



Nano-LED半极性面InGaN/GaN单量子阱结构极化和光谱仿真分析

王鑫炜, 刘宏伟, 高克, 张赞允, 李晓云, 宁平凡, 王笃祥, 牛萍娟

引用本文:

王鑫炜, 刘宏伟, 高克, 等. Nano-LED半极性面InGaN/GaN单量子阱结构极化和光谱仿真分析[J]. *发光学报*, 2021, 42(1): 111-117.

WANG Xin-wei, LIU Hong-wei, GAO Ke, et al. Polarization and Spectral Simulation of Nano-LED Semi-polarized InGaN/GaN Single Quantum Well[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2021, 42(1): 111-117.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CJL.20200285>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

类金字塔状GaN微米锥的形貌及发光性能

Morphology and Optical Properties of GaN Micro-pyramid Structure

发光学报. 2019, 40(1): 23-29 <https://doi.org/10.3788/fgxb20194001.0023>

高效InGaN/AlInGaN发光二极管的结构设计及其理论研究

Simulation and Design of High Efficiency InGaN/AlInGaN Based Light-emitting Diodes

发光学报. 2016, 37(2): 208-212 <https://doi.org/10.3788/fgxb20163702.0208>

具有三角形InGaN/GaN多量子阱的高内量子效率的蓝光LED

High Internal Quantum Efficiency Blue Light-emitting Diodes with Triangular Shaped InGaN/GaN Multiple Quantum Wells

发光学报. 2013, 34(1): 66-72 <https://doi.org/10.3788/fgxb20133401.0066>

In_xGa_{1-x}N量子阱蓝光LED光电特性与量子阱束缚态能级的关系

Relationship Between In_xGa_{1-x}N Quantum-well Blue LED's Photoelectric Properties and Quantum Well Bound State Energy Level

发光学报. 2013, 34(7): 911-917 <https://doi.org/10.3788/fgxb20133407.0911>

垒层厚度对InGaN/GaN多量子阱电注入发光性能的影响及机理

Barrier Thickness Designing of InGaN/GaN Multiple Quantum Well for Electroluminescence

发光学报. 2018, 39(2): 208-213 <https://doi.org/10.3788/fgxb20183902.0208>

文章编号: 1000-7032(2021)01-0111-07

Nano-LED 半极性面 InGaN/GaN 单量子阱结构极化和光谱仿真分析

王鑫炜^{1,2}, 刘宏伟^{1,2*}, 高 克¹, 张赞允¹,
李晓云¹, 宁平凡¹, 王笃祥³, 牛萍娟^{1,2}

(1. 天津工业大学 电子与信息工程学院, 天津 300387;

2. 天津市光电检测与系统重点实验室, 天津 300387; 3. 天津三安光电有限公司, 天津 300384)

摘要: 通过有限元分析, 利用 COMSOL 软件模拟计算了 Nano-LED 半极性面 InGaN/GaN 单量子阱距离边缘不同位置的应变和压电极化分布, 并结合模拟得到的量子阱极化电场, 采用 Silvaco 软件计算得到了 Nano-LED InGaN/GaN 单量子阱距离边缘不同位置的发光光谱。应变和压电极化分布结果表明, 其在距离半极性面量子阱边缘 100 nm 的范围内变化明显。然而, 在半极性面内部, 应力释放现象消失, 压电极化电场变强, 量子限制 Stark 效应导致 InGaN/GaN 单量子阱发光强度降低。发光光谱分析表明, 60 mA 工作电流下, Nano-LED InGaN/GaN 半极性面量子阱边缘位置的光谱峰值最大蓝移达 21 nm, 其原因在于边缘的应力释放作用。Nano-LED 非极性面和半极性面的整体光谱分析表明, 在固定 Nano-LED 高度条件下, Nano-LED 的直径越大, 半极性面占比越高, 器件整体发光光谱的双峰值现象越明显, 这将为多波长 Nano-LED 器件的设计提供借鉴。

关键词: Nano-LED; 量子阱应变; 极化效应; 有限元分析

中图分类号: O482.31

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20200285

Polarization and Spectral Simulation of Nano-LED Semi-polarized InGaN/GaN Single Quantum Well

WANG Xin-wei^{1,2}, LIU Hong-wei^{1,2*}, GAO Ke¹, ZHANG Zan-yun¹,
LI Xiao-yun¹, NING Ping-fan¹, WANG Du-xiang³, NIU Ping-juan^{1,2}

(1. School of Electronics and Information Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China;

2. Tianjin Key Laboratory of Optoelectronic Detection Technology and System, Tianjin 300387, China;

3. Tianjin San'an Optoelectronics Co. LTD., Tianjin 300384, China)

* Corresponding Author, E-mail: hwliu@foxmail.com

Abstract: In this paper, the strain and the piezoelectric polarization distribution of Nano-LED semi-polar InGaN/GaN single quantum well (QW) have been analyzed by COMSOL. The radiation spectrum characteristic of the quantum well has also been calculated by using finite element method (Silvaco). The simulated results indicate that the piezoelectric polarization changed significantly within 100 nm of the QW edge. Through the QW strain distribution, the stress release is more obvious at the edge of InGaN/GaN QW. But in the central of the semi-polarized plane, the strain release

收稿日期: 2020-09-26; 修订日期: 2020-10-29

基金项目: 国家自然科学基金(61504093); 国家留学基金委资助访问学者项目(201809345004); 天津市科技计划(19JCTPJC48000, 18ZXCLGX00090, 18JCYBJC85400); 天津市教委科研计划(2017ZD06); 天津市高等学校创新团队培养计划(TD13-5035)资助项目

Supported by National Natural Science Foundation of China(61504093); Visiting Scholar Program of China Scholarship Council (201809345004); Project of TSTC(19JCTPJC48000, 18ZXCLGX00090, 18JCYBJC85400); Scientific Research Project of Tianjin Municipal Commission of Education(2017ZD06); Training Project of Innovation Team(TD13-5035)

vanishes and the piezoelectric polarization increases. Thus, the luminous efficiency of QW decreases because of the quantum confinement Stark effect (QCSE). At the edge of semipolar InGaN/GaN QW, blue shift about 21 nm is observed at driven current of 60 mA. The simulated emission spectra of Nano-LED show that the double peak is obvious when the proportion of semi-polar QW is higher in the Nano-LED device, which can be used as a reference for the multi-spectrum Nano-LED design.

Key words: Nano-LED; quantum well strain; polarization; finite element;

1 引 言

GaN 纳米发光二极管 (Nano-LED) 是基于纳米尺度 GaN 三维结构的发光二极管, 得益于其纳米尺度、高响应速度和高光效等特性, 其在微纳显示、高速可见光通信、环境监测和光学传感等多种领域具有广阔的应用前景^[1-4]。Nano-LED 为亚微米级三维核壳结构^[5-8]。Nano-LED 由非极性面生长的侧壁及半极性面生长的顶端组成, 其中非极性面生长的侧壁不受材料极化影响, 而半极性面生长的顶端量子阱将会受到自发极化电场和压电极化电场的影响^[6], 导致 Nano-LED 整体的发光光谱及发光强度变化^[9]。在 Nano-LED 单色高效发光器件的制备过程中, 提高 Nano-LED 器件中的纳米柱高度、利用 Nano-LED 高比表面积增加侧壁非极性面发光面积、减小顶部半极性面的影响是目前的研究热点^[9-11], 但过高的纳米柱高度为后续 Nano-LED 非极性面侧壁材料生长带来一定的困难^[12]。以高度 5 mm、直径 1 mm 的 Nano-LED 器件为例, 半极性面和非极性面面积比为 4.33%, 对于高度为 1 mm、直径为 1 mm 的器件, 半极性面和非极性面面积比增加为 21.6%^[13]。因此, 在 Nano-LED 整体结构中, 顶部半极性面仍会占有一部分发光面积, 其对器件整体性能的影响不能忽略。

Nano-LED 为纳米尺度, 半极性面量子阱边缘位置应力释放作用明显^[14], 边缘应力释放作用导致压电极化的改变, 对半极性面 InGaN/GaN 单量子阱发光特性影响较大, 导致 Nano-LED 的整体器件光谱中出现双峰值现象, 该现象将为基于 Nano-LED 多波长的可见光通信提供波分复用的基础^[15]。相比普通发光二极管, 半极性面 Nano-LED 的尺寸效应导致半极性面量子阱中受边缘应力释放影响的比例增多, 增大了半极性面边缘

应变释放所导致的光谱偏移程度, 对 Nano-LED 整体器件发光光谱的影响随之增大。因此, 需要深入研究 Nano-LED 半极性面上生长的量子阱的边缘应变极化对 Nano-LED 量子阱整体发光光谱的影响规律。

本文利用最基本的 Nano-LED InGaN/GaN 单量子阱有限元模型来分析半极性面 Nano-LED InGaN/GaN 单量子阱应变变化, 利用 COMSOL 仿真软件计算出量子阱在距离边缘不同位置的应变, 推导出其压电极化分布。然后, 采用 Silvaco 仿真软件计算不同压电极化条件下半极性面 Nano-LED InGaN/GaN 单量子阱的发光光谱及 Nano-LED 整体结构的发光光谱。本文工作为 Nano-LED 结构设计及光谱调制设计提供了理论依据。

2 数值模型的建立及仿真结果分析

2.1 基于有限元的 InGaN/GaN 单量子阱应变仿真分析

本仿真中 Nano-LED InGaN/GaN 单量子阱纵向尺度范围 H 约在 100 ~ 2 000 nm 范围, Nano-LED 为六角晶柱结构, 生长在 GaN 纳米柱核壳顶部为半极性面。结构中应变来源于 GaN/InGaN 层边界晶格失配, GaN 层超过一定厚度后, 对中间 InGaN 层的应变影响不大, 其应变释放作用主要发生在量子阱两侧边缘位置。所以, 本文在实验

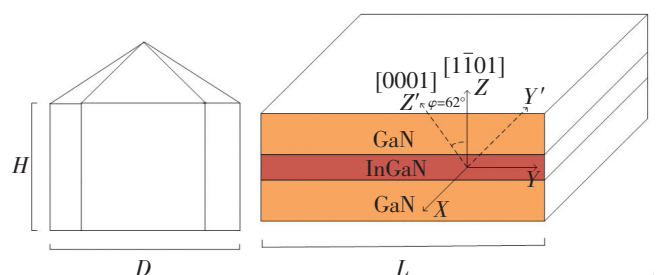


图 1 Nano-LED InGaN/GaN 单量子阱应变分析模型

Fig. 1 Model of InGaN/GaN quantum well strain analysis

仿真过程中,构造了与 Nano-LED 半极性面类似的结构,固定量子阱厚度,分析距离边缘不同位置的量子阱应变变化,量子阱基本模型如图 1 所示。本文计算过程中,取 Nano-LED 的高度为 100 nm,直径(D)为 600 nm, Nano-LED 的半极性面的晶面为 $[\bar{1}101]$, InGaN/GaN 单量子阱的长度(L)为 320 nm,上下 GaN 的厚度为 20 nm, InGaN 的厚度为 10 nm。

$$\varepsilon_{m2} = \frac{(a_{\text{bot}} \cdot c_{\text{bot}}) - \sqrt{(a_{\text{top}} \cdot c_{\text{bot}})^2 \cos^2 \varphi + (a_{\text{bot}} \cdot c_{\text{top}})^2 \sin^2 \varphi}}{\sqrt{(a_{\text{top}} \cdot c_{\text{bot}})^2 \cos^2 \varphi + (a_{\text{bot}} \cdot c_{\text{top}})^2 \sin^2 \varphi}}, \quad (2)$$

其中 a 、 c 为对应纤锌矿结构 $[1000]$ 和 $[0001]$ 晶向晶格常数, a_{bot} 、 a_{top} 、 c_{bot} 、 c_{top} 为量子阱中材料 InGaN、GaN 的晶格常数。 φ 为量子阱的生长方向与 GaN c 轴的夹角。应变 $\varepsilon_{x'x'}$ 、 $\varepsilon_{y'y'}$ 、 $\varepsilon_{z'z'}$ 、 $\varepsilon_{y'z'}$ 可以通过下列公式得到^[16]:

$$\varepsilon_{x'x'} = \varepsilon_{m1}, \quad \varepsilon_{y'y'} = \varepsilon_{m2}, \quad (3)$$

$$\varepsilon_{z'z'} = \frac{(B_{41}\varepsilon_{m1} + B_{42}\varepsilon_{m2})A_{32} - (B_{31}\varepsilon_{m1} + B_{32}\varepsilon_{m2})A_{42}}{A_{31}A_{42} - A_{32}A_{41}}, \quad (4)$$

$$\varepsilon_{y'z'} = \frac{(B_{31}\varepsilon_{m1} + B_{32}\varepsilon_{m2})A_{41} - (B_{41}\varepsilon_{m1} + B_{42}\varepsilon_{m2})A_{31}}{A_{31}A_{42} - A_{32}A_{41}}, \quad (5)$$

其中由材料生长角度不同导致的过程参数 A_{31} 、 A_{32} 、 A_{41} 、 A_{42} 、 B_{31} 、 B_{41} 、 B_{32} 、 B_{42} 可以由以下公式得到:

$$A_{31} = C_{11}\sin^4\varphi + (0.5C_{13} + C_{44})\sin^2 2\varphi + C_{33}\cos^4\varphi, \quad (6)$$

$$A_{32} = [C_{11}\sin^2\varphi + (C_{13} + 2C_{44})\cos 2\varphi - C_{33}\cos^2\varphi]\sin 2\varphi, \quad (7)$$

$$A_{41} = 0.5[(C_{11} - C_{13})\cos 2\varphi + 2C_{44}\cos 2\varphi + (C_{13} - C_{33})\cos^2\varphi]\sin 2\varphi, \quad (8)$$

$$A_{42} = [0.5(C_{11} + C_{13}) - C_{13}]\sin^2 2\varphi + 2C_{44}\cos^2 2\varphi, \quad (9)$$

$$B_{31} = C_{12}\sin^2\varphi + C_{13}\cos^2\varphi, \quad (10)$$

$$B_{41} = 0.5(C_{12} + C_{13})\sin 2\varphi, \quad (11)$$

$$B_{32} = C_{13}(\cos^4\varphi + \cos^4\varphi) + [0.25(C_{11} + C_{33}) - C_{44}]\sin^2 2\varphi, \quad (12)$$

$$B_{42} = 0.5[C_{11}\cos^2\varphi - (C_{13} + 2C_{44})\cos 2\varphi - C_{33}\sin^2\varphi]\sin 2\varphi, \quad (13)$$

其中 C_{11} 、 C_{12} 、 C_{13} 、 C_{33} 、 C_{44} 为 InGaN/GaN 单量子阱结构中 GaN 势垒层和 InGaN 势阱层材料的弹性

InGaN/GaN 单量子阱中是由两种不同晶格常数的材料组成的异质结,晶格常数的差异随 In 组分变化,晶格常数随 In 的增多其差异性将随之增大,晶格差异性将会产生弹性应变。量子阱内部初始应变可以由下式计算得到^[16]:

$$\varepsilon_{m1} = \frac{a_{\text{bot}} - a_{\text{top}}}{a_{\text{top}}}, \quad (1)$$

常数。其中表 1 为 GaN/InN 量子阱材料晶格常数,表 2 为 GaN/InN 量子阱材料的弹性常数。本文中不同 In 组分的 InGaN 晶格常数、弹性常数参量可以通过表 1、表 2 并结合维加德定理^[3,4] 计算得到。

表 1 GaN/InN 量子阱材料的晶格常数^[16-17]

Tab. 1 Lattice constant of GaN/InGaN quantum well material^[16-17]

材料	晶格常数	
	a/nm	c/nm
GaN	0.318 9	0.518 5
InN	0.354	0.570 5

表 2 GaN/InN 量子阱材料的弹性常数^[18-20]

Tab. 2 Elastic constant of InGaN quantum well material^[18-20]

材料	弹性常数				
	C_{11}/GPa	C_{12}/GPa	C_{13}/GPa	C_{33}/GPa	C_{44}/GPa
GaN	390	145	106	398	105
InN	223	115	92	224	48

在应变异质结结构中, InGaN 量子阱在平行于结面方向会产生压应变,量子阱晶格常数发生改变使之与衬底的晶格常数相匹配,同时 InGaN 膜在垂直于结面方向产生张应变。利用公式(1)~(13)可以计算不同晶向、不同晶格常数材料构成的量子阱结构的初始应变。将应变初始值带入图 1 所示量子阱弹性力学有限元计算模型中,即可分析由于边缘应力释放带来的应变分布。本文工作中,结合 Nano-LED 量子阱结构,取量子阱晶面为 $[\bar{1}101]$ 半极性面,材料晶向坐标变换夹角 φ 为 62° , $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 量子阱 In 组分 x 为 0.3,计算得到量子阱应变分布,如图 2 所示。结果表明,随着分析应变的位置逐渐靠近边缘,应力

释放的现象将更为明显。半极性面 Nano-LED InGaN/GaN 单量子阱边缘应变变化范围约为 100 nm, 当距离边缘位置大于 100 nm 时, 边缘

应力释放将会明显减弱。利用仿真得到的量子阱应变结果可以用于计算距离边缘不同位置的压电极化。

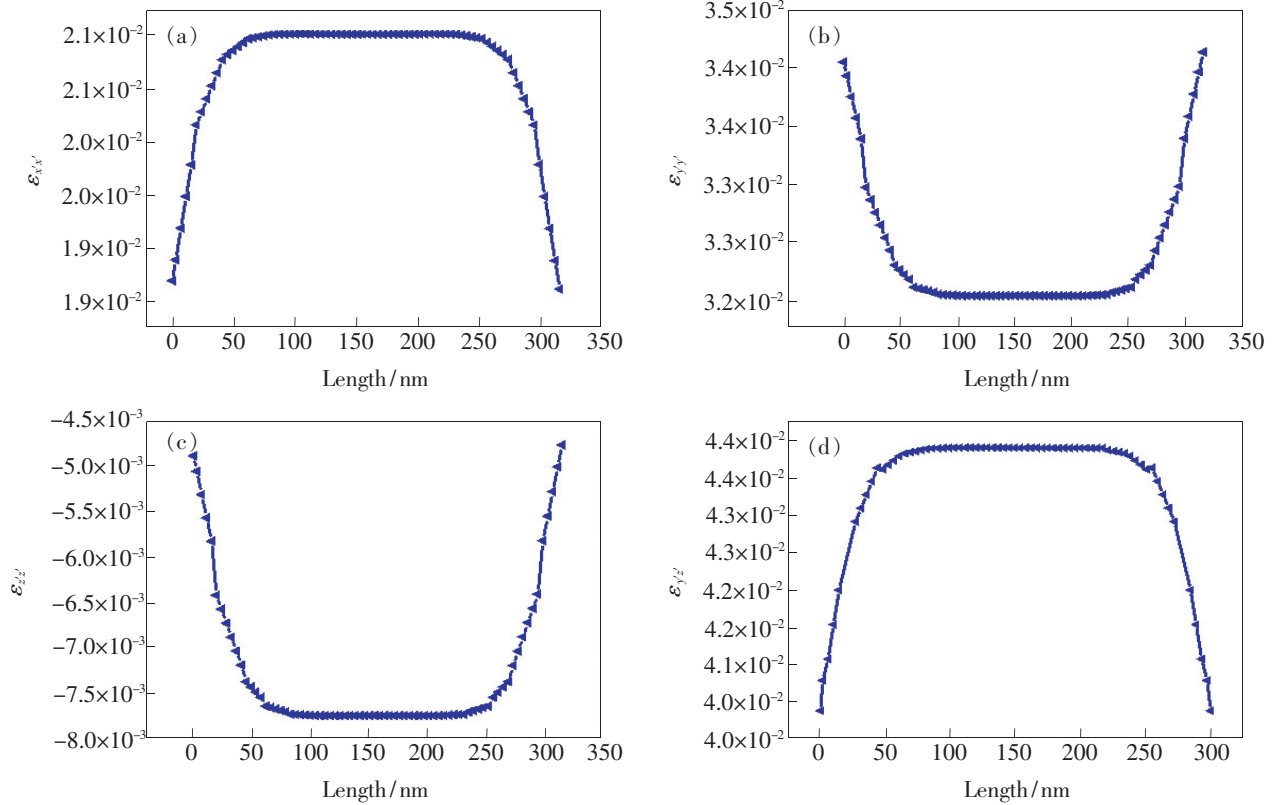


图 2 长度为 320 nm 的 Nano-LED InGaN/GaN 单量子阱应变分布。(a) $\varepsilon_{x'x'}$; (b) $\varepsilon_{y'y'}$; (c) $\varepsilon_{z'z'}$; (d) $\varepsilon_{y'z'}$ 。
Fig. 2 Distribution of strain for Nano-LED InGaN/GaN quantum well with a length of 320 nm. (a) $\varepsilon_{x'x'}$. (b) $\varepsilon_{y'y'}$. (c) $\varepsilon_{z'z'}$. (d) $\varepsilon_{y'z'}$.

2.2 InGaN/GaN 单量子阱压电极化计算

对于 InGaN/GaN 单量子阱结构, z 轴极化场可以由下式得到^[21]:

$$P_z = P_{SP} + P_{PZ}, \quad (14)$$

其中 P_{SP} 为自发极化场, P_{PZ} 为压电极化场。

Nano-LED 量子阱自发极化场为:

$$P_{SP} = (P_{bot}^{SP} - P_{top}^{SP}) \cos\varphi, \quad (15)$$

P_{bot}^{SP} 和 P_{top}^{SP} 分别对应于底部衬底层和顶部生长层材料。GaN 材料体系中 $P_{SP}(\text{InN})$ 、 $P_{SP}(\text{GaN})$ 参数见表 3。对于不同 In 组分 x 半极性面 InGaN 的自发极化, 依据维加德定理和其非线性校正公式^[22]:

$$P_{SP}(\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}) = x \cdot P_{SP}(\text{InN}) - (1-x) \cdot P_{SP}(\text{GaN}) + b_{AB} \cdot x \cdot (1-x), \quad (16)$$

其中 Bowing 参数 b_{AB} 可以用下式得到^[23]:

$$b_{AB} = 2P_{SP}(\text{InN}) + 2P_{SP}(\text{GaN}) - 4P_{SP}(\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{N}), \quad (17)$$

对于压电极化场 P_{PZ} , 依据上一节内容中的应变分布, 计算压电极化场强如下:

$$P_{PZ} = \varepsilon_{x'x'}(e_{31} \cos\varphi) + \varepsilon_{y'y'} \left(e_{31} \cos^3\varphi + \frac{e_{33} - e_{15}}{2} \sin\varphi \sin 2\varphi \right) + \varepsilon_{z'z'} \left(\frac{e_{33} + e_{15}}{2} \sin\varphi \sin 2\varphi + e_{33} \cos^3\varphi \right) + \varepsilon_{y'z'} \left[(e_{31} - e_{33}) \cos\varphi \sin 2\varphi + e_{15} \sin\varphi \cos 2\varphi \right], \quad (18)$$

压电张量系数 e_{31} 、 e_{15} 、 e_{33} 见表 3^[21,24-25]。

表 3 InGaN 量子阱材料的压电张量参数

Tab. 3 Piezoelectric tensor constant of InGaN quantum well material

材料	压电张量参数			
	$e_{31}/$ ($\text{C} \cdot \text{cm}^{-2}$)	$e_{15}/$ ($\text{C} \cdot \text{cm}^{-2}$)	$e_{33}/$ ($\text{C} \cdot \text{cm}^{-2}$)	$P_{SP}/$ ($\text{C} \cdot \text{m}^{-2}$)
GaN	-0.46	0.19	0.78	-0.029
InN	-0.48	1.06	1.06	-0.032

利用上节仿真得到的应变参数 $\varepsilon_{x'x'}$ 、 $\varepsilon_{y'y'}$ 、 $\varepsilon_{z'z'}$ 、 $\varepsilon_{y'z'}$, 代入公式 (18), 即可得到半极性面

Nano-LED InGaN/GaN 单量子阱压电极化分布, 如图 3 所示。结果表明, 分析压电极化的位置逐渐靠近边缘, 压电极化随应变的减小而减小, 半极性面 Nano-LED InGaN/GaN 单量子阱压电极化变化范围约为 100 nm, 当距离边缘位置大于 100 nm 时, 压电极化将会明显减弱。利用计算得到的压电极化, 设置 Nano-LED InGaN/GaN 单量子阱的边界条件, 通过计算得到对应的距边缘不同距离的发光光谱及发光强度。

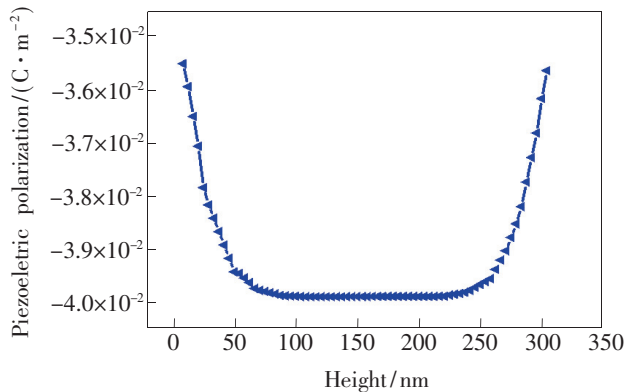


图 3 长度为 320 nm 的 InGaN/GaN 单量子阱压电极化分布

Fig. 3 Polarization distribution of InGaN/GaN quantum well with a length of 320 nm

2.3 InGaN/GaN 单量子阱光电特性分析

利用推导得到的半极性面 Nano-LED InGaN/GaN 单量子阱压电极化公式, 设置不同极化条件下的量子阱能带, 通过 Silvaco 光电耦合计算和载流子复合有限元分析的方法得到不同应力位置下 InGaN/GaN 单量子阱的发光光谱。改变 Nano-LED 直径, 利用发光光谱和半极性面、非极性面的比例关系得到对应的不同直径 (D) Nano-LED 的发光光谱, 分别如图 4 和图 5 所示。

图 4(a) 光谱计算结果表明, 半极性面 Nano-LED InGaN/GaN 单量子阱发光光谱功率呈高斯分布。与量子阱中心位置 (160 nm) 相比, 边缘位置 (0 nm) 发光光谱出现光谱偏移的现象, 且整体辐射效率较高。在 60 mA 注入电流条件下, 距离量子阱边缘位置 100 nm 处光辐射峰值波长为 464 nm, 在量子阱边缘位置 (0 nm) 发光光谱的峰值波长为 443 nm, 向蓝光方向移动了 21 nm (如图 4(b) 所示)。产生这种结果的原因是 InGaN/GaN 单量子阱内部在压电极化的作用下, 量子阱的导带和价带所形成的能带模型由无极化的方形势阱变为三角形势阱, 量子阱内电子和空穴在极化场

的作用下将会出现空间分离的现象, 进而导致电子空穴复合几率的下降, 使量子阱发光效率降低。同时, 由于量子阱相对宽度变窄, 导致发光波长变长。而量子阱边缘位置产生的应力释放可以减弱压电极化影响, 进而使半极性面生长的 InGaN/GaN 单量子阱发光光谱蓝移, 在量子阱内部应力释放作用逐渐减弱 (如图 2 所示), 压电极化趋于稳定。

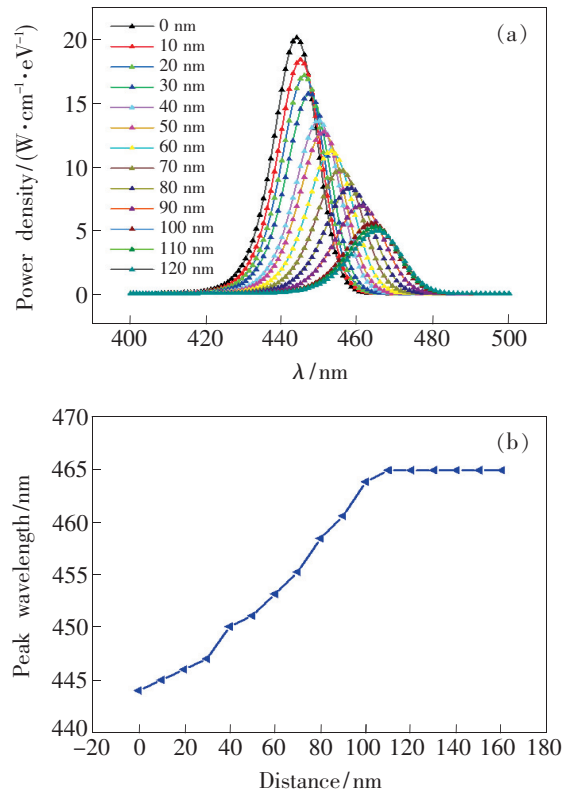


图 4 (a) 应力释放条件下不同位置的半极性面 InGaN/GaN 单量子阱光谱分布; (b) 峰值波长。

Fig. 4 (a) Spectral distribution of semipolar InGaN/GaN quantum well with different position under strain release conditions. (b) Peak wavelength.

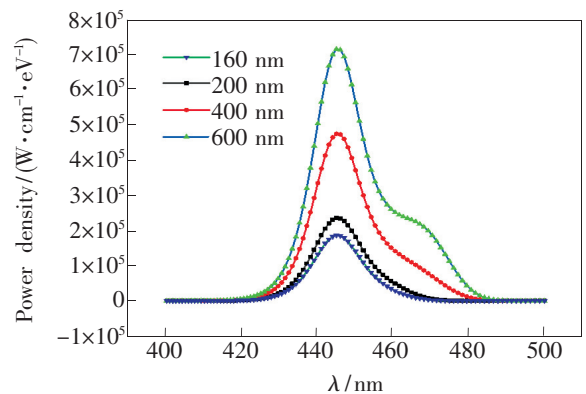


图 5 不同直径下 Nano-LED 的光谱分布

Fig. 5 Spectral distribution of Nano-LED at different diameter

图 5 所示的 Nano-LED 非极性面和半极性面整体发光光谱表明, 随着 Nano-LED 的直径增大, Nano-LED 发光面积随之增大, 导致 Nano-LED 发

光强度增大。Nano-LED 半极性面因受边缘应力释放作用的影响,半极性面的光谱将会出现偏移。在固定 Nano-LED 高度的条件下,半极性面所占 Nano-LED 整体结构比例随直径的增大而增多。随半极性面所占 Nano-LED 整体面积比例的增多,边缘应力释放作用所导致半极性面 Nano-LED InGaN/GaN 量子阱光谱偏移的影响增大,导致 Nano-LED 整体结构的发光光谱在 440 nm 及 470 nm 处出现双峰值现象。

3 结 论

本文利用 COMSOL 软件分析了半极性面 Nano-LED InGaN/GaN 单量子阱距离边缘不同位置的应变,并推导出量子阱的压电极化分布,通过光电耦合和有限元分析软件 Silvaco 仿真计算得到不同应变位置 InGaN/GaN 单量子阱的发光光谱及 Nano-LED 整体结构的发光光谱。结果表

明,在量子阱边缘位置(0 nm)和量子阱中心位置(160 nm),发光光谱的峰值波长蓝移 21 nm,这一结果体现了应力释放对 InGaN/GaN 单量子阱发光的调制作用。这一光谱差异在进行波分复用的可见光通信系统中可以加以利用,拓展系统的通信带宽。针对 Nano-LED 整体结构的发光光谱在 440 nm 以及 470 nm 处出现的双峰值现象,对于在同一衬底材料上生长不同直径的 Nano-LED 器件结构,其顶部半极性面将受到材料组分和极化电场的双重调制,其光谱变化范围将会更大,这为单衬底多波长发光器件的应用提供了行之有效的解决方案。在 Nano-LED 器件设计过程中,通过控制 Nano-LED 的高度和直径,同时设计 Nano-LED 侧壁非极性面和顶端半极性面量子阱比例,可以得到更大的光谱调制范围。这些结果对 Nano-LED 结构设计及光谱调制设计提供了理论依据。

参 考 文 献:

- [1] EISENFELD T, KARSENTY A. Design and modeling of light emitting nano-pixel Structure (LENS) for high resolution display (HRD) in a visible range [J]. *Nanomaterials*, 2020, 10(2):214-1-23.
- [2] LAZAREV S, DZHIGAEV D, BI Z X, *et al.*. Structural changes in a single GaN nanowire under applied voltage bias [J]. *Nano Lett.*, 2018, 18(9):5446-5452.
- [3] WASISTO H S, PRADESI D, GÜLINK J, *et al.*. Beyond solid-state lighting: miniaturization, hybrid integration, and applications of GaN nano- and micro-LEDs [J]. *Appl. Phys. Rev.*, 2019, 6(4):041315.
- [4] HERSEE S D, RISHINARAMANGALAM A K, FAIRCHILD M N, *et al.*. Threading defect elimination in GaN nanowires [J]. *J. Mater. Res.*, 2011, 26(17):2293-2298.
- [5] RISHINARAMANGALAM A K, UL MASABIH S M, FAIRCHILD M N, *et al.*. Controlled growth of ordered III-nitride core-shell nanostructure arrays for visible optoelectronic devices [J]. *J. Electron. Mater.*, 2015, 44(5):1255-1262.
- [6] LING S C, LU T C, CHANG S P, *et al.*. Low efficiency droop in blue-green m-plane InGaN/GaN light emitting diodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, 96(23):231101-1-3.
- [7] COULON P M, PUGH J R, ATHANASIOU M, *et al.*. Optical properties and resonant cavity modes in axial InGaN/GaN nanotube microcavities [J]. *Opt. Express*, 2017, 25(23):28246-28257.
- [8] CHANG S J, LAI W C, SU Y K, *et al.*. InGaN-GaN multi quantum-well blue and green light-emitting diodes [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.*, 2002, 8(2):278-283.
- [9] ZHAO Y J, FU H Q, WANG G T, *et al.*. Toward ultimate efficiency: progress and prospects on planar and 3D nanostructured nonpolar and semipolar InGaN light-emitting diodes [J]. *Adv. Opt. Photonics*, 2018, 10(1):246-308.
- [10] ZENG F M, ZHU L H, LIU W, *et al.*. Study on optical properties of indium-graded semipolar InGaN/GaN quantum well [J]. *IEEE Photonics J.*, 2016, 8(3):2200413-1-24.
- [11] HSU P S, FARRELL R M, WEAVER J J, *et al.*. Comparison of polished and dry etched semipolar (11 $\bar{2}$ 2) III-nitride laser facets [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2013, 25(21):2105-2107.
- [12] LEE C T, CHENG C J, LEE H Y, *et al.*. Color conversion of GaN-based micro light-emitting diodes using quantum dots [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2015, 27(21):2296-2299.
- [13] GIRGEL I, EDWARDS P R, LE BOULBAR E, *et al.*. Investigation of InGaN facet-dependent non-polar growth rates and

- composition for core-shell LEDs [J]. *J. Nanophotonics*, 2016,10(1):016010.
- [14] HAEMMER M, ROYCROFT B, AKHTER M, *et al.*. Size-dependent bandwidth of semipolar ($11\bar{2}2$) light-emitting-diodes [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2018,30(5):439-442.
- [15] MCKENDRY J J D, GREEN R P, KELLY A E, *et al.*. High-speed visible light communications using individual pixels in a micro light-emitting diode array [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2010,22(18):1346-1348.
- [16] BERNARDINI F, FIORENTINI V. First-principles calculation of the piezoelectric tensor d of III-V nitrides [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002,80(22):4145-4147.
- [17] VURGAFTMAN I, MEYER J R. Band parameters for nitrogen-containing semiconductors [J]. *J. Appl. Phys.*, 2003,94(6):3675-3696.
- [18] WU Y R, LIN Y Y, HUANG H H, *et al.*. Electronic and optical properties of InGaN quantum dot based light emitters for solid state lighting [J]. *J. Appl. Phys.*, 2009,105(1):013117-1-7.
- [19] YU P, CHIU C H, WU Y R, *et al.*. Strain relaxation induced microphoto luminescence characteristics of a single InGaN-based nanopillar fabricated by focused ion beam milling [J]. *J. Appl. Phys.*, 2008,93(8):081110-1-3.
- [20] DOWNES J, FAUX D A. Calculation of strain distributions in multiple-quantum-well strained-layer structures [J]. *J. Appl. Phys.*, 1995,77(6):2444-2447.
- [21] ROUSTRAY S R, LENKA T R. Effect of degree of strain relaxation on polarization charges of GaN/InGaN/GaN hexagonal and triangular nanowire solar cells [J]. *Solid-State Electron.*, 2019,159:142-149.
- [22] BERNARDINI F, FIORENTINI V. Nonlinear macroscopic polarization in III-V nitride alloys [J]. *Phys. Rev. B*, 2001,64(8):085207.
- [23] FIORENTINI V, BERNARDINI F, AMBACHER O. Evidence for nonlinear macroscopic polarization in III-V nitride alloy heterostructures [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002,80(7):1204-1206.
- [24] BERNARDINI F, FIORENTINI V, VANDERBILT D. Spontaneous polarization and piezoelectric constants of III-V nitrides [J]. *Phys. Rev. B*, 1997,56(16):R10024-R10027.
- [25] MASTRO M A, SIMPKINS B, WANG G T, *et al.*. Polarization fields in III-nitride nanowire devices [J]. *Nanotechnology*, 2010,21(14):145205-1-5.



王鑫炜(1994 -),男,江西吉安人,硕士研究生,2017年于沈阳工业大学获得学士学位,主要从事纳米光学器件结构设计的研究

E-mail: 1830091201@tiangong.edu.cn



刘宏伟(1980 -),男,辽宁朝阳人,博士,副教授,2010年于中国科学院半导体研究所获得博士学位,主要从事半导体光电材料及器件的研究。

E-mail: hwliu@foxmail.com