

复合电子阻挡层优化 InGaN 基紫色激光器光电性能

谈奇灵, 李书平*

厦门大学物理科学与技术学院, 福建 厦门 361005

摘要 基于实验样品,利用 PICS3D 模拟软件分析电子阻挡层对激光器性能的影响,尤其是对电光转换效率的影响。通过在上波导层和电子阻挡层之间插入一层 AlGaIn 层,调整插入层和原始电子阻挡层的 Al 原子数分数和厚度,形成复合电子阻挡层,设计了一系列 InGaIn 基紫色激光器,并模拟比较它们的电流-电压特性曲线、发光功率、电光转换效率、能带分布和载流子分布等特性。结果表明,采用插入层的 Al 原子数分数和厚度分别为 0.30 和 15 nm、原始电子阻挡层的 Al 原子数分数和厚度为 0.24~0.06 和 5 nm 的新复合结构电子阻挡层,可以调整能带结构、抑制电子泄漏、增加空穴注入,从而提高辐射复合率、增大激光器电光转换效率。相较于参考结构,新结构的电光转换效率提升了 36.9%。

关键词 激光器; 电子阻挡层; 插入层; 电光转换效率

中图分类号 TN248

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS231298

1 引言

自 1996 年日亚公司 Nakamura 等^[1]制备出首个氮化镓(GaN)基蓝光激光二极管(LD)以来,GaN 材料在发光器件上的应用开始受到人们广泛关注^[2-3]。目前,Ⅲ族氮化物半导体凭借其优异的物理化学性质,如直接带隙、禁带宽度大、高载流子迁移率、高击穿电压、高热导率和良好的热稳定性等^[4-10],被广泛应用于发光二极管、激光二极管和探测器等光电器件和电子器件中^[5-6,11-12]。

GaN 基半导体激光器在高密度光学存储、固态照明、无线电通信、生物医学技术、化学分析等方面都得到广泛的应用^[3,7,12-21],相对于庞大的固体紫外激光器,GaN 基半导体激光器还能实现更高的功率、效率,更小的尺寸和更低的成本^[15,22-23]。目前,InGaIn 紫光激光器(390~435 nm)^[24]在结构上仍存在光损耗高、电阻大、晶格失配、电子泄漏、界面处极化电荷导致能带偏移等问题^[7,25],其中电子泄漏问题尤其显著,通常会在有源区(MQWs)与上波导层(UWG)之间,或者上波导层与 p 型覆盖层(p-CL)之间生长一层电子阻挡层(EBL)来抑制电子泄漏,但该 EBL 也会阻碍迁移率较低的空穴的注入^[7]。为了减少电子泄漏,研究人员提出了许多优化结构:Alahyarizadeh 等^[7]使用 AlInGaIn 四元 EBL 减少势垒和 EBL 界面的感应电荷引起的价

带偏移;Zhang 等^[26]设计了一种由 p 型掺杂 AlGaIn 和非故意掺杂 GaN 层组成的复合结构,并将其替代最后一层量子垒层(LQB),以克服电子泄漏问题;Liang 等^[27]发现上波导层使用 InGaIn/GaN 或者 GaN/AlGaIn 的复合结构时,光输出功率会恶化,故提出 InGaIn/GaN/AlGaIn 多层 UWG 结构,以减少光学损耗,提高发光功率;Xing 等^[28]设计了矩形、梯形、倒梯形 3 种结构 EBL,结果表明,反梯形结构 EBL 抑制电子泄漏的效果最好。

本文参考文献^[29]的紫色 In_{0.15}Ga_{0.85}N/GaN 激光器实验样品结构,激射波长为 410 nm,该波段激光在外科手术、穴位刺激等方面有重要应用^[30-31],但目前对该波段激光器研究仍然较少。为了进一步提高器件的光电性能,在参考结构 A 的基础上优化 EBL 结构,研究 Al_rGa_{1-r}N 复合 EBL 对紫色 In_{0.15}Ga_{0.85}N/GaN 激光器的影响,最终得到的优化结构 C,相对于参考结构,优化结构的电光转换效率提高了。

2 实验结构与参数

所使用的模拟软件是由 Crosslight 软件公司生产的 PICS3D 软件,该软件可以通过有限元方法,自洽求解泊松方程和电流连续性方程,模拟 GaN 基 LD 在三维空间中的工作情况^[32-33]。

所模拟的紫色 LD 参考结构 A 来自文献^[29]的实

收稿日期: 2023-07-24; 修回日期: 2023-08-21; 录用日期: 2023-09-06; 网络首发日期: 2023-09-22

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0400801, 2016YFB0400800)

通信作者: *lsp@xmu.edu.cn

验样品结构,如图 1 所示,从下到上依次为:厚度为 $1\ \mu\text{m}$ 的 n-GaN 衬底,掺杂浓度为 $3\times 10^{18}\ \text{cm}^{-3}$;厚度为 $1\ \mu\text{m}$ 、掺杂浓度为 $3\times 10^{18}\ \text{cm}^{-3}$ 的 n-Al_{0.08}Ga_{0.92}N 覆盖层;厚度为 120 nm、掺杂浓度为 $5\times 10^{17}\ \text{cm}^{-3}$ 的 n-GaN 波导层;由两个周期多量子阱组成的有源区结构,该结构由两层厚度为 2.5 nm 的 In_{0.15}Ga_{0.85}N 量子阱和三层厚度为 14 nm 的 GaN 量子垒构成,量子阱和量子垒均

非故意掺杂;厚度为 100 nm 的非故意掺杂 GaN UWG;厚度为 20 nm、掺杂浓度为 $5\times 10^{19}\ \text{cm}^{-3}$ 的 p-Al_{0.15}Ga_{0.85}N EBL;p 型覆盖层,选择厚度为 600 nm、掺杂浓度为 $2\times 10^{19}\ \text{cm}^{-3}$ 的 p-Al_{0.06}Ga_{0.94}N 层;p 型接触层,选择厚度为 40 nm、掺杂浓度为 $1\times 10^{20}\ \text{cm}^{-3}$ 的 p-GaN 层。表 1 所示为紫色 LD 参考结构 A 的各层信息。

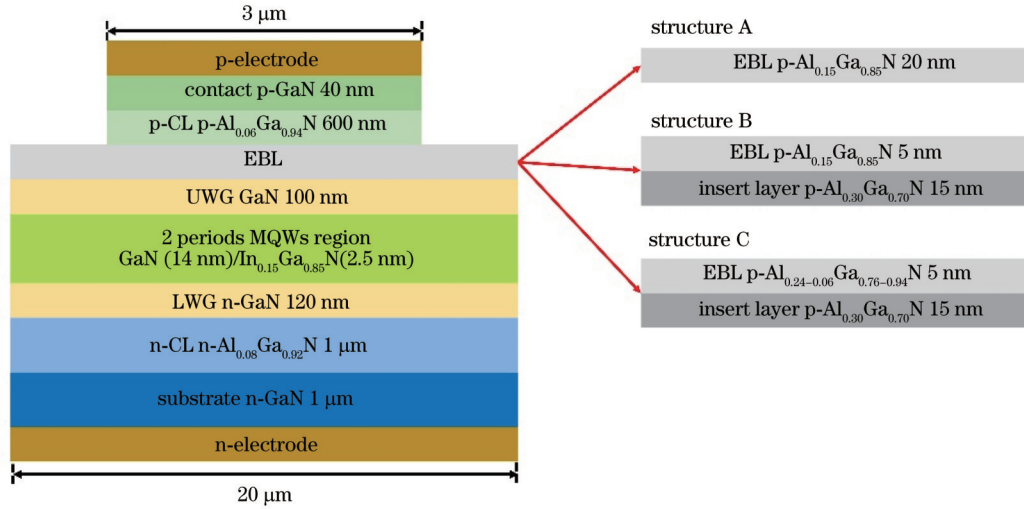


图 1 参考结构 A 与优化结构 B 和 C 示意图

Fig. 1 Schematic of reference structure A with optimized structures B and C

表 1 参考结构 A 各层信息

Table 1 Information on each layer of reference structure A

Layer	Thickness /nm	Doping concentration / cm^{-3}
p-GaN, contact	40	1×10^{20}
p-Al _{0.06} Ga _{0.94} N, CL	600	2×10^{19}
Al _{0.15} Ga _{0.85} N, EBL	20	5×10^{19}
u-GaN, UWG	100	0
GaN, QB	14	0
In _{0.15} Ga _{0.85} N, QW	2.5	0
n-GaN, LWG	120	5×10^{17}
n-Al _{0.08} Ga _{0.92} N, CL	1000	3×10^{18}
n-GaN, substrate	1000	3×10^{18}

出光方向上,器件的腔长设置为 $600\ \mu\text{m}$,脊宽为 $3\ \mu\text{m}$,前后腔面反射率分别设置为 10% 和 90%^[29]。模拟计算中其他参数如下:俄歇复合系数和肖特基-瑞利-霍尔(SRH)复合时间分别设置为 $1\times 10^{-29}\ \text{cm}^6/\text{s}$ 和 $0.1\ \text{ns}$ ^[34-35], GaN 材料的生长方向为 [0001], 器件外环境温度设置为 300 K,考虑到内部缺陷对内置极化的部分补偿作用^[20],极化屏蔽系数设置为 25%^[29], GaN 材料的能带偏移率设置为 0.65^[36], Al_xGa_{1-x}N 和 In_yGa_{1-y}N 材料的折射率按照文献[29, 37-38]的方法设置;材料内部光吸收系数参考文献[29, 39]提出的简单线性函数,其他参数按照 PICS3D 软件和文献[36]设置。

图 2 所示为参考结构 A 的光功率模拟仿真结果与文献[29]中对应结构的实验结果的对比,考虑到文献[29]中实验结构发光功率曲线的纵轴单位是任意单位 (arb. units),将该文献中 1200 mA 注入电流下的光功率缩放到与模拟实验中相同电流下的发光功率,对其他电流下的发光功率也乘以相同的缩放系数。从图像可以观察到:仿真模拟结果的发光功率曲线的阈值电流、斜率效率和 1200 mA 注入电流下发光功率分别为 238 mA、0.957 W/A、906 mW,而实验结果的阈值电流和斜率效率分别为 229 mA、0.941 W/A,相对误差分别为 3.9%、2.7%;模拟结果的激射波长为 409.9 nm,而文献[29]中该结构的实验激射波长为 410 nm,相对误差只有 0.02%。由此可以说明,按照文献[29]的实验结构模拟的结果是可靠的。

3 优化结果与讨论

将通过调节 EBL 中 AlGa_xN 材料的 Al 含量,以调整能带结构,从而减小电子泄漏、提高激射复合率。首先,在 EBL 与上波导层之间引入一层 AlGa_xN 层,称为插入层,并将其与 EBL 层结合,构成复合结构 EBL;然后,通过减少原始 EBL 厚度,使得复合结构 EBL 的厚度始终与参考实验的 EBL 厚度保持一致,即 20 nm。

首先,设置插入层的厚度为 1 nm,原 EBL 的厚度为 19 nm;插入层的 Al 原子数分数设定为与 EBL 一致,为 0.15。然后,改变插入层 Al 原子数分数为

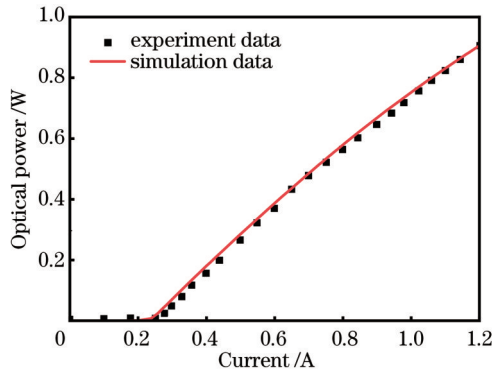


图 2 实验与模拟参考结构的 $P-I$ 特性曲线

Fig. 2 $P-I$ characteristic curves of experimental and simulated reference structures

表 2 不同插入层和原始 EBL 厚度、Al 原子数分数下各系列样品名称

Table 2 Names for each series of samples with different insert layer and original EBL thicknesses and Al atomic number fraction

Thickness / nm	Sample name								
	$x=0.15$	$x=0.18$	$x=0.20$	$x=0.23$	$x=0.25$	$x=0.27$	$x=0.30$	$x=0.35$	$x=0.40$
1+19	LD I -0.15	LD I -0.18	LD I -0.20	LD I -0.23	LD I -0.25	LD I -0.27	LD I -0.30	LD I -0.35	LD I -0.40
5+15	LD II -0.15	LD II -0.18	LD II -0.20	LD II -0.23	LD II -0.25	LD II -0.27	LD II -0.30	LD II -0.35	LD II -0.40
10+10	LD III -0.15	LD III -0.18	LD III -0.20	LD III -0.23	LD III -0.25	LD III -0.27	LD III -0.30	LD III -0.35	LD III -0.40
15+5	LD IV -0.15	LD IV -0.18	LD IV -0.20	LD IV -0.23	LD IV -0.25	LD IV -0.27	LD IV -0.30	LD IV -0.35	LD IV -0.40
19+1	LD V -0.15	LD V -0.18	LD V -0.20	LD V -0.23	LD V -0.25	LD V -0.27	LD V -0.30	LD V -0.35	LD V -0.40

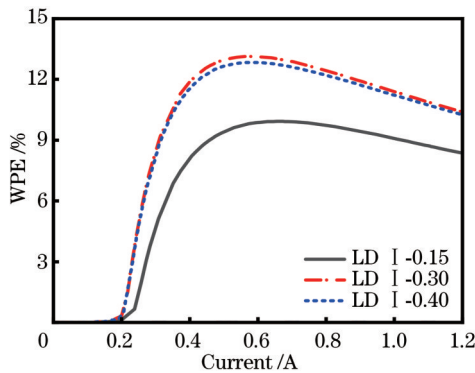


图 3 系列 I 中部分样品的电光转换效率随电流的变化曲线
Fig. 3 Wall plug efficiency versus current for partial samples in series I

提取系列 I 中各样品在 1200 mA 注入电流下的电光转换效率,并绘制出电光转换效率随插入层 Al 含量的变化曲线,如图 4 所示。

从图 4 可以观察到,在 1200 mA 注入电流下,随着系列 I 样品中插入层 Al 含量的增加,电光转换效率表现出一个明显的趋势:开始时迅速增大,然后缓慢减小。在系列 I 的所有样品中,插入层 Al 原子数分数为 0.27 的 LD I -0.27 具有最高的电光转换效率,达到了 10.38%,相较于参考结构 A,其电光转换效率提高了 24.2%。

按照相同的方法,可以得到系列 II ~ V 中所有样品在 1200 mA 注入电流下,电光转换效率随着插入层

0.18、0.20、0.23、0.25、0.27、0.30、0.35 和 0.40,共得到 9 个样品,并将这些样品命名为系列 LD I,其中 Al 原子数分数为 0.15 的样品被命名为 LD I -0.15,Al 原子数分数为 0.18 的样品被命名为 LD I -0.18,以此类推得到其他样品名称。

在样品 LD I -0.15 中,改变插入层和 EBL 的厚度,将插入层厚度分别设置为 5、10、15、19 nm,并按照系列 I 中的样品设置插入层原子数分数,将这些样品按照厚度分别命名为系列 II、系列 III、系列 IV 和系列 V。各个系列中样品的命名如表 2 所示。

模拟出表 2 中系列 I ~ V 的所有样品,并绘制出系列 I 中部分样品的电光转换效率(WPE)随注入电流的变化曲线,如图 3 所示。

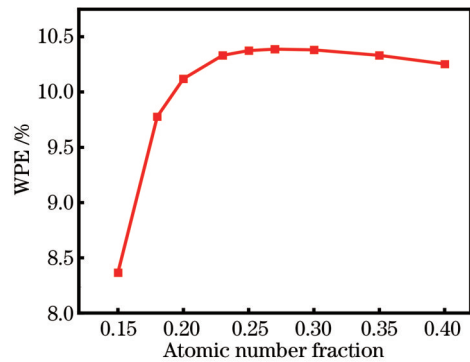


图 4 1200 mA 注入电流下,系列 I 中样品的电光转换效率随插入层 Al 含量的变化
Fig. 4 Variation of wall plug efficiency with insert layer Al content in series I at 1200 mA injection current

Al 含量的变化情况,图 5 展示了所有系列中电光转换效率随插入层 Al 含量变化的趋势。

从图 5 能够观察到:随着插入层 Al 含量的增加,所有系列样品的电光转换效率均呈现出先增加后减小的趋势;当插入层 Al 原子数分数处于 0.25~0.30 时,各系列样品的电光转换效率达到最大。值得注意的是,在上述 Al 含量范围内的样品,随着插入层厚度逐渐增大,同一 Al 含量样品的电光转换效率先增大后减小。

在所有系列中,电光转换效率最大的样品为 LD IV -0.30,即插入层厚度为 15 nm,Al 原子数分数为 0.30 的样品光电性能最佳;在 1200 mA 注入电流下,

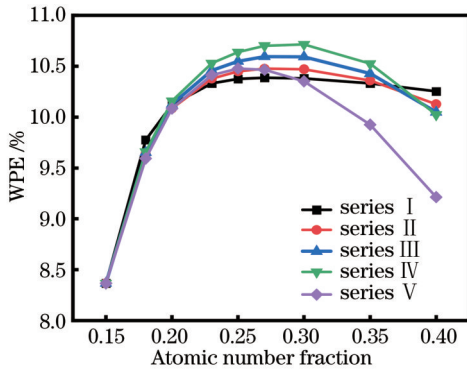
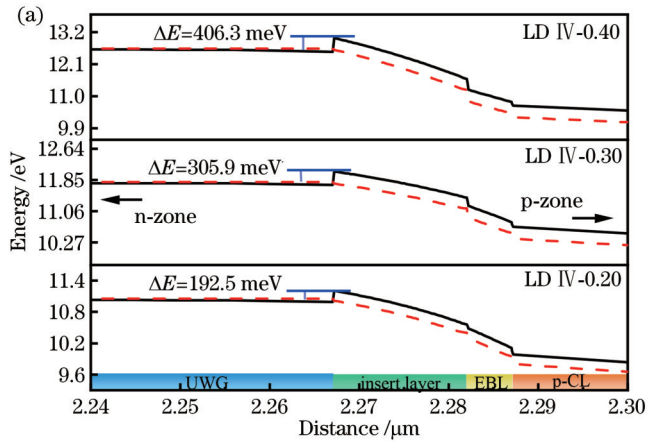


图 5 1200 mA 注入电流下,系列 I~V 中各样品的电光转换效率随插入层 Al 含量的变化

Fig. 5 Variation of wall plug efficiency with insert layer Al content for each sample in series I-V at 1200 mA injection current



其电光转换效率为 10.72%,相较于参考结构 A,其电光转换效率提升了 28.2%。

接下来,从能带和载流子分布的角度分析 LD IV-0.30 性能优于其他结构的原因。选择插入层厚度相同的 LD IV-0.20、LD IV-0.30 和 LD IV-0.40 3 个样品,并绘制出它们的能带结构,如图 6 所示。

由图 6 可知,LD IV-0.20、LD IV-0.30 和 LD IV-0.40 3 个样品的插入层对于电子的有效势垒高度分别为 192.5、305.9、406.3 meV,对于空穴的有效势垒高度分别为 176.3、184.9、210.9 meV。

由于原 EBL 的 Al 含量保持不变,EBL 对空穴的有效势垒高度几乎保持不变,经验证,LD IV-0.20、LD IV-0.30 和 LD IV-0.40 3 个样品的 EBL 对空穴的有效势垒高度分别为 177.5、176.2、176.2 meV,差距可以忽略不计。

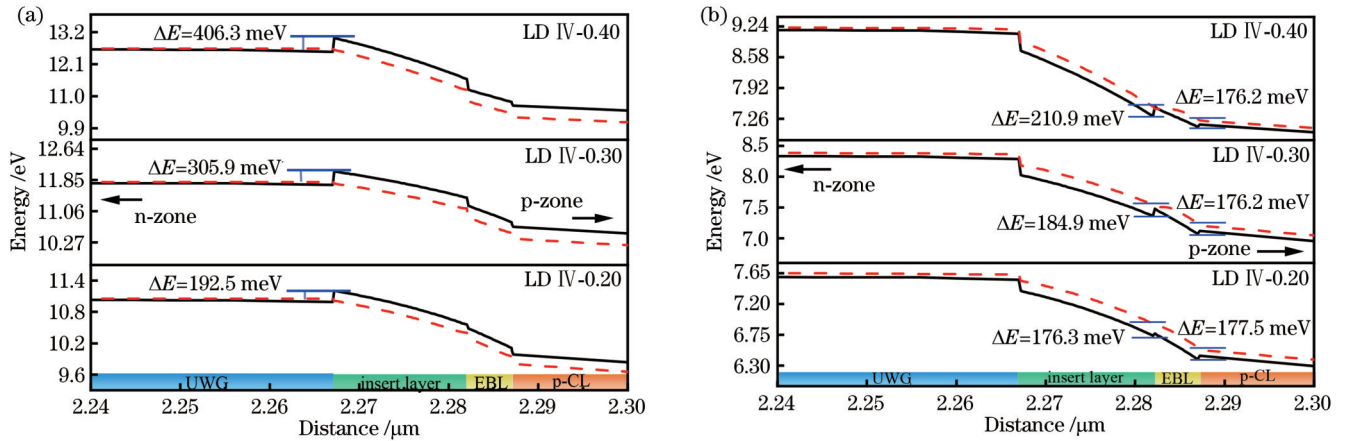


图 6 1200 mA 注入电流下,LD IV-0.20、LD IV-0.30 和 LD IV-0.40 的能带图像。(a) 导带;(b) 价带

Fig. 6 Energy band of LD IV-0.20, LD IV-0.30, and LD IV-0.40 at 1200 mA injection current. (a) Conduction band; (b) valence band

综上所述,随着插入层 Al 含量的逐渐增大,插入层的能带宽度逐渐展宽,对电子和空穴的势垒高度也逐渐增大,电子和空穴穿过插入层的难度更大,从而导致电子泄漏和空穴注入减少。当插入层 Al 原子数分数小于 0.30 时,电子势垒高度较低,导致电子泄漏较大,激励所需的电子数量较少,从而导致电光转换效率降低;当 Al 原子数分数大于 0.30 时,空穴势垒高度较高,导致空穴注入难度更大,激励所需的空穴数量减少,从而导致电光转换效率降低。因此,电子势垒高度和空穴势垒高度达到相对平衡的 LD IV-0.30 具有最大的电光转换效率。

为了验证以上结论,绘制出 LD IV-0.20、LD IV-0.30 和 LD IV-0.40 3 个样品的电子浓度(α_e)和空穴浓度(α_h)分布曲线,如图 7 所示。可以观察到,在 LD IV-0.20、LD IV-0.30 和 LD IV-0.40 结构的插入层和 EBL 中,随着 Al 含量的增加,电子浓度呈现出减小的趋势,这与前文得到的插入层的电子有效势垒高度变化规律一致,LD IV-0.40 的插入层对电子的有效势垒高度最高,电子泄漏最少,因此插入层和 EBL 的

子浓度最小。对于空穴,由于插入层的势垒阻挡,EBL 中靠近 n 区的界面产生积累;随着插入层 Al 含量逐渐增大,插入层和 EBL 之间空穴的有效势垒增大,空穴经插入层注入有源区就变得困难,因此插入层中空穴浓度也随着 Al 含量增大呈现减少的趋势。

值得注意的是,在插入层和 EBL 层中靠近 p 区界面处都存在少量的电子堆积。产生这种现象部分原因是外电场,电子有向 p 区移动的趋势,导致电子在界面势垒处堆积,还有一部分原因是 GaN、InN 和 AlN 等纤锌矿结构材料的极化^[40]。以 LD IV-0.30 样品为例,插入层、EBL 和 p 型覆盖层的体材料分别为 $\text{Al}_{0.30}\text{Ga}_{0.70}\text{N}$ 、 $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ 和 $\text{Al}_{0.06}\text{Ga}_{0.94}\text{N}$,由于 GaN、InN 和 AlN 材料界面之间存在自发极化和压电极化,而且设置材料的生长方向是 Ga 极生长,即沿 [0001] 方向生长,在这种情况下,自发极化方向与外电场方向相同,而压电极化方向与材料界面的 Al 含量有关。在 EBL 中,AlGaIn 材料的 Al 含量小于插入层,而在 p 型覆盖层中,AlGaIn 材料的 Al 含量也小于 EBL,所以这两个界面上的压电极化方向与外电场相反。此外,相对于外电场,

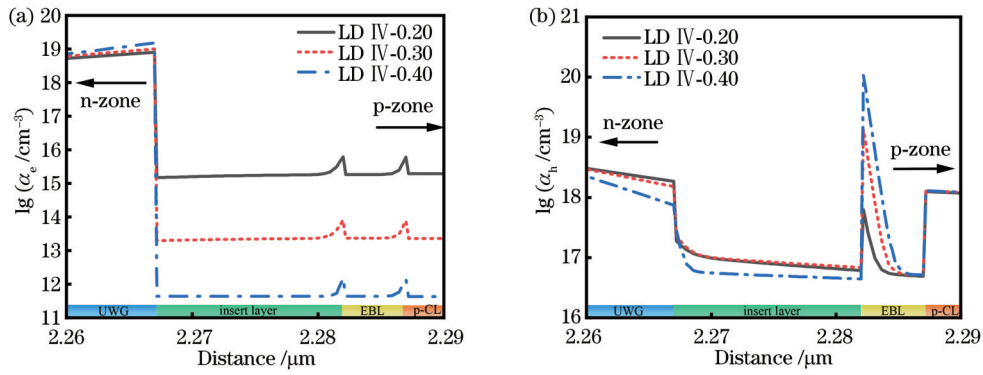


图 7 1200 mA 注入电流下, LD IV-0.20、LD IV-0.30 和 LD IV-0.40 的载流子浓度分布。(a) 电子; (b) 空穴

Fig. 7 Carrier concentration distribution of LD IV-0.20, LD IV-0.30, and LD IV-0.40 at 1200 mA injection current. (a) Electrons; (b) holes

压电极化产生的场强相对较小。因此,在这两个界面附近存在一个局部反向电场,它阻碍了电子的迁移,导致在两个界面处产生电子堆积。

综上所述:在插入层 Al 原子数分数小于 0.30 的情况下,电子势垒高度较低,不足以抑制电子泄漏,从而导致有源区内激射复合减少,电光转换效率降低;在插入层 Al 原子数分数大于 0.30 的情况下,空穴势垒过高、压电极化增强,从而阻碍空穴注入,同样导致有源区激射复合减少,电光转换效率降低。因此插入层

Al 原子数分数为 0.30 时,能够在电子和空穴势垒之间取得平衡,使得有源区内激射复合达到最佳状态,从而实现电光转换效率达到最高。

在接下来的分析中,将考虑在保持 Al 含量不变的情况下,随着插入层厚度的增大,电光转换效率先增大后减小的原因。选取 LD I-0.30、LD II-0.30、LD III-0.30、LD IV-0.30 和 LD V-0.30 5 个样品,绘制出这 5 个样品在注入电流为 1200 mA 时,发光功率、电光转换效率以及电压随插入层厚度的变化曲线,如图 8 所示。

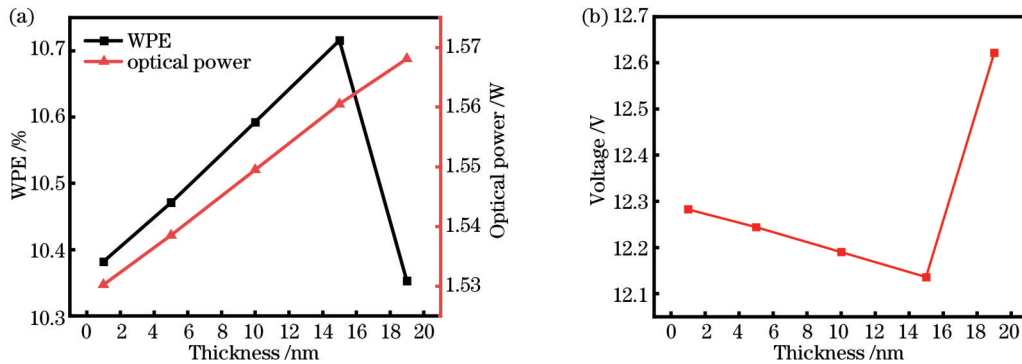


图 8 1200 mA 注入电流下, LD I-0.30、LD II-0.30、LD III-0.30、LD IV-0.30 和 LD V-0.30 的光电性能随插入层厚度的变化。(a) 发光功率和电光转换效率; (b) 电压

Fig. 8 Photovoltaic performance of LD I-0.30, LD II-0.30, LD III-0.30, LD IV-0.30, and LD V-0.30 with the thickness of insert layer at 1200 mA injection current. (a) Optical power and wall plug efficiency; (b) voltage

从图 8 可以观察到,在 1200 mA 注入电流下,随着插入层厚度逐渐增大,发光功率逐渐增大,而电光转换效率呈现出先增大后减小的趋势,电压呈现出先减小后增大的趋势,当插入层厚度为 15 nm 时,电光转换效率和电压均取得极值。

绘制出 LD IV-0.30 的能带结构,如图 9 所示。由图 9 可知,LD IV-0.30 的插入层对电子和空穴的势垒高度分别为 305.9 meV 和 184.9 meV,而 EBL 对空穴的势垒高度为 176.2 meV。按照同样的方法,可以得到其他样品的插入层对载流子的势垒高度,如表 3 所示。随着插入层厚度增大,空穴的势垒高度逐渐增大。

绘制出 5 个样品的能带结构,为了更好地观察,以下只显示价带结构,如图 10 所示。可以观察到,AlGaIn 材料本身的极化作用使得插入层和 EBL 的能带产生倾斜。此外,随着插入层厚度的增大,上波导层的能带高度先降低后增高,其中 LD IV-0.30 的上波导层能带高度最低。

上波导层与 p 型覆盖层之间的能带高度差距越大,对载流子的阻碍作用即总电阻越大,表现在同一注入电流下电压越大。在插入层厚度小于 15 nm 的情况下,由于插入层对空穴的势垒高度增大,上波导层和 p 型覆盖层之间的能带高度差距减小,导致上波导层能带高度降低,电压逐渐减小;在厚度大于 15 nm 的情况

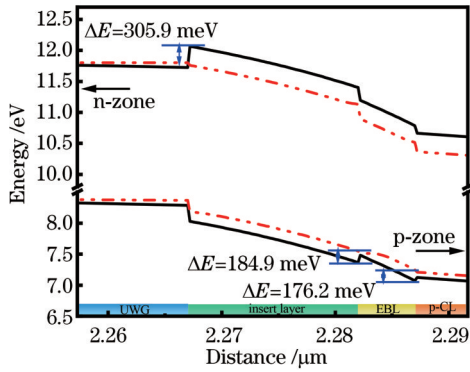


图 9 1200 mA 注入电流下, LD IV-0.30 的能带结构
Fig. 9 Energy band structure of LD IV-0.30 at 1200 mA injection current

表 3 LD I-0.30、LD II-0.30、LD III-0.30、LD IV-0.30 和 LD V-0.30 在 1200 mA 注入电流下的电子和空穴势垒高度
Table 3 Electron and hole barrier heights of LD I-0.30, LD II-0.30, LD III-0.30, LD IV-0.30, and LD V-0.30 at 1200 mA injection current unit: meV

Carrier	LD I-30	LD II-30	LD III-30	LD IV-30	LD V-30
Electron	292.4	307.4	307.0	305.9	290.5
Hole	165.1	176.2	180.6	184.9	194.3

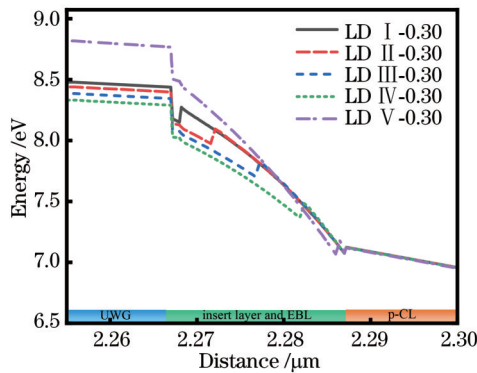


图 10 1200 mA 注入电流下, LD I-0.30、LD II-0.30、LD III-0.30、LD IV-0.30 和 LD V-0.30 的价带分布
Fig. 10 Valence band distribution of LD I-0.30, LD II-0.30, LD III-0.30, LD IV-0.30, and LD V-0.30 at 1200 mA injection current

下,尽管空穴势垒高度仍在增大,但是 EBL 厚度过小,EBL 中靠近 n 区和靠近 p 区两个界面的压电极化相互增强,进一步加剧了插入层能带倾斜,最终导致上波导层能带高度仍然增高,从而引起电压上升。因此,在 1200 mA 注入电流下,电压呈现出先减小后增大的趋势。

综上所述:当插入层厚度小于 15 nm 时,发光功率持续增大,而电压持续减小,导致电光转换效率逐渐提高;当厚度大于 15 nm 时,尽管发光功率仍在增大,但电压的增大逐渐占据主导地位,从而导致电光转换效

率开始下降。最终插入层厚度为 15 nm 时,即 LD IV-0.30 的电光转换效率达到最大。

将上述优化结构 LD IV-0.30 命名为结构 B。如前所述,由于原 EBL 和 p 型覆盖层的 Al 含量未改变,EBL 对空穴的有效势垒高度也保持不变。为进一步减小势垒高度、提高电光转换效率,对 EBL 的 Al 含量进行调整。

接下来,调整原 EBL 的 Al 原子数分数,从恒定的 0.15 调整为渐变。设置平均原子数分数为 0.15,改变结构 B 中 EBL 的 Al 原子数分数为 0.10~0.20、0.12~0.18、0.18~0.12、0.20~0.10、0.24~0.06、0.27~0.03,分别用 LD 1、LD 2、LD 3、LD 4、LD 5、LD 6 来命名调整后的样品。同样地,绘制出这些样品在 1200 mA 注入电流下的电光转换效率,如图 11 所示。

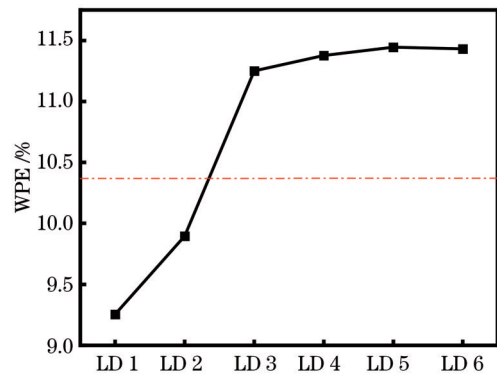


图 11 1200 mA 注入电流下, LD 1、LD 2、LD 3、LD 4、LD 5、LD 6 的电光转换效率,其中虚线是恒定 Al 原子数分数的结构 B 在该电流下的电光转换效率
Fig. 11 Wall plug efficiency of LD 1, LD 2, LD 3, LD 4, LD 5, and LD 6 at 1200 mA injection current, the dashed line is the wall plug efficiency of structure B with constant Al atomic number fraction at this injection current

在图 11 中,虚线表示为结构 B 在相同测试条件下的电光转换效率。可以观察到:Al 含量沿生长方向逐渐增大的样品,即 LD 1 和 LD 2,其电光转换效率低于具有恒定 Al 原子数分数 EBL 的结构 B;Al 含量沿生长方向逐渐减小的样品,即 LD 3、LD 4、LD 5 和 LD 6,它们的电光转换效率均高于结构 B;电光转换效率最高的样品是 LD 5,即 EBL 的 Al 原子数分数渐变为 0.24~0.06、厚度为 5 nm 的样品。

接下来,选择 LD 1、LD 5 和结构 B 3 个样品,从能带结构和载流子浓度分布的角度,解释 Al 含量渐变对光电性能的影响。绘制出这 3 个结构的能带图,如图 12 所示。由图 12 可知,LD 1、结构 B 和 LD 5 的插入层对电子的有效势垒高度分别为 257.9、305.9、314.6 meV,插入层对空穴的有效势垒高度分别为 200.3、184.9、169.7 meV。

LD 1 和结构 B 的 EBL 对空穴的有效势垒高度分

别为 188.9 meV 和 176.2 meV, 而在 LD 5 中, EBL 靠近 p 区的 Al 原子数分数与 p 型覆盖层的 Al 原子数分

数均为 0.06, 因此认为 LD 5 的 EBL 对空穴没有阻碍作用。

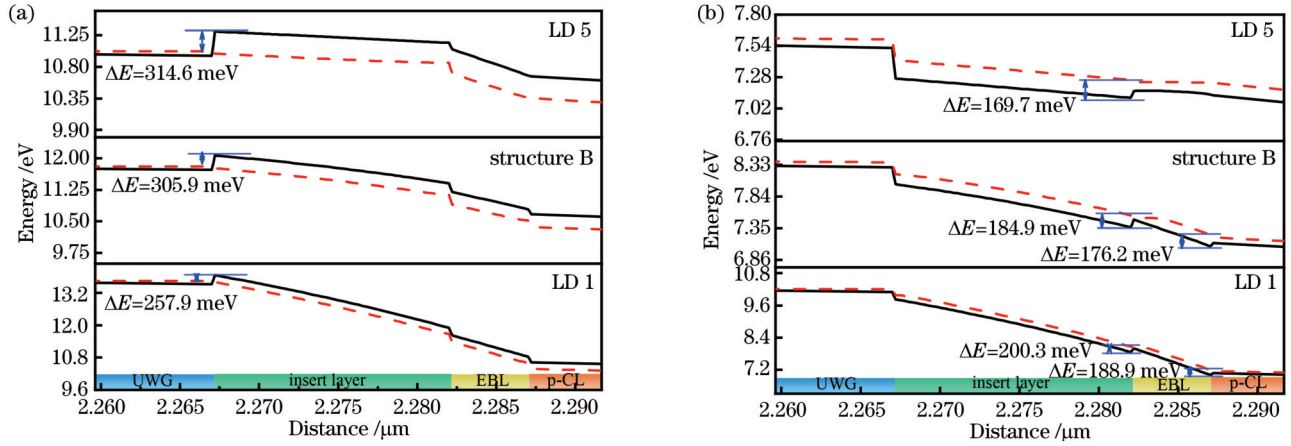


图 12 1200 mA 注入电流下, LD 1、结构 B 和 LD 5 的能带结构。(a) 导带; (b) 价带

Fig. 12 Energy band of LD 1, structure B, and LD 5 at 1200 mA injection current. (a) Conduction band; (b) valence band

综上所述: 相对于结构 B, EBL 中 Al 含量逐渐减小的 LD 5 的电子势垒高度更大, 空穴势垒高度更小; 相反地, EBL 中 Al 含量逐渐增大的 LD 1 的电子势垒高度减小, 空穴势垒高度增大。这 3 个样品的载流子浓度分布如图 13 所示。可以观察到: 在插入层和 EBL 中, LD 1 的电子浓度最大, 空穴浓度最小; LD 5 的电子浓度最

小, 空穴浓度最大。这与从能带结构得出的结论一致: 一方面, LD 5 的电子势垒高度最大, 导致电子泄漏最少, 插入层和 EBL 中电子浓度最小, 有更多电子被阻挡在有源区; 另一方面, LD 5 的空穴势垒高度最小, 有利于空穴注入, 所以有源区中有更多的空穴与电子参与辐射复合, 从而导致 LD 5 的电光转换效率更高。

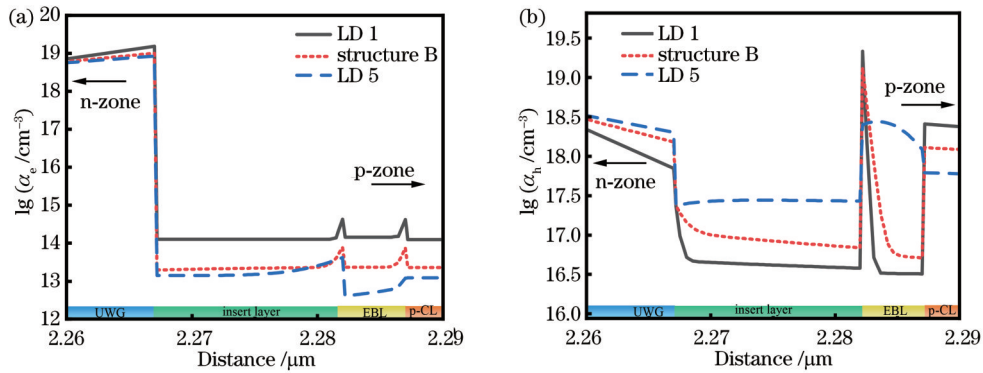


图 13 1200 mA 注入电流下, LD 1、结构 B 和 LD 5 的载流子浓度分布。(a) 电子; (b) 空穴

Fig. 13 Carrier concentration distribution of LD 1, structure B, and LD 5 at 1200 mA injection current. (a) Electrons; (b) holes

如前所述, 由于在 LD 5 的 EBL 中靠近 p 区一侧的 Al 含量与 p 型覆盖层一致, 因此认为没有空穴势垒高度, 从而使得空穴注入效率更高。此外, EBL 本身的 p 型掺杂浓度比 p 型覆盖层高, 导致 EBL 中的空穴浓度大于 p 型覆盖层, 所以 EBL 靠近 p 区一侧没有电子积累; 在插入层中, LD 1、结构 B 和 LD 5 依然存在由压电极化产生的电子累积, 然而, 由于 LD 5 的电子泄漏更少, 空穴注入较多, 而且 EBL 中靠近 n 区的一侧 Al 原子数分数为 0.24, 与插入层中 Al 原子数分数 0.30 的差距减小, 导致压电极化减弱, 因此 LD 5 的插入层中电子累积的范围相对较大。

最终, 将优化 EBL 的 Al 含量后得到的最佳结构 LD 5 命名为结构 C。接下来对比参考结构 A、结构 B

和结构 C 3 个样品的光电性能。图 14 展示了结构 A、B 和 C 的电流-电压 (I - V) 特性曲线、电光转换效率随电流的变化以及激光光谱, 它们的阈值电压、激光波长和在 1200 mA 注入电流下的电光转换效率如表 4 所示。

通过对比可知: 相对于参考结构 A, 优化结构 B 和 C 的阈值电压略微上升, 电光转换效率显著提升; 相对于结构 B, 优化结构 C 的电光转换效率进一步提高; 相对于参考结构 A, 优化结构 C 的电光转换效率提高了 36.9%。3 个结构的激光波长均在 410 nm 附近。

4 结 论

参考紫色 InGa_N 基激光器实验结构, 设计了新的

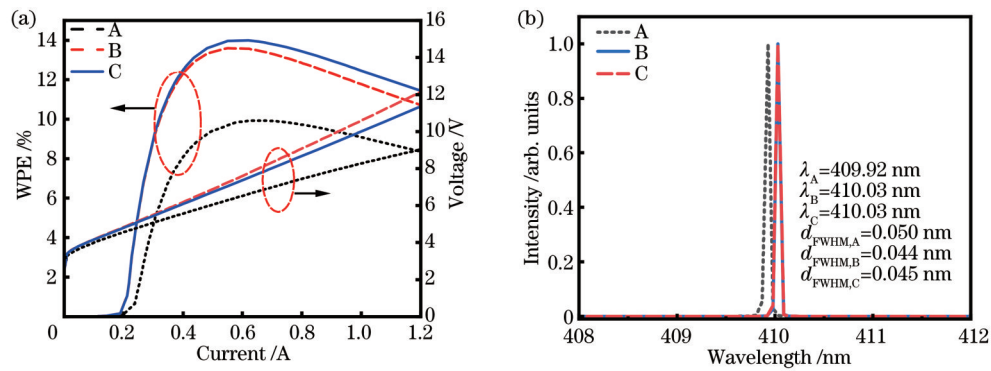


图 14 结构 A、B 和 C 的光电特性。(a)电压和电光转换效率随电流的变化;(b)1200 mA 注入电流下的激光光谱

Fig. 14 Photoelectric properties of structures A, B, and C. (a) Voltage and wall plug efficiency versus current; (b) radiation spectra at 1200 mA injection current

表 4 结构 A、结构 B 和结构 C 的光电性能

Table 4 Photoelectric properties of structures A, B, and C

Structure	Threshold voltage / V	WPE / %	Radiation wavelength / nm
A	4.761	8.365	409.92
B	4.836	10.72	410.03
C	4.832	11.45	410.03

EBL 结构,优化了紫色激光器的光电性能。首先,根据实验结构,模拟其光电性能并对比分析;然后,重新设计了 EBL 结构,将其设置为靠近有源区的插入层和靠近 p 区的原 EBL 两层结构,调整插入层和原 EBL 的厚度和 Al 含量,设计了一系列 InGaN 基紫色激光器的样品,通过对比这些样品的发光功率、电流-电压特性曲线、电光转换效率等参数,得到优化结构 B 和 C;最后,根据优化样品的能带结构、载流子分布等内部特性,总结优化结构光电性能提升的内部机理。相对于参考结构,最终优化结构 C 的电光转换效率提升了 36.9%。

参 考 文 献

- [1] Nakamura S, Senoh M, Nagahama S I, et al. InGaN-based multi-quantum-well-structure laser diodes[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1996, 35(1B): L74-L76.
- [2] Liang F, Zhao D G, Liu Z S, et al. Improved performance of GaN-based blue laser diodes using asymmetric multiple quantum wells without the first quantum barrier layer[J]. Optics Express, 2022, 30(6): 9913-9923.
- [3] Goldberg G R, Ivanov P, Ozaki N, et al. Gallium nitride light sources for optical coherence tomography[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10104: 101041X.
- [4] Anani M, Abid H, Chama Z, et al. $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ refractive index calculations[J]. Microelectronics Journal, 2007, 38(2): 262-266.
- [5] Liang F, Chen P, Zhao D G, et al. Observation of positive and small electron affinity of Si-doped AlN films grown by metalorganic chemical vapor deposition on n-type 6H-SiC[J]. Chinese Physics B, 2016, 25(5): 057703.
- [6] Cao Z K, Wang X W, Zhao D G, et al. The influence of temperature and TMGa flow rate on the quality of p-GaN[J]. AIP Advances, 2021, 11(3): 035109.
- [7] Alahyarizadeh G, Amirhoseiny M, Hassan Z. Effect of different EBL structures on deep violet InGaN laser diodes performance [J]. Optics & Laser Technology, 2016, 76: 106-112.
- [8] Zhang Z Z, Yang J, Zhao D G, et al. The melt-back etching effect of the residual Ga in the reactor for GaN grown on (111) Si [J]. AIP Advances, 2022, 12(9): 095106.
- [9] Hezabra A, Abdeslam N A, Sengoua N, et al. 2D study of AlGaIn/AlN/GaN/AlGaIn HEMTs' response to traps[J]. Journal of Semiconductors, 2019, 40(2): 022802.
- [10] 胡磊, 张立群, 刘建平, 等. 高功率氮化镓基蓝光激光器[J]. 中国激光, 2020, 47(7): 0701025.
- [11] Hu L, Zhang L Q, Liu J P, et al. High power GaN-based blue lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(7): 0701025.
- [12] Peng L Y, Liu S T, Yang J, et al. The influence of residual GaN on two-step-grown GaN on sapphire[J]. Materials Science in Semiconductor Processing, 2021, 135: 105903.
- [13] Liang F, Zhao D G, Liu Z S, et al. GaN-based blue laser diode with 6.0 W of output power under continuous-wave operation at room temperature[J]. Journal of Semiconductors, 2021, 42(11): 112801.
- [14] 袁庆贺, 井红旗, 张秋月, 等. 砷化镓基近红外大功率半导体激光器的发展及应用[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(4): 040003.
- [15] Yuan Q H, Jing H Q, Zhang Q Y, et al. Development and applications of GaAs-based near-infrared high power semiconductor lasers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(4): 040003.
- [16] 宁永强, 陈泳屹, 张俊, 等. 大功率半导体激光器发展及相关技术概述[J]. 光学学报, 2021, 41(1): 0114001.
- [17] Ning Y Q, Chen Y Y, Zhang J, et al. Brief review of development and techniques for high power semiconductor lasers [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(1): 0114001.
- [18] 朱坤, 李辉, 郝永芹, 等. 分布布拉格反射器半导体激光器中光栅结构设计[J]. 中国激光, 2023, 50(11): 1101022.
- [19] Zhu K, Li H, Hao Y Q, et al. Design of grating structure in distributed Bragg reflector semiconductor laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(11): 1101022.
- [20] 陈良惠, 杨国文, 刘育衡. 半导体激光器研究进展[J]. 中国激光, 2020, 47(5): 0500001.
- [21] Chen L H, Yang G W, Liu Y X. Development of semiconductor lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5): 0500001.
- [22] Kasami Y, Kuroda Y, Seo K, et al. Large capacity and high-data-rate phase-change disks[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2000, 39(2S): 756-761.
- [23] Ben Y H, Liang F, Zhao D G, et al. The role of InGaIn quantum barriers in improving the performance of GaN-based laser diodes[J]. Optics & Laser Technology, 2022, 145: 107523.

- [19] Li J M, Liu Z, Liu Z Q, et al. Advances and prospects in nitrides based light-emitting-diodes[J]. Journal of Semiconductors, 2016, 37(6): 061001.
- [20] Xing Y, Zhao D G, Jiang D S, et al. Suppression of electron and hole overflow in GaN-based near-ultraviolet laser diodes[J]. Chinese Physics B, 2018, 27(2): 028101.
- [21] Nakamura S. InGaN-based violet laser diodes[J]. Semiconductor Science and Technology, 1999, 14(6): R27-R40.
- [22] Yamashita Y, Kuwabara M, Torii K, et al. A 340-nm-band ultraviolet laser diode composed of GaN well layers[J]. Optics Express, 2013, 21(3): 3133-3137.
- [23] 张薇, 仲莉, 张德帅, 等. 795 nm 大功率外腔半导体激光器的研究[J]. 光学学报, 2023, 43(10): 1014004.
- Zhang W, Zhong L, Zhang D S, et al. Research on 795 nm high power external cavity semiconductor laser[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(10): 1014004.
- [24] 胡盘新. 大学物理手册[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1999: 566-567.
- Hu P X. Handbook of college physics[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 1999: 566-567.
- [25] Yang J, Zhao D G, Liu Z S, et al. A 357.9 nm GaN/AlGaIn multiple quantum well ultraviolet laser diode[J]. Journal of Semiconductors, 2022, 43(1): 010501.
- [26] Zhang Z Z, Yang J, Zhao D G, et al. Theoretical optical output power improvement of InGaN-based violet laser diode using AlGaIn/GaN composite last quantum barrier[J]. Nanomaterials, 2022, 12(22): 3990.
- [27] Liang F, Zhao D G, Jiang D S, et al. Output light power of InGaN-based violet laser diodes improved by using a u-InGaIn/GaN/AlGaIn multiple upper waveguide[J]. Chinese Physics B, 2017, 26(12): 124210.
- [28] Xing Z Q, Zhou Y J, Liu Y H, et al. Reduction of electron leakage of AlGaIn-based deep ultraviolet laser diodes using an inverse-trapezoidal electron blocking layer[J]. Chinese Physics Letters, 2020, 37(2): 027302.
- [29] Liang F, Zhao D G, Jiang D S, et al. Performance enhancement of the GaN-based laser diode by using an unintentionally doped GaN upper waveguide[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2018, 57(7): 070307.
- [30] Gao X Y, Litscher G, Liu K, et al. Sino-European transcontinental basic and clinical high-tech acupuncture studies-part 3: violet laser stimulation in anesthetized rats[J]. Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine, 2012, 2012: 402590.
- [31] Hatayama H, Kato J, Inoue A, et al. Comparison of violet diode laser with CO₂ laser in surgical performance of soft tissues [J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6425: 64250E.
- [32] Wang W J, Liao M L, Yuan J, et al. Enhancing performance of GaN-based LDs by using GaN/InGaIn asymmetric lower waveguide layers[J]. Chinese Physics B, 2022, 31(7): 074206.
- [33] Li X, Zhao D G, Jiang D S, et al. Suppression of electron leakage in 808 nm laser diodes with asymmetric waveguide layer [J]. Journal of Semiconductors, 2016, 37(1): 014007.
- [34] Nawaz S M, Niass M I, Wang Y F, et al. Enhancement of the optoelectronic characteristics of deep ultraviolet nanowire laser diodes by induction of bulk polarization charge with graded AlN composition in Al_xGa_{1-x}N waveguide[J]. Superlattices and Microstructures, 2020, 145: 106643.
- [35] Goudon T, Miljanović V, Schmeiser C. On the Shockley-Read-Hall model: generation-recombination in semiconductors[J]. SIAM Journal on Applied Mathematics, 2007, 67(4): 1183-1201.
- [36] Vurgaftman I, Meyer J R, Ram-Mohan L R. Band parameters for III - V compound semiconductors and their alloys[J]. Journal of Applied Physics, 2001, 89(11): 5815-5875.
- [37] Laws G M, Larkins E C, Harrison I, et al. Improved refractive index formulas for the Al_xGa_{1-x}N and In_yGa_{1-y}N alloys[J]. Journal of Applied Physics, 2001, 89(2): 1108-1115.
- [38] Piprek J, Peng T, Qui G, et al. Energy gap bowing and refractive index spectrum of AlInN and AlGaInN[C]//Compound Semiconductors 1997. Proceedings of the IEEE Twenty-Fourth International Symposium on Compound Semiconductors, September 8-11, 1997, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2002: 227-230.
- [39] Huang C Y, Lin Y D, Tyagi A, et al. Optical waveguide simulations for the optimization of InGaIn-based green laser diodes[J]. Journal of Applied Physics, 2010, 107(2): 023101.
- [40] Fiorentini V, Bernardini F, Ambacher O. Evidence for nonlinear macroscopic polarization in III-V nitride alloy heterostructures[J]. Applied Physics Letters, 2002, 80(7): 1204-1206.

Optoelectronic Performance Optimization of InGaIn-Based Violet Laser Diodes by Composite Electron Blocking Layers

Tan Qiling, Li Shuping*

College of Physical Science and Technology, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian, China

Abstract

Objective Compared with other types of laser diodes, semiconductor laser diodes have excellent properties such as high optical power, high efficiency, low cost, and good laser quality. Thus, laser diodes, especially those with short excitation wavelengths, have important and wide applications in solid-state illumination, high-density optical storage, radio-optical communication, biomedical technology, and chemical analysis. To continuously meet the increasing performance requirements of InGaIn-based violet laser diodes in the above fields, we select an experimental sample from the reference as reference structures and theoretically investigate the effect of structural changes in the laser diodes on their optoelectronic performance. Meanwhile, we are motivated by the current problems in the actual growth epitaxy process and operation of violet laser diodes that hinder the performance enhancement, such as difficulties in p-type doped epitaxial

growth, lattice mismatch, polarization of the GaN material, and electron leakage. Typically, the mobility of electrons in semiconductors is higher than the mobility of holes, resulting in electron leakage from the active region. This is the region where the radiative composite of electrons and holes is supposed to occur, to the p-cladding layer where holes inject, and non-radiative composite with holes occurs therein, which significantly reduces the carrier radiative composite rate. Additionally, the polarization effect of the GaN material results in a shift in the internal energy band structure of the laser diodes and also reduces the optoelectronic performance. Thus, many researchers have proposed a number of optimization schemes to reduce electron leakage and minimize the influence of the polarization effect, and most of the schemes are the growth optimization in the actual epitaxy process and the structure optimization of the waveguide layer and active region in the laser diodes. We conclude that by directly modifying the structure of the electron blocking layer (EBL) such as thickness and contents, the energy band structure can be adjusted and the electron leakage rate can be reduced without decreasing the hole injection to improve the wall plug efficiency.

Methods The experimental InGaN-based violet laser diode sample in the reference is selected, and the completely identical laser diode sample is constructed by the PICS3D software to simulate the optoelectronic performance. During the simulation, we set the simulation parameters exactly according to the experimental parameters in the reference. After simulation, the luminescence power variation of the simulation results with the injection current is plotted and strictly compared with the luminescence power of the experimental structure to confirm the accuracy and rationality of the obtained simulation results. Subsequently, a series of simulated structures are designed based on the reference structure. The basic concept is to modify the EBL to reduce the electron leakage. Therefore, we first divide the EBL into two layers and optimize the Al content and thickness of the insert layer close to the active region by comparing the wall plug efficiency, and then illustrate the reasons for the performance optimization in carrier distribution and energy band structure distribution. Subsequently, we optimize the Al content of the original EBL far from the active region to increase hole injection and radiative recombination rate and also explain the reasons for the performance optimization by comparing the carrier distribution and energy band structure distribution. Finally, the optoelectronic performance of the optimized structure is compared with that of the reference structure to illustrate the performance enhancement significance.

Results and Discussions First, we simulate the reference structure in PICS3D software according to the experimental structure, plot its optical power-injection current curve and compare it with the optical power curve measured from the experimental structure, and the results indicate the validity of the proposed simulation (Fig. 2). Subsequently, a series of insert layer structures are designed by changing the Al content in the insert layer and keeping the total thickness constant, and the wall plug efficiency of different Al content in the insert layer of this series is compared (Fig. 4). By adjusting the thicknesses of the insert layer and the original EBL, the Al content of the insert layer are varied in the same way with the total thickness of the composite EBL constant, and five series of wall plug efficiency is obtained (Fig. 5). As a result, we obtain the optimized structure B. Furthermore, to obtain the reason for the better performance of the optimized structure B, we select three samples with the same thickness and different Al content of the insert layer and compare their energy band structures and carrier distribution (Figs. 6 and 7). The reason is that the change of energy band structure leads to easier carrier injection. Additionally, five samples with different thicknesses and the same insert layer Al content are also selected to compare their optical powers and voltages (Fig. 8), and the reason for optimization is illustrated in terms of the hole barrier height and energy band tilt (Table 3 and Fig. 10). Finally, a series of samples are designed by changing the Al content of the original EBL from a constant Al content to a gradient to obtain their wall plug efficiency (Fig. 11). Finally, we obtain the final optimized structure C. Images of the energy band structure and carrier distribution are plotted according to a similar method (Figs. 12 and 13), which illustrates that the performance optimization is due to the easier hole injection led to by the gradient of the Al content of the original EBL. The optimized samples show an increase in wall plug efficiency relative to the reference structure (Table 4 and Fig. 14).

Conclusions The effects of the thickness and Al content of the composite EBL on InGaN-based violet laser diodes are investigated. The results show that adjusting the thickness and content of the insert layer and changing the Al content of the original EBL to gradient can reduce the electron leakage of the reference structure and increase its hole injection, thus significantly improving the wall plug efficiency. Setting the insert layer thickness to 15 nm and the Al atomic number fraction to 0.30 can reduce the electron leakage and thus increase the radiative recombination rate for improving the wall plug efficiency from 8.365% to 10.72%. On this basis, the Al atomic number fraction of the original EBL are set to a gradient of 0.24 to 0.06, which further increases the hole injection and radiation recombination rate, and improves the wall plug efficiency to 11.45%. Finally, the wall plug efficiency is improved by 36.9% at 1200 mA injection current compared with the reference structure, and the results provide references for improving the InGaN-based violet laser diodes.

Key words lasers; electron blocking layer; insert layer; wall plug efficiency