

n 波导层铟组分对 GaN 基绿光激光二极管光电性能的影响

贾甜甜¹, 董海亮¹, 贾志刚¹, 张爱琴², 梁建³, 许并社^{1,4}

- (1. 太原理工大学 新材料界面科学与工程教育部重点实验室, 山西 太原 030024;
2. 太原理工大学 轻纺工程学院, 山西 太原 030024;
3. 太原理工大学 材料科学与工程学院, 山西 太原 030024;
4. 陕西科技大学 材料原子·分子科学研究所, 陕西 西安 710021)

摘要: 高功率 GaN 基激光二极管外延结构理论仿真对提高 GaN 基激光二极管的光电性能具有重要的指导意义。设计了一种 n 侧双波导结构的绿光激光二极管外延结构, 讨论了激光器外延结构中 n-In_xGa_{1-x}N 波导层中铟组分对其光电性能的影响, 揭示了 n-In_xGa_{1-x}N 波导层对激光二极管光电性能的影响机制。通过调控 n-In_xGa_{1-x}N 波导层中铟组分, 调控外延层中的光场分布, 使光场发生了偏移。结果表明, 当 n 侧 In_xGa_{1-x}N 波导层中铟组分最佳值为 0.07 时, 将光子损耗降低了 0.2 cm⁻¹, 阈值电流由 193.49 mA 降低到 115.98 mA, 此外, 器件的光子损耗最少, 阈值电流最小, 工作电压最低, 从而提高了激光二极管的输出功率和电光转换效率。因此, 当绿光激光二极管的注入电流密度为 6 kA/cm² 时, 功率输出达 234.95 mW。n 侧双波导结构设计为制备高功率绿光激光二极管提供了理论指导和数据支撑。
关键词: 绿光; GaN 基激光二极管; 波导层; 光场分布

中图分类号: TN312⁺.8 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20200489

Influence of indium composition of n waveguide layer on photoelectric performance of GaN-based green laser diode

Jia Tiantian¹, Dong Hailiang¹, Jia Zhigang¹, Zhang Aiqin², Liang Jian³, Xu Bingshe^{1,4}

- (1. Key Laboratory of Interface Science and Engineering in Advanced Materials Ministry of Education, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;
2. College of Textile Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;
3. College of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;
4. Institute of Atomic and Molecular Science, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China)

Abstract: The theoretical simulation of the extension structure of high-power GaN-based laser diodes is of great significance to improve the photoelectric performance of GaN-based laser diodes. A green laser diode extension structure with an n-side dual-wave conductor structure was designed. The effect of indium parts in the n-In_xGa_{1-x}N waveguide layer on its photoelectronic performance in laser extension structure was discussed. And the mechanism of the n-In_xGa_{1-x}N waveguide layer on the photoelectronic performance of laser diode was clarified.

收稿日期: 2020-11-18; 修订日期: 2021-01-19

基金项目: 国家自然科学基金 (61904120, 21972103, 61604104, 51672185); 国家重点研发计划 (2016YFB0401803); 山西省基础研究项目 (201801D221124, 201801D121101, 201901D111111, 201901D211090, 201601D202029); 山西省重点研发项目 (201803D31042)

作者简介: 贾甜甜, 女, 硕士生, 主要从事 GaN 绿光激光器方面的研究。

导师简介: 董海亮, 男, 高级实验师, 主要从事光电材料方面的研究。

许并社, 教授, 主要从事新型半导体材料方面的研究。

The results showed that when the indium part of the n-side $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ waveguide layer was 0.07, the photon loss was minimal, and the threshold current was the lowest. When the indium part of the n-side waveguide layer was high or low, photon loss and operating voltage were increased, and meanwhile, the output power of the laser diode was reduced. Therefore, by regulating indium parts in the n- $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ waveguide layer and controlling the optical field distribution of the outer layer, the photon loss was reduced by 0.2 cm^{-1} , and the threshold current was reduced by 193.49 mA to 115.98 mA, and the operating voltage was reduced, which increased the output power and electro-optical conversion efficiency of the laser diode, increased the laser output power to 234.95 mW at 6 kA/cm^2 . The n-side dual-waveguide structure design provides theoretical guidance and data support for the preparation of high-power green laser diodes.

Key words: green light; GaN based laser diode; waveguide layer; optical field distribution

0 引言

近年来, GaN 基激光二极管 (Laser Diodes, LD) 在高密度存储、显示、投影方面具有广泛的应用^[1-7], 并且 InGaN 材料的发光光谱从红外到紫外覆盖了整个可见光光谱^[8]。相对于技术较成熟的蓝光 LD 和红光 LD, 目前市场上比较稳定的绿光 LD 普遍是倍频的固体 LD, 其通过倍频晶体转换红外波长激光, 获得绿光激光^[9]。国内外在 InGaN 蓝光 LD 研究方面取得了重大进展^[10], 不仅蓝光 LD 的输出功率得到明显提高, 而且光学性质得到改善。随着 InGaN 蓝光 LD 波长向绿光长波方向扩展, InGaN 波导层和 AlGaIn 限制层材料之间的折射率差值减小会导致绿光光子反射率降低, 导致光场向有源区 p 侧偏移, 限制层对光场的限制作用减小, 降低光学限制因子, 进而产生光子泄漏。因此, 光场偏移导致了光子损耗增加, 不仅增加了阈值电流, 而且降低了 LD 的输出功率^[10-11]。然而, 为了获得高性能更长波长的激光二极管, 一般采用增加 n-AlGaIn 包层的厚度的方法来减少光子泄漏, 但是这对减少光子泄漏效果差。该方法主要用于提高激光光束的质量, 但厚的包层会导致 LD 工作电压升高。同时, 金属有机化学气相沉积方法生长厚的 AlGaIn 层生长会导致器件的稳定性降低^[12]。采用提高 n-InGaIn 波导层铟组分或增加 n-InGaIn 波导层厚度的方法来减少光子泄漏, 不仅增加了生长高质量的激光器的难度, 而且会增大 LD 的串联电阻, 从而导致工作电压升高^[13]; 采用对称单波导层结构的 LD 存在光子在 p 型层的吸收比较大和光子泄漏大的问题。采用非对称 n 侧双波导 InGaIn 蓝光 LD 结构, 提

高 InGaIn 波导层厚度使光学模在 GaN 衬底方向的光子泄漏完全被抑制^[14-15]。

针对绿光 InGaIn LD 存在严重的光子泄漏和低输出功率的问题, 采用 k·p 理论模型设计了非对称双波导结构, 通过调控 n 侧波导层的铟组分增加波导层和限制层的折射率差, 从而调控外延层中光场的分布, 将光场控制在量子阱区和波导区, 增加光学限制因子, 不仅降低光子损耗, 而且还降低 LD 的工作电压和阈值电流; 通过调控 n- $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 波导层铟组分来调节波导层的带隙, 不仅降低空穴注入的势垒, 而且增加空穴注入效率, 降低非辐射复合效率, 提高内量子效率, 从而提高 LD 的输出功率和电光转换效率。

1 软件模拟和器件结构

1.1 器件结构

采用 SiLENSe (Simulator of Light Emitters based on Nitride Semiconductors) 仿真软件进行理论仿真实验。InGaIn 基绿光 LD 的外延结构如图 1 所示, 其外延参数如表 1 所示。文中将优化下 n 侧 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 层波导铟组分, 取值 0.04、0.05、0.06、0.07 和 0.075, 其他结构参数都相同。通过改变 n- $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 波导层铟组分实现调控 LD 的光场分布。对 LD 器件结构进行模拟, 设置偏压 3~12 V, 腔长 $800 \mu\text{m}$, 宽度 $10 \mu\text{m}$, 在设计材料时外延层的电子和空穴的迁移率分别为 $200 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ 和 $20 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$, 带偏移比 $\Delta E_c/\Delta E_v=0.7/0.3$, 俄歇系数 (C_p 和 C_n) InN 为 $2.5 \times 10^{-30} \text{ cm}^6\text{s}^{-1}$, GaN 为 $0 \text{ cm}^6\text{s}^{-1}$, 电子和空穴的非辐射寿命为 0 s。激光器器件的光电性能都是在工作温度为 300 K 时计算获得, 整个外延结构中每层的缺陷密度为 $1 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$ 。

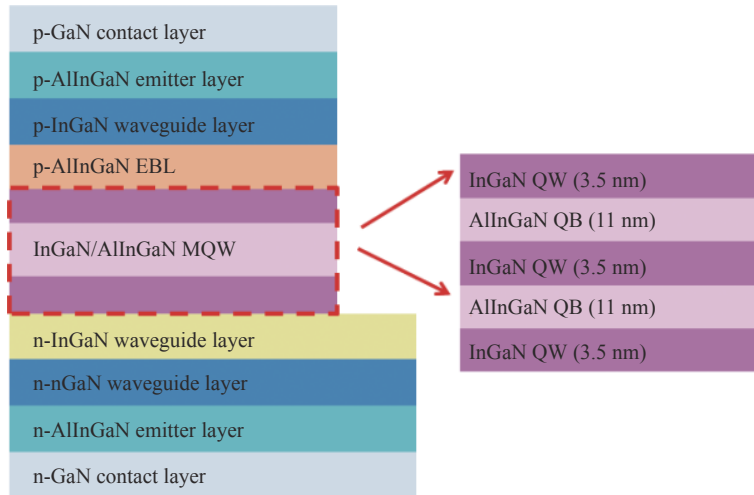


图 1 InGaN 基绿光 LD 的外延结构

Fig.1 Epitaxial structure of the InGaN-based green laser diode

表 1 InGaN 基绿光 LD 的外延参数

Tab.1 Structural parameters of InGaN-based green laser diode

Name	Thickness	Concentration /cm ⁻³	Mobility /cm ² V ⁻¹ s ⁻¹
p-Contact layer	100 nm p-GaN	1×10 ²⁰	200/20
p-Cladding layer (CL)	500 nm p-Al _{0.12} In _{0.01} Ga _{0.87} N	1×10 ²⁰	200/20
p-Waveguide layer (WG)	70 nm p-In _{0.04} Ga _{0.96} N	2×10 ¹⁹	200/20
Electron blocking layer (EBL)	14nm p-Al _{0.18} In _{0.01} Ga _{0.81} N	5×10 ¹⁸	200/20
Quantum well (QW)/ Quantum barrier (QB) (×2)	3.5 nm In _{0.29} Ga _{0.71} N/11 nm Al _{0.05} In _{0.01} Ga _{0.94} N	0/6×10 ¹⁸	3 000/30/ 200/20
QW	3.5 nm In _{0.29} Ga _{0.71} N	0	3 000/30
n-WG	47.5 nm In _x Ga _{1-x} N	5×10 ¹⁸	200/20
n-WG	100 nm n-GaN	5×10 ¹⁸	200/20
n-CL	550 nm n-Al _{0.09} In _{0.01} Ga _{0.9} N	6×10 ¹⁸	200/20
n-Contact layer	100 nm n-GaN	6×10 ¹⁸	200/20

2 结果讨论

2.1 光场分布对光子损耗的影响

由于电子对光子的吸收较小,而空穴对光子的吸收较大,相对于 p 侧的波导层和限制层,光子在传输

过程中在 n 侧波导层和限制层区的损耗较小, p 限制层中的空穴浓度较高,光损耗也较大。为了减少 p 侧空穴对光子的吸收。因此,调控光场向 n 侧分布有助于降低光子损耗。由于低铟组分的 n-In_xGa_{1-x}N 波导层和限制层之间的折射率差减小,限制光场的能力减弱,导致光子泄漏。因此, n-In_xGa_{1-x}N 波导层中铟组分是影响折射率差值的关键因素之一,是调控光场分布和实现高功率输出的关键参数^[12]。

对于 525 nm 激光器而言, InN 和 GaN 的折射率分别设置为 2.88^[12] 和 2.42^[13], 波长在 525 nm 时 x 为 0.04~0.08 的 In_xGa_{1-x}N 折射率曲线如图 2 所示。

为了研究波导层铟组分变化对光场分布以及折

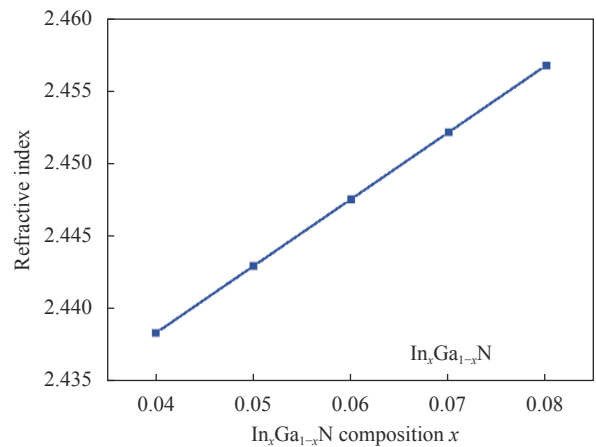


图 2 波长在 525 nm 时 x 为 0.04~0.08 的 In_xGa_{1-x}N 折射率曲线图
Fig.2 Refractive index of In_xGa_{1-x}N with x composition 0.04-0.08 at the wavelength of 525 nm

射率差的影响,将讨论 $n\text{-In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 波导层不同铟组分的光场分布,如图 3 所示,TE 模限制在波导层区和有源区,这主要是由于波导层与限制层之间折射率的差值较大,限制光的能力较大。由图 3(a)可以看出:铟

组分从 0.04~0.075, TE_1 模的强度先增大后减小,这表明限制层对光场的限制先增加后减小。同时光场向 n 侧波导移动,使光场偏离 p 侧波导区,减少光场在 p 限制层区的泄漏。当铟组分增加到 0.075 时,波导

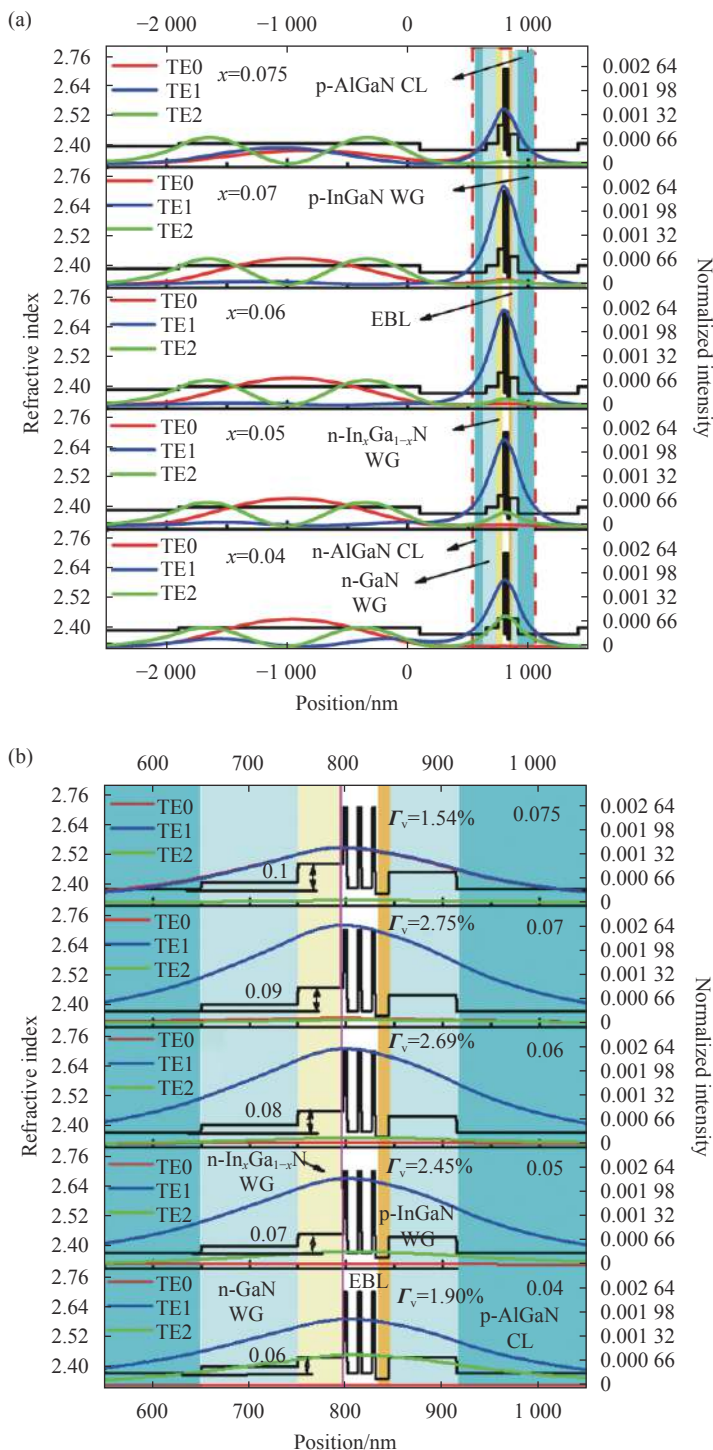


图 3 不同 $n\text{-In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 波导层铟组分的 TE-模的折射率分布和强度分布 ((b) 是 (a) 550~1050 nm 的放大图)

Fig.3 Refractive index profiles and intensity distributions of TE-modes versus the different $n\text{-In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ waveguide indium content ((b) is the magnification of (a) from 550 nm to 1050 nm)

层和限制层间的折射率差从 0.06 增加到 0.1, 限制层对光场的限制作用逐渐增强。但铟组分为 0.075 时, 光子泄漏增加, 光场强度降低, 如图 3(b) 所示。这主要是由于铟组分增加, $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 折射率增大, 限制层对光子限制减弱, 从而导致向衬底泄漏会增强^[14]。 Γ_v 从 $n\text{-In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 波导层铟组分为 0.04 时的 1.90% 增加到铟组分为 0.07 时的 2.75%, 而后降低到 0.075 时的 1.54%, 进而验证了随着 $n\text{-InGaN}$ 波导层铟组分的增加, 波导层和限制层之间的折射率对比度增加, 减少了光子向 n 限制层方向泄漏^[11, 13]。但当铟组分过高时, 限制层对光子限制减弱^[14]。因此, 当铟组分为 0.07 时, 光场主要分布在波导层区, 减少了 p 型限制层对光的吸收, 从而降低了光子损失。光子损耗机理将在下面部分进行详细讨论。

LD 的阈值电流密度受内部光子损耗影响较大, 内部光子损耗越大, LD 的阈值电流越高, 斜率效率越低。因此, 光子损耗的研究对于提升 GaN 基 LD 的性能具有重要意义。光场分布影响着光子损耗, 这主要是由于外延层中电子和空穴对光子的吸收系数不同导致^[16]。光子损耗越大, 光子泄漏越多, 光场强度越弱。内部光子损耗 (α_{Total}) 则是由量子阱内 (α_{QW}) 和阱外 (α_{out}) 的损耗组成, 从图 4 中可以看出, α_{out} 和 α_{Total} 最小值的铟组分是 0.07, 而 α_{QW} 最小值为 0.04。当铟组分从 0.04 增加到 0.07 时, 在注入电流为 0.5 A 时 (电流密度为 6 kA/cm^2), α_{Total} 和 α_{out} 值减少了 0.2 cm^{-1} , 从 0.07 增加到 0.075 时, α_{Total} 和 α_{out} 值增加了 0.05 cm^{-1} , 如图 4(a) 和 (c) 所示。这主要是由于铟组分增加使 n 侧 InGaN 波导层和 AlGaIn 限制层材料之间的折射率差值增大, 减少了光子损耗, 从而降低了 α_{out} ^[10, 14], 但过高的铟组分由于多模激励会增加光子损耗。组分从 0.04 增加到 0.07 时, α_{QW} 值增加了 0.04 cm^{-1} , 如图 4(b) 所示, 这是由于铟组分的增加, 量子阱和 n 侧波导层之间的折射率差就会增加, 使光场远离 p 型区域, 尤其是具有较大吸收系数的电子阻挡层, 从而导致大的 α_{QW} ^[17]。但组分从 0.04 增加到 0.07 时, α_{QW} 值降低了 0.02 cm^{-1} , 这也是多模激励引起的。因此, 波导层铟组分为 0.07 时光子泄漏最少, 光损耗最小。

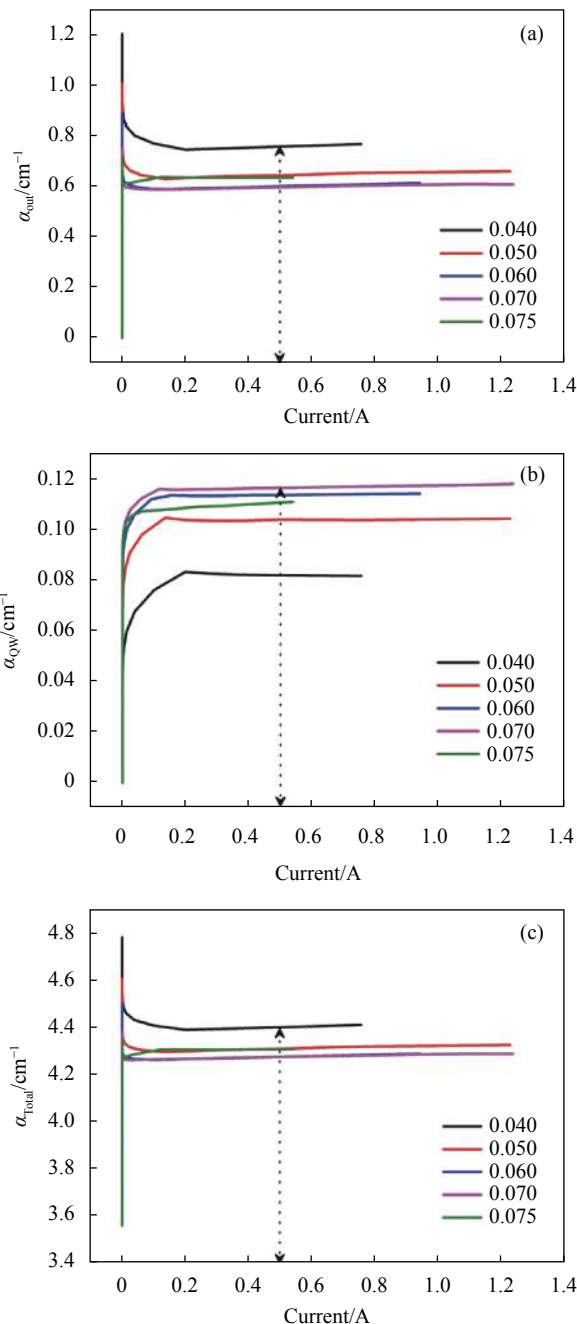


图 4 不同 $n\text{-In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 波导层铟组分下 LD 的多个量子阱外 (α_{out}) (a)、内 (α_{QW}) (b) 和总光损耗 (α_{Total}) (c) 随注入电流的变化曲线 (箭头所指 0.5 A 即 6 kA/cm^2)

Fig.4 Optical loss outside multiple quantum wells (α_{out}) (a), optical loss in multiple quantum wells (α_{QW}) (b) and total optical loss (α_{Total}) (c) of laser diode versus the injected current for different $n\text{-In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ waveguide indium content (The arrow indicates 0.5 A or 6 kA/cm^2)

2.2 电学性质

内量子效率 (Internal Quantum Efficiency, IQE)、输

输出功率和电光转换效率是 LD 器件重要的电学参数, 漏电流对 IQE 有着重要的影响。在注入电流为 6 kA/cm^2 时, 铟组分为 0.04 器件的漏电电流密度最大, 注入效率最小, 而 0.07 的器件漏电电流密度比较小, 从图中也可以看出铟组分的变化对漏电电流密度影响不大, 同时 0.07 的注入效率最大, 如图 5(a)、(b) 所示。

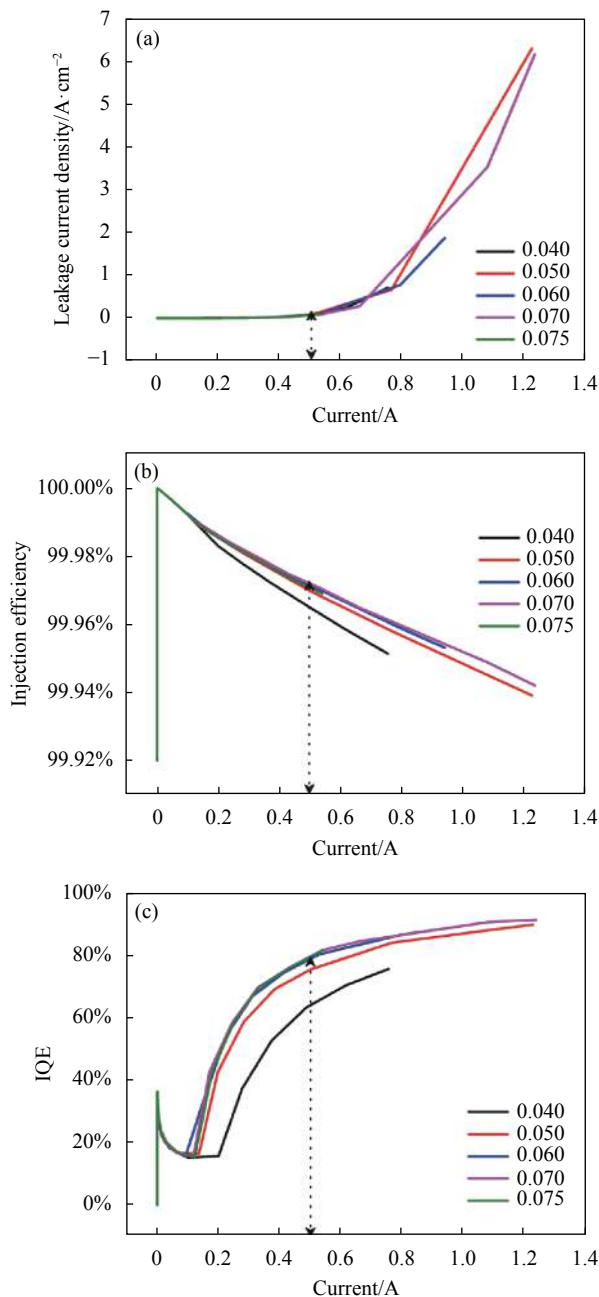
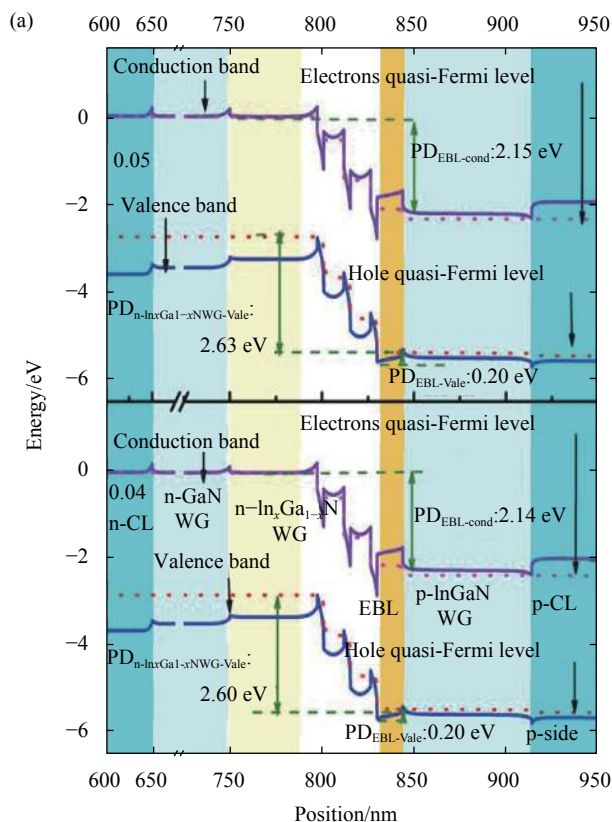


图 5 不同 $n\text{-In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 波导层铟组分下, LD 的漏电流密度 (a)、注入效率 (b) 和 IQE(c) 与注入电流的关系

Fig.5 Leakage current density (a), injection efficiency (b) and IQE (c) of laser diode versus the injected current for different $n\text{-In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ waveguide indium content

注入效率越大, 漏电电流流密度越小, 器件的 IQE 越大^[18]。从图 5(c) 中可以看出, 铟组分是 0.07 时 IQE 最大。这主要是由于当空穴的注入增加, 电子的泄漏减少, 空穴和电子在有源区的辐射复合就会增强, 进而提高 IQE。注入电流为 6 kA/cm^2 时 IQE 最大值为 80%, 因此, $n\text{-In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 波导层最佳组分为 0.07 时获得最高的内量子效率。

从能带结构的角对漏电流、注入效率与 $n\text{-In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 波导层铟组分之间的相互影响关系进行解释。图 6 为 LD 在电流密度为 6 kA/cm^2 时不同铟组分的能带结构图。从铟组分为 0.04、0.05、0.06、0.07 和 0.075 的能带图中可以观察到, 价带中的三角形势垒平整。为了揭示能带对电子泄漏的影响, 电子费米能级与 $n\text{-In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ WG 或 AlGaIn EBL 的导带 (Conduction bands) 之间的电位差 (Potential Difference, PD) 表示为 $\text{PD}_{n\text{-In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N WG-cond}}$ 或 $\text{PD}_{\text{EBL-cond}}$ 。电子泄漏的势垒高度为 $\text{PD}_{n\text{-In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N WG-cond}}$ 和 $\text{PD}_{\text{EBL-cond}}$ 之间的差值。从图 6 可以看出, 铟组分为 0.04、0.05、0.06、0.07 和 0.075 电子泄漏的势垒高度分别为 2.14、2.15、2.15、2.15 eV。阻挡电子泄漏的势垒高度



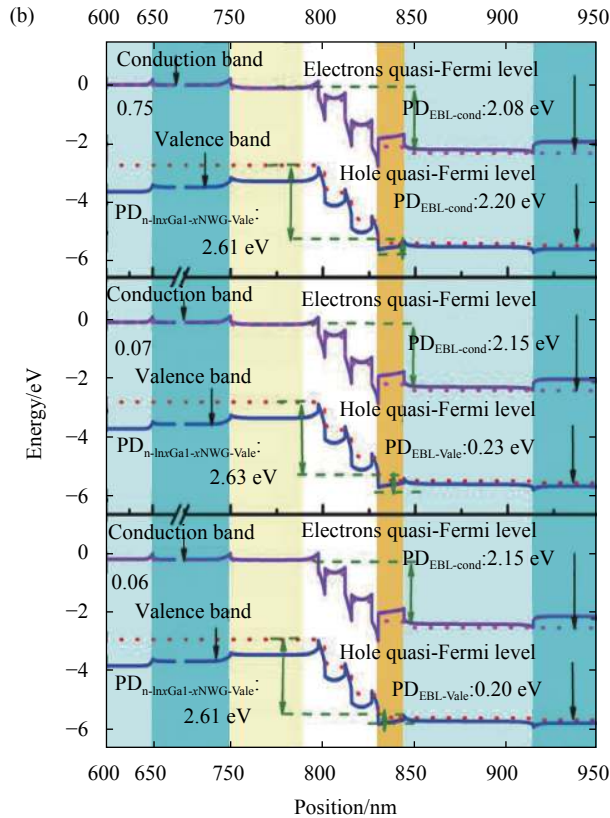


图 6 在注入 0.5 A(即电流为密度 6 kA/cm²) 时,能带随 n-In_xGa_{1-x}N 波导层钼组分的变化曲线

Fig.6 Band energy versus of different n-In_xGa_{1-x}N waveguide indium contents at injection current 0.5 A (Injection density is 6 kA/cm²)

从 2.14 eV 先增加到 2.15 eV。因此,提高钼组分对增强势垒高度来减少电子泄漏并没有太大的影响,但是过高钼分会降低电子泄漏势垒高度。此外,钼组分对空穴注入的影响可以用来解释价带对空穴传输的影响。在图 6 中,PD_{n-In_xGa_{1-x}NWG-Vale} 为 n-In_xGa_{1-x}N WG 层价带费米能级与 AlGaIn EBL 的价带 (Valence bands) 之间的电位差; PD_{EBL-Vale} 为在 AlGaIn-EBL 空穴费米能级与 AlGaIn 势垒层 (Barrier) 价带之间的电位差。势垒的高度为 PD_{n-In_xGa_{1-x}NWG-Vale} 和 PD_{EBL-Vale} 之和。钼组分为 0.04、0.05、0.06、0.07 和 0.075 时势垒高度的值分别为 2.80、2.83、2.81、2.86、2.81 eV。In_xGa_{1-x}N 带隙公式: $Eg(x)=1.43x^2-4.08x+3.42$ ^[11]。随着钼组分的增加,In_xGa_{1-x}N 带隙减小,从而减小空穴注入的势垒。从上述对能带的分析可以得出结论,钼组分为 0.07 时的 LD 不仅增加了电子泄漏的势垒高度,而且也降低了空穴注入的势垒高度^[19-20],从而 LD 在钼组分为 0.07 时 IQE 获得最高值为 80%。

LD 的 IQE 同时受非辐射电流密度影响较大。n-In_xGa_{1-x}N 波导层钼组分的增加可以减少电子和空穴在除量子阱区外的其他区复合,提高辐射复合率,从而提高内量子效率^[21]。当载流子浓度在有源区较高时,非辐射复合主要依赖于俄歇复合,如图 7 所示。因为非辐射复合率被定义为 $R_{nr}=Cnp^2$,其中 C 为俄歇复合系数;n 和 p 分别为有源区电子和空穴的浓度。在室温下的 III-V 族半导体中,系数 C 实际上与载流子浓度无关。因此,非辐射复合过程的速率主要取决于载流子浓度,而有源区在钼组分为 0.04 时载流子浓度最大,故非辐射复合电流密度在 0.04 时最大,如图 7(d) 所示。此外,当注入电流超过阈值电流时,俄歇复合电流密度保持不变,同时非辐射复合电流密度也不变。当钼组分为 0.07 时,非辐射复合电流密度降到最小。因此,器件在钼组分为 0.07 时获得了高的 IQE。

图 8 给出了 LD 的阈值电流和电压与 n-In_xGa_{1-x}N 波导层钼组分的关系。从图 8(a) 中可以看出,钼组分为从 0.04 增加到 0.075,阈值电流从 193.19 mA 先降低到 115.98 mA 后升高到 132.33 mA。LD 阈值电流的大小主要取决于光学损耗和 IQE^[22],当钼组分提高时,光子损耗先降低后升高和 IQE 的提高会导致阈值电流的先升高后降低。从图 8(b) 中可以看出,波导层的钼组分对 LD 的工作电压并没有明显的变化,曲线呈增大的趋势。这主要是由于 LD 的电压与外延层的串联电阻有关,等效电阻越大,工作电压就会随之增大^[23]。钼组分为 0.04 时器件的工作电压最大,组分 0.07 时器件的电压最小。这主要是由于钼组分增加使得电子泄漏先减少后增加,空穴注入先增加后减小,从而使得电压先减小后增加。因此,钼组分为 0.07 时,器件的阈值电流和电压最低。

LD 的光输出功率和电光转换效率是 LD 最关键的电学参数。由图 9(a) 中可以看出,随着 InGaIn 波导层钼组分从 0.04 增加至 0.075,LD 的光最大输出功率从 152.9 mW 增加到 234.95 mW 后降低至 164.42 mW。这是由于随着 n-In_xGa_{1-x}N 波导层钼组分的增加,LD 的光子损耗先逐渐减小后增大,同时载流子注入效率先逐渐增加后减小所致。随着钼组分增加,可以将光场限制在 n 侧波导层中,光子损耗先减少后增大,同时波导层折射率差增加^[14],光限制因子先增加后减

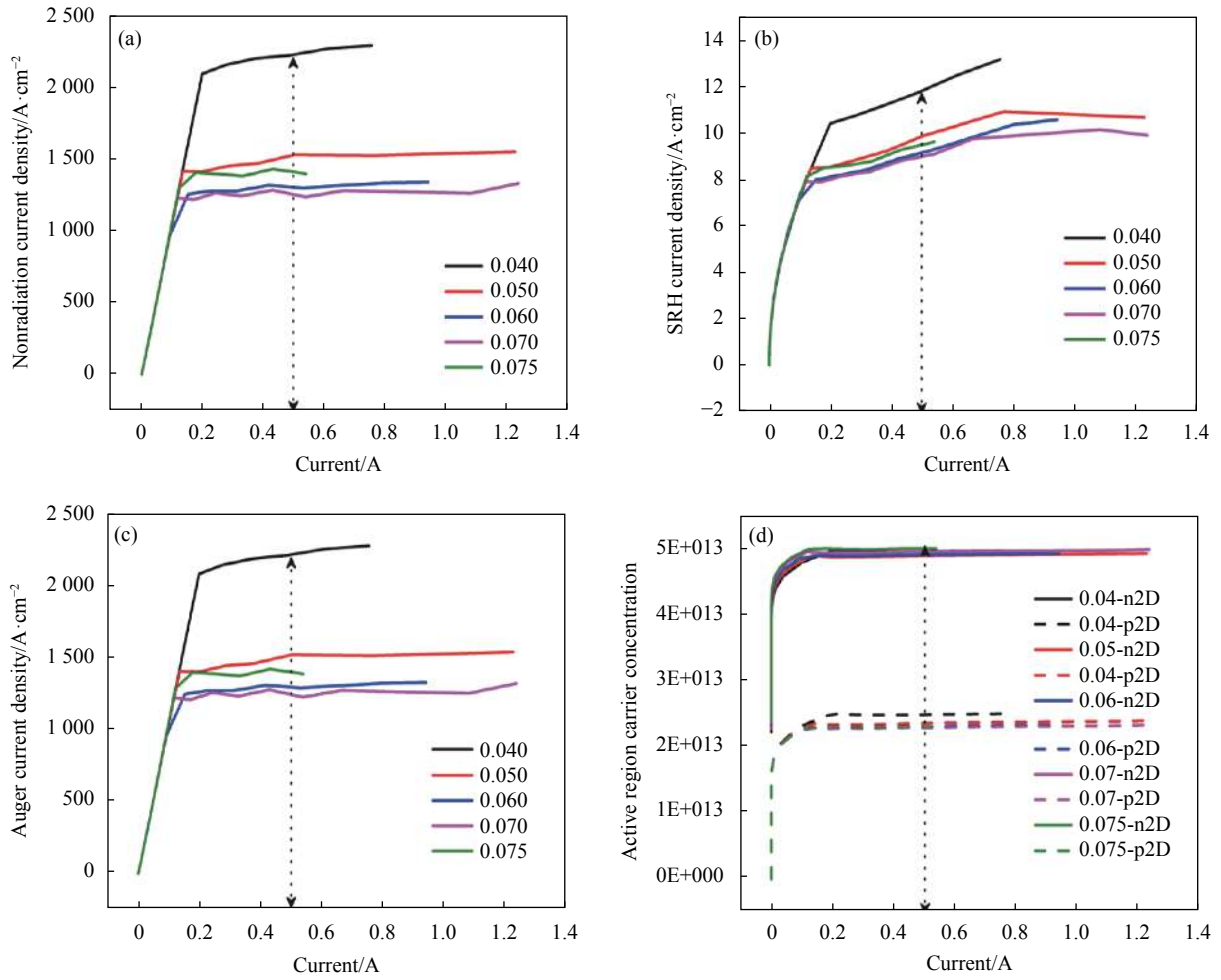


图 7 不同 $n\text{-In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 波导层铟组分下, LD 的非辐射电流密度 (a)、SRH 电流密度 (b)、俄歇电流密度 (c) 和有源区载流子浓度 (d) 与注入电流的关系

Fig.7 Curves of nonradiative current density (a), SRH current density (b), Auger current density (c) and active region carrier concentration (d) versus injected current at different indium components of $n\text{-In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ waveguide layers

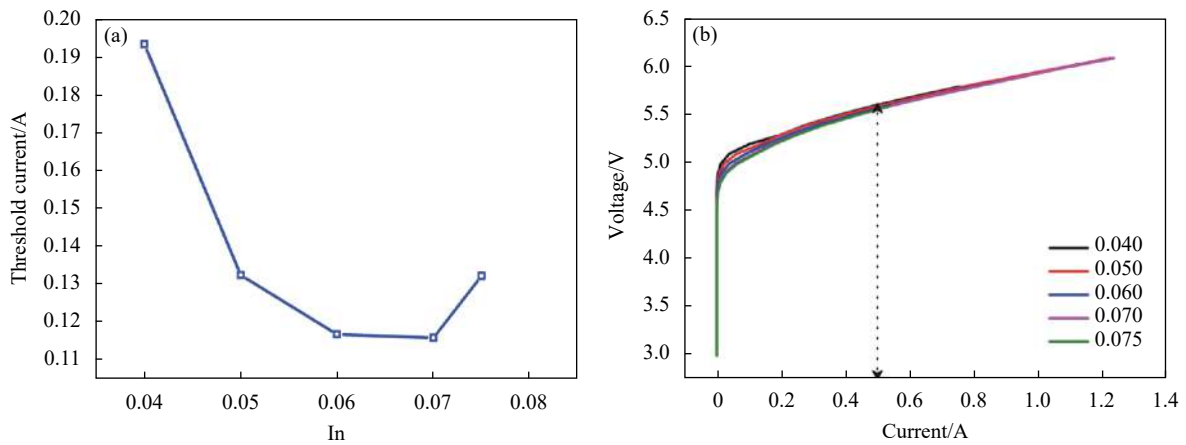


图 8 不同 $n\text{-In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 波导层铟组分下 LD 的阈值电流 (a) 和工作电压 (b) 与注入电流的关系曲线

Fig.8 Threshold current (a) and voltage (b) of laser diode with $n\text{-In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ waveguide indium contents versus injected current

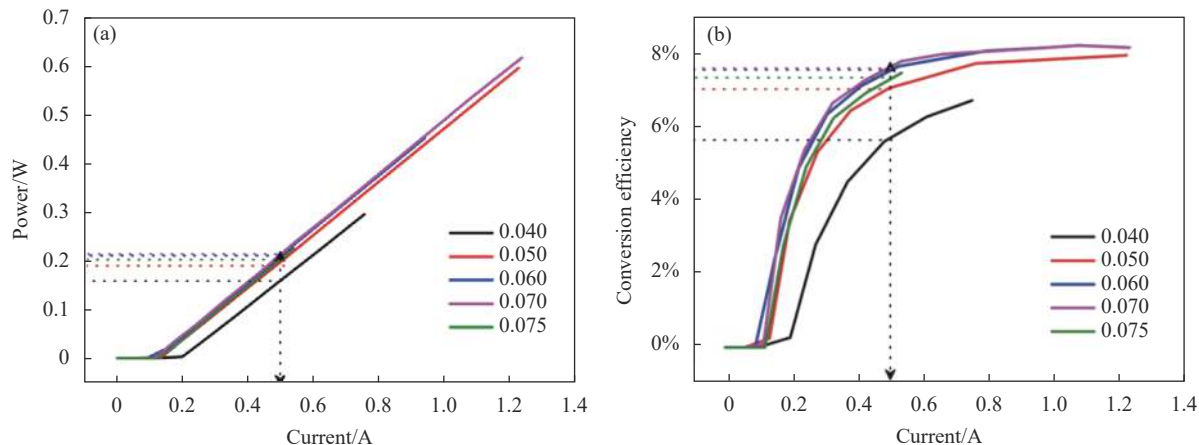


图 9 不同 $n\text{-In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 波导层铟组分下 LD 的功率 (a) 和电光转换效率 (b) 与注入电流的关系图

Fig.9 Simulated power (a) and conversion efficiency (b) of laser diode with $n\text{-In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ waveguide indium contents versus injected current

小,使得阈值电流先减小后增大^[16],同时使得输出功率增大^[24]。铟组分为 0.07 时器件的输出功率最高。

LD 的电光转换效率取决于 LD 的功率 P 、电流 I 和电压 V 。在注入电流为 6 kA/cm^2 时,0.07 时器件的电光转换效率接近 7.8%,如图 9(b) 所示。主要原因是随着 $n\text{-In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 波导层铟组分增加,输出功率先增大,且工作电压降低,从而电光转换效率增加;但铟组分继续增加时,输出功率降低,工作电压提高,电光转换效率降低。并且 LD 的电光转换效率取决于 LD 的阈值电流^[18,25],阈值电流越大,光电转换效率越低。因此,当 n -波导层铟组分为 0.07 时,可以改善器件的光子泄漏、输出功率以及电光转换效率等特性。

3 结 论

分析了光场中各种横模分布、光子损耗以及电学性能,对 InGaN 半导体绿光 LD 的 $n\text{-In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 侧波导层不同铟组分进行了仿真计算。研究结果表明, n 波导层铟组分增加,使限制层和波导层间的折射率差增加,调控光场在外延层分布,使光学限制因子从 1.89% 增加到 2.75%,光子泄漏减少,光子损耗减少。同时随着 n 波导铟组分的增加,载流子注入效率增加,电子泄漏减少,非辐射复合电子密度降低,从而内量子效率提高,且使得激光二极管的工作电压随 n 波导铟组分的增加而减小,阈值电流从 195.51 mA 降低到 112.76 mA。当注入电流为 0.5 A 时,获得 80% 的内量子效率、7.2% 的最佳电光转换效率和 284.28 mW 的输出功率。通过调控 InGaN 波导层铟组分为制备

高输出功率和光学特性的边发射激光二极管提供了理论实验数据。

参考文献:

- [1] Liu Y, Liu Y, Xiao H D, et al. 638 nm narrow linewidth diode laser with a grating external cavity [J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(6): 1249-1256. (in Chinese)
- [2] Cao Y X, Shu S L, Sun F Y, et al. Development of beam combining technology in mid-infrared semiconductor lasers (Invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(10): 1003002. (in Chinese)
- [3] Qiu B C, Hu H, Wang W M, et al. Design and fabrication of 12 W high power and high reliability 915 nm semiconductor lasers [J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(4): 590-603. (in Chinese)
- [4] Xu H W, Ning Y Q, Zeng Y G, et al. Design and epitaxial growth of quantum-well for 852 nm laser diode [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(3): 590-597. (in Chinese)
- [5] Yang B H, Cai Y D, Wen Z X, et al. Automatic compensation method for beam drift in long-distance laser measurement [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(11): 2393-2402. (in Chinese)
- [6] Lan T, Zhou G Z, Li Y, et al. Mitigation of efficiency droop in an asymmetric GaN-based high-power laser diode with sandwiched GaN/InAlN/GaN lower quantum barrier [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(6): 1-8.
- [7] Zhao D M, Zhao D G. Analysis of the growth of GaN epitaxy on silicon [J]. *Journal of Semiconductors*, 2018, 39(3): 033006.
- [8] Tian A Q, Hu L, Zhang L Q, et al. Design and growth of GaN-based blue and green laser diodes [J]. *Science China Materials*, 2020, 63(8): 1348-1363.

- [9] Lermer T, Schillgalies M, Breidenassel A, et al. Waveguide design of green InGaN laser diodes [J]. *Physica Status Solidi*, 2010, 207(6): 1328-1331.
- [10] Zhang Y, Xu P. Research progress of GaN-based lasers [J]. *Nonferrous Metal Materials and Engineering*, 2020, 41(1): 54-60. (in Chinese)
- [11] Zhang L Q, Jiang D S, Zhu J J, et al. Confinement factor and absorption loss of AlInGaN based laser diodes emitting from ultraviolet to green [J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, 105(2): 023104.
- [12] Feng M X, Sun Q, Liu J P, et al. Al-free cladding-layer blue laser diodes with a low aspect ratio in far-field beam pattern [J]. *Journal of Semiconductors*, 2018, 39(8): 61-65.
- [13] Liang F, Zhao D G, Jiang D S, et al. Influence of optical field distribution on GaN-based green laser diodes [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(7): 0701018. (in Chinese)
- [14] Muziol G, Turski H, Siekacz M, et al. Elimination of leakage of optical modes to GaN substrate in nitride laser diodes using a thick InGaN waveguide [J]. *Applied Physics Express*, 2016, 9(9): 092103.
- [15] Liang F, Zhao D G, Jiang D P, et al. Suppression of optical field leakage in GaN-based green laser diode using graded-indium n-In_xGa_{1-x}N lower waveguide [J]. *Superlattices and Microstructures*, 2019, 132: 106153.
- [16] Tang F Z, Zhu T T, Fu W Y, et al. Insight into the impact of atomic- and nano-scale indium distributions on the optical properties of InGaN/GaN quantum well structures grown on m-plane freestanding GaN substrates [J]. *Journal of Applied Physics*, 2019, 125(22): 225704.
- [17] Kawaguchi M, Imafuji O, Nozaki S, et al. Optical-loss suppressed InGaN laser diodes using undoped thick waveguide structure[C]//Conference on Gallium Nitride Materials and Devices XI, 2016, 9748: 974818.
- [18] Erbert G, Bugge F, Knigge A, et al. Highly reliable 75W InGaAs/AlGaAs laser bars with over 70% conversion efficiency [C]//Proceedings of SPIE—The International Society for Optical Engineering, 2007, 6133: 61330B.
- [19] Liang F, Zhao D P, Jiang D S, et al. New design of upper waveguide with unintentionally doped InGaN layer for InGaN-based laser diode [J]. *Optics & Laser Technology*, 2017, 97(1): 284-289.
- [20] Jong-In S, Hyungsung K, Dong-Soo S, et al. An explanation of efficiency droop in InGaN-based light emitting diodes: saturated radiative recombination rate at randomly distributed In-rich active areas [J]. *Journal- Korean Physical Society*, 2011, 58(3): 503-508.
- [21] Dong H L, Jia T T, Liang J, et al. Improved carrier transport and photoelectric properties of InGaN/GaN multiple quantum wells with wider well and narrower barrier [J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 129: 106309.
- [22] David, A, Grundmann M J, Kaeding J F, et al. Carrier distribution in (0001) InGaNGaN multiple quantum well light-emitting diodes [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(5): 053502.
- [23] Chong F, Wang J, Xiong C, et al. An asymmetric broad waveguide structure for a 0.98- μm high-conversion-efficiency diode laser [J]. *Journal of Semiconductors*, 2009, 30(6): 64-67.
- [24] Bour D P, Rosen A. Optimum cavity length for high conversion efficiency quantum well diode lasers [J]. *Journal of Applied Physics*, 1989, 66(7): 2813-2818.
- [25] Xu Z W, Qu Y, Wang Y Z, et al. Simulation analysis of high power asymmetric 980 nm broad-waveguide diode lasers [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(4): 1094-1098. (in Chinese)