

AlGaAs 电子阻挡层组分优化对 980 nm 半导体激光器温度特性的影响*

张昊¹⁾²⁾ 宋悦^{1)2)†} 陈泳屹^{1)2)‡} 刘基顺¹⁾²⁾ 张立功¹⁾²⁾ 沙宏博¹⁾²⁾
王冠然¹⁾²⁾ 秦莉¹⁾²⁾ 梁磊¹⁾²⁾ 贾鹏¹⁾²⁾ 邱橙¹⁾²⁾ 雷宇鑫¹⁾²⁾
王玉冰¹⁾²⁾ 唐欣¹⁾²⁾ 王立军¹⁾²⁾

1) (中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 特种发光科学与技术全国重点实验室, 长春 130033)

2) (中国科学院大学, 大珩学院, 北京 100049)

(2026 年 1 月 8 日收到; 2026 年 2 月 3 日收到修改稿)

针对 980 nm 边发射半导体激光器在高温下因电子热逃逸导致的性能退化问题, 本文通过能带工程, 在 P 面波导层与势垒层之间设计了不同组分的 AlGaAs 电子阻挡层 (EBL). 利用 PICS 3D 软件, 系统性仿真对比了无 EBL, Al_{0.3}GaAs EBL 及 Al_{0.4}GaAs EBL 三种结构在 300—360 K 温区内的光电特性. 研究表明, EBL 能显著抑制电子泄漏, 其中 Al_{0.4}GaAs EBL 在 360 K 下将 P 型包层电子浓度降低了 97.14%. 然而, 该结构过高的 Al 组分会引入大量的空穴注入势垒, 导致有源区载流子严重失衡, 量子阱内电子浓度反常升高至 $2.3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 进而引发强烈的俄歇复合, 劣化了激光器高温下的阈值特性与输出功率. 相比之下, Al_{0.3}GaAs EBL 在电子限制与空穴注入之间取得了最佳平衡, 其在全温域内表现出最优的综合性能: 在保证 94.7% 的电子抑制效果的同时, 在 280.9 K 时具有最高的特征温度 T_0 , 并且相比于其他两种结构, 光功率的仿真值也最高, 达到 3.693 W. 研究发现, EBL 设计的核心在于寻求载流子限制与注入效率的全局最优, 而非单一追求极高的势垒, 该结论为研制高温度稳定性的 980 nm 泵浦激光器提供了关键的设计依据.

关键词: 半导体激光器, 温度特性, 电子阻挡层

DOI: 10.7498/aps.75.20260038

CSTR: 32037.14.aps.75.20260038

1 引言

边发射半导体激光器 (edge-emitting lasers, EELs) 作为高效的电光转换器件, 是现代光电子系统的核心光源, 在高功率光纤激光器泵浦、材料加工等领域发挥着不可替代的作用^[1-3]. 其中, 工作于 980 nm 波段的 EELs 因其与掺铒光纤的主吸收峰高度匹配, 成为实现高效率光纤激光器的首选泵

浦源^[4-6], 不仅如此, 也是实现高性能异质集成光子回路所需的关键光源之一^[7]. 然而, 半导体激光器的性能对温度极为敏感, 其高温下的严重退化是制约器件功率、效率及可靠性的关键瓶颈^[8]. 随着工作温度升高, 载流子热逃逸加剧, 导致阈值电流呈指数增长, 输出功率显著下降^[9], 特征温度 T_0 很低. 这使得器件在高温或高功率工作时, 为维持性能稳定不得不依赖复杂、笨重且高能耗的水冷散热系统, 极大增大了系统的体积、成本与复杂性.

* 国家重点研发计划 (批准号: 2023YFB2805100)、国家自然科学基金 (批准号: 62574201)、吉林省科技发展计划 (批准号: SKL202302027)、天津市科技计划 (批准号: 24YFYSHZ00250) 和中国科学院长春光机所曙光人才项目资助的课题.

† 通信作者. E-mail: songyue@ciomp.ac.cn

‡ 通信作者. E-mail: chenyy@ciomp.ac.cn

因此,通过能带工程优化载流子限制能力,从根本上改善激光器的高温工作特性,降低对极端散热条件的依赖,对于推动其在高环境温度或紧凑型系统中的实际应用具有重要意义。

在影响半导体激光器高温特性的众多原因中,载流子特别是电子的泄露与热逃逸被广泛认为是主导机制之一^[10]。在高温下,注入到有源区量子阱中的电子有更大概率获得更高的动能,更容易克服异质结势垒的束缚^[11]。当温度升高时,载流子获得的能量较高,会逃逸出势垒的限制进入波导层,导致激光器的内量子效率下降^[12],同时由于带尾效应,温升将导致量子阱带隙变窄、增益波段红移,使材料增益下降,最终导致器件阈值增大、电光转换效率下降,多余的电功率转化成热使器件温度进一步升高^[13],陷入恶性循环^[14]。

高温下半导体激光器阈值电流增大的一个主要原因是载流子的寄生非辐射复合。一个温度依赖的非辐射复合通道源于量子阱内的热载流子(主要是电子)分布^[15]。载流子在外加电压的驱动下获得能量,多数载流子转移至量子阱内,部分载流子由于能量过高,可以直接越过量子阱进入到相反的波导层,形成载流子泄漏^[16]。

为有效抑制载流子泄漏,提升器件温度稳定性,在P面波导层与限制层间插入宽带隙电子阻挡层(electron blocking layer, EBL)已成为一种关键的能带工程设计策略^[17]。通过构建额外的势垒,EBL能将电子阻挡在有源区,从而增强载流子限制^[18]。研究表明,EBL的合理设计对其效能有决定性影响^[19,20]。例如,2018年,Kolbe等^[21]在310 nm紫外LED中采用Al组分梯度渐变的AlGaIn EBL并优化掺杂,通过协同提升电子阻挡与空穴注入能力,使输出功率提升了约30%。2019年,Paliwal等^[22]为450 nm蓝光激光器设计了一种阶梯渐变组分的EBL,通过精细调控极化电场与能带,将电子泄漏电流降低了3个数量级,同时大幅度提升了激光器输出功率和斜率效率,输出功率从146.8 mW增至247.7 mW,斜率效率提高约61.9%。2022年,Muretova等^[23]设计并优化了980 nm GaAs波导激光二极管的电子/空穴阻挡层(EBL),采用AlGaAsSb电子阻挡层与GaInP空穴阻挡层组合,将漏电流抑制至初始值的1%以下。这些工作验证了能带工程在优化EBL功能上的潜力。然而,上述研究主要集中于宽禁带氮化物体系,

对于近红外波段如980 nm的AlGaAs/GaAs体系EELs,并没有完成从载流子限制效果到器件光电性能的完整探究,关于EBL Al组分的精细优化及其在宽温区内对载流子输运、复合动力学及光电热耦合特性影响的系统性仿真研究,仍待深入。

本文针对980 nm高功率边发射半导体激光器,致力于通过优化EBL设计,在P面GaAsP势垒层与Al_{0.25}GaAs波导层之间,引入了不同Al组分的Al_xGa_(1-x)As层作为EBL,提升激光器温度稳定性。

采用专业的半导体光电器件仿真软件PICS 3D,对包含传统无EBL结构及两种不同带隙EBL结构在内的3种方案,进行系统的电-光-热仿真,温度范围涵盖300—360 K。通过对比分析变温条件下的载流子分布、复合速率、增益谱,以及功率-电流-电压(*P-I-V*)特性,本研究旨在从物理机理层面深入揭示:1)不同Al组分EBL对电子泄漏抑制与空穴注入平衡的调控作用机制;2)明确EBL设计对复合动力学过程的影响;3)最终如何决定器件的宏观温度稳定性(如特征温度 T_0)与高温工作特性。本研究为改善温度特性的980 nm泵浦激光器的外延结构设计提供了理论依据与优化方向。

2 结构设计

在半导体激光器异质结构中,电子的热逃逸是影响器件高温下光电性能恶化的主要原因。电子拥有较小的有效质量,这导致其拥有更大的迁移率和动能,在高温环境中更容易获得能量到达更高能态,当电子获得足够能量,会克服势垒层的导带偏移量而逃离有源区,进入到P面波导层甚至包层发生非辐射复合。相比之下,空穴的有效质量约为电子有效质量的8倍^[24],在高温下也很难克服势垒层的束缚,因此,空穴的热逃逸对器件温度特性的影响远小于电子,为了减少外加外延层带来的电阻增大,本文只考虑电子阻挡层的设计,以实现器件光电性能和温度特性的优化。

本研究设计了一种适合高温工作的980 nm波段的边发射半导体激光器外延结构,其N型与P型包层均采用渐变Al组分的周期性结构,每个周期依次由400 nm Al_{0.25}GaAs, 20 nm Al_{0.25→0.4}GaAs渐变层、200 nm Al_{0.4}GaAs以及20 nm Al_{0.4→0.25}

GaAs 渐变层构成, 并分别在 N 面和 P 面设置 5 个和 3 个周期; 有源区经优化后采用 8 nm $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ 量子阱与 10 nm $\text{GaAsP}_{0.08}$ 势垒层组合, 以确保在目标波长处获得高光学增益; 波导层设计为渐变折射率多周期结构, 高、低折射率层分别采用 $\text{Al}_{0.25}\text{GaAs}$ 和 $\text{Al}_{0.4}\text{GaAs}$ 材料, 层间通过 20 nm 组分渐变层平滑能带, 并在靠近电接触区域进行重掺杂 (N 面 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, P 面 $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) 以降低接触电阻, 而紧邻有源区的部分则保持无掺杂以抑制自由载流子的吸收 [25,26]; 为有效抑制电子泄漏并平衡空穴注入, 在 P 面无掺杂波导层与势垒层之间设置了电子阻挡层, 并对比了两种设计.

外延结构示意图如图 1 所示, 外延结构的具体参数总结于表 1. 在结构设计时, 由于波导层中 Al 组分质量分数为 0.25, 当选用 10 nm $\text{Al}_{0.3}\text{GaAs}$ EBL, 由于质量分数为 0.3 的 Al 组分相较于波导层中质量分数为 0.25 的 Al 组分有适当提升, 提供的导带势垒为 40—50 meV, 引入了较为适中的

导/价带偏移, 代表较为适中的阻挡策略; 而选用 10 nm $\text{Al}_{0.4}\text{GaAs}$ EBL, Al 组分在不超包层最大 Al 组分的同时, 可以提供较大的导/价带偏移量 (可超过 120 meV), 这与无 EBL 结构和 $\text{Al}_{0.3}\text{GaAs}$ EBL 结构形成足够明显的对比.

3 仿真与分析

本文使用 CrossLight Pics 3D 软件对上文 3 种外延结构进行光-电-热仿真, 由于不考虑横向光场模式分布, 器件结构方面设为 25 μm 宽, 2 mm 腔长. 其中热效应对半导体激光器微观物理机制的改变, 是本文进行热仿真的核心, 主要体现在具体的材料参数, 如材料带隙、载流子迁移率等方面. 在本文所使用的仿真模型中, 材料带隙、载流子有效质量、迁移率以及态密度等对温度敏感的参数, 材料库中均有相对应的温度变化公式. 这里以体材料 AlGaAs 带隙为例: 温度升高会使得晶

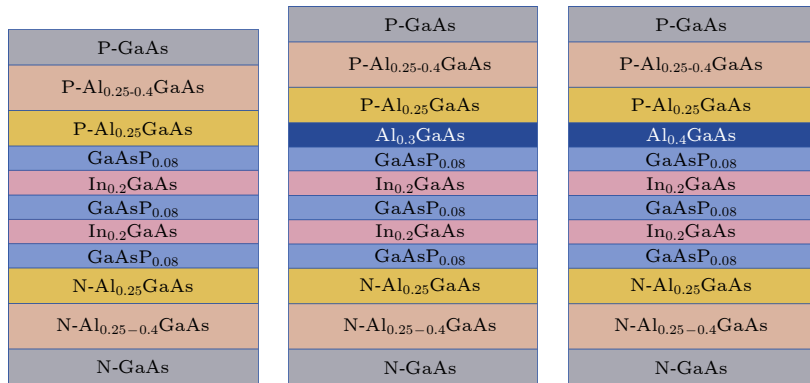


图 1 3 种外延结构

Fig. 1. Three types of extension structures.

表 1 外延结构

Table 1. Extensional structure.

Structure layer	Materials	Thicknesses/nm	Doping/ cm^{-3}
P-contact layer	GaAs	150	$> 3 \times 10^{19}$
P-cladding layer	$\text{Al}_{0.25-0.4}\text{GaAs}$	2250	$3 \times 10^{18} - 5 \times 10^{16}$
P-waveguide layer	$\text{Al}_{0.25}\text{GaAs}$	170	—
Electron blocking layer	$\text{Al}_{0.4}\text{GaAs}/\text{Al}_{0.3}\text{GaAs}$	10	1×10^{18}
Barrier layer*2	$\text{GaAsP}_{0.08}$	10	—
Quantum well*2	$\text{In}_{0.2}\text{GaAs}$	8	—
Barrier layer	$\text{GaAsP}_{0.08}$	10	—
P-waveguide layer	$\text{Al}_{0.25}\text{GaAs}$	170	—
P-cladding layer	$\text{Al}_{0.25-0.4}\text{GaAs}$	3500	$2 \times 10^{18} - 5 \times 10^{16}$
n-substrate	GaAs	200	2×10^{18}

格膨胀, 原子间势场减弱而使得带隙变窄; 同时温度升高会增加声子散射, 改变电子的自能进而导致带边位移, 对于这部分物理机理的计算, 仿真软件遵循经典的 Varshni 经验公式:

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta},$$

其中对于质量分数为 0.45 以下 Al 组分, 即本文结构所使用的 Al 组分区间, $\alpha = -5.5 \times 10^{-4}$, $\beta = 9.4285712 \times 10^{-2}$. 因此设置接触层热边界条件的温度时, 材料参数会按预设方程进行修改, 实现可靠的光-电-热仿真.

3.1 载流子限制效果分析

沿外延生长方向的电子浓度分布, 是对电子热逃逸和电子阻挡层作用的最直观体现, 图 2 展示了原始结构、质量分数为 0.3 的 Al 组分的电子阻挡层结构和质量分数为 0.4 的 Al 组分的电子阻挡层结构, 当注入 3.0 A 电流, 即 6.0 kA/cm² 电流密度时, 在 300—360 K 不同温度下外延生长方向的电子浓度分布.

3.1.1 电子泄漏抑制的定量分析

图 2(a)—(c) 展示了 3 种结构在不同温度下的电子浓度分布, 图中左侧放大区域为有源区量子阱的电子浓度分布, 右侧放大区域为泄漏到包层区域的电子浓度分布. 对于未设置 EBL 的参考结构, 电子泄漏现象显著. 在 300 K 时, 其 P 型包层区域的最大电子浓度为 $1.39 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$; 当温度升至 360 K 时, 最大电子浓度急剧增至 $4.2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, 表明热激发显著加剧了电子的热逃逸现象.

相比之下, 引入 AlGaAs EBL 后, 电子泄漏得到有效抑制. 具体而言, 对于 Al_{0.3}GaAs EBL 结构, P 型包层在 300 K 和 360 K 下的最大电子浓度分别为 $5.7 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 和 $2.2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. 而 Al_{0.4}GaAs EBL 结构展现了更强的限制能力, 对应浓度进一步降低至 $1.97 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 和 $1.2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. 与参考结构相比, 两种 EBL 在 300 K 下将包层电子浓度降低了约 2 个数量级, 降幅分别为 99.6% 和 99.85%, 在 360 K 高温下仍保持了 94.7% 和 97.14% 的抑制率. 这一结果直接归因于 AlGaAs 层引入的导带偏移 ΔE_c . 更高的 Al 组分产生更大的 ΔE_c , 从而形成更高的能量势垒, 对电子从有源区向 P 侧的溢出产生了较强的阻挡作用.

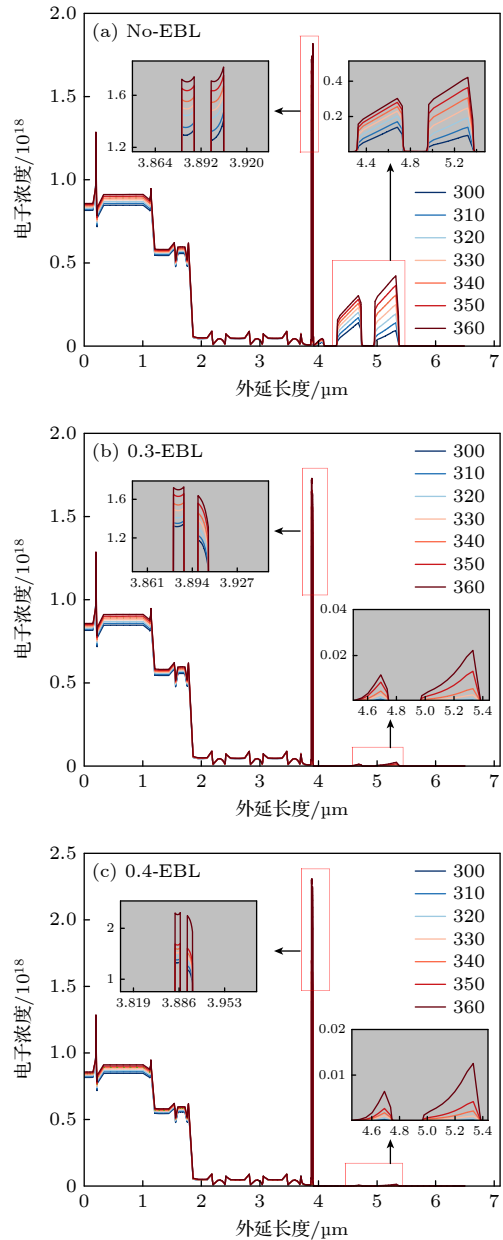


图 2 外延生长方向 300—360 K 温度下电子浓度分布图 (a) 原始结构; (b) Al_{0.3}GaAs EBL 结构; (c) Al_{0.4}GaAs EBL 结构

Fig. 2. Electron concentration distribution along the epitaxial growth direction at 300–360 K: (a) Original structure; (b) Al_{0.3}GaAs EBL structure; (c) Al_{0.4}GaAs EBL structure.

3.1.2 有源区载流子积累与注入平衡的转变

尽管高 Al 组分 EBL 对电子泄漏的抑制效果更佳, 但其对 P 侧空穴注入有源区的阻碍作用也随之凸显, 并显著改变了有源区的载流子统计行为. 如图 2 的放大区域所示, 在 360 K 高温下, 参考结构量子阱内的峰值电子浓度 $1.81 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$.

引入 $\text{Al}_{0.3}\text{GaAs}$ EBL 后, 该值略微下降至 $1.72 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. 然而, $\text{Al}_{0.4}\text{GaAs}$ EBL 结构却导致量子阱内峰值电子浓度反常地升高至 $2.3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$.

这一现象揭示了载流子注入机制的转变. $\text{Al}_{0.4}\text{GaAs}$ EBL 在提供高导带势垒的同时, 也引入了过高的价带势垒 ΔE_v , 严重阻碍了空穴注入有源区. 为补偿空穴短缺并维持足够的光增益, 系统必须提高偏压, 驱使准费米能级上移, 从而向有源区超量注入电子. 这直接导致了量子阱内电子浓度非平衡地积聚及载流子比例 (n/p) 严重失衡. 相反, $\text{Al}_{0.3}\text{GaAs}$ EBL 在电子阻挡与空穴注入之间取得了更优的平衡, 促进了两端载流子的高效注入, 使得有源区能在更低的总体载流子密度下达到粒子数反转条件.

综上所述, 仿真分析表明 EBL 结构能有效抑制电子泄漏, 且 Al 组分越高, 抑制效果越强. 然而, 过高的 Al 组分将恶化空穴注入, 可能引发有源区载流子失衡. 这种分布差异是决定后续复合动力学行为的关键, 特别是对于与载流子浓度呈强非线性关系 ($\sim n^3$) 的俄歇复合过程^[27], $\text{Al}_{0.4}\text{GaAs}$ EBL 结构中的高电子浓度将导致显著的效率损失.

图 3(a)–(c) 展示了外延生长方向, 不同温度下不同外延结构的空穴浓度分布, 其中放大区域为有源区、电子阻挡层以及波导层的空穴浓度分布. 仿真结果显示, 在 $\text{Al}_{0.3}\text{GaAs}$ EBL 结构中, 波导层内的峰值空穴浓度为 $0.652 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 且 EBL 内也有较高的空穴浓度 $1.644 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 相比于无 EBL 原始结构中波导结构内近乎无空穴堆积, 这种现象表明 EBL 结构确实对空穴的注入产生了阻碍作用, 大量空穴被堆积在有源区附近. 相比之下, $\text{Al}_{0.4}\text{GaAs}$ EBL 由于提供了更高的价带势垒, 空穴在 P 面波导层中空穴堆积更加严重, 波导层内峰值空穴浓度高达 $0.896 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 相较于 $\text{Al}_{0.3}\text{GaAs}$ EBL 增大了 37.4%, 这使得进入到 EBL 内的空穴浓度下降至 $1.21 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. 尽管 $\text{Al}_{0.4}\text{GaAs}$ EBL 通过提高偏压使得量子阱中空穴浓度达到 $2.27 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 但仍然略低于 $\text{Al}_{0.3}\text{GaAs}$ EBL 结构量子阱中的 $2.3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$.

3.2 复合动力学与热产生

为深入探究不同电子阻挡层 EBL 设计对器件内部能量转换与损耗机制的影响, 本节基于仿真获得的载流子分布, 系统对比分析了 3 种结构的辐射

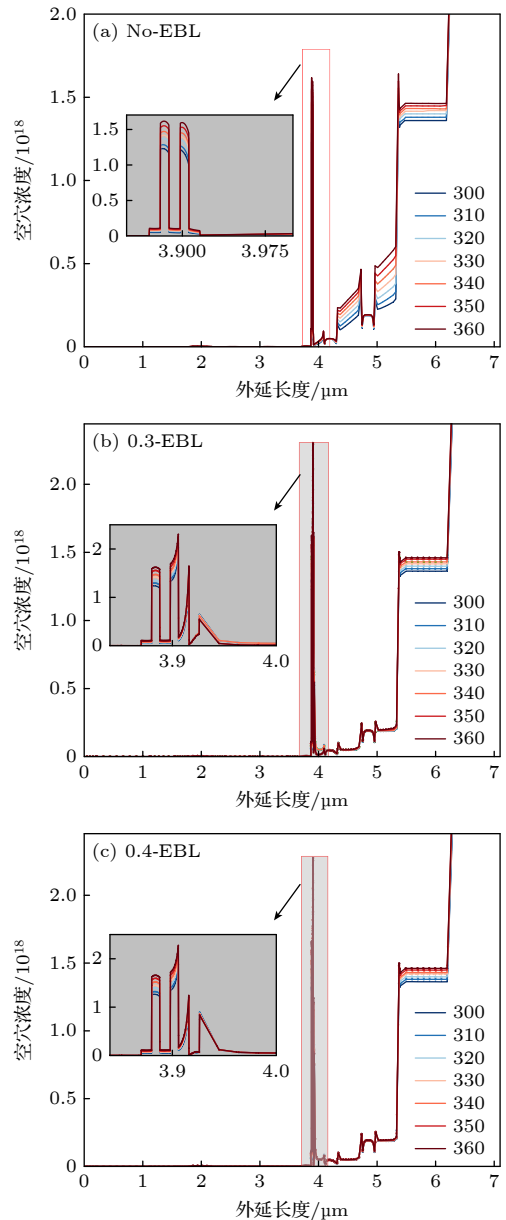


图 3 外延生长方向 300—360 K 温度下空穴浓度分布图 (a) 原始结构; (b) $\text{Al}_{0.3}\text{GaAs}$ EBL 结构; (c) $\text{Al}_{0.4}\text{GaAs}$ EBL 结构

Fig. 3. Hole concentration distribution along the epitaxial growth direction at 300–360 K: (a) Original structure; (b) $\text{Al}_{0.3}\text{GaAs}$ EBL structure; (c) $\text{Al}_{0.4}\text{GaAs}$ EBL structure.

复合、俄歇复合速率空间分布, 这些数据共同揭示了决定最终光电性能的微观物理现象, 在仿真中本部分依然是在 3.0 A 注入电流下进行数据采集.

图 4(a) 展示了 3 种结构在大电流不同温度下辐射复合的峰值变化, 仿真表明两种复合主要发生在有源区量子阱内. $\text{Al}_{0.4}\text{GaAs}$ EBL 结构如理论预测一样, 在量子阱中表现出最高的辐射复合速率, 这与其拥有最高的阱内电子浓度直接相关, 在 360 K

高温下可以达到 $6.65 \times 10^{26} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$, 相比于原始结构在高温下的 $6.06 \times 10^{26} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ 有着 9.7% 的增长. 而 $\text{Al}_{0.3}\text{GaAs}$ EBL 结构的高温辐射复合速率也可达到 $6.41 \times 10^{26} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$, 并且从变化趋势看, 更接近于线性.

与辐射复合形成鲜明对比的是俄歇复合. 在本文的仿真中考虑了俄歇复合机制对器件性能的影响, 采用标准的三粒子模型进行仿真计算^[28], 其净复合速率定义为 $R_{\text{au}} = (C_n n + C_p p)(np - n_i^2)$, 对于 980 nm 波段的 InGaAs 材料, 俄歇复合系数 $C_n = C_p = 2.0 \times 10^{-30} \text{ cm}^6/\text{s}$.

如图 4(b) 所示, $\text{Al}_{0.4}\text{GaAs}$ EBL 结构在低温区间 (330 K) 以下俄歇复合与其他两种结构十分接近, 但在高温下迅速增长, 在 360 K 时俄歇复合速率为 $24.97 \times 10^{25} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$, 相比于原始结构的 $18.29 \times 10^{25} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ 增长了 36.5%, 这与 3.1 节中所展示的有源区载流子浓度分布十分吻合, 更高的有源区载流子浓度势必会增大俄歇复合速率, 不仅如此, 俄歇复合对温度十分敏感, 便导致了 EBL

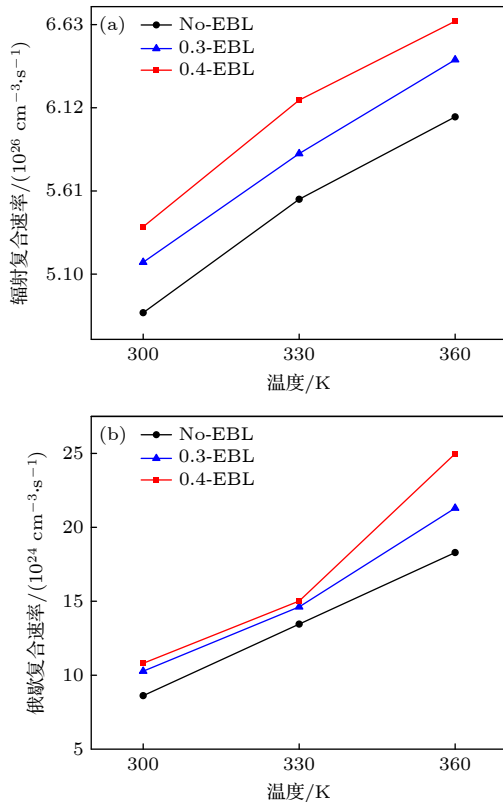


图 4 3 种结构在不同温度的大电流下复合速率 (a) 辐射复合; (b) 俄歇复合

Fig. 4. Recombination rates of three structures under high current at different temperatures: (a) Radiative recombination; (b) Auger recombination.

结构在高温下有如此大的俄歇复合损耗. 相比之下, $\text{Al}_{0.3}\text{GaAs}$ EBL 结构通过平衡的载流子注入, 在维持可观辐射复合的同时, 将俄歇复合速率有效抑制在一个较低水平, 这为其高效率提供了根本保障. 无 EBL 结构则因电子泄漏严重, 有源区无法积累高浓度载流子, 故俄歇复合率最低, 但其代价是巨大的泄漏电流损失.

3.3 光电性能与温度稳定性分析

本节基于出光功率-电流 ($P-I$) 与电压-电流 ($V-I$) 特性曲线, 系统分析了温度 (300—360 K) 对器件关键性能参数的影响. 通过提取阈值电流 I_{th} 、特征温度 T_0 , 结合前文载流子动力学结果, 综合评估了不同 EBL 设计的高温稳定性与电光性能.

3.3.1 阈值特性与热稳定性

T_0 是衡量激光器温度稳定性的黄金指标, T_0 值越大表明阈值电流对温度越不敏感, 器件的高温性能越好, T_0 计算公式如下:

$$I_{\text{th}}(T) = I_0 \cdot \exp\left(\frac{T}{T_0}\right),$$

其中, I_0 是常数, T 是热沉温度, T_0 即特征温度. 器件阈值电流 $I_{\text{th}}(T)$ 通过 $P-I$ 曲线确定, 对高于激光阈值的线性区域进行线性最小二乘法拟合, 并将拟合直线外推至 X 轴, 即光功率为零处, 交点对应的电流值定义为阈值电流 I_{th} . 仿真了 3 种结构在 300—360 K 温度范围内, 阈值电流和波长随温度的变化, 如图 5 所示, 图中散点附近的直线即为最小二乘法的拟合曲线, 在曲线附近由不同颜色给出了相应的置信区间, 以此来显示数据点是否符合理论预期.

图 5 展示了 3 个结构在温度变化范围内阈值电流变化曲线, 随着温度的上升, 阈值电流逐渐增大. 在相同温度下, 如 300 K 时, 原始结构表现出最低的阈值电流, $\text{Al}_{0.3}\text{GaAs}$ EBL 结构阈值电流 I_{th} 较 (66.15 mA), 而拥有最强抑制效果的 $\text{Al}_{0.4}\text{GaAs}$ EBL 结构拥有最高的阈值电流, 为 68.5 mA. 这一现象直接表明 EBL 设计在改善电子限制的同时, 所引入的负面效果已主导了阈值特性. 3.2 节中 $\text{Al}_{0.4}\text{GaAs}$ EBL 所具有的最高俄歇复合速率更是从侧面印证了这一负面影响, 非辐射复合的加剧进一步增大了其阈值电流. 因此, 3 种结构达到阈值的物理代价截然不同, 原始结构虽然

拥有较低的阈值电流, 但电子热逃逸严重, 在高温及大电流下性能恶化严重; $\text{Al}_{0.4}\text{GaAs}$ EBL 由于空穴注入瓶颈引起了有源区内非辐射复合 (俄歇复合) 加剧, 导致损耗增大, 阈值条件增大; 而 $\text{Al}_{0.3}\text{GaAs}$ EBL 则平衡了这两种负面影响. 由阈值电流对 3 个结构的特征温度进行计算, 可以得到原始结构特征温度为 271.7 K, $\text{Al}_{0.4}\text{GaAs}$ EBL 结构的特征温度为 274.7 K, $\text{Al}_{0.3}\text{GaAs}$ EBL 结构的特征温度高达 280.9 K, 可以看出 $\text{Al}_{0.3}\text{GaAs}$ EBL 拥有三者中最好的温度特性, 这点在后续的光功率中可以得到更直接的体现.

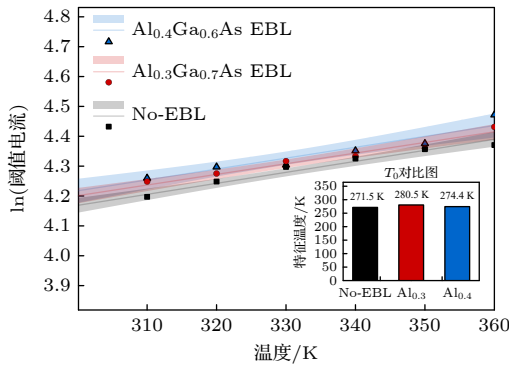


图 5 3 种结构阈值电流对数随温度变化曲线

Fig. 5. Temperature variation curves of threshold current for three structures.

图 6 展示了 3 个结构的峰值增益波长随温度的变化曲线, 可以看出随着温度增加, 3 个结构的峰值增益波长发生红移, 三者的温漂系数分别为 $0.361 \text{ nm}/^\circ\text{C}$, $0.346 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 和 $0.359 \text{ nm}/^\circ\text{C}$, $\text{Al}_{0.3}\text{GaAs}$ EBL 结构对波长随温度漂移的抑制效果最为显著. 这一改善可归因于 $\text{Al}_{0.3}\text{GaAs}$ EBL 卓越的载流子管理能力, 如 3.1 节所述. 其优异的载流子限制与平衡的注入特性, 使得有源区内载流子浓

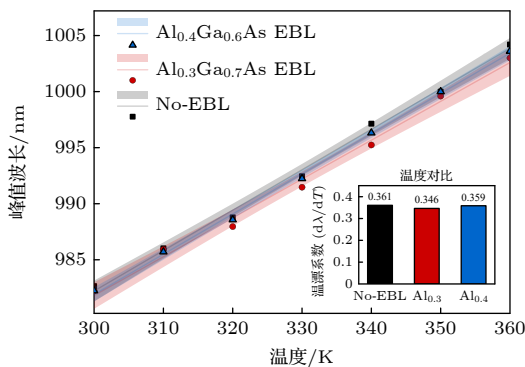


图 6 峰值波长随温度变化曲线

Fig. 6. Curve of peak wavelength variation with temperature.

度在温度变化时保持更高的稳定性. 这有效抑制了由载流子浓度波动通过等离子体效应和带隙填充效应引起的额外波长漂移^[9]. 因此, 优化 EBL 设计不仅能提升电光转换效率, 还能增强激光器输出光谱的温度稳定性, 这对于需要在宽温范围内工作的应用具有重要意义.

3.3.2 输出功率与电压的温度依赖性

基于前文关于载流子限制效果与复合动力学的分析, 这些微观物理机制的差异最终决定了器件宏观光电性能的优劣. 图 7 展示了 3 种结构在不同温度下的 $P-I-V$ 特性曲线.

对 $P-I$ 特性仿真结果的分析表明数据与理论预期一致, 进一步验证了前文载流子动力学相关结论: 在 300—360 K 温度范围内, 含 $\text{Al}_{0.3}\text{GaAs}$ EBL 的结构均表现出最佳的光功率输出. 具体来看, 无 EBL 的原始结构在 300 K 和 360 K 下的最大光功率分别为 3.664 W 和 3.360 W; 引入 $\text{Al}_{0.4}\text{GaAs}$ EBL 后, 对应温度下的最大功率提升至 3.689 W 和 3.590 W, 较原始结构分别提高 0.682% 和 6.84%. 而 $\text{Al}_{0.3}\text{GaAs}$ EBL 结构提升更为明显, 在相同温度下最大功率达到 3.693 W 和 3.592 W, 增幅分别为 0.791% 和 6.90%. 这一结果表明虽然更高 Al 组分 (质量分数为 0.4) 能凭借更大的导带偏移更有效地抑制电子热逃逸, 但其引入的过高价带势垒也严重限制了空穴注入, 导致有源区内载流子比例失衡、电子异常积累, 进而引发显著的俄歇复合损耗. 因此, $\text{Al}_{0.4}\text{GaAs}$ EBL 结构未能将良好的载流子限制完全转化为更高的光输出, 其效率与功率提升受到制约. 相比之下, $\text{Al}_{0.3}\text{GaAs}$ EBL 在电子阻挡与空穴注入之间取得了更好的平衡, 实现了更低的整体损耗和更高的辐射复合效率, 从而在宽温域内输出最高的光功率.

对 $V-I$ 特性的深入分析揭示了一个值得注意的现象: 在 340 K 及以下温度, $\text{Al}_{0.3}\text{GaAs}$ EBL 的工作电压始终低于 $\text{Al}_{0.4}\text{GaAs}$ EBL 结构, 这与二者价带势垒 (ΔE_v) 的高低关系一致. 然而, 当温度升至 350 K 与 360 K 时, 电压关系发生反转, $\text{Al}_{0.4}\text{GaAs}$ EBL 的工作电压反而低于 $\text{Al}_{0.3}\text{GaAs}$ EBL, 例如, 在注入电流 3 A 下, 360 K 时二者电压差为 0.1 V. 这一转折表明, 决定工作电压的主导机制随温度发生了转变.

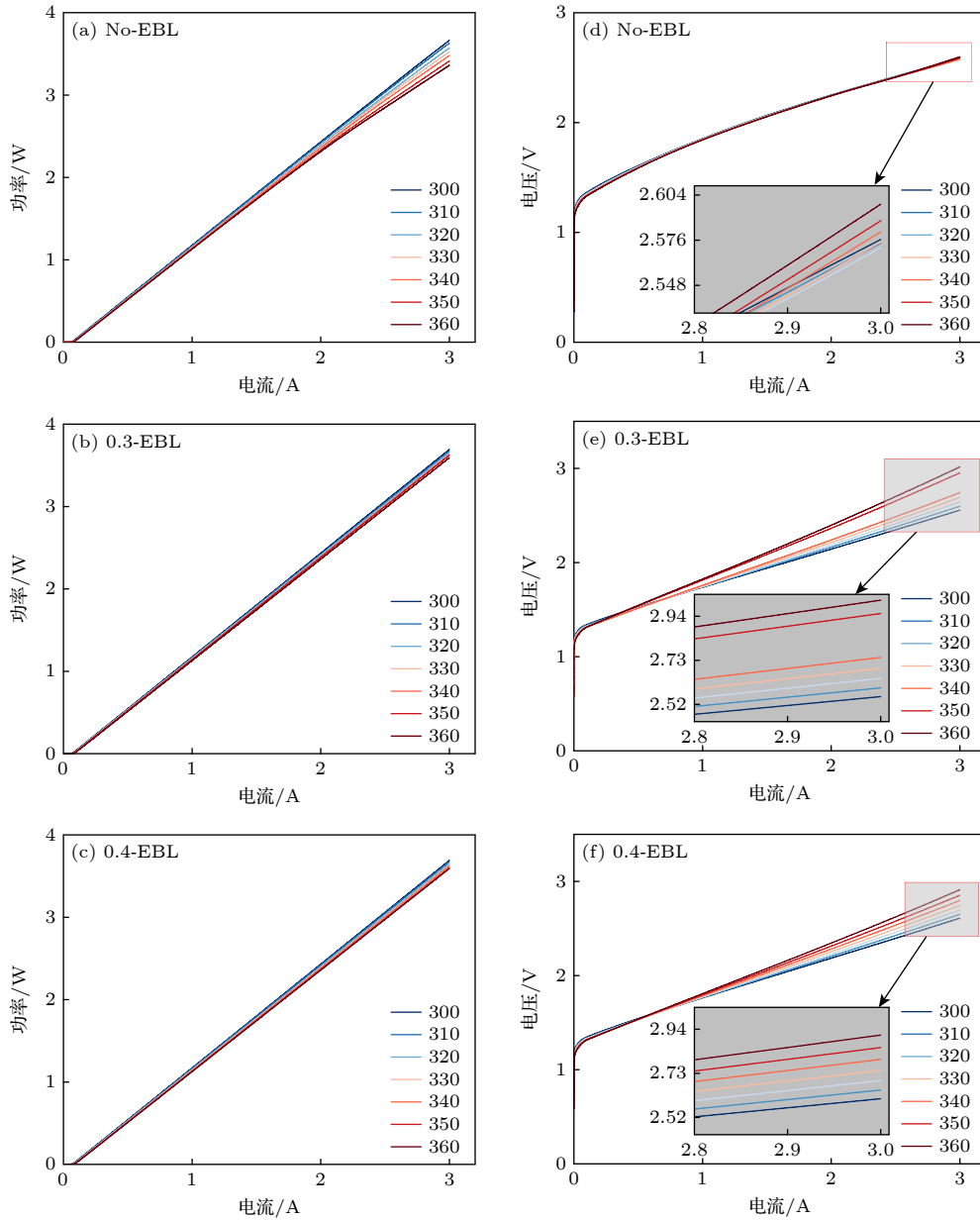


图 7 (a) 原始结构 $P-I$ 曲线; (b) $\text{Al}_{0.3}\text{GaAs}$ EBL 结构 $P-I$ 曲线; (c) $\text{Al}_{0.4}\text{GaAs}$ EBL 结构 $P-I$ 曲线; (d) 原始结构 $V-I$ 曲线; (e) $\text{Al}_{0.3}\text{GaAs}$ EBL 结构 $V-I$ 曲线; (f) $\text{Al}_{0.4}\text{GaAs}$ EBL 结构 $V-I$ 曲线

Fig. 7. (a) $P-I$ curve of the original structure; (b) $P-I$ curve of the $\text{Al}_{0.3}\text{GaAs}$ EBL structure; (c) $P-I$ curve of the $\text{Al}_{0.4}\text{GaAs}$ EBL structure; (d) $V-I$ curve of the original structure; (e) $V-I$ curve of the $\text{Al}_{0.3}\text{GaAs}$ EBL structure; (f) $V-I$ curve of the $\text{Al}_{0.4}\text{GaAs}$ EBL structure.

为了定量分析工作电压随温度变化的深层物理机理, 图 8 对比了不同 Al 组分 EBL 结构在 3 A 大电流注入下的电压与动态电阻随温度的变化趋势. 从表 2 泄漏电流密度可以看出, 无 EBL 结构电子泄漏电流密度高达 157.14 A/cm^2 , 在引入 EBL 结构后电子泄漏电流密度分别被抑制到 3.73 A/cm^2 和 1.8 A/cm^2 . 对比发现 Al 组分质量分数从 0.3 增至 0.4, 对泄漏电流密度的改善仅为 1.25%.

表 2 泄漏电流密度
Table 2. Leakage current density.

结构	360 K 下 $J_{\text{leak}} / (\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})$	电子抑制效率/%	器件影响
No-EBL	157.14	0 (基准)	电子热逃逸严重
0.3-BEL	3.73	97.6	有效阻挡, 电压适中
0.4-EBL	1.8	98.85	有效阻挡, 空穴注入受阻

可以看出在低温区 ($\leq 340 \text{ K}$) 时电压主要由势垒主导, $\text{Al}_{0.4}\text{GaAs}$ EBL 结构电压明显大于 $\text{Al}_{0.3}\text{GaAs}$ EBL 结构, 同时 $\text{Al}_{0.3}\text{GaAs}$ EBL 的动

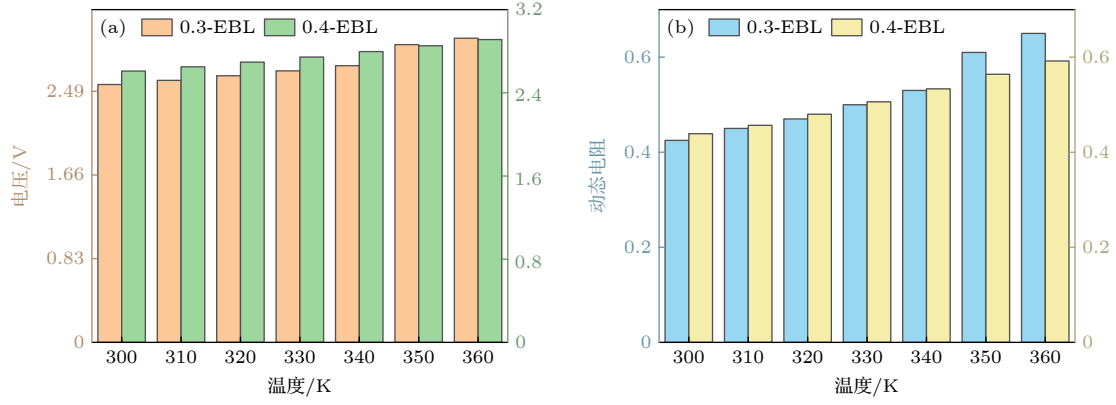


图 8 (a) 不同温度下两 EBL 结构在 3 A 大电流注入下电压变化; (b) 不同温度下两 EBL 结构在 3 A 大电流注入下动态电阻变化
 Fig. 8. (a) Voltage variation of two EBL structures under 3 A high current injection at different temperatures; (b) dynamic resistance variation of two EBL structures under 3 A high current injection at different temperatures.

态电阻明显更小. 这表明在低温环境下由于空穴热激发能不足, 高 Al 组分 EBL 带来的高价带势垒是阻碍空穴注入, 提高器件工作电压的决定性因素. 当温度升至 350 K 时, 如图 8 所示主导机制发生了反转, 此时 $\text{Al}_{0.3}\text{GaAs}$ EBL 的工作电压和动态电阻都发生了反超, 这一现象有力证明了在 350 K 附近, 势垒阻挡对工作电压的影响开始逐渐小于动态载流子损耗的影响. 而器件处于高温区, 即 ≥ 350 K 时, $\text{Al}_{0.3}\text{GaAs}$ EBL 的动态电阻实现了大幅度反超, 随温度升高. 可以结合前文俄歇复合速率以及电子浓度分布的对比作出假设, $\text{Al}_{0.4}\text{GaAs}$ EBL 结构内增强的俄歇复合对载流子堆积起到了消耗作用, 抑制了有源区准费米能级的过度攀升, 从而使得动态电阻维持在较低水平; 相比之下, $\text{Al}_{0.3}\text{GaAs}$ EBL 由于导带限制能力有限, 在高温下电子热逃逸会更高, 为了在大电流下维持增益补偿, 必须增加更高的偏压来提高准费米能级分裂, 因此, 在宏观上表现出更大的工作电压和动态电阻.

3.4 综合讨论

适当 Al 组分 (质量分数为 0.3) 的 EBL 结构不仅可以抑制激光器出射波长对温度的依赖性, 还可以得到更为出色的温度特性, 体现在宏观方面是拥有比原始无 EBL 结构和高 Al 组分 (质量分数为 0.4) 结构更大的出光功率. 但功率的提升也带来了工作电压的提升, 虽然低 Al 组分在较低温度区间工作电压增长较小, 但在高温情况下由于对电子热逃逸抑制效果低于高 Al 组分的 EBL 结构, 工作电压会大幅增大. 因此对 EBL 的选择应根据具体应用要求来进行决定.

4 总结

本研究通过系统的数值仿真, 深入探究了 Al 组分对 GaAs 基 980 nm 激光器电子阻挡层 (EBL) 性能的影响机理, 并对无 EBL, $\text{Al}_{0.3}\text{GaAs}$ EBL 及 $\text{Al}_{0.4}\text{GaAs}$ EBL 三种结构进行全面的对比分析.

在载流子限制与注入方面, EBL 的引入能有效抑制电子泄漏, 且 Al 组分越高, 抑制效果越强. 然而, 过高的 Al 组分 (质量分数为 0.4) 会同时引入过大的价带势垒, 严重阻碍空穴注入, 导致有源区载流子严重失衡, 电子浓度异常积聚. 相比之下, $\text{Al}_{0.3}\text{GaAs}$ EBL 在电子限制与空穴注入之间取得了最佳平衡, 实现了高效的双极载流子注入. 在复合动力学方面, 载流子分布的差异直接决定了复合路径的竞争. $\text{Al}_{0.4}\text{GaAs}$ EBL 结构由于其有源区的高电子浓度, 引发了强烈的俄歇复合, 极大地浪费了注入的载流子. 而 $\text{Al}_{0.3}\text{GaAs}$ EBL 结构则凭借其均衡的载流子分布, 在维持高辐射复合速率的同时, 将有害的俄歇复合抑制在较低水平. 最终, 在宏观光电特性方面, 上述微观物理机制的差异导致了显著的性能区别.

$\text{Al}_{0.3}\text{GaAs}$ EBL 结构在常温和高温情况下, 出光功率相较于传统无 EBL 结构提升了 7.91% 和 6.90%, 同时拥有 3 种结构中最低的波长温漂系数 $0.346 \text{ nm}/^\circ\text{C}$, 以及最高的特征温度 280.9 K, 相较于原始无 EBL 结构特征温度提升了近 10 K, 对于 GaAs 体系半导体激光器而言是非常显著的改善. 增大带隙是 EBL 阻挡电子热逃逸的核心机理,

但一味增大带隙还会引起有源区载流子异常积累,从而引发俄歇复合增加,增大非辐射损耗,因此设计适当带隙的 EBL 才是提升半导体激光器温度特性的关键,对于 AlGaAs 材料 EBL 结构存在一定的优化区间^[29]. 未来本研究期望将仿真结果转换为实际器件,对 EBL 有更深入探究.

参考文献

- [1] Zhang X, Dong H L, Jia Z G, Zhang A Q, Liang J, Xu B S 2022 *Mater. Rep.* **36** 13 (in Chinese) [张旭,董海亮,贾志刚,张爱琴,梁建,许并社 2022 *材料导报* **36** 13]
- [2] Ning Y Q, Chen Y Y, Zhang J, Song Y, Lei Y X, Qiu C, Liang L, Jia P, Qin L, Wang L J 2021 *Acta Opt. Sin.* **41** 0114001 (in Chinese) [宁永强,陈泳屹,张俊,宋悦,雷宇鑫,邱橙,梁磊,贾鹏,秦莉,王立军 2021 *光学学报* **41** 0114001]
- [3] Du W H, Yang H W, Chen H T, Li Y J, Wang W, Chen G Y 2008 *MicroNanoelectron. Technol.* **45** 444 (in Chinese) [杜伟华,杨红伟,陈宏泰,李雅静,王薇,陈国鹰 2008 *纳米器件与技术* **45** 444]
- [4] Khalil G E, Fattah G A, Shafik M S, Badr Y A 2002 *IEEE* **10** 123
- [5] Qiao C, Su R F, Li X, Fang D, Fang X, Tang J L, Zhang B S, Wei Z P 2019 *Chin. J. Lasers* **46** 0701002 (in Chinese) [乔闯,苏瑞巩,李翔,房丹,方铨,唐吉龙,张宝顺,魏志鹏 2019 *中国激光* **46** 0701002]
- [6] Yuan Q H, Jing H Q, Zhong L, Liu S P, Ma X Y 2020 *Acta Opt. Sin.* **41** 194 (in Chinese) [袁庆贺,井红旗,仲莉,刘素平,马骁宇 2020 *发光学报* **41** 194]
- [7] Yu C, Zhang M, Liang L, Qiu C, Chen Y Y, Lei Y X, Wang Y B, Song Y, Jia P, Li D B, Wang L J 2025 *Light Sci. Appl.* **14** 396
- [8] Henry C H, Logan R A, Merritt F R, Luongo J P 1983 *IEEE J. Quantum Electron.* **19** 947
- [9] Osinski M, Buus J 1987 *IEEE J. Quantum Electron.* **23** 9
- [10] Piprek J 2017 *Physics and Simulation of Optoelectronic Devices* (SPIE) p100980Q
- [11] Ortiz V, Becker C, Page H, Sirtori C 2002 *J. Quantum Electron.* **38** 547
- [12] Hou L, Han H N, Zhang L, Zhang J W, Li D H, Wei Z Y 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 134205 (in Chinese) [侯磊,韩海年,张龙,张金伟,李德华,魏志义 2015 *物理学报* **64** 134205]
- [13] Shan X, Liu Y, Zhang J, et al. 2012 *2012 International Conference on Optoelectronics and Microelectronics* Changchun, China, August 23–25, 2012 p123
- [14] Ma M L, Wu J, Yang M, Ning Y Q, Shang G Y 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 174209 (in Chinese) [马明磊,吴坚,杨沐,宁永强,商广义 2013 *物理学报* **62** 174209]
- [15] Kaul T, Erbert G, Klehr A, Maaßdorf A, Martin D, Crump P 2019 *IEEE J. Sel. Top. Quant.* **25** 1
- [16] Wang W Z, Jing H Q, Qi Q, Wang C L, Ni Y X, Liu S P, Ma X Y 2017 *Chin. J. Lumin.* **2** 165 (in Chinese) [王文知,井红旗,祁琼,王翠鸾,倪羽茜,刘素平,马骁宇 2017 *发光学报* **2** 165]
- [17] Han S H, Lee D Y, Lee S J, Cho C Y, Kwon M K, Lee S P, Noh D Y, Kim D J, Kim Y C, Park S J 2009 *Appl. Phys. Lett.* **94** 1274
- [18] Yang W, Li D, Liu N Y, Chen Z, Wang L, Liu L, Li L, Wan C H, Chen W H, Hu X D, Du W M 2012 *Appl. Phys. Lett.* **100** 031105
- [19] Chen Y H, Song Y H, Wang Z W, Li J Y, Zhou J C, Hou Y F, Zhou M 2024 *Micro Nanostructures* **196** 207996
- [20] Zubov F I, Muretova M E, Payusov A S, Maximov M V, Zhukov A E, Asryan L V 2020 *Semiconductors* **54** 366
- [21] Kolbe T, Knauer A, Rass J, Cho H, Hagedorn S, Einfeldt S, Kneissl M, Weyers M 2017 *Materials* **10** 1396
- [22] Paliwal A, Singh K, Mathew M 2019 *IET Optoelectronics* **13** 254
- [23] Muretova M E, Zubov F I, Asryan L V, Shernyakov Y, Maximov M, Zhukov A 2022 *Semiconductors* **56** 246
- [24] Vurgaftman I, Meyer J R, Ram-Mohan L R 2001 *J. Appl. Phys.* **89** 5815
- [25] Man Y X, Zhong L, Ma X Y, Liu S P 2020 *Acta Opt. Sin.* **40** 1914001 (in Chinese) [曼玉选,仲莉,马骁宇,刘素平 2020 *光学学报* **40** 1914001]
- [26] Liu J W, Du Z H, Li J Y, Qi R B, Xu K X 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 074213 (in Chinese) [刘景旺,杜振辉,李金义,齐汝宾,徐可欣 2011 *物理学报* **60** 074213]
- [27] Joachim P 2007 *Nitride Semiconductor Devices: Principles and Simulation* (Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA)
- [28] Xue M X, Chen Z B, Wang W M, Ouyang H Q, Liu X H, Song Y, Zhang C, Xiao W J, Hou Z Y 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 154206 (in Chinese) [薛明晰,陈志斌,王伟明,欧阳慧泉,刘先红,宋岩,张超,肖文健,侯章亚 2014 *物理学报* **63** 154206]
- [29] Han R B, Qi A Y, Qu H W, Zhou X Y, Zheng W H 2024 *IEEE Photonics Tech. Lett.* **36** 1429

Effect of composition optimization of AlGaAs electron blocking layers on the temperature characteristics of 980 nm semiconductor lasers*

ZHANG Hao¹⁾²⁾ SONG Yue^{1)2)†} CHEN Yongyi^{1)2)‡} LIU Jishun¹⁾²⁾
 ZHANG Ligong¹⁾²⁾ SHA Hongbo¹⁾²⁾ WANG Guanran¹⁾²⁾ QIN Li¹⁾²⁾
 LIANG Lei¹⁾²⁾ JIA Peng¹⁾²⁾ QIU Cheng¹⁾²⁾ LEI Yuxin¹⁾²⁾
 WANG Yubing¹⁾²⁾ TANG Xin¹⁾²⁾ WANG Lijun¹⁾²⁾

1) (State Key Laboratory of Luminescence Science and Technology, Changchun Institute of Optics,

Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

2) (Daheng College, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(Received 8 January 2026; revised manuscript received 3 February 2026)

Abstract

High-power 980 nm edge-emitting semiconductor lasers (EELs) serve as the dominant pump sources for erbium-doped fiber amplifiers (EDFAs) and are crucial for various industrial, medical, and photonic integration applications. However, their performance severely degrades at elevated temperatures, primarily due to enhanced electron thermionic escape from the active region, leading to increased threshold current, reduced output power, and limited reliability. This work aims to address this fundamental challenge by strategically designing and optimizing an AlGaAs electron blocking layer (EBL) within the P-side of the laser heterostructure. The core objective is to systematically investigate the influence of EBL aluminum (Al) composition on the carrier dynamics, recombination mechanisms, and resultant temperature-dependent electro-optical characteristics of 980 nm EELs, thereby identifying the optimal design paradigm for achieving superior high-temperature stability.

A comprehensive numerical simulation study was conducted using the commercial semiconductor device simulator PICS 3D, which self-consistently solves the coupled electrical, optical, and thermal equations. Three distinct epitaxial structures were designed and compared: 1) a reference structure without an EBL; 2) a structure incorporating a 10 nm Al_{0.3}GaAs EBL; and 3) a structure incorporating a 10 nm Al_{0.4}GaAs EBL. The EBL was positioned between the undoped P-side waveguide and the barrier layer. The active region consisted of an 8 nm In_{0.2}Ga_{0.8}As single quantum well with GaAsP_{0.08} barriers. The cladding layers employed a graded Al-composition AlGaAs design. Simulations were performed over a temperature range of 300 K to 360 K for devices with a 25 μm stripe width and a 2 mm cavity length. Key analyzed parameters included spatial carrier distributions (electron/hole concentrations), radiative and Auger recombination rates, power-current-voltage (*P-I-V*) characteristics, threshold current (I_{th}), characteristic temperature (T_0), and lasing wavelength shift.

Carrier confinement and injection balance: The introduction of an AlGaAs EBL dramatically suppressed electron leakage into the P-cladding. At 360 K, the peak electron concentration in the P-cladding was reduced

* Project supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2023YFB2805100), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 62574201), the Research Foundation for Basic Research of Jilin Province, China (Grant No. SKL202302027), the Science and Technology Program of Tianjin, China (Grant No. 24YFYSHZ00250), and the Shuguang Talent Program of the Chinese Academy of Sciences.

† Corresponding author. E-mail: songyue@ciomp.ac.cn

‡ Corresponding author. E-mail: chenyy@ciomp.ac.cn

by 94.7% for the Al_{0.3}GaAs EBL and by 97.14% for the Al_{0.4}GaAs EBL, compared to the reference structure. However, the higher Al-content EBL (Al_{0.4}GaAs) introduced a significantly larger valence band barrier, severely impeding hole injection into the quantum well (QW). This imbalance caused an anomalous accumulation of electrons within the QW, reaching a density of $2.3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ at 360 K for the Al_{0.4}GaAs EBL, compared to $1.72 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ for the Al_{0.3}GaAs EBL and $1.81 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ for the reference structure.

Recombination dynamics: The disparate carrier distributions led to distinct recombination pathways. The Al_{0.4}GaAs EBL structure exhibited the highest radiative recombination rate due to its high electron density but simultaneously suffered from the strongest Auger recombination—36.5% higher than the reference at 360 K. This is attributed to the cubic dependence of Auger recombination on carrier density. The Al_{0.3}GaAs EBL structure maintained a high radiative rate while effectively suppressing Auger recombination, achieving a more favorable balance.

Threshold and spectral characteristics: Despite its superior electron confinement, the Al_{0.4}GaAs EBL structure exhibited the highest threshold current across the temperature range, a direct consequence of the hole injection bottleneck and enhanced non-radiative losses. The Al_{0.3}GaAs EBL structure achieved the best temperature stability, characterized by the highest characteristic temperature $T_0 = 280.9 \text{ K}$, compared to 271.7 K (reference) and 274.7 K (Al_{0.4}GaAs EBL). It also demonstrated the lowest wavelength temperature drift coefficient (0.346 nm/°C), enhancing spectral stability.

Power output and efficiency: The Al_{0.3}GaAs EBL structure delivered the highest continuous-wave output power across the entire temperature range. At 360 K, its maximum power was 3.592 W, representing a 6.90% improvement over the reference structure (3.360 W). The Al_{0.4}GaAs EBL structure showed a similar improvement (3.590 W) but at the cost of higher operating voltage at lower temperatures. The voltage-current relationship revealed a complex interplay between hole injection barrier and carrier recombination, with a crossover occurring above 350 K where the Al_{0.4}GaAs EBL voltage became lower, indicating a shift in the dominant mechanism to leakage and recombination dynamics.

This study elucidates the critical trade-off in EBL design for high-temperature 980 nm semiconductor lasers. While increasing the Al composition in the AlGaAs EBL strengthens electron confinement, an excessively high Al fraction (0.4) introduces a prohibitive hole injection barrier. This disrupts carrier balance in the active region, leading to electron pile-up, a dramatic increase in detrimental Auger recombination, and ultimately degrading threshold and power performance. The Al_{0.3}GaAs EBL emerges as the optimized design, successfully striking an optimal balance between effective electron blocking and efficient hole injection. It achieves a significant suppression of electron leakage (>94%) while minimizing parasitic non-radiative losses, resulting in the best overall performance: the highest T_0 (280.9 K), the lowest wavelength drift, and the greatest output power across the 300–360 K range. The findings underscore that the key to improving high-temperature laser characteristics lies not in merely maximizing the EBL barrier height but in globally optimizing the carrier confinement-injection equilibrium. This work provides essential guidelines and a theoretical foundation for the epitaxial design of temperature-stable, high-power 980 nm pump lasers.

Keywords: semiconductor laser, temperature characteristics, electron blocking layer

DOI: [10.7498/aps.75.20260038](https://doi.org/10.7498/aps.75.20260038)

CSTR: [32037.14.aps.75.20260038](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20260038)



AlGaAs电子阻挡层组分优化对980 nm半导体激光器温度特性的影响

张昊 宋悦 陈泳屹 刘基顺 张立功 沙宏博 王冠然 秦莉 梁磊 贾鹏 邱橙 雷宇鑫 王玉冰 唐欣 王立军

Effect of composition optimization of AlGaAs electron blocking layers on the temperature characteristics of 980 nm semiconductor lasers

ZHANG Hao SONG Yue CHEN Yongyi LIU Jishun ZHANG Ligong SHA Hongbo WANG Guanran
QIN Li LIANG Lei JIA Peng QIU Cheng LEI Yuxin WANG Yubing TANG Xin WANG Lijun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 100403 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20260038

CSTR: 32037.14.aps.75.20260038

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20260038>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

混沌光注入半导体激光器中极端事件的演变

Evolution of extreme events in chaotic light-injected semiconductor lasers

物理学报. 2023, 72(16): 164201 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230759>

超晶格电子阻挡层周期数对AlGaN基深紫外发光二极管性能的影响

Influence of period number of superlattice electron barrier layer on the performance of AlGaN-based deep ultraviolet LED

物理学报. 2024, 73(12): 128503 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231969>

基于双路光电反馈下光注入半导体激光器的高性能线性调频信号产生

High-performance linear frequency-modulated signal generation based on optically injected semiconductor laser with dual-loop optoelectronic feedback

物理学报. 2022, 71(21): 214204 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221308>

自混沌光相位调制光反馈半导体激光器输出光的混沌特性

Chaotic characteristics of output light from semiconductor laser with self-chaotic phase modulation and optical feedback

物理学报. 2022, 71(15): 150502 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220204>

基于滤波反馈宽带平坦混沌信号的快速物理随机比特产生

Fast physical random bit generation of wideband flat chaos signal based on filter feedback

物理学报. 2022, 71(22): 224203 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221173>

1550 nm毫瓦级单横模垂直腔面发射半导体激光器

1550-nm vertical-cavity surface-emitting laser with single-mode power of milliwatts

物理学报. 2022, 71(6): 064204 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212132>