

InGaAsSb/AlGaAsSb量子阱激光器性能的仿真优化研究

周靖涵¹, 王登魁^{1*}, 李承林², 方正君^{2*}, 房丹¹, 王勇¹, 方铨¹

¹长春理工大学, 高功率半导体激光国家重点实验室, 吉林 长春

²安徽光智科技有限公司, 安徽 滁州

收稿日期: 2026年4月7日; 录用日期: 2026年5月20日; 发布日期: 2026年5月27日

摘要

2 μm 波段作为重要的大气窗口, 是诸多领域核心光电器件的工作波段, 该波段的激光器主要采用InGaAsSb/AlGaAsSb的量子阱结构。本文通过仿真技术系统地研究了InGaAsSb/AlGaAsSb量子阱激光器关键参数对器件性能的影响, 包括接触层掺杂浓度、量子阱厚度、上限制层Al组分。结果表明: 接触层掺杂浓度为 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 时, 可在增强载流子约束能力与维持光场分布之间实现最优平衡; 量子阱厚度为10 nm时, 能够获得良好的光学增益, 避免过薄量子阱引发的载流子泄漏; 上限制层Al组分较低时, 有助于提升辐射复合效率。本研究为高性能铟化物中红外激光器的结构设计与性能优化提供了理论依据。

关键词

InGaAsSb/AlGaAsSb量子阱, 接触层掺杂浓度, 量子阱厚度, 上限制层Al组分

Simulation Optimization of the Performance of InGaAsSb/AlGaAsSb Quantum Well Lasers

Jinghan Zhou¹, Dengkui Wang^{1*}, Chenglin Li², Zhengjun Fang^{2*}, Dan Fang¹, Yong Wang¹, Xuan Fang¹

¹State Key Laboratory of High Power Semiconductor Lasers, Changchun University of Science and Technology, Changchun Jilin

²Anhui Guangzhi Technology Co., Ltd., Chuzhou Anhui

Received: April 7, 2026; accepted: May 20, 2026; published: May 27, 2026

*通讯作者。

文章引用: 周靖涵, 王登魁, 李承林, 方正君, 房丹, 王勇, 方铨. InGaAsSb/AlGaAsSb量子阱激光器性能的仿真优化研究[J]. 物理化学进展, 2026, 15(2): 82-90. DOI: 10.12677/japc.2026.152009

Abstract

The 2 μm waveband serves as a critical atmospheric window and represents the operating waveband for core optoelectronic devices in numerous fields. Lasers operating within this band predominantly adopt the InGaAsSb/AlGaAsSb quantum well structure. This study systematically investigates the influences of key parameters on the device performance of InGaAsSb/AlGaAsSb quantum well lasers via simulation, including doping concentration of the contact layer, quantum well thickness, and Al composition in the upper cladding layer. The results show that a contact layer doping concentration of $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ achieves the optimal balance between enhancing carrier confinement and maintaining optical field distribution. A quantum well thickness of 10 nm yields favorable optical gain while avoiding carrier leakage caused by overly thin quantum wells. A lower Al composition in the upper cladding layer contributes to improved radiative recombination efficiency. This work provides a theoretical basis for the structural design and performance optimization of high-performance antimonide mid-infrared lasers.

Keywords

InGaAsSb/AlGaAsSb Quantum Well, Contact Layer Doping Concentration, Quantum Well Thickness, Al Composition in Upper Cladding Layer

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

2 μm 中红外半导体激光器可广泛应用于化学气体检测[1]-[4]、环境监测[5]-[7]、外太空探测[8]、空间通信应用[9]、医疗诊断技术等[10]领域,受到了研究人员的高度重视。目前,基于 III~V 材料体系载流子直接复合跃迁机制工作的半导体激光器已经实现紫外到近红外覆盖[11]-[13],同时,采用量子级联或带间级联激光器结构,激光器的工作波长也不再受限于材料的禁带宽度,可以实现远红外甚至太赫兹波段的工作[14]。然而,上述材料体系无论是通过直接复合还是子带间跃迁,均难以在 2 μm 波段实现室温连续高效率的激光输出。

I 型量子阱结构因其具备电子与空穴波函数空间重叠度高、辐射复合效率高、光学增益强等优势,成为高性能半导体激光器的首选有源区方案。其中,四元 InGaAsSb 合金凭借组分调节的灵活性,可精确控制带隙能量以匹配 2 μm 波长;同时具有良好的载流子限制能力,从而成为 2 μm 波段实现室温连续波高功率输出的理想有源区材料[15]-[17]。

本研究设计了 2 μm 波段的 InGaAsSb/AlGaAsSb 量子阱激光器结构,采用仿真技术,探究了量子阱厚度、接触层掺杂浓度、上限制层 Al 组分对 InGaAsSb/AlGaAsSb 激光器性能的影响。上述参数决定了有源区载流子限制能力、光学增益大小与光场分布等特性,然而目前对这些参数缺乏系统性研究,这在一定程度上制约了器件性能的进一步提升。本论文通过对比分析不同结构参数下的仿真结果,揭示各参数对能带结构、载流子分布、光场特性及复合机制的调控规律,并据此提出了相应的器件优化方案,为高性能碲化物中红外激光器的结构设计 with 性能优化提供理论依据与可行性策略。

2. 仿真模型与器件结构

2.1. 仿真模型

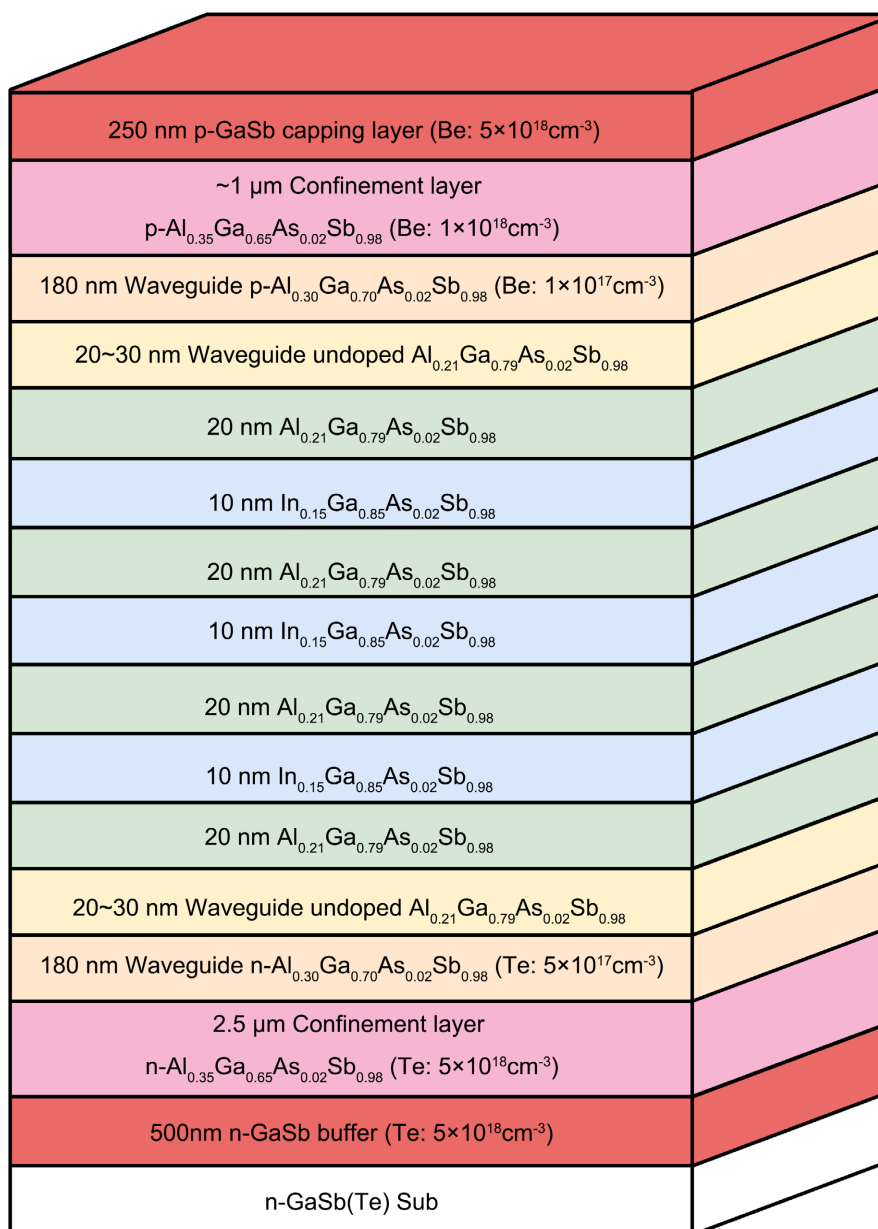


Figure 1. Schematic diagram of the epitaxial structure of an InGaAsSb/AlGaAsSb laser
图 1. InGaAsSb/AlGaAsSb 激光器外延结构示意图

本文采用 TCAD 软件，调用的仿真模型包括费米模型、SRH 复合模型、光学复合模型以及俄歇复合模型。在上述模型中，运用了泊松方程、连续性方程和漂移扩散方程来描述载流子的输运特性。泊松方程[18]主要描述电场与空间电荷分布的静电关系。方程为：

$$\nabla^2 \Phi = -\frac{\rho}{\epsilon} \quad (1)$$

式中, ε 表示电介质常数, Ψ 表示静电势, ρ 表示空间电荷密度。

载流子连续性方程用以表示载流子浓度与载流子电流之间的关系, 包括电子连续性方程[19]和空穴连续性方程[20], 如下所示:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = D_p \nabla^2 p - \mu_p \nabla \cdot (pE) + g_p - \frac{p - p_0}{\tau_p} \quad (2)$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D_n \nabla^2 n + \mu_n \nabla \cdot (nE) + g_n - \frac{n - n_0}{\tau_n} \quad (3)$$

式中, n 和 p 表示电子和空穴的浓度, D_p 、 D_n 表示空穴/电子扩散系数, μ_n 和 μ_p 分别表示电子迁移率和空穴迁移率, τ_p 、 τ_n 表示空穴/电子载流子寿命, g_n 和 g_p 分别表示电子产生率和空穴产生率。

漂移-扩散方程[21]主要用来描述电流密度与载流子的复合、产生之间的关系。载流子在电场作用下做加速运动, 但由于散射机制会与电子和空穴发生碰撞, 改变载流子运动的速度大小与方向, 方程为:

$$J_p = q\mu_p n E_p + qD_p \nabla p \quad (4)$$

$$J_n = q\mu_n n E_n + qD_n \nabla n \quad (5)$$

式中, J_p 、 J_n 表示载流子浓度, E_n 和 E_p 表示电场强度。

2.2. 器件结构

图 1 为本文设计 InGaAsSb/AlGaAsSb 多量子阱激光器结构, 具有典型的双限制异质结构特征。采用 n 型 GaSb (Te 掺杂) 衬底, 其上依次为 500 nm n -GaSb 缓, 1.58 μm 厚的 AlGaAsSb 下限制层、180 nm 厚的 p 型 AlGaAsSb 波导层, 以及 20~30 nm 厚的非掺杂 AlGaAsSb 波导层。有源区为周期性堆叠的多量子阱结构, 由 10 nm 厚的 InGaAsSb 势阱层与 20 nm 厚的 AlGaAsSb 势垒层组成。继续向上依次为 20~30 nm 厚的非掺杂 AlGaAsSb 波导层、180 nm 厚的 p 型 AlGaAsSb 波导层和 1 μm 厚的 p 型 AlGaAsSb 上限制层, 构成对称型光学波导结构。最上方为 250 nm 厚的高掺杂 p -GaSb 盖层, 用于形成欧姆接触。仿真实验中涉及的材料参数包括 SRH 复合的电子及空穴寿命[22]、材料的光学复合速率[22] [23] 以及低电场时的电子和空穴迁移率[23]。

3. 分析与讨论

3.1. 接触层掺杂浓度的优化

通过 TCAD 数值模拟, 在保持接触层厚度恒定不变的条件下, 将接触层掺杂浓度从 $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 逐步提升至 $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 。如图 2(a) 所示, 仿真结果表明, 随着接触层掺杂浓度的数量级增加, 能带结构呈现出显著的整体下移现象。当接触层掺杂浓度为 $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 时, 能带处于最高位置; 而当接触层掺杂浓度增至 $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 时, 能带位置达到最低点。两者之间的能带位置差异约为 0.6 eV。根据泊松方程, 接触层高掺杂直接导致局部电荷密度显著增大, 从而在 p 区产生更大的电场梯度, 使接触层能带下移幅度远大于量子阱层, 后者主要受扩散电场影响[24] [25]。能带下移量与掺杂浓度呈非线性关系: 在掺杂浓度低于 $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 时, 下移幅度小于 0.1 eV; 在高于 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 区间, 下移幅度超过 0.4 eV。

与此同时, 量子阱区域的电子浓度随掺杂浓度的增加呈现出独特的变化曲线, 如图 2(b) 所示, 在掺杂浓度 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 时达到峰值为 $3.83 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 。而在其他掺杂浓度时, 电子浓度仅在 $2 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$ 附近徘徊, 因此提高掺杂浓度可以有效降低载流子的隧穿作用[25]。

图 2(c) 为束缚电子密度随掺杂浓度的变化曲线, 从图中可以看出, 随接触层掺杂浓度升高, 束缚电子浓度逐渐降低。其中掺杂浓度为 $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 时束缚电子浓度最高, 且量子阱区域的束缚电子密度变

化幅度较大。通过对比图 2(a)以及图 2(c)可知,能带下移引起量子阱有效势阱深度增大,且对电子束缚能力增强,因此束缚电子浓度随掺杂浓度升高而增加。由图 2(d)可知,随着掺杂浓度的增加,光场强度呈先增强后减弱的趋势[15],在掺杂浓度为 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 时光场强度达到最高峰值 $5.34 \times 10^6 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。

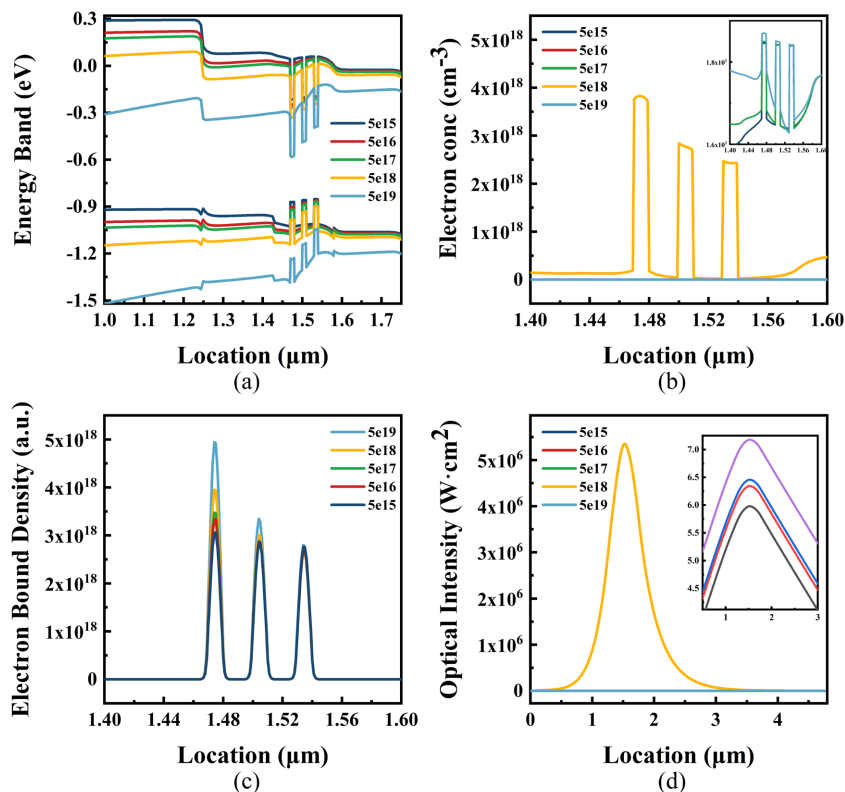


Figure 2. Effect of doping concentration variation on device performance. (a) Energy band; (b) Electron concentration; (c) Bound electron density; (d) Optical field intensity
图 2. 改变掺杂浓度对性能的影响。(a) 能带; (b) 电子浓度; (c) 束缚电子密度; (d) 光场强度

3.2. 量子阱厚度的优化

量子阱厚度对能带位置的影响如图 3(a)所示。随着量子阱厚度从 6 nm 增加到 12 nm, 导带和价带位置整体上升。在厚度为 6 nm 至 8 nm 区间, 能带位置发生显著跃变, 整体差值约 0.23 eV; 相比之下, 8 nm 至 12 nm 厚度间的变化仅为 0.1 eV。这一变化符合量子阱理论: 厚度增加使量子化能级间距减小, 导致导带底和价带顶相对上升[26]。这一能带特性变化同样反映在束缚电子密度上, 如图 3(c)。在 6 nm 厚度处观察到最高的束缚电子密度, 当量子阱厚度为 10 nm 时, 其内部电子浓度达到峰值(图 3(b))。其余厚度下的电子浓度则与能带位置及束缚电子密度的变化规律一致。

如图 3(d)和图 4 所示, 量子阱厚度对光场特性的影响呈现显著的非线性关系: 当量子阱厚度为 6 nm 时, 器件光场强度降至最低值 $4.92 \times 10^{-23} \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$; 随着量子阱厚度逐渐增加至 8 nm, 光场强度略微增加; 当量子阱厚度达到 10 nm 时, 光场强度开始呈现指数级增长趋势, 光场强度达到峰值 $4.41 \times 10^6 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$, 此时光场分布展现出良好的空间扩展性和模式稳定性; 值得注意的是, 当厚度继续增加至 12 nm 时, 虽然光场强度仍维持在较高的量级, 但已出现约 8% 的下降趋势。尽可能使用国际标准单位(公制), 如厘米、千克、秒, 在特殊情况下可以使用英制单位, 如“3.5 英寸磁盘”。避免把公制与英制混合使用。

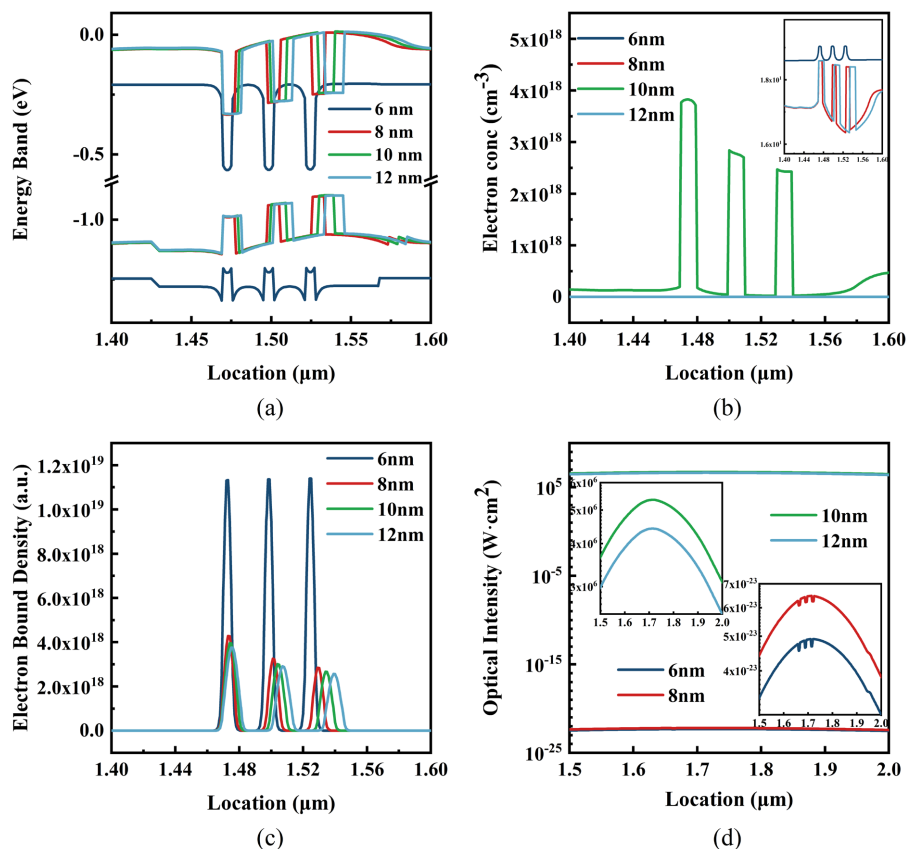


Figure 3. Effect of quantum well thickness variation on device performance. (a) Energy band; (b) Electron concentration; (c) Bound electron density; (d) Optical field intensity
图 3. 改变量子阱厚度对性能的影响。(a) 能带; (b) 电子浓度; (c) 束缚电子密度; (d) 光场强度

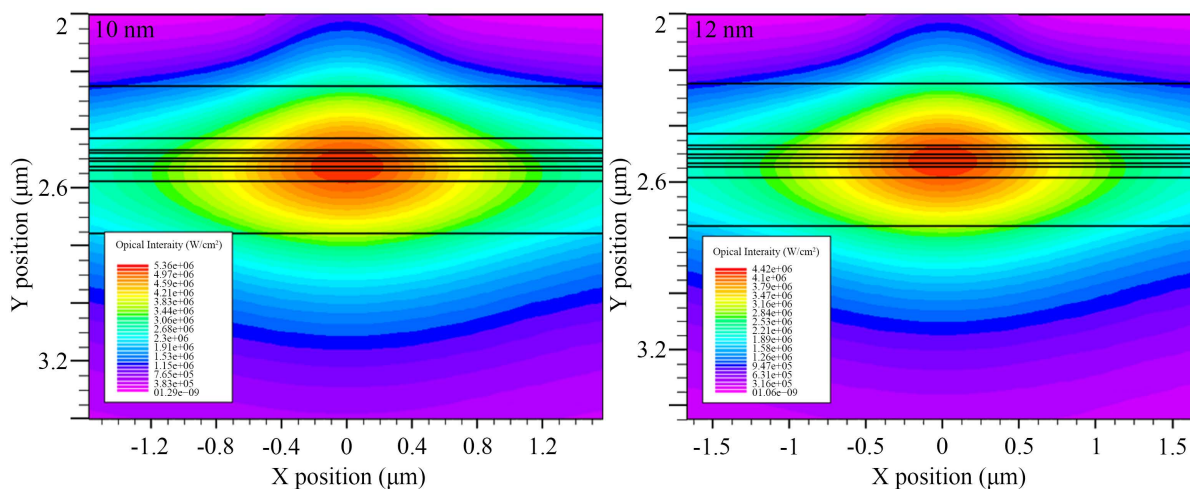


Figure 4. Optical field intensity distributions at quantum well thicknesses of 10 nm and 12 nm
图 4. 量子阱厚度为 10、12 nm 时的光场强度图

3.3. 上限制层 Al 组分的优化

对上限制层的 Al 进行调控，以系统研究 Al 组分变化对性能的影响。Al 组分的调整区间为 0.35 至

0.85, 步进增量为 0.1。在 InGaAsSb/AlGaAsSb 激光器中, 增加上限制层 AlGaAsSb 的 Al 组分使该层禁带宽度显著增大, 上限值层的能带相对于量子阱层向上移动。如图 5(a)所示, 随着 Al 组分的逐步增加, 上限制层能带整体呈现明显的上升趋势, 具体表现为导带上移 0.58 eV, 价带上移 0.25 eV, 且禁带宽度由 1.2 eV 增加至 1.53 eV。由于界面处的能带偏移(ΔE_c 和 ΔE_v)增大, 进而导致从上限制层到量子阱的能带整体随之偏移。其中, 上限制层因直接受 Al 组分变化影响, 移动幅度最大, 而量子阱层仅受界面势垒影响, 偏移较小[27]。

量子阱区域的电子浓度随 Al 组分的增加呈现出独特的变化曲线, 如图 5(b), 在 Al 组分为 0.35 时达到峰值为 $3.83 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 。其次为组分在 0.85 时有第二高值 $2.63 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 。而在其他掺杂浓度时, 电子浓度仅为 18 cm^{-3} 左右。仅从峰值来看, 当上限制层 Al 组分为 0.35 时, 第一量子阱区域电子浓度最高, 在后两个阱区浓度逐渐下降, 但仍部分高于 Al 组分为 0.85 时的电子浓度。

与掺杂浓度中的修改相类似, 在修改 Al 组分的过程中, 束缚电子密度曲线的变化规律同样与能带显示出较高的相关性。在束缚电子密度曲线中, 随着接触层掺杂浓度的升高, 曲线逐渐上移, 如图 5(c)。且束缚电子密度在第一至第三个阱区是逐渐降低的, 该特征与电子浓度的特征相同。光场强度呈现出与电子浓度类似的曲线特性。二者均在上限制层 Al 组分为 0.35 时达到最高峰值, 如图 5(d)。最高光场强度为 $5.34 \times 10^6 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。整体曲线随着组分升高, 光场强度逐渐减小, 整体发光位置并无变化, 均处于量子阱中心。

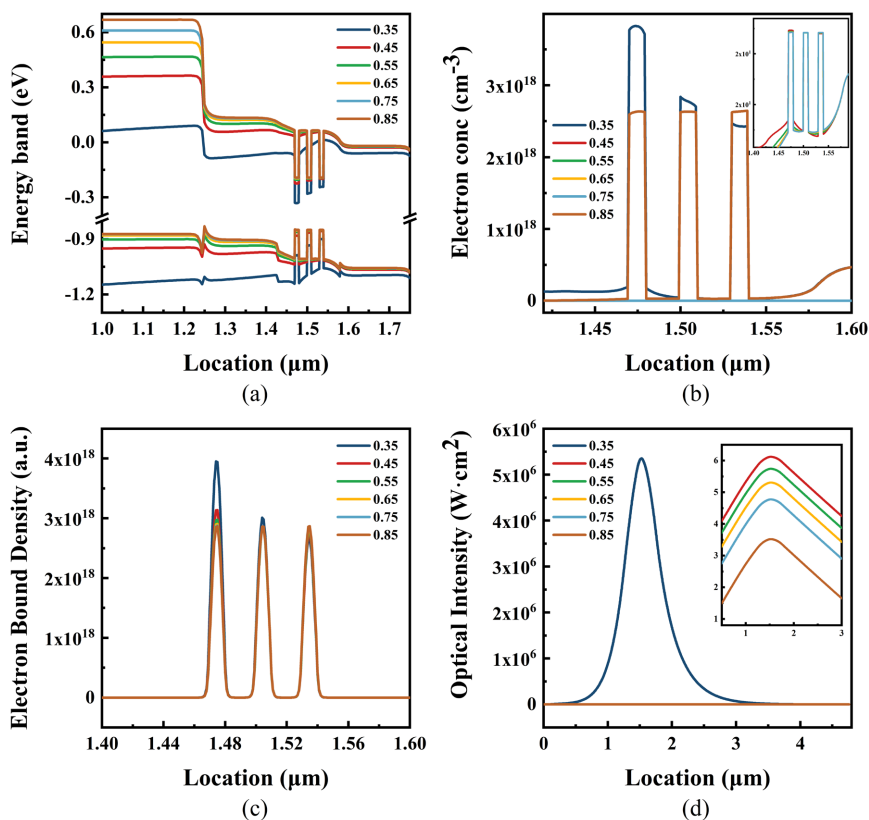


Figure 5. Effect of Al composition variation in the upper cladding layer on device performance. (a) Energy band; (b) Electron concentration; (c) Bound electron density; (d) Optical field intensity

图 5. 改变上限制层 Al 组分对性能的影响。(a) 能带; (b) 电子浓度; (c) 束缚电子密度; (d) 光场强度

4. 结论

本研究针对 InGaAsSb/AlGaAsSb 中红外量子阱激光器, 采用 TCAD 数值模拟方法, 系统探究了接触层掺杂浓度、量子阱层厚度及上限制层 Al 组分对器件能带结构、载流子分布、束缚电子密度与光场特性的影响规律。结果表明, 接触层掺杂浓度显著调控器件能带与载流子行为, 浓度提升可增大量子阱有效势阱深度、增强电子束缚能力, 在 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 时电子浓度与光场强度均达到最优值。量子阱层厚度存在明显性能拐点, 厚度为 10 nm 时光场强度最高且模式稳定性最佳。上限制层 Al 组分通过改变禁带宽度与能带偏移影响载流子限制效果, Al 组分为 0.35 时量子阱区电子浓度、束缚电子密度及光场强度均表现最优, 组分过高会造成器件性能显著下降。综上, 合理匹配接触层掺杂浓度、量子阱厚度与上限制层 Al 组分, 可有效优化能带排布、提升载流子限制效率与光场输出性能, 为该类中红外量子阱激光器的结构设计及性能提升提供了可靠的仿真依据与优化方向。

参考文献

- [1] Christensen, L.E., Webster, C.R. and Yang, R.Q. (2007) Aircraft and Balloon *in Situ* Measurements of Methane and Hydrochloric Acid Using Interband Cascade Lasers. *Applied Optics*, **46**, 1132-240. <https://doi.org/10.1364/ao.46.001132>
- [2] Horstjann, M., Bakhirkin, Y.A., Kosterev, A.A., Curl, R.F., Tittel, F.K., Wong, C.M., *et al.* (2004) Formaldehyde Sensor Using Interband Cascade Laser Based Quartz-Enhanced Photoacoustic Spectroscopy. *Applied Physics B*, **79**, 799-803. <https://doi.org/10.1007/s00340-004-1659-3>
- [3] Mukherjee, A., Prasanna, M., Lane, M., Go, R., Dunayevskiy, I., Tsekoun, A., *et al.* (2008) Optically Multiplexed Multi-Gas Detection Using Quantum Cascade Laser Photoacoustic Spectroscopy. *Applied Optics*, **47**, 4884-4897. <https://doi.org/10.1364/ao.47.004884>
- [4] Schiller, C.L., Bozem, H., Gurk, C., Parchatka, U., Königstedt, R., Harris, G.W., *et al.* (2008) Applications of Quantum Cascade Lasers for Sensitive Trace Gas Measurements of CO, CH₄, N₂O and HCHO. *Applied Physics B*, **92**, 419-430. <https://doi.org/10.1007/s00340-008-3125-0>
- [5] Lee, B.H., Wood, E.C., Zahniser, M.S., McManus, J.B., Nelson, D.D., Herndon, S.C., *et al.* (2010) Simultaneous Measurements of Atmospheric HONO and NO₂ via Absorption Spectroscopy Using Tunable Mid-Infrared Continuous-Wave Quantum Cascade Lasers. *Applied Physics B*, **102**, 417-423. <https://doi.org/10.1007/s00340-010-4266-5>
- [6] Manne, J., Lim, A., Jäger, W. and Tulip, J. (2010) Off-Axis Cavity Enhanced Spectroscopy Based on a Pulsed Quantum Cascade Laser for Sensitive Detection of Ammonia and Ethylene. *Applied Optics*, **49**, 5302-5216. <https://doi.org/10.1364/ao.49.005302>
- [7] Stimler, K., Nelson, D. and Yakir, D. (2010) High Precision Measurements of Atmospheric Concentrations and Plant Exchange Rates of Carbonyl Sulfide Using Mid-IR Quantum Cascade Laser. *Global Change Biology*, **16**, 2496-2503. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.02088.x>
- [8] Webster, C.R. (2005) Measuring Methane and Its Isotopes ¹²CH₄, ¹³CH₄, and CH₃D on the Surface of Mars with *in Situ* Laser Spectroscopy. *Applied Optics*, **44**, 1226-1235. <https://doi.org/10.1364/ao.44.001226>
- [9] Blaser, S., Hofstetter, D., Beck, M. and Faist, J. (2001) Free-Space Optical Data Link Using Peltier-Cooled quantum cascade Laser. *Electronics Letters*, **37**, 778-780. <https://doi.org/10.1049/el:20010504>
- [10] Shorter, J.H., Nelson, D.D., McManus, J.B., Zahniser, M.S. and Milton, D.K. (2010) Multicomponent Breath Analysis with Infrared Absorption Using Room-Temperature Quantum Cascade Lasers. *IEEE Sensors Journal*, **10**, 76-84. <https://doi.org/10.1109/jsen.2009.2035764>
- [11] 韩家贤, 韦华, 刘建良, 等. GaAs 和 InP 化合物半导体的发展趋势及应用[J]. 云南化工, 2023, 50(12): 16-20.
- [12] 赵煜墨, 李晓强, 齐志强, 等. 808 nm 高功率半导体激光器研究综述: 研究进展、关键技术与应用[J/OL]. 激光与光电子学进展, 2025: 1-44. <https://link.cnki.net/urlid/31.1690.TN.20250815.1442.006>, 2026-05-14.
- [13] 杨天瑞, 徐欢, 梅洋, 等. GaN 垂直腔面发射激光器研究进展[J]. 中国激光, 2020, 47(7): 151-165.
- [14] 李静漪, 杨雄伟, 龙健宇, 等. 基于 DFB 激光器产生太赫兹信号的无线传输系统中的相位补偿技术[J/OL]. 光学学报, 2025: 1-16. <https://link.cnki.net/urlid/31.1252.O4.20251216.1416.016>, 2026-05-14.
- [15] Yu, H., Yang, C., Chen, Y., Shi, J., Cao, J., Geng, Z., *et al.* (2025) Mid-Infrared High-Power InGaAsSb/AlGaInAsSb Multiple-Quantum-Well Laser Diodes around 2.9 μm. *Nanomaterials*, **15**, Article 139. <https://doi.org/10.3390/nano15020139>

-
- [16] Garbuzov, D.Z., Martinelli, R.U., Lee, H., Menna, R.J., York, P.K., DiMarco, L.A., *et al.* (1997) 4 W Quasi-Continuous-Wave Output Power from 2 μm AlGaAsSb/InGaAsSb Single-Quantum-Well Broadened Waveguide Laser Diodes. *Applied Physics Letters*, **70**, 2931-2933. <https://doi.org/10.1063/1.118747>
- [17] Donetsky, D., Kipshidze, G., Shterengas, L. and Young, W.F. (2012) 2.3 μm Type-I Quantum Well GaInAsSb/AlGaAsSb/GaSb Laser Diodes with Quasi-CW Output Power of 1.4 W. *The Journal of Physical Chemistry C*, **117**, Article 20071320.
- [18] Aissa, B. and Bouarissa, N. (2024) N-Type Doping Modulation of Double GaAs/AlGaAs Quantum Wells. *Computational Materials Science*, **237**, Article 112845.
- [19] Sze, S.M. and Ng, K.K. (2007) *Physics of Semiconductor Devices*. 3rd Edition, Wiley. <https://doi.org/10.1002/0470068329>
- [20] Griffiths, D.J. (2017) *Introduction to Electrodynamics*. 4th Edition, Cambridge University Press.
- [21] Selberherr, S. (1984) *Analysis and Simulation of Semiconductor Devices*. Springer.
- [22] Kumar, R.J., Borrego, J.M., Dutta, P.S., Gutmann, R.J., Wang, C.A. and Nichols, G. (2005) Auger and Radiative Recombination Coefficients in 0.55-Ev InGaAsSb. *Journal of Applied Physics*, **97**, Article 023353. <https://doi.org/10.1063/1.1828609>
- [23] Ioffe Physical Technical Institute (2024) Ioffe Database: New Semiconductor Materials (NSM). <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/>
- [24] Newell, A.T., Carrasco, R.A., Logan, J.V., Hains, C.P., Shima, D., Balakrishnan, G., *et al.* (2026) Unintentional Doping and Native Defects in the AlGaAsSb Barrier of *nBn* Photodetectors and Their Effect on Detector Dark Current. *Journal of Applied Physics*, **139**, Article 084504. <https://doi.org/10.1063/5.0313715>
- [25] Manyk, T., Rutkowski, J., Kopytko, M., Kłos, K. and Martyniuk, P. (2024) Theoretical Study of Quaternary nBp InGaAsSb SWIR Detectors for Room Temperature Condition. *Materials*, **17**, Article 5482. <https://doi.org/10.3390/ma17225482>
- [26] Miller, D.A.B. (1996) Optical Physics of Quantum Wells. In: Oppo, G.L., Barnett, S.M. and Riis, E., Eds., *Quantum Dynamics of Simple Systems*, Institute of Physics, 239-266.
- [27] Eales, T.D., Marko, I.P., Adams, A.R., Meyer, J.R., Vurgaftman, I. and Sweeney, S.J. (2021) Quantifying Auger Recombination Coefficients in Type-I Mid-Infrared InGaAsSb Quantum Well Lasers. *Journal of Physics D: Applied Physics*, **54**, Article 055105. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/abc042>