text{\AA}$  至  $70\ \text{\AA}$  之间的阱宽度在适当的 GaN/ 蓝宝石模板层上同时再生长 10 个周期的 a- 平面及 c- 平面 MQW 结构。

[0036] 对在三重轴模式中使用  $\text{CuK}_{\alpha 1}$  辐射以 Philips MRD XPERT PRO™ 衍射仪所作的 HRXRD 测量 [9] 进行的运动学分析证实了量子阱尺寸及障壁层成分。借助使用 He-Cd 激光

器（激发功率密度 $\sim 10\text{W}/\text{cm}^2$ ）的 325nm 线进行室温连续波（c-w）PL 谱测量来表征 MQW 发射特性。

[0037] 图 2 为一对同时再生长的 a- 平面（69 Å 的 GaN/96 Å 的  $\text{Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{N}$ ）及 c- 平面（72 Å 的 GaN/98 Å 的  $\text{Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{N}$ ）MQW 堆叠进行的 HRXRD 扫描的曲线图。除量子阱尺寸外，HRXRD 分布还提供贯穿 FWHM 卫星峰值的 MQW 界面质量的定性比较。

[0038] 分别在 GaN（11  $\bar{2}0$ ）及（0004）反射周围对所述 a- 平面及 c- 平面结构进行同轴  $2\theta - \omega$  扫描。对 x 射线分布进行的分析得出了  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  障壁层的铝成分 x 及量子阱尺寸（阱及障壁层厚度）二者，对于同时生长的 a- 平面及 c- 平面采样，其相差不超过 7%，此表明一质量传输受限制的 MOCVD 生长状态。除来自 GaN 层的强反射外，这两个 HRXRD 分布还表明超晶格（SL）峰值向外达到二阶。SL 峰值的 FWHM 可为量子阱界面质量提供一定性量度 [10]；因此，通过图 2 中所示的扫描，可断定 a- 平面 MQW 的界面质量差于 c- 平面样本的界面质量。尽管 a-GaN 模板中贯穿 MQW 的穿透位错密度很大，然而对 a- 平面 MQW 结构质量的分析（阐述于 [9] 中）仍表明存在一明显的界面。与 c- 平面相比的穿透位错（TD）密度升高且 a- 平面生长的表面粗糙度增大很可能是 a- 平面 MQW 界面粗糙度变大及 SL 峰值变宽的原因。另外，据估计，a- 平面 TD 密度大于 c- 平面 TD 密度约两个数量级。

[0039] 图 3(a) 及 (b) 为阱宽度范围从 20 Å 至 70 Å 的 (a) a- 平面及 (b) c- 平面 GaN/（100 Å 的  $\text{Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{N}$ ）MQW 的室温 PL 谱的曲线图。每一曲线上的垂直灰线均表示 GaN 块材的能带边缘。

[0040] 不管晶体取向如何，当量子局限效应减小时，MQW PL 的发射均会随着量子阱宽度的增加而移至更长的波长（等效地，PL 发射减少）。

[0041] 具体而言，随着阱宽度的增加，a- 平面 MQW 的发射能量稳定地接近 GaN 块材的能带边缘但不会红移出 GaN 块材的能带边缘。UID a-GaN 薄膜的电阻性质会阻止在室温下进行能带边缘发射，从而如在图 3(a) 中所观察到仅自量子阱发射。

[0042] 相反地，当 GaN 量子阱宽度从 38 Å 增加至 50 Å 时，c- 平面 MQW 发射能量红移至 GaN 能带边缘以下。对于宽于 50 Å 的极性 GaN 阱而言，只检测到自下伏 GaN 进行的 PL 发射。c-GaN 缓冲发射的出现意味着 c- 平面模板具有一低于 a- 平面模板的固有点缺陷密度。而且，在非极性及极性 MQW 二者中均观察到黄带发射；因此，深陷阱能级的起源很可能是保持 a- 平面形态所需的生长条件而不是非极性取向的特征。

[0043] PL 发射谱的这两个主要特征 - 发射能量及发射强度 - 分别在图 4 及 5 中归纳成随量子阱的宽度而变化。因存在量子局限效应，发射能量随阱宽度的增大而减小。

[0044] 图 4 为一 a- 平面及 c- 平面 MQW 的室温 PL 发射能量对阱宽度的相依性的曲线图。对于所有被研究的量子阱宽度而言，a- 平面 MQW 发射均会相对于 GaN 块材能带边缘蓝移，且当量子局限效应使量子阱的基态能量升高时，所述蓝移量会随阱宽度的减小而增加。使用如图 4 中虚线所示的方阱 SCPS 计算 [11] 来对 a- 平面 MQW 的发射能量趋势进行精确地建模。理论与实验之间的一致性证实，非极性 MQW 的发射不受极化感应电场影响。尽管存在此种一致性，然而理论模型会随着量子阱宽度的减小而逐渐将实验数据估高 15 至 35 meV。这种偏离的趋势可通过激子结合能量随 GaN/AlGaIn MQW 的阱宽度的减小而预期增加来解释 [12, 13]，因为在 SCPS 模型中未虑及激子结合能量。相反地，图 4 显示 c- 平面 MQW 发射随

阱宽度的增加的显著红移这是一种普遍观察到的取决于 QCSE 的趋势 [14-18]。具体而言, 实验性 c- 平面 MQW 发射能量趋势与由 Grandjean 等人所提出的极性 QW 基态的模型 [13] 相一致。通过对所述实验数据进行内插, GaN 阱宽度大于  $\sim 43\text{\AA}$  的 c- 平面 MQW 的发射低于 GaN 块材能带边缘。增加阱厚度会增加量子阱内的载流子的空间间隔并降低再结合效率直至再也观察不到 MQW 发射 (阱宽于  $50\text{\AA}$ ) 为止。先前报道的 a- 平面 ( $107\text{\AA}$  GaN)/( $101\text{\AA}$   $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}$ ) MQW 的发射 [9] 提供了非极性 MQW 量子效率提高的额外证据。

[0045] 图 5 为在 a- 平面及 c- 平面两种生长取向情况下归一化的室温 PL 强度随 GaN 量子阱宽度变化的曲线图。每一种取向的数据均分别归一化, 因此无法在 a- 平面与 c- 平面 MQW 的相对强度之间进行直接比较。因模板层的微结构质量明显不同, 故 a- 与 c- 平面 MQW 发射强度之间的直接比较将不具有说服力。

[0046] 最大 a- 平面 MQW 发射强度与  $52\text{\AA}$  的最佳量子阱宽度相关联, 而最大 c- 平面发射强度则是在  $28\text{\AA}$  宽的阱情况下观察到的。由于 QCSE, 最佳发射强度是从相对薄的极性 GaN 量子阱 ( $20\text{\AA}$ - $35\text{\AA}$ ) 获得 - 此视 AlGaIn 障壁层的厚度及成分而定 [13]。厚阱中再结合效率的降低及因异质界面处非辐射性跃迁而引起的再结合的减少与薄阱 [19] 外的电子波动函数扩展之间的平衡决定最佳 c- 平面阱宽度。相反地, 因非极性 MQW 不会经受 QCSE, 故预计最佳阱宽度取决于材料质量、界面粗糙度及激子的玻尔半径。虽然 a- 平面结构的界面粗糙度大于 c- 平面, 但非极性取向的有利效果是明显的。还应注意, 随着非极性表面及界面质量的提高, 最佳阱宽度将很可能偏离对于这些样本所观察到的最佳宽度。

[0047] 参考文献

[0048] 下列参考文献以引用方式并入本文中:

[0049] 1. F. Bernardini, V. Fiorentini, and D. Vanderbilt, Phys. Rev. B 56, R10024(1997).

[0050] 2. T. Takeuchi, H. Amano, and I. Akasaki, Jpn. J. Appl. Phys. 39, 413(2000).

[0051] 3. P. Waltereit, O. Brandt, A. Trampert, H. T. Grahn, J. Menniger, M. Ramsteiner, M. Reiche, and K. H. Ploog, Nature 406, 865(2000).

[0052] 4. A. Bhattacharyya, I. Friel, S. Iyer, T. C. Chen, W. Li, J. Cabalu, Y. Fedyunin, K. F. Ludwig, T. D. Moustakas, H. P. Maruska, D. W. Hill, J. J. Gallagher, M. C. Chou, and B. Chai, J. Cryst. Growth 251, 487(2003).

[0053] 5. E. Kuokstis, C. Q. Chen, M. E. Gaevski, W. H. Sun, J. W. Yang, G. Simin, M. A. Khan, H. P. Maruska, D. W. Hill, M. C. Chou, J. J. Gallagher, and B. Chai, Appl. Phys. Lett. 81, 4130(2002).

[0054] 6. H. M. Ng, Appl. Phys. Lett. 80, 4369(2002).

[0055] 7. M. D. Craven, S. H. Lim, F. Wu, J. S. Speck, and S. P. DenBaars, Appl. Phys. Lett. 81, 469(2002).

[0056] 8. B. P. Keller, S. Keller, D. Kopolnek, W. N. Jiang, Y. F. Wu, H. Masui, X. Wu, B. Heying, J. S. Speck, U. K. Mishra, and S. P. Denbaars, J. Electron. Mater. 24, 1707(1995).

[0057] 9. M. D. Craven, P. Waltereit, F. Wu, J. S. Speck, and S. P. DenBaars, Jpn. J. Appl. Phys., Part 2, 42, L235(2003).



- [0058] 10. G. Bauer and W. Richter, Optical characterization of epitaxial semiconductor layers (Springer Verlag, Berlin, New York, 1996).
- [0059] 11. I. H. Tan, G. L. Snider, L. D. Chang, and E. L. Hu, J. Appl. Phys. 68, 4071 (1990).
- [0060] 12. P. Bigenwald, P. Lefebvre, T. Bretagnon, and B. Gil, Phys. Stat. Sol. B 216, 371 (1999).
- [0061] 13. N. Grandjean, B. Damlano, S. Dalmaso, M. Leroux, M. Laugt, and J. Massies, J. Appl. Phys. 86, 3714 (1999).
- [0062] 14. N. Grandjean, J. Massies, and M. Leroux, Appl. Phys. Lett. 74, 2361 (1999).
- [0063] 15. I. Jin Seo, H. Kollmer, J. Off, A. Sohmer, F. Scholz, and A. Hangleiter, Phys. Rev. B 57, R9435 (1998).
- [0064] 16. R. Langer, J. Simon, V. Ortiz, N. T. Pelekanos, A. Barski, R. Andre, and M. Godlewski, Appl. Phys. Lett. 74, 3827 (1999).
- [0065] 17. G. Traetta, A. Passaseo, M. Longo, D. Cannoletta, R. Cingolani, M. Lomascolo, A. Bonfiglio, A. Di Carlo, F. Delia Sala, P. Lugli, A. Botchkarev, and H. Morkoc, Physica E7, 929 (2000).
- [0066] 18. M. Leroux, N. Grandjean, M. Laugt, J. Massies, B. Gil, P. Lefebvre, and P. Bigenwald, Phys. Rev. B 58, R13371 (1998).
- [0067] 19. A. Kinoshita, H. Hirayama, P. Riblet, M. Ainoya, A. Hirata, and Y. Aoyagi, MRS Internet J. Nitride Semicond. Res. 5, W1 1.32 (2000).

[0068] 结论

[0069] 就此结束对本发明较佳实施例的说明。下文将阐述用于实现本发明的一些替代实施例。

[0070] 例如,在替代实施例中可使用非极性 (Al, In, Ga)N 量子阱及异质结构设计和 MOCVD 生长条件的变化形式。此外,除所生长的量子阱数量外,各层的特定厚度及成分均为量子阱结构设计所固有的变量且可用于本发明的各替代实施例中。此外,特定 MOCVD 生长条件决定量子阱结构层的尺寸及成分。就此而言, MOCVD 生长条件依赖于反应器且可因特定反应器设计而异。对于目前在工业及学术中所使用的各种各样的反应器设计,该过程可具有诸多种变化形式。

[0071] 诸如生长温度、生长压力、V/III 比率、前驱物流量及源材料等条件也可存在变化形式,此并不背离本发明的范围。控制界面质量是该过程的另一重要方面且与特定反应器设计的流量切换能力直接相关。生长条件的不断优化将使对上述集成量子阱层的成分及厚度控制更加精确。

[0072] 另外,除 MOCVD 以外的若干种不同的生长方法也可用于本发明。例如,所述生长方法也可为分子束外延 (MBE)、液相外延 (LPE)、氢化物气相外延 (HVPE)、升华或等离子体增强化学气相沉积 (PECVD)。

[0073] 最后,可采用除蓝宝石以外的其他衬底。这些衬底包括碳化硅、氮化镓、硅、氧化锌、氮化硼、铝酸锂、铈酸锂、锆、氮化铝及镓酸锂。

[0074] 为便于例示及说明起见,上文已提供了对本发明一个或多个实施例的说明。其并非旨在作为穷尽性说明或将本发明限定于所公开的确切形式。根据上述教示可作出诸多种

修改及变动。本发明的范围并不打算由本详细说明加以限定,而时由随附权利要求书加以限定。

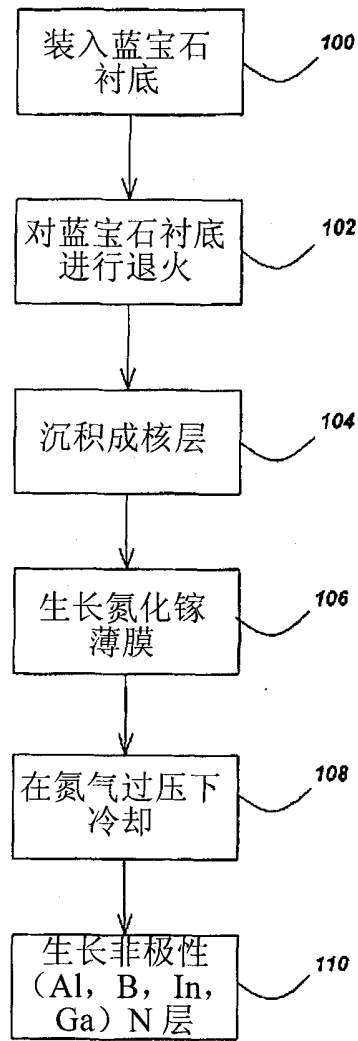


图 1

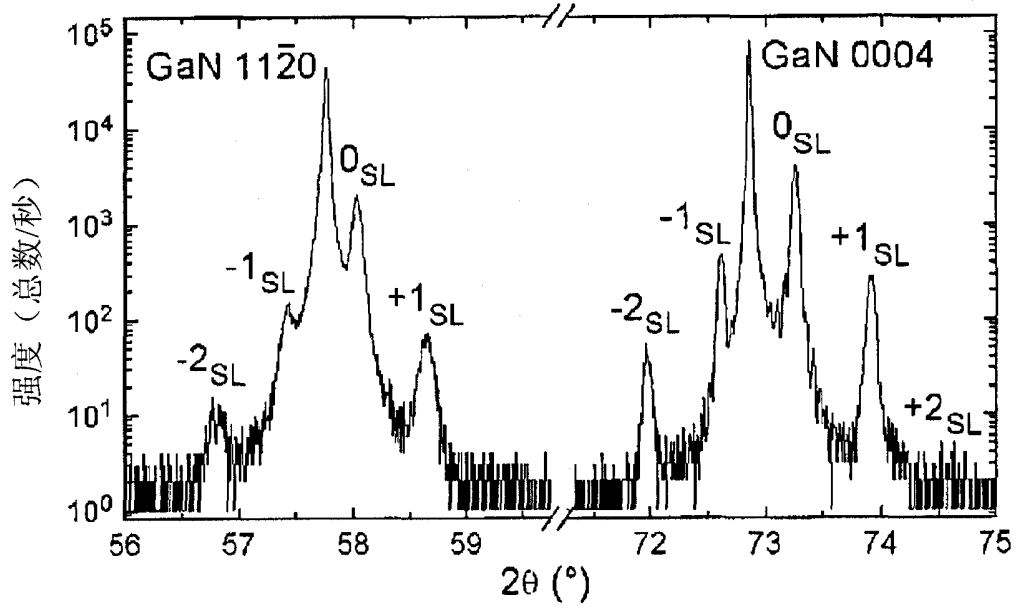


图 2

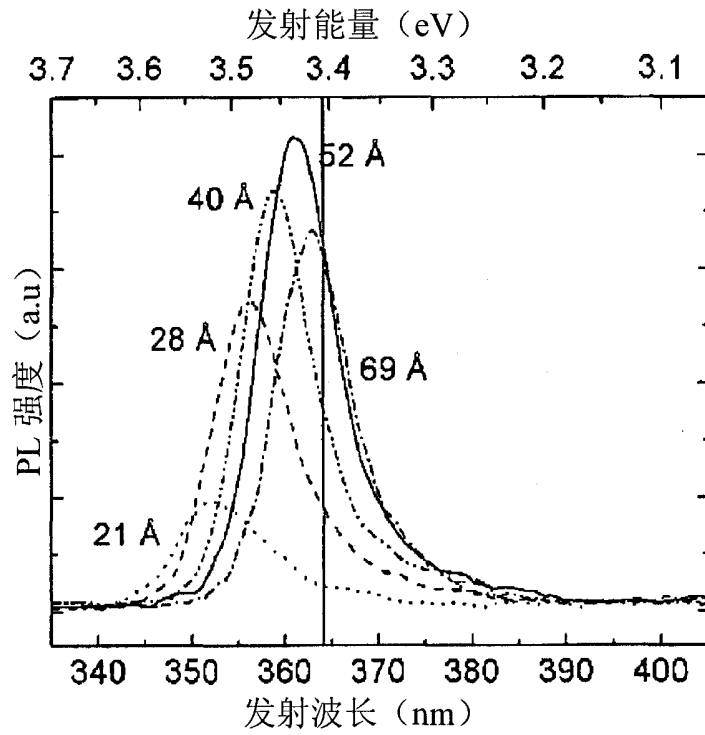


图 3(a)

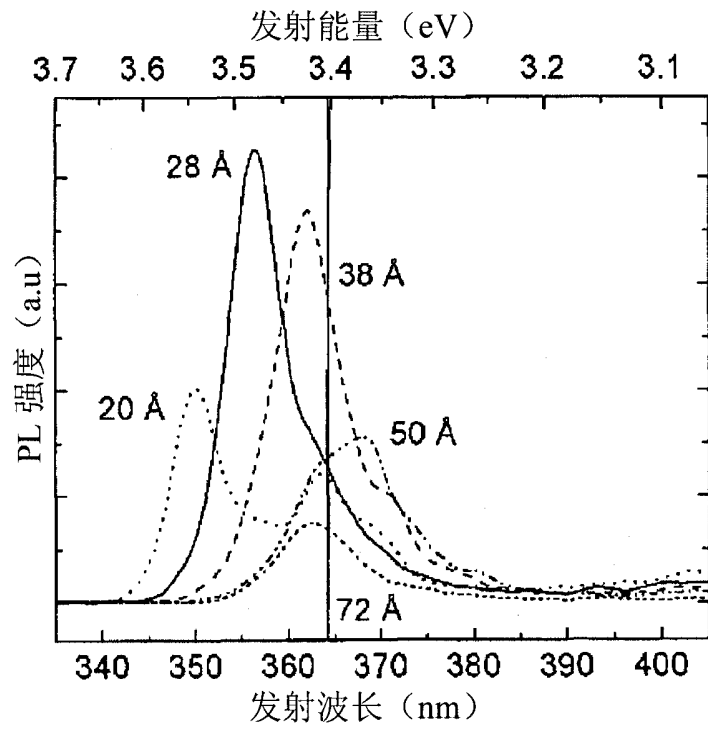


图 3(b)

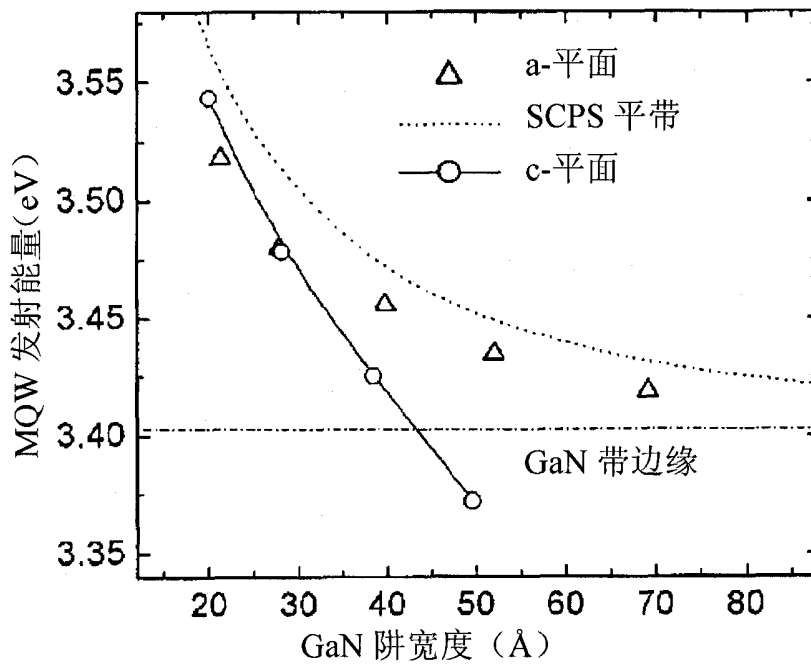


图 4

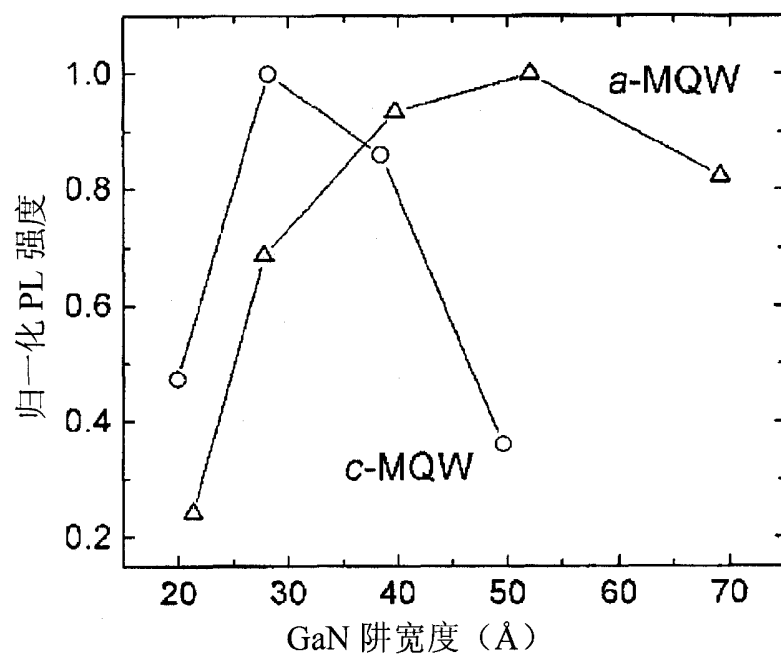


图 5