

文章编号 1004-924X(2026)15-2331-28

852 nm 波段半导体激光器研究进展

孙龙龙¹, 唐吉龙¹, 张 聪^{1*}, 代 千², 宋海智^{1,2}, 魏志鹏^{1*}

(1. 长春理工大学 半导体激光全国重点实验室, 吉林 长春 130022;

2. 西南技术物理研究所, 四川 成都 610041)

摘要: 852 nm 半导体激光器与铯原子 D₂ 线跃迁高度匹配, 是铯原子钟、量子传感、冷原子操控和精密光谱系统中的关键光源。系统综述了 852 nm 波段半导体激光器在量子阱材料体系、器件结构设计、核心性能优化及工程应用方面的研究进展。从材料演进角度分析了 AlGaAs/GaAs、无铝 InGaAsP/GaAs 和 InAlGaAs/GaAs 等体系的发展逻辑, 阐明了载流子限制能力、腔面可靠性、温度稳定性和电光转换效率之间的内在关联。按照器件类型总结了分布反馈激光器 (Distributed Feedback Laser, DFB)、垂直腔面发射激光器 (Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser, VCSEL)、外腔反馈激光器、垂直外腔面发射激光器 (Vertical External-Cavity Surface-Emitting Laser, VECSEL) 及高功率边发射激光器的发展现状, 比较了其在线宽、功率、斜率效率、单模稳定性和系统集成方面的性能差异。最后, 对国内外商用 852 nm 半导体激光器产品进行了分析, 指出当前国内仍主要集中在代理销售、模块封装和整机集成环节, 核心芯片及增益芯片仍依赖国外供应。未来, 852 nm 半导体激光器会向窄线宽、高功率、高效率、宽温稳定、高可靠和芯片级集成方向发展, 为新一代铯原子钟和量子精密测量系统提供支撑。

关键词: 半导体激光器; 量子阱结构; 核心性能指标; 铯原子钟

中图分类号: TN36 **文献标识码:** A

doi: 10. 37188/OPE. 20263415. 2331

CSTR: 32169. 14. OPE. 20263415. 2331

Research advances in semiconductor lasers at 852 nm band

SUN Longlong¹, TANG Jilong¹, ZHANG Cong^{1*}, DAI Qian², SONG Haizhi^{1,2}, WEI Zhipeng^{1*}

(1. National Key Laboratory of Semiconductor Laser, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

2. Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China)

* Corresponding author, E-mail: czhang@cust. edu. cn; zpweicust@126. com

Abstract: Semiconductor lasers emitting at 852 nm are essential light sources for cesium-based atomic systems because their wavelength is resonant with the Cs D₂ transition. They support cesium atomic clocks, quantum sensing, cold-atom manipulation, and precision spectroscopy. This review addresses the need for a systematic assessment of 852 nm laser technologies by summarizing recent advances in quantum-well material systems, device architectures, performance optimization, and engineering applications. The development of AlGaAs/GaAs, aluminum-free InGaAsP/GaAs, and InAlGaAs/GaAs active-region plat-

收稿日期: 2026-04-03; **修订日期:** 2026-04-27.

基金项目: 吉林省科技发展计划资助项目 (No. SKL202602007JC); 中国兵器工业集团有限公司激光技术重点实验室开放基金资助项目 (No. KLLDT202410)

forms is first reviewed. The effects of material design on carrier confinement, facet reliability, thermal stability, and electro-optical conversion efficiency are analyzed. Major device configurations—including vertical-cavity surface-emitting lasers, distributed-feedback lasers, external-cavity diode lasers, vertical external-cavity surface-emitting lasers, and high-power edge-emitting lasers—are then evaluated according to their structural characteristics and performance metrics. Their relative capabilities in linewidth, output power, slope efficiency, single-mode stability, and system-level integration are compared. Commercial 852 nm semiconductor laser products are further assessed from an application-oriented perspective. Current domestic activities are concentrated primarily on product distribution, module packaging, and system integration, whereas core laser chips and gain chips remain largely dependent on overseas suppliers. Future development should prioritize narrower linewidths, higher output power, improved electro-optical efficiency, wider operating-temperature ranges, enhanced reliability, and chip-scale integration. These advances are expected to support next-generation cesium atomic clocks and quantum precision-measurement systems.

Key words: semiconductor lasers; quantum well structure; core performance metrics; cesium atomic clocks

1 引 言

自 1962 年问世以来,半导体激光器^[1-7]历经五十余年演进,结构从同质结、异质结、量子阱逐步发展至边发射与面发射 (Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser, VCSEL) 等多种形式。半导体激光器作为现代光电子技术的核心元件,在通信、传感、医疗和精密测量等领域发挥着重要作用^[8]。其中,852 nm 波段的半导体激光器因与铯原子 D_2 线 (852.359 nm) 精确共振,在原子钟、冷原子物理与量子信息处理等前沿科技中具有不可替代的地位。该波长的激光能够高效地操控铯原子的超精细能级跃迁,成为实现高精度时间频率标准、量子模拟和空间导航系统的关键光源。面向下一代量子信息与精密测量技术的发展需求,852 nm 半导体激光器正加速向极窄线宽、超高频率稳定性及光子集成化方向演进。其未来的深度研发不仅将持续突破现有半导体光源的性能极限,更将为空间原子钟、量子传感网络等国家重大战略工程提供不可或缺的核心底座,释放出更具前瞻性的科学研究与工程应用价值^[9]。

852 nm 半导体激光器的性能优势主要体现在其窄线宽关键指标上。窄线宽是保障激光与原子相互作用精度的基础,直接影响光谱分辨率和相干长度,是实现高信噪比原子探测和精密操

控的前提^[10]。高功率输出则决定了激光系统能够操控的原子规模及其在分束、调制和频率转换后的实用光强,尤其在大规模冷原子制备和量子模拟中尤为重要。高斜率效率反映了器件的电光转换效能,直接关系到系统的功耗、热管理和长期稳定性。为实现这些性能,研究人员通过优化量子阱材料体系 (如无铝有源区、应变工程)、创新器件结构 (如 DFB, VCSEL) 以及引入光子晶体、外腔反馈等技术,显著提升了器件的内量子效率、模式纯度和温度稳定性,为其在高端应用中的可靠运行奠定了基础。

本文系统综述了 852 nm 半导体激光器在材料设计、结构创新与铯原子光物理应用中的研究进展。首先介绍不同量子阱材料体系的发展历程及其对载流子限制、腔面可靠性、温度稳定性和电光转换效率的影响;随后围绕铯原子 D_2 线应用中最关键的单模/单频工作要求,重点分析 VCSEL, DFB、外腔反馈激光器、VECSEL 以及基横模边发射激光器的发展现状;进而对比国内外商用产品的性能指标与工程应用情况;最后探讨该波段激光器在铯原子钟、量子传感和精密测量系统中的应用趋势。通过上述梳理,旨在突出 852 nm 半导体激光器由材料可靠性提升走向单频化、小型化和系统集成化的发展逻辑。

2 852 nm 半导体激光器量子阱材料体系

边发射和面发射激光器的结构如图 1 所示。852 nm 半导体激光器作为铯(Cs)原子频标及高精度光谱分析的核心光源,其性能表现深度耦合于有源区材料体系的能带结构与物理稳定性。纵观其发展历程,材料体系的演进呈现出显著的“螺旋式上升”特征^[11-12]。初期研究以 AlGaAs/GaAs 体系为奠基石,利用其近乎完美的晶格匹配特性确立了基本的物理框架,但在高功率应用中受限于铝组分高化学活性诱发的灾变性光学镜面损伤(Catastrophic Optical Mirror Damage, COMD)及暗线缺陷(Dark Line Defects, DLD)。为降低铝相关腔面氧化和灾变性光学镜面损伤风险,学术界于 20 世纪 90 年代开始关注 InGaAsP/GaAs 无铝体系。该体系在提高腔面可靠性和抑制氧化相关退化方面具有明显优势,但其导带带

阶较小,使高温电子限制能力仍面临一定挑战。进入第三阶段,InAlGaAs 体系凭借应变工程与先进腔面钝化技术的融合,在保留铝系材料高特征温度优势的同时攻克了寿命难题,实现了高性能与高可靠性的再平衡。如图 2 所示,下文将以此时间演进为脉络,系统综述各材料体系背后的物理机制与技术变革。本章将系统梳理上述三大材料体系的物理特性、失效机制及优化策略,阐明材料组分更替背后的可靠性物理逻辑。

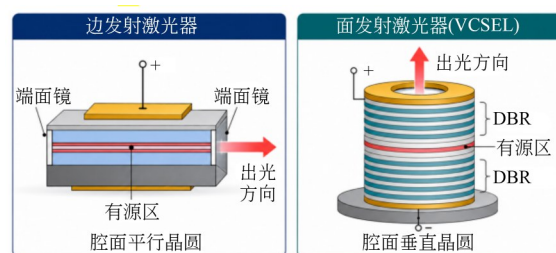


图 1 边发射激光器和面发射激光器

Fig. 1 Edge-emitting lasers and surface-emitting lasers

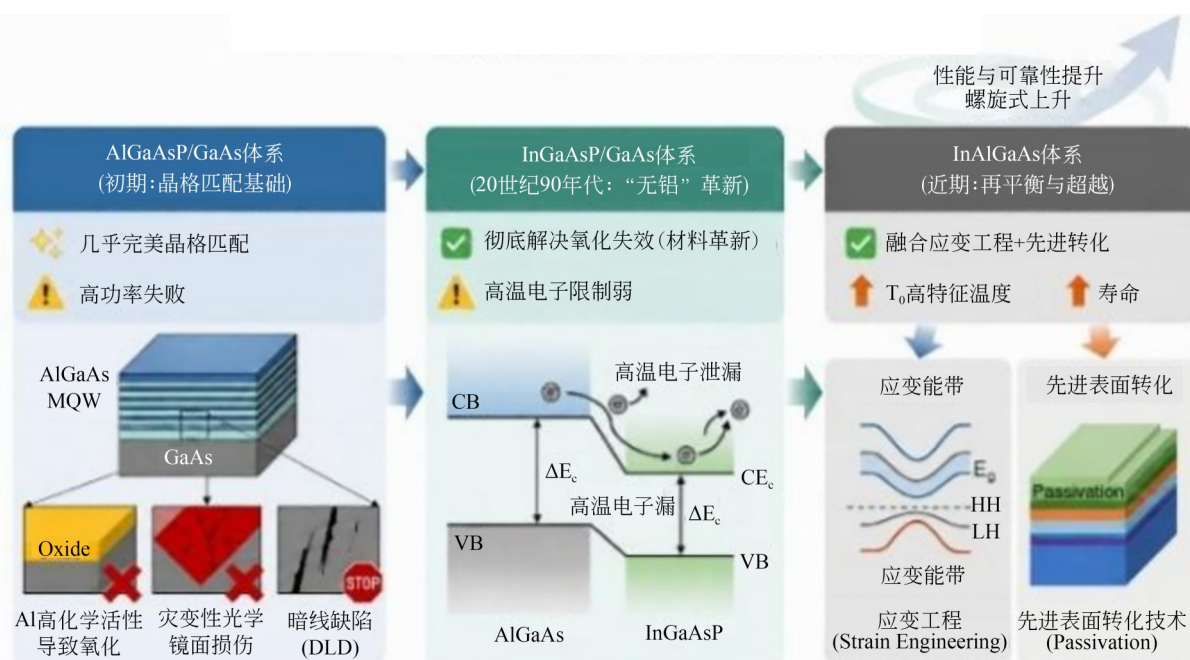


图 2 852 nm 半导体激光器量子阱材料体系演进

Fig. 2 Evolution of quantum well material systems for 852 nm diode lasers

2.1 早期探索与 AlGaAs 体系的局限

作为化合物半导体激光器发展的奠基石, AlGaAs/GaAs 体系凭借其得天独厚的晶格匹配特性与成熟的外延工艺,率先确立了 852 nm 波段激光器的物理框架。该体系利用较大的导带

带阶实现了优异的电子限制能力,在早期的基础研究中展现出极高的特征温度与模式稳定性。然而,随着对原子钟等应用场景中高功率与长寿命需求的提升,铝组分固有的高化学活性所引发的灾变性光学镜面损伤^[13]及暗线缺陷^[14]增殖,如

图3所示,逐渐成为其发展的根本性瓶颈。

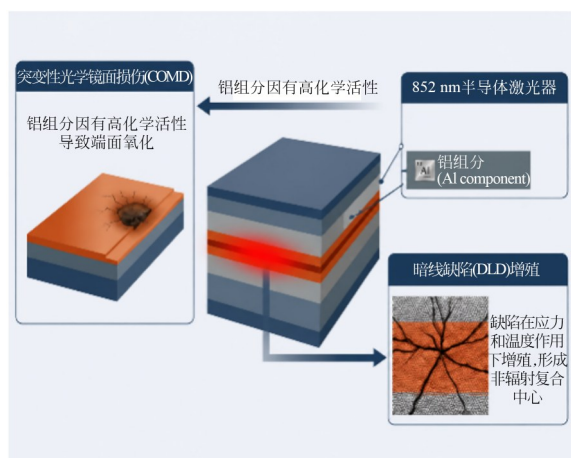


图3 灾变性光学镜面损伤及暗线缺陷增殖

Fig.3 Catastrophic optical mirror damage and dark-line defect proliferation

面向铯原子钟与精密光谱学的早期应用需求,852 nm半导体激光器的研究率先于AlGaAs/GaAs材料体系中取得突破。该体系凭借AlAs与GaAs间极低的晶格失配率(约为0.14%),在宽带隙调控下仍能与衬底保持优异的晶格匹配。20世纪70至80年代,研究人员依托液相外延技术,通过精准调控有源区铝组分($x \approx 0.05 \sim 0.10$)并引入高铝包层构建双异质结,有效实现了载流子与光场的双重限制。这一阶段确立的“电注入-光限制”核心物理模型,成功实现了器件的室温连续波激射,并大幅降低了阈值电流密度^[15]。随后,伴随金属有机化学气相沉积(Metal-organic Chemical Vapor Deposition, MOCVD)与分子束外延(Molecular Beam Epitaxy, MBE)等现代外延技术的成熟,该波段激光器正式跨入量子阱时代。量子限制效应及态密度的阶梯化分布不仅进一步压低了阈值电流,更显著提升了材料的微分增益。基于AlGaAs/GaAs量子阱结构的器件在光谱纯度与光束质量上实现了跨越式提升,为早期实验室环境下的原子冷却等精密光谱操控奠定了坚实的光源基础^[15]。

尽管AlGaAs体系具备晶格匹配的先天优势,但伴随应用向高功率与长寿命(如星载原子钟)拓展,其固有的材料缺陷逐渐成为制约技术演进的根本瓶颈。该局限性源于铝元素极高的化学活性,主要诱发灾变性光学镜面损伤

(COMD)与体内暗线缺陷(DLD)增殖两大核心失效机制。COMD是限制器件输出功率密度的首要因素,其物理本质为典型的热-光正反馈过程。解理腔面处的Al极易氧化生成非晶态 Al_2O_3 及表面缺陷态。这些深能级陷阱强烈吸收激射光子,并通过非辐射复合释放热量;同时,半导体带隙的负温度系数使得局部升温引发带隙收缩,进而导致吸收系数呈指数级激增。此“吸收-发热-带隙收缩”的恶性循环瞬间使腔面温度突破材料熔点(通常 $>1200^\circ\text{C}$),造成晶格的不可逆破坏。2015年,美国的Pendse等^[14]指出,AlGaAs激光器的COMD阈值功率密度通常限制在数兆瓦/平方厘米的量级,如图4所示。传统的腔面钝化或非吸收窗口技术不仅徒增工艺成本,亦未能从根源上消除氧化隐患。此外,AlGaAs体系在长期服役中深受DLD主导的体失效困扰。在载流子注入或光泵浦下,非辐射复合释放的能量会辅助点缺陷发生迁移运动。受制于Al-As与Ga-As在键能与化学性质上的差异,微小的原生缺陷(如穿透位错)在852 nm高光子密度场中,会迅速沿 $\langle 100 \rangle$ 或 $\langle 110 \rangle$ 等特定晶向攀移和滑移,演化为复杂的各向异性非发光网络。该缺陷增殖过程不仅导致器件光功率骤降与阈值电流呈指数级激增,更使得其平均失效时间难以满足航天级任务(>10 万小时)的严苛标准,极大地制约了工业化量产的成品率。

综上所述,AlGaAs/GaAs体系作为852 nm

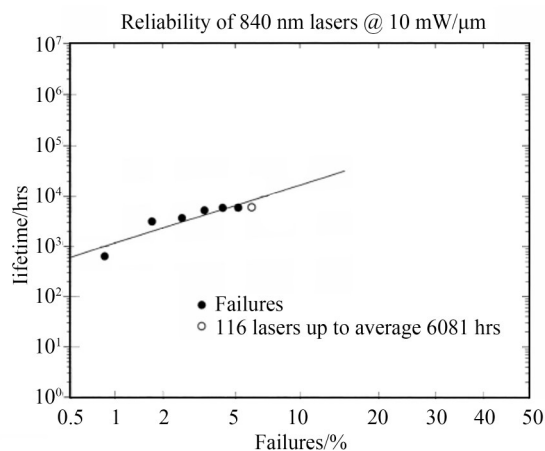


图4 AlGaAs激光器的COMD阈值功率密度^[14]

Fig.4 Catastrophic optical mirror damage (COMD) threshold power density for AlGaAs-based lasers^[14]

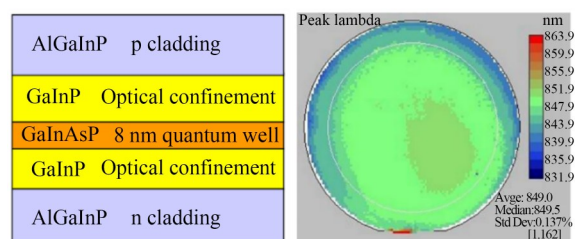
激光器的“开路先锋”,虽然在早期的原理验证和低功率应用中功不可没,但其材料属性中的铝是一把双刃剑:它赋予了材料调整带隙的能力,却也带来了难以根除的氧化敏感性和缺陷不稳定性。这种内在的物理矛盾,使得 AlGaAs 体系在面对高功率、高亮度及极端环境应用时显得力不从心。这直接促使了学术界和工业界在 20 世纪 90 年代中期开始寻找替代方案,从而开启了以无铝材料 InGaAsP 体系为代表的第二阶段探索。这一转型不仅是材料组分的更替,更是对器件可靠性物理深刻理解后的必然选择。

2.2 无铝 InGaAsP 体系的兴起

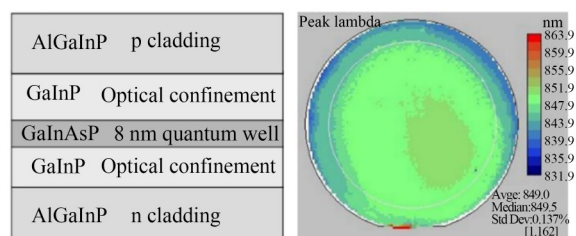
鉴于 AlGaAs 体系在化学性质上的先天弱点,20 世纪 90 年代末期,学术界与工业界的目光集体转向了以 InGaAsP/GaAs 为核心的无铝材料体系。这一阶段的主要驱动力在于寻找一种既能保持与 GaAs 衬底较好匹配,又能有效降低铝相关腔面氧化和灾变性光学镜面损伤风险的材料方案。InGaAsP 四元合金体系因其有源区不含铝元素,且拥有极低的表面复合速度,被视为解决高功率器件寿命瓶颈的理想途径。这一时期的研究呈现出从基础的宽条形器件向高性能分布反馈(DFB)及单模器件演进的清晰脉络。

2005 年,法国阿尔卡特泰雷兹 III-V 实验室的 Ligeret 等^[16]深入探讨了 InGaAsP/GaAs 作为有源区材料的能带结构,如图 5(a)所示,指出通过精细调节铟(In)和磷(P)的组分可以精确覆盖 852 nm 波段且完全避免铝的使用。他们采用低压金属有机化学气相沉积(LP-MOCVD)技术生长了具有 InGaP 包层和 InGaAsP 有源区的激光器结构。实验结果表明,该器件实现了高达 67% 的连续波电光转换效率。这一结果从实验上证实了 InGaAsP 材料表面较低的氧化速率可以显著提升 COMD 阈值,为后续的高功率应用打开了窗口。随后,为了进一步挖掘该体系在高功率下的潜力,同实验室的 F-J Vermersch 等^[17]于同一年提出了更为激进的波导设计方案,如图 5(b)所示。针对高功率运行时光场密度过高的问题,引入了宽波导结构设计。这种设计通过增加光场在波导层中的扩展范围,有效降低了有源区内的光子密度,从而减弱了空间烧孔效应。研究结果显示,采用该结构的 100 μm 条宽器件在连续

波模式下输出功率超过了 4 W,且在准连续波条件下突破了 6 W。这一数据在当时是 AlGaAs 体系难以企及的,它有力地证明了无铝体系并非仅仅是可靠性的妥协,其在高功率输出能力上同样具备压倒性优势。



(a) Ligeret等提出
(a) Proposed by Ligeret *et al.*



(b) F-J Vermersch等提出
(b) Proposed by F-J Vermersch *et al.*

图 5 激光器结构及波长光致发光制图

Fig. 5 Device architecture and wavelength-resolved photoluminescence mapping

虽然高功率输出令人振奋,但无铝体系真正的核心价值在于其卓越的可靠性。Pendse 等^[14]于 1998 年发表的综述性研究对这一问题进行了对比分析。该研究不仅是一份实验报告,更是一篇关于失效物理的深刻论文。作者系统对比了 AlGaAs/GaAs 与 InGaAsP/GaAs 两种体系在相同应力条件下的老化行为,揭示了两者截然不同的退化机制。研究指出,AlGaAs 器件的失效主要由暗线缺陷的快速攀移驱动,这是一种典型的复合增强缺陷运动;相比之下,InGaAsP 体系由于 In-P 键和 Ga-As 键的键能差异及其独特的晶格硬度,对位错的攀移具有极强的抑制作用。实验数据显示,在 60 $^{\circ}\text{C}$ 的高温加速老化测试中,InGaAsP 激光器展现出了极低的退化率,且完全没有观察到突发性失效现象。这篇文献从材料物理层面解释了无铝体系在抑制 COMD 和 DLD 相关退化方面的优势,说明其在长寿命应用场景中

具有较高可靠性和工程应用潜力。针对 In-GaAsP 量子阱内的载流子动力学问题,相关研究人员也开展了数值模拟工作。2007 年,中国台湾彰化师范大学物理系研究团队利用微观仿真手段,分析了应变对价带结构的影响,如图 6 所示^[18]。研究表明,在 InGaAsP 量子阱中引入适当

的压应变,可以有效分离轻空穴与重空穴能带,从而降低价带顶的态密度有效质量。这种能带工程手段显著降低了器件的透明载流子密度,为实现低阈值电流提供了理论支撑,也解释了为何无铝体系在维持高可靠性的同时仍能保持优异的电学特性。

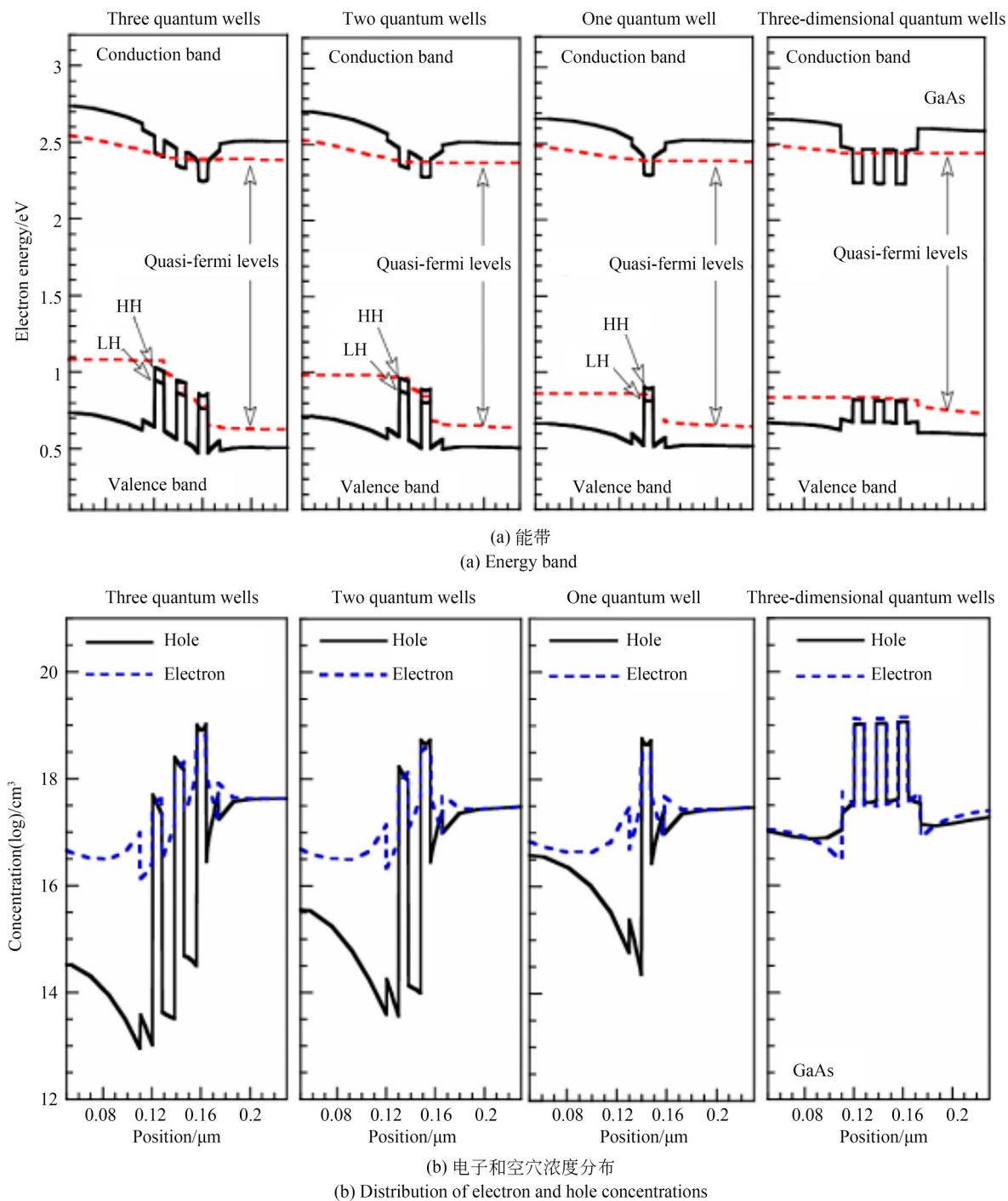


图 6 输入电流为 13 mA 时 InGaAsP 量子阱的能带及电子和空穴浓度分布^[18]

Fig. 6 Energy band and carrier concentration distributions of InGaAsP quantum wells at injection current of 13 mA^[18]

法国阿尔卡特泰雷兹 III-V 实验室的 Ligeret 等^[19]在 2006 年发表的论文中,详细阐述了基于 InGaAsP 体系的 DFB 激光器的研制过程。在 Al-GaAs 体系中,由于铝极易氧化,在进行二次外延生长以掩埋光栅时,往往会在界面处形成高密度的缺陷态,严重影响良率。他们指出,“无铝”体系最大的工艺优势在于其表面化学性质稳定,允许在刻蚀光栅后进行高质量的二次外延。该团队成功制备了包含一阶光栅的 DFB 激光器,结构如图 7 所示,实现了单纵模激射,边模抑制比(Side Mode Suppression Ratio, SMSR)超过 40 dB,且线宽被成功压缩至原子跃迁所需的范围内。这项工作标志着 852 nm 无铝激光器正式具备了服务于精密光谱学的能力。在此基础上,他们于 2010 年发表的论文进一步推动了该技术的工业化进程^[20]。作者重点关注了器件在长期运行中的光谱稳定性。他们展示的低铝 DFB 激光器不仅在输出功率上达到了 150 mW 以上,更重要的是,其洛伦兹线宽控制在 500 kHz 以下。文中详细记录了器件在数千小时老化测试中的波长漂移数据,结果表明,得益于 InGaAsP 材料的稳定性,器件并未出现常见的光谱跳模或波长漂移现象。这一成果直接回应了原子钟领域对光源“全生命周期光谱稳定”的严苛诉求,证明了无铝 DFB 激光器已经是一种成熟的商用产品。

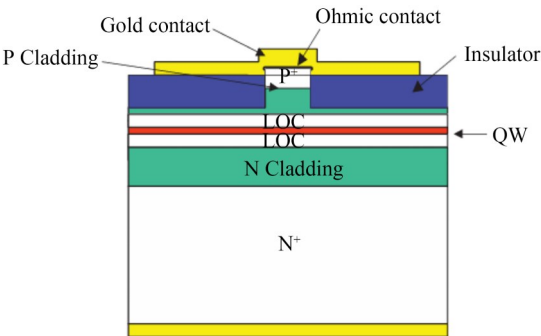


图 7 脊型 DFB 半导体激光器结构^[19]
Fig. 7 Structure of ridge-waveguide DFB semiconductor laser^[19]

随着无铝材料体系在抗氧化与高可靠性方面的优势得到确立,21 世纪初研究重心逐渐从单纯的寿命验证转向对器件光电性能的极致挖掘。2007 年该实验室采用同样的无铝有源区设计^[21],基于金属有机气相外延(Metal Organic Vapor

Phase Epitaxy, MOVPE)技术在 n 型 GaAs 衬底上生长了适用于 852 nm 发射的压缩应变 In-GaAsP 单量子阱(厚度为 8 nm),其应变约为 0.6%,位于 GaInP 大光学腔(厚度为 1 μm)中,如图 8 所示,以实现高效载流子限制和低光学损耗。限制层采用 AlGaInP 材料,有效提高了能带偏移,抑制载流子泄漏。该结构表现出优异的材料质量与光学性能:内部损耗低于 3 cm⁻¹,内量子效率达 95%,透明电流密度为 100 A/cm²。基于此量子阱的 DFB 激光器通过二次外延再生技术集成光栅结构,在铯原子 D₂线(852.12 nm)处实现了单频单模输出,边模抑制比超过 45 dB,线宽窄至 0.9 MHz,输出功率达 40 mW,同时光束质量因子 M²保持在 1.3 左右,展现出在高精度原子钟与空间干涉测量中的应用潜力。从 2004 年到 2007 年,该实验室在 852 nm 无铝有源区分布式反馈激光器的研发上取得了显著进步,实现了从原理验证到面向实用化的跨越。在激光器结构上,2007 年的工作通过精确控制限制层铝组分和量子阱应变(约 0.6%),使材料质量和载流子限制能力得到优化。同时,光栅制造工艺得以巩固,明确并实现了关键的 1:3 纵横比,确保了高效的光反馈耦合。这些结构上的改进直接带来了性能的飞跃:激光器成功地将发射波长精确锁定于铯原子钟所需的 852.12 nm,并在该波长下将边模抑制比从>30 dB 大幅提升至 50 dB,频谱纯度极高;其光谱线宽也从小于 2 MHz 优化至 0.9 MHz,更接近于原子冷却等苛刻应用的要求。这一演进标志着该 DFB 激光器从一个高性能的实验室器件,发展成为一个能够满足原子钟等空间应用严苛规格的可靠光源。

与国际前沿保持同步,国内科研力量在 21 世

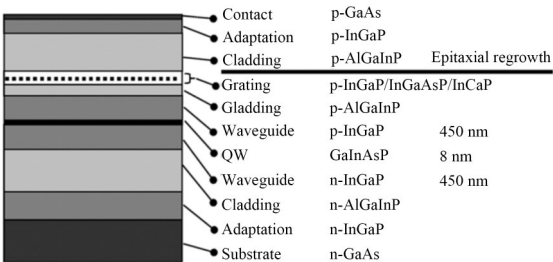


图 8 压缩应变 InGaAsP 量子阱结构^[21]
Fig. 8 Architecture of InGaAsP quantum well with compressive strain^[21]

纪初也对无铝体系的高功率工程化特性进行了深入验证。2002 年,李忠辉团队基于低压金属有机气相外延(LP-MOVPE)技术,成功研制出高性能的 850 nm 分离限制异质结单量子阱(Separated Confinement Heterostructure-Single Quantum Well, SCH-SQW)激光器,结构如图 9 所示^[22]。该工作深刻体现了对无铝材料物理属性的辩证应用:在结构设计上,核心有源区严格选用 10 nm 厚的 InGaAsP 无铝材料,以从根本上消除铝氧化诱发的非辐射复合中心;而为了弥补无铝材料折射率差较小的物理短板,限制层则引入晶格匹配的 AlGaInP 材料,构建了“有源区无铝、限制层含铝”的混合能带结构。在工艺实现上,研究人员通过优化 750℃ 的高温生长条件及 p 型层的高浓度碳(C)掺杂技术,有效克服了四元合金外延中的组分偏析难题,显著提升了异质结界面的晶体质量。实验结果有力地支撑了“无铝体系具备极高 COMD 阈值”这一物理推论:在腔面未进行任何镀膜钝化处理(Uncoated Facets)的严苛条件下,条宽 100 μm 的器件实现了室温下 1 W 的连续波输出,外微分量子效率高达 0.68 W/A。这一数据直接证实了 InGaAsP 材料本身极低的表面复合速率赋予了器件卓越的抗损伤能力。然而,尽管解决了可靠性瓶颈,该器件的阈值电流密度(460 A/cm²)虽在同类器件中表现优异,却仍高于传统 AlGaAs 器件,这也从侧面印证了 InGaAsP/AlGaInP 界面因导带带阶较小而面临的载流子限制不足。这种在高功率下表现卓越,但在低阈值与高温电子锁定能力上存在的物理局限,实际上已为学术界后续向兼具“深电子势阱”与“高抗氧化性”的 InAlGaAs 体系(即第三阶段)演进提供了深刻的实验注脚。

综上所述,无铝 InGaAsP/GaAs 体系的发展

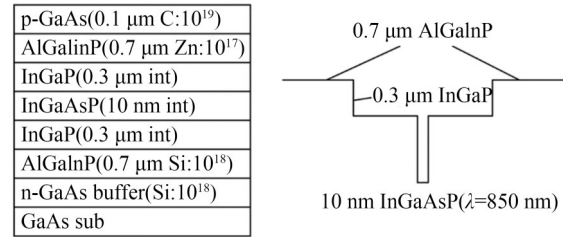


图 9 无铝 SCH-SQW 激光器结构示意图^[22]

Fig. 9 Schematic diagram of aluminum-free SCH-SQW laser structure^[22]

体现了通过材料组分优化提升器件可靠性的重要思路。InGaAsP 体系中报道的瓦级输出功率和较高外微分效率主要体现了无铝有源区在降低腔面吸收、抑制 COMD 和提升器件可靠性方面的材料优势。对于铯原子钟和高分辨率光谱等 852 nm 典型应用而言,单频性、线宽、边模抑制比和长期频率稳定性仍是评价光源适用性的首要指标;高功率和高效率更多体现为功率裕量、系统分光能力以及冷原子装载效率的工程支撑参数。在 852 nm 波段,无铝 InGaAsP 体系在高可靠性半导体激光器研究中占据了重要地位,并为后续单频 DFB 器件和高功率器件的发展提供了材料基础。然而,正如李忠辉在其研究中所指出的,InGaAsP 体系并非完美无缺。其固有的较小导带带阶导致电子限制能力弱于 AlGaAs 体系,这使得器件在高温或极大注入电流下的性能稳定性面临新的挑战。正是这一物理局限,驱动历史的车轮继续向前,迈向了融合铝系高带阶优势与磷系高可靠性优势的第三阶段——InAlGaAs 体系。

2.3 InAlGaAs 体系的回归

尽管无铝 InGaAsP 体系在 20 世纪 90 年代末期凭借卓越的抗氧化能力解决了灾变性光学镜面损伤这一顽疾,但随着 852 nm 激光器应用场景向星载原子钟(面临极端温度波动)及高功率泵浦源(面临高结温)拓展,该体系在高温电子限制能力上的物理短板逐渐显现。根据 1995 年 Li 对比研究所展开的系统性分析,InGaAsP/GaAs 体系虽然拥有较低的界面复合速率,但其导带带阶相对较小^[23]。该研究深入对比了不同材料体系在高温下的载流子动力学行为,指出在 InGaAsP 量子阱中,当器件温度超过 50℃ 时,电子越过势垒泄漏到波导层及包层的概率呈指数级上升。这种严重的载流子泄露直接导致了器件特征温度(T_0)的降低,通常仅维持在 100 K 左右。这一物理事实迫使学术界重新审视铝元素在能带工程中的价值:AlGaAs 材料拥有巨大的导带带阶,能够构建深势阱以确保持载流子的高效限制。因此,如何保留铝系材料的电子限制优势,同时通过现代外延技术克服其氧化和缺陷敏感性,成为第三阶段——InAlGaAs 体系回归的核心科学问题。

InAlGaAs 四元合金体系的引入并非简单的组分回归,而是基于应变工程和界面控制技术的全新升级。然而,引入铝元素不可避免地带来了外延生长中的复杂性,特别是对于界面态的控制。2024 年,王斌等^[24]深入探讨了 MOCVD 或 MBE 生长过程中生长停顿时间(Interruption Duration)对量子阱界面质量的微观影响。GaAsP/InAlGaAs 结构以及生长如图 10 所示。研究人员通过精细的光致发光谱分析发现,对于含铝的 InAlGaAs 量子阱,生长停顿是一把双刃剑。一方面,适当的停顿有助于原子在表面迁移以平整异质结界面;另一方面,由于铝极高的化学活性,过长的停顿时间会导致背景杂质(如氧、碳)在界面的富集,形成非辐射复合中心。该研究量化了停顿时间与光致发光(Photoluminescence, PL)峰值强度及半峰全宽(Full Width at Half Maximum, FWHM)之间的非单调关系,揭示了在几秒量级的最佳停顿窗口内,可以获得陡峭且低缺陷密度的量子阱界面。这一发现为制备高质量 InAlGaAs 有源区提供了至关重要的工艺窗口参数,证明了通过精细的动力学控制,完全可以抑制铝带来的负面效应。

2013 年,徐华伟等^[25]详细阐述了针对 852 nm 波段的 InAlGaAs/AlGaAs 量子阱优化策略。作者通过模拟计算与实验验证相结合的方式,设计了非对称的分别限制异质结构(SCH)。

研究重点在于通过调节量子阱中的铟(In)组分引入压应变,利用应变效应分离轻、重空穴能带,从而降低价带顶的态密度有效质量。这种设计不仅提高了材料的微分增益,还进一步改善了阈值电流的温度敏感性。文献中展示的 X 射线双晶衍射(X-Ray Diffraction, XRD)摇摆曲线数据表明,通过优化生长温度和 V/III 族比,外延层的晶格失配度被严格控制在 10^{-3} 量级以内,展现了极高的晶体完整性。InAlGaAs 体系回归的直接结果是器件温度稳定性的显著提升。2012 年,该团队提供了翔实的实验数据支持^[26]。研究人员对基于 InAlGaAs 有源区的 852 nm 激光器进行了宽温区(例如 20~80 °C)的 P-I 特性测试。结果显示,该体系激光器的特征温度 T_0 普遍提升至 150 K 以上,部分优化结构甚至达到了 180 K。相比于 InGaAsP 体系(通常 $T_0 \approx 100$ K)和早期的 AlGaAs 体系($T_0 \approx 120 \sim 140$ K),这一性能跃升具有深刻的物理内涵。文献分析指出,这得益于 InAlGaAs 材料较大的导带带阶有效地抑制了俄歇复合(Auger Recombination)和载流子热逃逸。特别是在高温高注入条件下,深电子势阱就像一个牢固的“大坝”,将高能电子紧紧锁在有源区内参与辐射复合。这种高温下的稳定性,对于不需要复杂温控系统的小型化原子钟应用具有决定性意义。

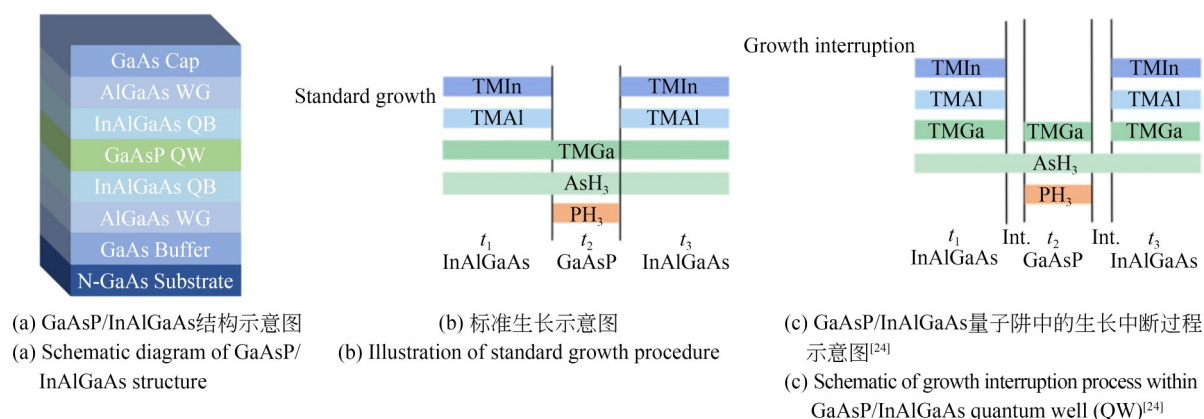


图 10 GaAsP/InAlGaAs 的结构及生长^[24]

Fig. 10 Structure and growth of GaAsP/InAlGaAs^[24]

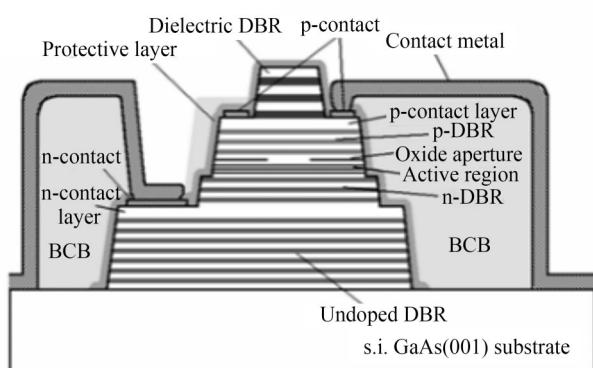
虽然 InAlGaAs 改善了温度特性,但含铝材料固有的腔面氧化风险(COMD)仍是悬在头顶

的达摩克利斯之剑。为降低含铝材料腔面氧化和 COMD 风险,研究人员发展了非吸收窗口、腔

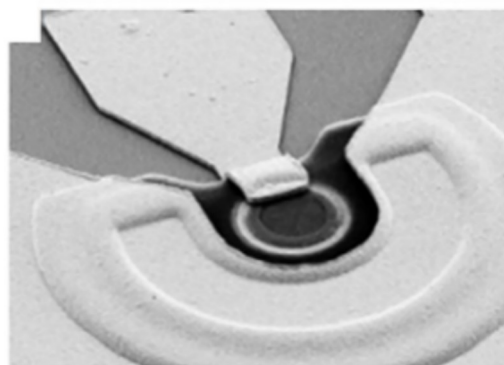
面钝化和多段波导等腔面工程技术。2022年,中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学与光子学国家重点实验室的研究团队详细记录了这一技术路线的演进^[13]。他们提出并验证了“非吸收窗口”(Non-Absorbing Mirror, NAM)技术和多段波导结构,通过量子阱混杂(Quantum Well Intermixing, QWI)或二次外延技术,人为地增大腔面附近区域的带隙宽度,使其对 852 nm 的激光光透明。腔面区域不再吸收光子,也就切断了“光吸收-发热-带隙收缩-更多吸收”的热逃逸正反馈回路。文献详细报道了利用杂质诱导无序化或介质膜加盖退火技术实现非吸收窗口(Non-Absorbing Mirror, NAM)的具体工艺。实验结果表明,采用该结构的 InAlGaAs 激光器,其连续波功率密度阈值被提升了数倍,即便在数瓦级的高功率输出下,也未观察到传统的 COMD 失效模式。这些结果表明,InAlGaAs 体系结合非吸收窗口和腔面钝化等技术后,可在保持较强载流子限制能力的同时提高腔面可靠性,从而在高温稳定性和高功率可靠性之间取得较好的平衡。

随着 InAlGaAs 材料体系在高温电子限制方面的物理优势得到确立,其应用范畴已不再局限于传统的边发射器件,而是进一步拓展至对功耗和体积要求更为严苛的垂直腔面发射激光器(VCSEL)领域。2014年, Nazaruk 等^[27]针对

850 nm 波段 VCSEL 普遍面临的温度敏感与偏振不稳定问题,提出了一种基于 InAlGaAs 量子阱的腔内接触(Intracavity-contacted)创新设计,其分布式布拉格反射镜(Distributed Bragg reflector, DBR)和 VCSEL 截面如图 11(a)所示。扫描电子显微镜如图 11(b)所示。该工作充分利用了 InAlGaAs/AlGaAs 异质结的大导带带阶特性,构建深电子势阱以有效抑制载流子的热逃逸;同时,引入“增益-腔模失谐”机制,通过将腔模波长相对于增益峰值红移约 15 nm,利用增益谱的红移补偿高温下的带隙收缩,确保了器件在高温环境下的微分增益与光电转换效率。实验结果表明,该器件在 20 °C 至 90 °C 的宽温区内阈值电流始终维持在 0.75 mA 以下的亚毫安级水平,且在 90 °C 高温下输出功率仍超过 1 mW,展现了卓越的热稳定性。针对原子物理应用对光源偏振纯度的严苛要求,该结构通过菱形氧化孔径引入面内各向异性,成功克服了 VCSEL 固有的随机偏振翻转问题,在全温区内实现了正交偏振抑制比(Orthogonal Polarization Suppression Ratio, OPSR)大于 18 dB 的稳定锁定。该成果表明,基于 InAlGaAs 量子阱的 VCSEL 结构在高温工作、低阈值和高速调制方面具有较好综合性能,为芯片级原子钟和小型化量子传感光源提供了一种可行的材料与器件设计方案。



(a) 介电DBR和腔内触点的氧化物约束InAlGaAs VCSEL截面示意图
(a) Schematic cross-section of an oxide-confined InAlGaAs VCSEL with dielectric DBRs and intra-cavity contacts



(b) VCSEL扫描电子显微镜^[27]
(b) Scanning electron microscopy (SEM) image of the VCSEL^[27]

图 11 基于 InAlGaAs 量子阱的腔内接触式 VCSEL

Fig. 11 InAlGaAs quantum well-based intracavity contact VCSEL

随着材料外延和器件工艺的改进,InAlGaAs 体系在高温稳定性、载流子限制和光电转换效率等方面表现出较强竞争力。2020 年,北京大学电子学系先进光通信系统与网络国家重点实验室的研究展示了该材料体系在原子钟相关应用中的高稳定工作能力^[28]。在这项研究中,基于 InAlGaAs 的 DFB 激光器被锁定于铯原子的 D_2 跃迁线。得益于材料本身的高增益和低损耗特性,激光器表现出了极窄的线宽和极低的相位噪声。作者记录了激光器与原子跃迁线锁定后的阿伦方差,结果显示其短稳达到了 10^{-13} 量级。这一指标的实现,离不开 InAlGaAs 材料在长时间运行中的光谱稳定性,说明该体系在高温稳定性和频率稳定性方面具有一定优势,适用于对长期稳定工作有要求的精密测量场景。2024 年,该实验室进一步拓展了应用视野,探讨了该波段激光器在基于 Voigt 效应的原子滤波及磁力计中的应用,实验装置如图 12 所示^[29]。这些高端应用对激光器的偏振稳定性(TE/TM 模式竞争控制)提出了极高要求,而 InAlGaAs 量子阱通过精确的应变调节(如引入张应变以增强 TM 模,或压应变增强 TE 模),展现了优异的偏振消光比控制能力。

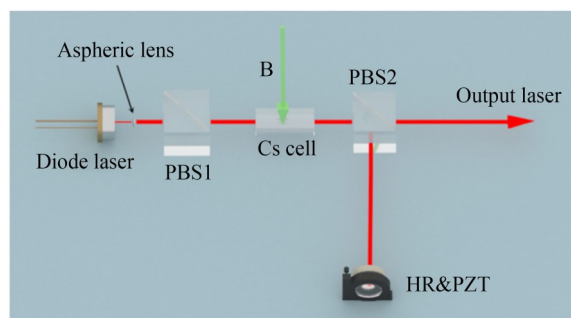


图 12 Cs 852 nm Voigt 激光器的实验装置^[29]

Fig. 12 Experimental setup for Cs 852 nm Voigt laser^[29]

综上所述,852 nm 半导体激光器发展的第三阶段,绝非向 AlGaAs 旧体系的简单回退,而是在更高物理认知和工艺水平上的辩证回归。InAlGaAs 体系的优势同样不应仅从输出功率角度理解。该体系较大的导带带阶有利于抑制高温载流子泄漏,应变工程可改善微分增益,而腔面钝化和非吸收窗口技术可提高 COMD 阈值。因此,InAlGaAs 材料体系对 852 nm 器件的贡献主要体现在高温稳定性、可靠性和电光转换效率的综合提升,

为后续 DFB、VCSEL 和基横模边发射器件实现稳定单频或高光束质量输出提供外延基础。通过明确物理痛点,优化微观生长机理,结合腔面工程技术,InAlGaAs 体系成功地将铝系材料的高温电子限制优势与铟系材料的应变工程优势融为一体。这一阶段的研究不仅产出了 T_0 高达 150 K 以上、寿命突破数万小时的高性能器件,更确立了现代半导体激光器设计中“能带-应变-界面”三位一体的综合调控范式,为后续更复杂光子集成芯片的研发奠定了坚实的材料学基础。

2.4 结论与未来展望

852 nm 半导体激光器有源区材料的演变,是一场围绕“晶格匹配、化学稳定性与能带工程”三者博弈的螺旋式上升过程:从早期 AlGaAs 体系确立基本器件框架但受到铝相关腔面氧化和缺陷退化限制,到 InGaAsP 体系通过无铝有源区设计提高腔面可靠性,再到 InAlGaAs 体系结合应变工程、较深势阱和非吸收窗口等技术改善高温稳定性与可靠性,852 nm 半导体激光器材料体系逐步实现了从可靠性提升到综合性能优化的发展。然而,随着量子信息网络与片上光互连技术的飞速发展,传统的量子阱结构正在逼近其物理极限,未来的技术范式将向亚波长尺度的纳米结构跃迁。正如 Jesper Mørk 等^[30]于 2024 年发表的论文中所指出的,半导体激光器的下一代革命将由纳米技术驱动,通过构建光子晶体激光器及半导体 Fano 激光器,研究人员已能在光波长尺度甚至更小的腔体内实现光场限制。这种纳米结构激光器不仅有望将阈值电流降低至微安量级,实现极致的低能耗运行,更为解决传统器件在高速调制下的物理瓶颈提供了新的自由度。可以预见,852 nm 波段的发展将不再局限于材料组分的微调,而是转向“材料-结构-光子态”的深度融合,旨在通过纳腔量子电动力学效应,开发出具有超快响应、超窄线宽及单光子发射能力的集成化光源,从而为未来的原子芯片及量子精密测量系统提供解决方案。

3 器件类型及性能

852 nm 半导体激光器作为铯(Cs)原子 D_2 线跃迁对应的关键光源,在铯原子钟、量子磁力计、原子干涉仪、冷原子操控和量子精密测量系统中

具有重要应用价值。与普通近红外半导体激光器相比,面向铯原子体系的 852 nm 激光器不仅需要波长能够精确覆盖 Cs D_2 线,还需要同时满足窄线宽、高边模抑制比、稳定输出功率、高斜率效率、低功耗和良好温度稳定性等综合要求^[31]。原子跃迁线对激光频率噪声、强度噪声和波长漂移十分敏感,因此器件结构、材料体系、腔型设计、光栅反馈方式和热管理能力共同决定了系统的探测信噪比、频率稳定性和长期可靠性。根据器件类型,852 nm 半导体激光器主要包括单模垂直腔面发射激光器(VCSEL)、分布反馈激光器(DFB)、外腔反馈半导体激光器、垂直外腔面发射激光器(VECSEL)以及高功率边发射半导体

激光器等几类。不同器件类型具有不同的性能侧重点:VCSEL 具有低阈值、低功耗、小体积和易集成优势,适用于芯片级原子钟和小型化原子传感系统;DFB 激光器依靠内置布拉格光栅实现单纵模选择,兼具窄线宽、高边模抑制比和较好工程可靠性;外腔反馈和 VECSEL 通过增加有效腔长或引入频率选择元件进一步压窄线宽,适合高分辨率原子光谱;边发射宽面积、脊形、锥形和非对称波导激光器则主要面向高功率和高效率输出。本文按照器件类型展开综述,并在每类器件中结合线宽、功率、斜率效率和温度特性等核心指标,分析 852 nm 半导体激光器的研究进展与发展逻辑,如图 13 所示。

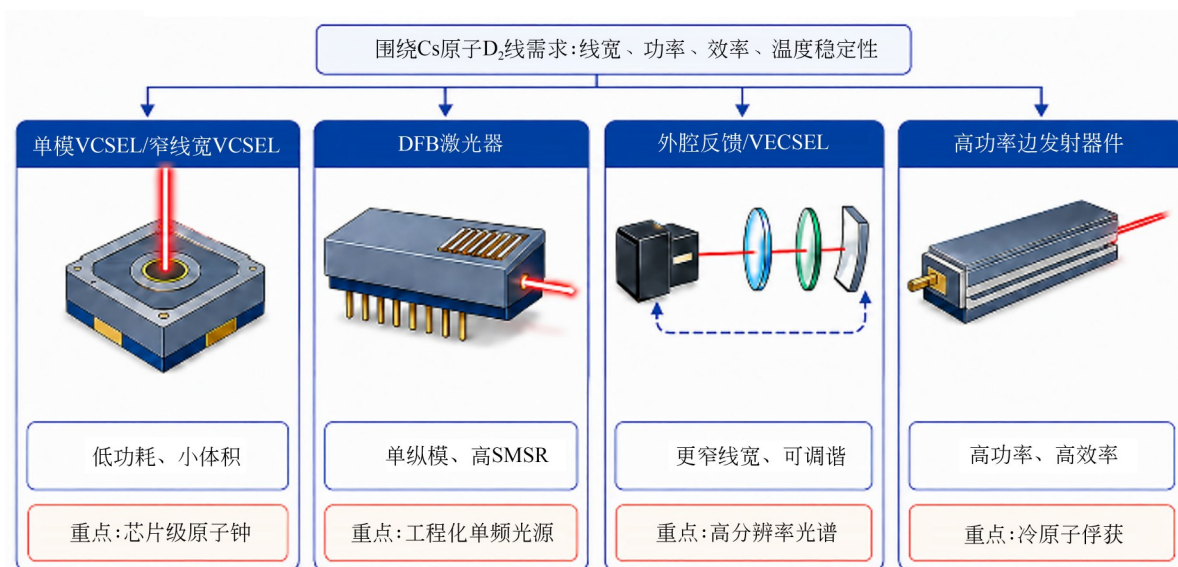


图 13 852 nm 半导体激光器器件类型及性能研究进展

Fig. 13 Research progress on types and performance of 852 nm semiconductor laser devices

3.1 单模 VCSEL 及窄线宽 VCSEL 852 nm 半导体激光器

窄线宽特性是衡量 852 nm 半导体激光器性能的核心指标之一,较窄的激光线宽能够有效降低相位噪声引起的光谱展宽,在激光与铯原子相互作用过程中实现更高精度的能级探测、光学泵浦和量子态操控^[32]。特别是在铯原子冷却与俘获、高分辨率饱和吸收谱以及高性能原子钟系统中,激光线宽通常要达到亚兆赫兹甚至百千赫兹量级,才能减小多普勒增宽和频率噪声对系统信噪比与长期稳定度的影响^[33]。因此,围绕 852

nm 半导体激光器开展窄线宽技术研究,不仅是提升器件本征性能的重要方向,也是突破铯原子精密测量系统小型化、高稳定性和高灵敏度瓶颈的关键。与传统边发射半导体激光器相比,垂直腔面发射激光器(Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser, VCSEL)采用垂直谐振腔结构,具有阈值电流低、功耗小、圆形光斑、易于二维阵列集成、封装成本低以及系统兼容性好等优势,因而成为 852 nm 铯原子小型化系统中最具代表性的光源类型之一。VCSEL 的纵模间隔通常远大于增益谱宽,本征上有利于实现单纵模工作,并可

降低边发射外腔二极管激光器中常见的纵模跳变问题,这对于需要长期稳定锁定在铯原子跃迁线附近的应用尤为重要。然而,普通氧化孔径 VCSEL 仍面临线宽较宽的限制,传统单模 VCSEL 线宽通常处于几十至上百 MHz 量级,虽可满足多普勒展宽蒸汽池中的光抽运或相干布居俘获实验需求,但在冷原子俘获、高分辨率谱学和下一代高性能原子钟中,其相位噪声会通过原子吸收谱斜率转换为透射光强度噪声,进而限制探测信噪比和频率稳定度。因此,如何在保持 VCSEL 低功耗、小体积、高可靠性和易集成优势的同时,进一步实现单模稳定输出与显著线宽压窄,已成为 852 nm VCSEL 器件研究的重要方向。这里围绕单模 VCSEL 及窄线宽 VCSEL 两类 852 nm 半导体激光器展开综述,重点分析其结构设计、模式调控、线宽压窄机制及其在铯原子精密测量系统中的应用价值。

美国 Sandia 国家实验室较早针对窄线宽 VCSEL 开展了系统研究。2009 年, Serkland 等^[34]提出通过增加 850 nm 单片 VCSEL 的有效腔长来降低冷腔线宽和 Schawlow-Townes 线宽。该器件在标准氧化孔径 VCSEL 基础上引入腔长扩展层,使有效腔长增加,并尽量避免引入额外腔损耗。实验表明,扩展腔 VCSEL 的洛伦兹线宽由标准器件的约 50 MHz 降低至 23 MHz,实现约 2 倍线宽压窄;同时器件仍保持低阈值工作特

性,阈值电流约 0.4 mA,在一定电流范围内保持单偏振工作,发射光谱边模抑制比大于 30 dB。该工作证明了“增加有效腔长、降低冷腔线宽”是压窄 VCSEL 线宽的有效物理路径,也为后续 852 nm 窄线宽 VCSEL 提供了结构设计依据。在此基础上,2018 年, Sandia 实验室进一步发展了短腔 VECSEL 和三镜 VCSEL 方案^[35]。短腔 VECSEL 通过半导体腔与外部微腔耦合,在总腔长小于 1 mm 的条件下实现单频模式选择和温度调谐,如图 14(a)所示。其设计目标是在 850 nm 附近获得小于 1 MHz 的窄线宽单频输出,并在温度调谐过程中避免模式跳变。该方案的核心思想是通过外部 DBR、中间 DBR 和半导体增益腔形成耦合腔结构,使目标波长处的复合腔模具有最低阈值,从而实现单纵模选择。与传统 VCSEL 相比,短腔 VECSEL 在不显著牺牲小型化优势的前提下增加了光子寿命,为 VCSEL 向亚 MHz 线宽发展提供了新的技术路径。2022 年, Huang, Serkland 和 Camparo 报道了用于原子器件的 852 nm 三镜 VCSEL^[36]。该器件能够与 Cs D₂ 线共振,输出功率约为 3 mW,线宽小于 2 MHz,比传统 50~100 MHz 量级 VCSEL 窄一个数量级以上。作者将该三镜 VCSEL 用于连续波 Cs 蒸汽池原子钟测试,结构如图 14(b)所示,获得约 $3.6 \times 10^{-12}/\tau^{1/2}$ 的短期频率稳定度,说明窄线宽 VCSEL 不仅在器件层面实现了线宽压窄,

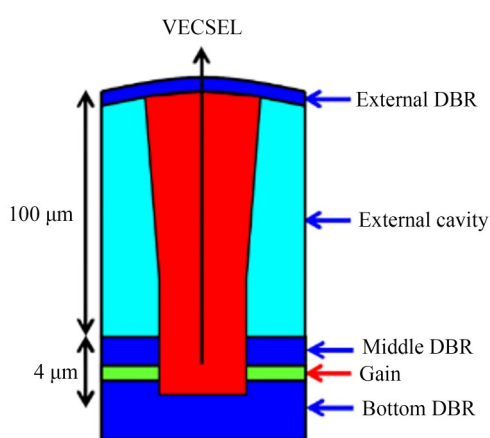
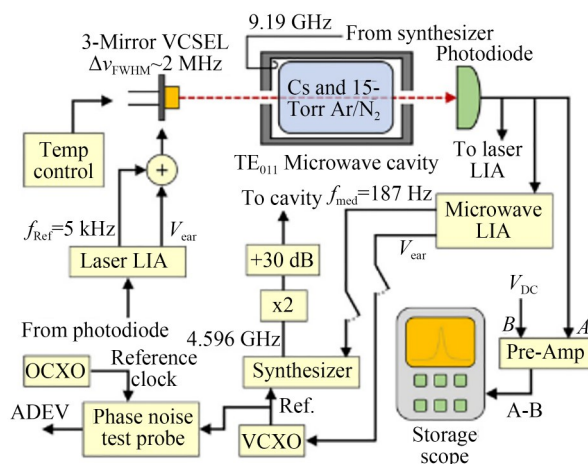
(a) 耦合腔 VECSEL 示意图^[35](a) Schematic diagram of coupling cavity VECSEL^[35](b) 三镜面 VCSEL 示意图^[36](b) Schematic diagram of three mirror VCSEL^[36]

图 14 Sandia 实验室的 VECSEL 设计方案

Fig. 14 VECSEL design concept of Sandia laboratory

而且已经具备支撑实际原子钟系统的应用潜力。该结果表明,三镜 VCSEL 在保持 VCSEL 低尺寸、低重量、低功耗和抗纵模跳变优势的同时,可显著降低相位噪声向强度噪声的转换,是面向下一代小型化铯原子钟和量子传感器的重要发展方向。

2024 年,中国科学院微电子研究所提出了一种面向量子传感的纵向多腔耦合 VCSEL 结构,如图 15 所示^[37]。该器件工作波长为 795 nm,虽然对应 Rb 原子跃迁而非 Cs 852 nm D_2 线,但其器件结构与 GaAs 基 VCSEL 平台高度相关,对 852 nm 窄线宽 VCSEL 设计具有重要借鉴意义。该研究通过在有源腔之外引入两个无源耦合腔,构成纵向三腔耦合结构,从而显著增加光子寿命并降低 Schawlow-Townes 线宽;同时,额外的外延腔间隔层增加了高阶横模的衍射损耗,使器件在较大氧化孔径下仍可保持单模输出。实验结果显示,该多腔耦合 VCSEL 在 25 °C 下实现了 4.6 mW 的高单模输出功率,线宽降低至 7.3 MHz,并且集成表面光栅后在 85 °C 下仍保持大于 27 dB 的正交偏振抑制比,表现出良好的偏振稳定性和温度适应性。该工作表明,多腔耦合结构能够同时改善 VCSEL 线宽、单模功率和偏振稳定性,为 852 nm 窄线宽 VCSEL 向高性能量子传感应用发展提供了新的结构思路。

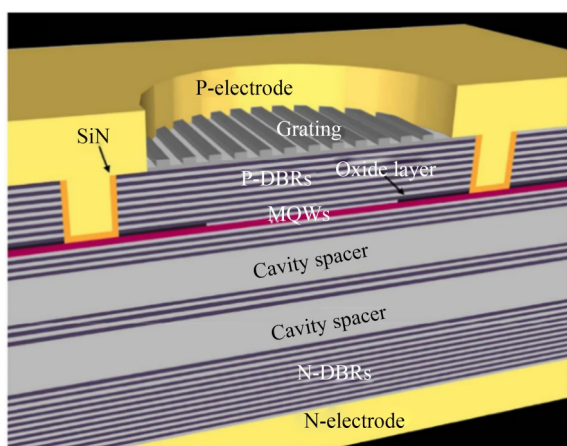


图 15 MCC VCSEL 的三维图示^[37]

Fig. 15 Three-dimensional illustration of MCC-VCSELs^[37]

2025 年,中国科学院微电子研究所报道了一种面向 Cs 基量子传感的 852 nm 双结级联 VCSEL,如图 16 所示^[38]。该器件采用两有源区级联

结构以提高输出功率,同时引入阶梯氧化孔径和延长腔结构来抑制高阶横模。其中,阶梯氧化层通过不同 Al 组分氧化层的一次湿法氧化形成渐变有效折射率分布,在增强电流限制的同时避免过强光学限制;延长腔结构则利用高阶模式较大的发散角增加其衍射损耗,从而提升基模竞争优势。为实现稳定偏振输出,研究人员进一步采用椭圆氧化孔径诱导各向异性横向限制,避免了表面光栅所需的复杂电子束曝光和刻蚀工艺。实验结果表明,3 $\mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$ 氧化孔径器件在连续工作条件下阈值电流为 0.8 mA,斜率效率达到 2.13 W/A,最大功率转换效率为 42.2%,最大单模输出功率达到 6.1 mW,最大正交偏振抑制比为 25.7 dB。该研究在 852 nm 波段同时实现了高单模功率、稳定偏振和工艺兼容性,为芯片级铯原子钟、量子陀螺仪和量子磁力计等系统提供了更具工程化潜力的 VCSEL 方案。

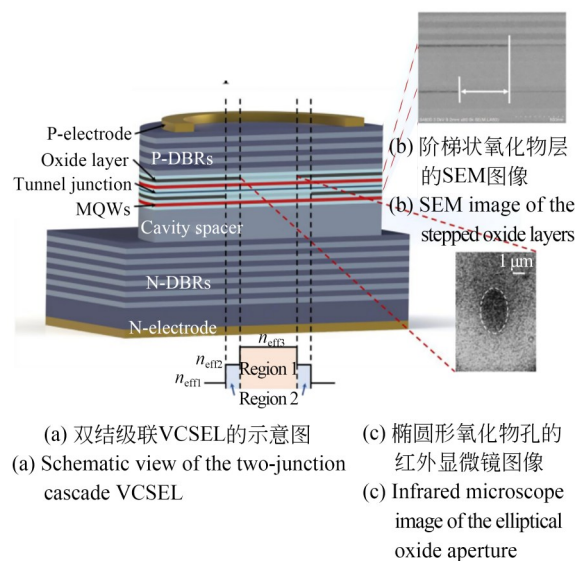


图 16 面向 Cs 基量子传感的 852 nm 双结级联 VCSEL^[38]

Fig. 16 852 nm double-resonant cascaded VCSEL for Cs-based quantum sensing^[38]

除线宽外,VCSEL 的温度特性和效率同样决定其工程应用能力。2005 年,张永明等^[39]采用自主设计的热封闭测试系统,如图 17 所示,系统表征了器件在 20 °C 至 80 °C 温区内的关键性能变化。研究结果表明,温度升高导致器件斜率效率从 0.3 mW/mA 下降至 0.2 mW/mA,同时阈值

电流显著增加,据此提取出的特征温度 T_0 高达 350 K,显示出该 VCSEL 结构较好的温度稳定性。实验测得基模激射波长随温度红移的速率为 $0.06\text{ nm}/^\circ\text{C}$,而由波长漂移法确定的器件热阻为 $2.02\text{ }^\circ\text{C}/\text{mW}$ 。这项工作不仅揭示出 VCSEL 中腔模与增益谱失配是效率下降的主因,其发展的热阻测试方法也为后续各类半导体激光器的热特性分析提供了借鉴,尤其突出了在高温环境下(如 $80\text{ }^\circ\text{C}$)维持器件正常工作的热设计挑战。

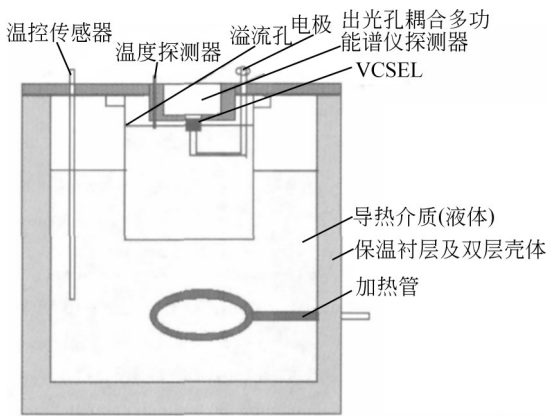


图 17 VCSEL 温度特性表征实验装置^[39]
Fig. 17 Experimental setup of VCSEL temperature characterization^[39]

总体来看,单模 VCSEL 及窄线宽 VCSEL 的发展逻辑主要集中在低功耗、小体积、窄线宽、高单模功率和稳定偏振之间的综合平衡。传统 VCSEL 已具备低阈值和易集成优势,但线宽较宽、单模功率有限和偏振稳定性不足限制了其在高性能原子系统中的应用;Sandia 扩展腔和三镜 VCSEL 工作表明,通过增加有效腔长和构建复合腔结构,可显著降低 VCSEL 频率噪声并改善原子钟信噪比。近年来,多腔耦合、延长腔、阶梯氧化孔径、级联有源区和椭圆氧化孔径等新结构进一步推动 VCSEL 由单纯低功耗光源向高单模功率、窄线宽和稳定偏振光源发展。未来 852 nm VCSEL 的研究重点将集中在 MHz 以下线宽、mW 级至十 mW 级单模输出、高偏振抑制比、高温稳定工作和晶圆级可制造工艺等方面,以满足芯片级铯原子钟和小型化量子传感系统的应用需求。

3.2 852 nm DFB 激光器

DFB 激光器是实现 852 nm 单频、窄线宽、高稳定输出的另一条重要路线。与普通 Fabry-Pérot 边发射激光器相比,DFB 激光器在有源区或波导附近引入周期性布拉格光栅,通过分布式反馈实现纵模选择,因而能够在无外腔条件下获得单纵模输出、高边模抑制比和较窄线宽。对于铯原子钟和精密光谱系统而言,DFB 激光器兼具较高输出功率、较好光束质量和较高封装稳定性,是从实验室系统走向工程化系统的重要器件类型。

2004 年,Krakowski 等^[20]报道了用于 Cs 原子泵浦的 852 nm 无铝有源区 DFB 激光器。该器件采用 InGaAsP/GaAs 无铝有源区设计,降低了 Al 氧化相关的端面退化和可靠性问题,并通过 DFB 光栅实现单频输出。经 $40\text{ }^\circ\text{C}$ 、20 mW 条件下 6 个月老化后,器件仍保持优异光谱性能: $25\text{ }^\circ\text{C}$ 下延迟自外差测得线宽为 215 kHz(洛伦兹拟合)或 330 kHz(高斯拟合), $40\text{ }^\circ\text{C}$ 下线宽约 260 kHz;边模抑制比保持高于 40 dB,布拉格波长漂移小于 0.12 nm ,推断寿命超过 50 万小时,数据如表 1 所示。该结果表明,无铝有源区与 DFB 结构结合,不仅可实现亚 MHz 窄线宽和高 SMSR,而且具有较高长期可靠性,非常适合原子钟和空间精密测量等长寿命应用场景。

表 1 老化 6 个月后 6 台 AR/HR DFB 激光器的线宽测量^[20]
Tab. 1 Linewidth characterization of six AR/HR DFB laser diodes following 6-month aging test^[20]

Laser	Beat width/ kHz	$\Delta\nu$ white noise/kHz	$\Delta\nu$ 1/f kHz
1	520	260	268
2	600	300	424
3	600	300	424
4	650	325	460
5	550	275	389
6	700	350	495

DFB 器件性能提升的关键在于材料损耗、光栅耦合和腔长之间的协同优化。2004 年,Alcatel Thales III-V 实验室围绕 852 nm DFB 激光器开展的系列研究表明^[19],采用 InGaAsP/GaAs 无铝有源区、应变量子阱和 GaInP 大光学腔结构,可

以提高载流子限制能力和光模约束效率,降低内部损耗并提升输出功率。在宽面积结构中,器件内量子效率可达到94%~95%,内部损耗低于 3 cm^{-1} ,经减反射/高反射镀膜后斜率效率达到 0.92 W/A ,连续输出功率超过 5.5 W 。2008年进一步采用窄脊波导结构后,器件在单横模条件下实现 $0.9\sim 1.05\text{ W/A}$ 斜率效率和 $230\sim 250\text{ mW}$ 输出功率。最终的852 nm DFB激光器通过光栅周期优化和二次外延再生技术,在 36.9°C 下精确发射于Cs D_2 线附近,输出功率约 40 mW ,边模抑制比超过45 dB,线宽约0.9 MHz。这些结果体现了DFB路线在单频性、窄线宽、功率和效率之间的综合平衡。

2020年,英国格拉斯哥大学在GaAs基DFB窄线宽激光器方面的工作也为852 nm波段器件设计提供了重要参考。Di Gaetano等^[40]报道了780.24 nm侧向耦合光栅DFB激光器,如图18所示,虽然其工作波长对应Rb D_2 线而非Cs 852 nm D_2 线,但该研究明确指出GaAs/AlGaAs材料平台覆盖700~900 nm波段,包含Rb 780 nm和Cs 852 nm等冷原子关键跃迁线,因此其结构设计方法对852 nm DFB激光器具有借鉴意义。该器件采用无铝有源区以降低端面灾变性光学损伤和镜面损伤风险,同时在n型AlGaAs包层中引入模式扩展层,使光场向n型包层扩展,从而降低量子阱光限制因子、传播损耗和横向平均功率密度;此外,4 mm长腔设计进一步降低功率密度并压窄线宽。实验实现了60 mW输出功率、612 kHz线宽、超过40 dB边模抑制比和大于0.3 nm

调谐范围。该工作说明,在GaAs基DFB激光器中,通过“无铝有源区+模式扩展层+长腔+侧向耦合光栅”的联合设计,可以在维持较高输出功率的同时实现亚MHz线宽,对852 nm DFB激光器的低损耗和窄线宽设计具有直接启发意义。

总体而言,DFB激光器路线的优势在于无需宏观外腔即可实现单频、窄线宽和高边模抑制比,同时较容易获得几十mW至数百mW量级输出功率。其主要技术难点包括光栅制备精度、再生长界面质量、光栅耦合系数控制、端面可靠性和热调谐稳定性。未来852 nm DFB激光器的发展将继续围绕低损耗无铝有源区、长腔低功率密度设计、模式扩展层、低损伤光栅刻蚀和高可靠封装展开,以满足铯原子钟、冷原子干涉仪和量子传感系统对高稳定单频光源的需求。

3.3 外腔反馈、VECSEL及其他窄线宽激光器

除VCSEL和DFB外,外腔反馈半导体激光器和VECSEL也是实现852 nm窄线宽输出的重要技术路线。其共同特点是通过增加有效腔长、引入频率选择元件或利用复合腔结构提高光子寿命和模式选择能力,从而显著降低激光相位噪声。与DFB激光器相比,外腔类器件通常具有更宽调谐范围和更窄线宽,但系统结构更复杂,对机械稳定性、温度控制和反馈光路调节提出更高要求。

2007年,Cocquelin等^[41]设计了用于铯原子钟的低阈值光泵浦VECSEL,发射波长锁定在852 nm Cs D_2 线附近。该器件通过在外腔中插入 $26\text{ }\mu\text{m}$ 法布里-珀罗标准具实现单频运转,输出功率超过5 mW,并可在约10 GHz范围内实现无跳模连续调谐。在铯吸收光谱实验中,该VECSEL能够清晰分辨间隔约为25 MHz的超精细跃迁,表明其线宽显著小于该能级间隔。VECSEL方案通过垂直腔增益结构与外腔频率选择元件结合,在单频性、窄线宽和调谐能力之间取得了较好平衡,适合高分辨率原子谱学和原子钟系统。

2018年,刘金玉等^[42]研制了基于窄带滤光片的852 nm外腔反馈半导体激光器。该系统如图19所示,采用猫眼透镜结构与可调反馈设计,通过旋转滤光片角度实现约14 nm波长调谐。采用光纤延时自差拍法测量,单滤光片配置下激光

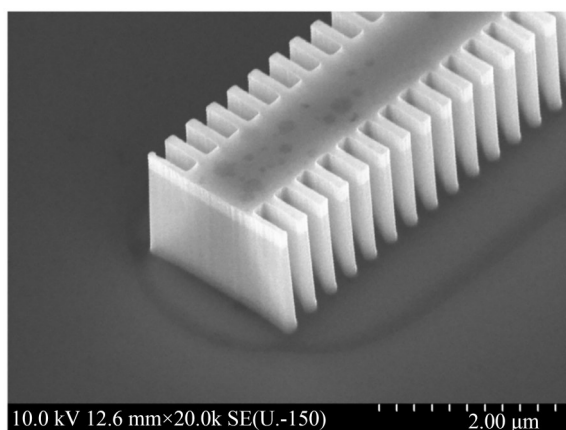


图18 侧向DFB光栅的SEM图像^[40]

Fig. 18 SEM image of lateral DFB grating^[40]

线宽约为 211 kHz,双滤光片结构进一步将线宽压窄至 187 kHz。双滤光片通过减小有效光谱带宽并增强纵模竞争,实现了更强的频率选择作用。该激光器还实现了大于 1.5 GHz 的频率连续调谐,并成功用于 Cs D₂线饱和吸收光谱测量,说明外腔反馈方案在精密光谱实验中具有较强适用性。

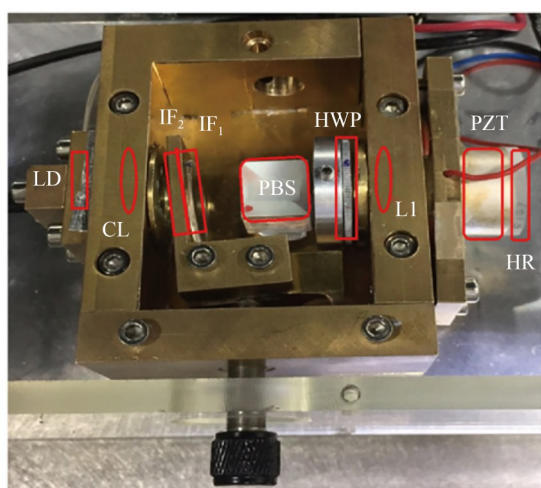


图 19 自制 852 nm IF-ECDL 装置图^[42]

Fig. 19 Experimental setup of home-built 852 nm IF-ECDL^[42]

从发展趋势看,外腔反馈和 VECSEL 技术在实验室高分辨率光谱、冷原子操控和频率标准中仍具有重要地位。其核心优势是线宽可达到百 kHz 甚至更低,并具备较大波长调谐范围;核心不足是系统复杂度、机械稳定性和集成化程度不如 DFB 和 VCSEL。未来若能通过微光学封装、片上外腔、MEMS 调谐结构或混合集成技术提高稳定性和集成度,外腔类 852 nm 半导体激光器仍将在高性能铯原子系统中发挥重要作用。

3.4 基横模边发射激光器及功率扩展结构

冷原子俘获、原子干涉仪、量子模拟和大规模原子传感系统,仅有窄线宽和单频性并不足够,还需要激光器提供足够的输出功率和较高电光转换效率。边发射半导体激光器由于有源区长度较长、输出功率扩展能力强,是实现百 mW 至瓦级 852 nm 输出的重要路线。根据波导结构和横向模式控制方式不同,该类器件可进一步分为宽面积激光器、脊形波导激光器、锥形激光器、光子带晶体激光器和非对称宽波导激光器等。

2002 年 9 月,李忠辉等^[22]采用 LP-MOVPE 技术制备了有源区无铝的 850 nm SCH-SQW 高功率半导体激光器。该器件采用 InGaAsP 作为无铝有源区,结合 AlGaInP 包层与 InGaP 波导层结构,有效降低了载流子泄漏与内部损耗。器件条宽为 100 μm ,腔长为 1 mm,在未镀膜条件下实现了室温连续输出功率 1 W,阈值电流密度为 460 A/cm²,外微分量子效率达 0.68 W/A,激光波长为 849 nm。该激光器的 P - I 曲线如图 20 所示。该研究体现了无铝有源区设计在高功率半导体激光器中的优势,包括低电阻、高导热性与良好可靠性,为 852 nm 波段高功率激光器的发展提供了重要参考。

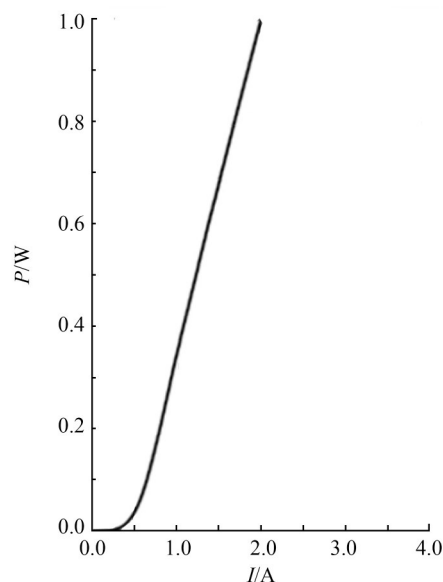


图 20 无铝激光器的输出光功率-电流曲线^[22]

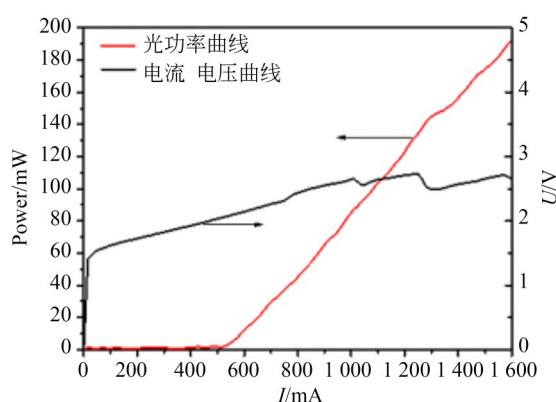
Fig. 20 Power-current characteristic curves of Al-free lasers^[22]

2006 年,俄罗斯 Ioffe 物理实验室采用纵向光子带晶体(Photonic Band Crystal, PBC)结构,在 850 nm GaAs/AlGaAs 半导体激光器中实现了超窄垂直发散角(9°)和高功率输出^[43]。该结构通过调制折射率分布有效限制了高阶模,提升了基模的光限制因子。宽面积多模器件在脉冲条件下输出功率达 6.3 W(腔长 500 μm ,条宽 100 μm),受限于腔面损伤;而 4 μm 窄条器件在连续波条件下实现 270 mW 单模输出,微分量子效率高达 95%,壁插效率达 50%。该研究展示了

PBC 结构在同时实现高功率、窄发散角和高效率方面的潜力,为 852 nm 波段高功率激光器提供了重要的技术路径。

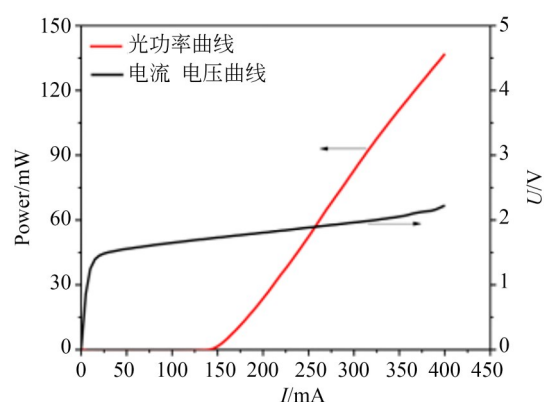
脊形波导和非对称波导结构则更适合在保持较好光束质量的同时提升输出功率。2017 年,北京工业大学通过优化脊形波导结构,重点研究了其在侧向模式控制与功率提升方面的性能^[44]。研究表明,通过合理设计脊型台深宽比(如脊宽 5 μm 、脊深 500 nm),并结合双沟槽结构与自对准工艺,可有效抑制高阶模振荡,实现单基横模稳

定输出。图 21 为激光器光功率电流电压(P - I - U)对比曲线测试。结果表明,该结构在 150 mA 工作电流下可实现 72 mW 的输出功率,斜率效率达 0.7 mW/mA,阈值电流低至 50 mA,该器件实现了约 72 mW 输出功率,其意义在于通过脊形波导结构实现了稳定的基横模工作和较好的横向模式控制。对于铯原子光物理应用而言,这类器件的价值在于其较好的光束质量、较低阈值和后续外腔耦合潜力,而非作为宽面积或锥形高功率半导体激光器的代表。



(a) 100 μm 脊宽激光器 P - I - U 曲线

(a) P - I - U characteristics of laser with a 100 μm ridge width



(b) 16 μm 脊宽激光器 P - I - U 曲线^[44]

(b) P - I - U characteristics of laser with a 16 μm ridge width^[44]

图 21 激光器 P - I - U 对比曲线

Fig. 21 Laser P - I - U comparison curves

2022 年,为实现 852 nm 高功率半导体激光器,中国科学院半导体研究所材料科学重点实验室通过理论分析与 PICS3D 软件优化设计,重点降低了内部损耗并提高了内量子效率^[45]。采用非对称宽波导结构与双沟脊形波导,在增大光斑尺寸、提高端面损伤阈值的同时,有效抑制高阶横模,保障基模稳定输出。实验制备的器件内部损耗低于 1 cm^{-1} ,在未镀膜条件下单端输出功率达 115 mW,快慢轴发散角分别为 42.3° 和 5.6° 。通过优化波导层厚度与掺杂策略(如波导层非掺杂、覆盖层渐变掺杂),显著降低了自由载流子吸收与载流子泄漏,从而在保持低串联电阻的前提下实现了高功率、低损耗的激光输出,为原子钟等应用提供了高性能光源。

斜率效率提升同样是边发射 852 nm 半导体激光器的重要目标。高斜率效率意味着在相同输出功率下具有更低驱动电流和更少热耗散,对

星载原子钟、便携式量子传感器和长时间稳定运行系统具有重要意义。在大型磁光阱中捕获大量冷原子需要瓦量级激光功率,有些高斜率效率,最高可达 0.89 mW/mA 的激光器^[46]能在维持较低阈值电流的同时,显著降低系统的功耗与热负荷,保障激光波长长期锁定于原子跃迁线上的稳定性,并减少由热效应引起的波长漂移。已有研究表明,采用无铝有源区、应变量子阱、大光学腔和优化波导结构,可显著提高载流子限制能力和光模约束效率,使器件斜率效率达到 0.6~1.05 W/A,部分器件内量子效率超过 95%。2004 年,法国 Alcatel Thales III-V 实验室研究的 852 nm DFB 及相关边发射器件^[19]中,宽面积结构可实现 0.92 W/A 斜率效率和多瓦级连续输出,窄脊结构在单横模条件下仍可保持 0.9~1.05 W/A 斜率效率和数百 mW 输出功率。2012 年,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

设计并制备了基于 $\text{In}_{0.15}\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.74}\text{As}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 应变量子阱的 852 nm 半导体激光器^[25]也实现了 0.64 W/A 斜率效率、50 mA 阈值电流和 290 mW 脉冲输出功率,说明通过材料增益和外延界面优化可有效提高电光转换效率。

温度稳定性是高功率和高效率器件能否实际应用的关键。温度升高会引起阈值电流增大、输出功率下降、斜率效率降低、激光波长红移以及谱线展宽。2013 年,黄海华等^[47]针对 850 nm $\text{AlGaInAs}/\text{AlGaAs}$ 梯度折射率波导分别限制增益量子阱结构,分别制备了锥形与条形两种半导体激光器,如图 22 所示,系统对比了其温度特性。在相同外延结构下,锥形器件由于能够限制电流流向扩散和载流子泄漏,特征温度可显著高于条形器件。

2017 年,廖翌如等^[48]对低阈值(57.5 mA) 852 nm 法布里-珀罗半导体激光器(Fabry-Perot

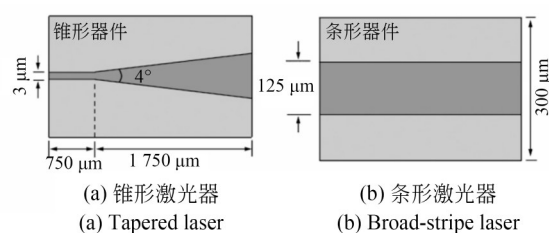
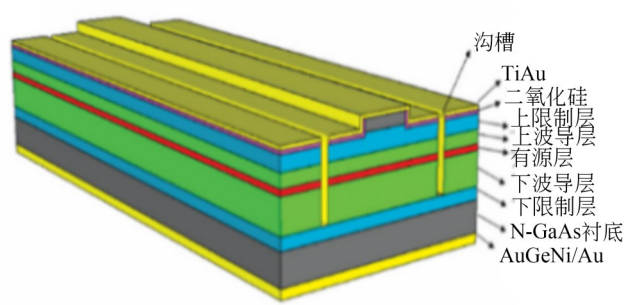


图 22 锥形激光器和条形激光器的结构示意图^[47]

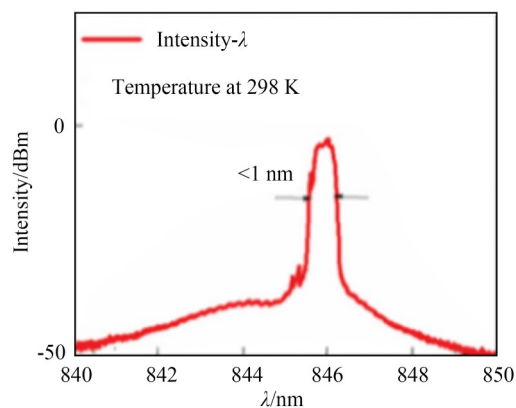
Fig. 22 Schematic diagram of tapered and ridge-stripe laser structures^[47]

Semiconductor Laser)进行了系统的温度特性表征,结构示意图如图 23(a)所示。相关研究测得 293~328 K 内特征温度约为 142.25 K,中心波长漂移率约为 0.249 nm/K,热阻约为 77.7 K/W,输出光谱如图 23(b)所示,为低功耗 852 nm 器件热设计提供了参考。



(a) 852 nm 半导体激光器结构示意图

(a) Schematic diagram of 852 nm semiconductor laser structure



(b) 输出光谱^[48]

(b) Output spectrum^[48]

图 23 852 nm 半导体激光器的结构及输出光谱^[48]

Fig. 23 Structure and output spectrum of 852 nm semiconductor laser^[48]

总体来看,高功率、高效率边发射 852 nm 半导体激光器的发展逻辑可以概括为:通过无铝有源区和应变量子阱降低非辐射复合与端面退化,通过大光学腔、模式扩展层和非对称波导降低内部损耗与功率密度,通过脊形、锥形、光子带晶体和双沟结构改善横向模式稳定性,通过掺杂优化和热管理降低温升与波长漂移。该类器件为大规模冷原子系统和高功率铯原子操控提供了基础光源,也可作为 DFB、外腔或放大系统中的增益芯片和功率扩展单元。

3.5 总结

作为铯原子 D_2 线跃迁对应的关键光源,852 nm 半导体激光器在铯原子钟、量子磁力计、原子干涉仪和冷原子操控等系统中具有重要作用,其性能提升需要同时兼顾窄线宽、高边模抑制比、高单模功率、高斜率效率、低功耗、稳定偏振和良好温度特性。从器件类型看,单模 VCSEL 及窄线宽 VCSEL 具有低阈值、小体积、低功耗和易集成优势,是芯片级原子钟和小型化量子传感器的重要候选光源;通过扩展腔、三镜结构、多腔耦

合、双结级联、阶梯氧化孔径和椭圆氧化孔径等设计,可有效改善传统 VCSEL 线宽较宽、单模功率不足和偏振稳定性有限等问题。DFB 激光器则依靠布拉格光栅实现单纵模选择,在窄线宽、高 SMSR、较高功率和长期可靠性方面具有优势,是工程化 852 nm 单频光源的重要路线。外腔反馈激光器和 VECSEL 通过增加有效腔长和引入频率选择元件,可获得百 kHz 量级甚至更窄线宽和较宽调谐范围,适合高分辨率原子光谱和频率锁定系统。

总体来看,852 nm 半导体激光器的发展正在由单一性能优化转向器件结构、材料体系、模式调控、热管理和系统集成的协同优化。高功率、高效率边发射激光器通过无铝有源区、应变量子阱、大光学腔、非对称波导、脊形波导、光子带晶体和双沟结构等设计,提高了输出功率、斜率效率、光束质量和端面可靠性,为冷原子俘获、原子干涉和大规模铯原子操控提供了基础光源。未来,低功耗窄线宽 VCSEL、高可靠 DFB 激光器、可集成外腔/VECSEL 以及高功率边发射器件将分别面向芯片级原子钟、精密光谱、量子传感和冷原子系统等不同应用需求持续发展。随着半导体外延、微纳加工、复合腔设计、片上外腔、微

光学集成和高效散热封装技术的进步,852 nm 半导体激光器有望进一步向窄线宽、低功耗、小型化和工程化方向演进。

4 商用 852 nm 半导体激光器性能对比

852 nm 半导体激光器是铯原子 D₂ 线精密光谱、冷原子物理、原子钟、量子传感和高分辨率光谱系统中的关键光源,其商用产品的发展水平直接反映了该波段半导体激光器从实验室研究走向工程应用的成熟程度。与前文侧重器件结构和性能研究进展的讨论不同,本章主要面向目前市面上可获得的 852 nm 及近邻波段半导体激光器产品,从供应商、产品型号、激光器结构、中心波长、线宽、工作电流、阈值电流和输出功率等方面进行对比分析。由于商用 852 nm 半导体激光器并非单一类型产品,而是涵盖高功率边发射激光二极管、DFB 单频激光器、VCSEL、窄线宽半导体激光模块、DBR 激光器和外腔半导体激光器等多种路线,因此,仅对产品参数进行罗列不足以体现其技术差异和应用边界。基于表 2 所列产品,进一步从器件结构、线宽水平、输出功率、系

表 2 商用 852 nm 半导体激光器性能

Tab. 2 Performance of commercial 852 nm semiconductor laser

生产商	型 号	波长/nm	线宽/ MHz	工作 电流/ mA	阈值 电流/ mA	功率/ mW
WaveSpectrum Laser Inc.	WSLD-850-300m-1-PD	850	/	520	140	300
	WSLD-850-500m-2-PD	850	/	890	220	500
	PL-DFB-852-C-1-PA-14BF	852	<2	120	20	30
新加坡 LD-PD PTE. LTD.	PL-VCSEL-0852-0-A81-TO46	852±1	15	/	0.5	1
	PL-NL-852-A-A81-PA-PZT	852	1	/	/	10
	PL-NL-852-A-A81-PA	852	1	/	/	10
	DFB 半导体激光器	852	≤1	200	/	100/150
	EYP-DFB-0852-00050-1500-BFY02-0000	852	2	/	70	55
德国 Topptica	EYP-DFB-0852-00100-1500-BFW01-0002	852	2	/	70	110
Eagleyard	EYP-DFB-0852-00050-1500-BFY02-0002	852	2	/	70	55
	EYP-DFB-0852-00100-1500-BFW01-0005	852	0.6	/	70	110
	EYP-ECL-0852-00080-1500-BFW01-0005	852	0.1	/	70	100
美国 Photodigm	Series DBR Laser Diode / PH852DBR	852.347±0.6	0.5	350	50	240
美国 Thorlabs	DBR852PN	852	1	300	50	24
德国 nanoplus	830 - 920 nm DFB 系列,可覆盖 852 nm / Cs D ₂	852	<1	/	35	100

统集成度和应用适配性等角度展开分析,以明确不同商用 852 nm 半导体激光器在铯原子精密测量及相关工程化系统中的适用范围。

由表 2 可见,当前市面上已有的 852 nm 及近邻波段半导体激光器产品并非单一类型,而是呈现出明显的结构分层。WaveSpectrum Laser Inc. 的 850 nm 边发射激光二极管输出功率可达 300~500 mW,说明功率型半导体激光器在高功率输出方面具有优势,但其中心波长并非严格对应 852 nm 铯原子 D₂ 线,且表中未给出线宽参数,因此更适合作为近邻波段高功率器件的参考,而不宜直接作为窄线宽单频光源进行比较。LD-PD PTE. LTD. 的 852 nm VCSEL 产品阈值电流仅为 0.5 mA、输出功率为 1 mW,体现出 VCSEL 低阈值、低功耗和小型化优势,适合微型化原子钟、芯片级传感和低功耗系统;但其线宽为 15 MHz、输出功率较低,难以满足高功率或高频率稳定性应用需求。因此,功率型边发射器件和 VCSEL 分别代表了“高功率输出”和“低功耗小型化”两类商用路线,其优势与局限均较为明确。

DFB 和 DBR 是当前 852 nm 商用单频半导体激光器中的主要类型。DFB 激光器通过分布反馈光栅实现纵模选择,兼具结构紧凑、封装成熟和工程集成便利等特点。表中 LD-PD PTE. LTD. 的 PL-DFB-852-C-1-PA-14BF 线宽小于 2 MHz、输出功率为 30 mW,Toptica Eagleyard 的 852 nm DFB 系列线宽覆盖 2 MHz 至 0.6 MHz,输出功率可达 55~150 mW,nanoplus 的 830~920 nm DFB 系列也可覆盖 852 nm/Cs D₂ 波段,线宽小于 1 MHz、功率可达 100 mW。相比之下,DBR 激光器通常将增益区与布拉格反射区分离,在保持紧凑结构的同时具有较好的单频稳定性和波长调谐能力。Photodigm 的 PH852DBR 线宽为 500 kHz、输出功率可达 240 mW,Thorlabs 的 DBR852PN 线宽为 1 MHz、输出功率为 24 mW,说明 DBR 结构能够在窄线宽、功率输出和器件集成度之间取得较好平衡。总体而言,DFB 和 DBR 产品更适合小型化铯原子光谱、便携式量子传感和工程化稳频系统。

外腔半导体激光器则代表了商用 852 nm 产

品中进一步压窄线宽的路线。Toptica Eagleyard 的 EYP-ECL-0852-00080-1500-BFW01-0005 线宽达到 100 kHz,输出功率为 100 mW,明显优于多数 MHz 量级 DFB、DBR 和 VCSEL 产品,因而更适用于饱和吸收谱锁频、冷原子制备、原子干涉和高分辨率光谱等对频率噪声敏感的应用。然而,外腔结构通常需要更高的机械稳定性、温度控制精度和反馈调节能力,其系统复杂度、成本和调试难度也高于普通封装半导体激光器。因此,商用 852 nm 半导体激光器的评价不能仅依据功率或线宽单一指标,而应结合具体应用需求进行综合判断:高功率输出场景应关注功率、电流和热管理;铯原子 D₂ 线稳频和量子精密测量应优先关注线宽、单模稳定性和波长匹配;小型化系统则需重点考虑功耗、封装形式和系统集成难度。

综上,商用 852 nm 半导体激光器已经形成了较为清晰的产品分层:高功率边发射激光二极管主要体现功率输出优势,但难以直接满足铯原子 D₂ 线窄线宽单频应用需求;VCSEL 具有低阈值、低功耗和小型化优势,适合微型化系统;DFB 激光器在结构紧凑性、输出功率和 MHz 或亚 MHz 量级线宽之间具有较好平衡,是工程化 852 nm 单频光源的重要类型;DBR 激光器进一步兼顾较高功率、单频稳定性和调谐能力;ECL 外腔半导体激光器则能够实现 100 kHz 量级线宽,更适合饱和吸收谱锁频、冷原子实验和高分辨率光谱等高频率稳定性应用。总体来看,国外厂商如 Toptica Eagleyard,Photodigm,Thorlabs 和 nanoplus 等已经能够提供 852 nm 附近 DFB、DBR、ECL 或相关核心器件产品,体现出较强的芯片、核心器件和标准化商用供应能力;相比之下,国内目前在 852 nm 半导体激光器领域主要体现为代理销售、模块封装或外腔/整机系统集成能力,尚未体现出成熟稳定的 852 nm DFB、DBR 或增益芯片自主批量供应能力。因此,后续国内 852 nm 半导体激光器的发展不仅需要继续提升线宽、输出功率、调谐范围、封装可靠性和长期稳定性等性能指标,更需要加强上游核心芯片和增益器件的自主研制能力,以支撑铯原子精密测量、量子传感和小型化原子钟等应用的国产化需求。

5 852 nm 半导体激光器在铯原子钟中的应用

高精度的时间与频率测量在多个科技领域至关重要。原子物理研究中,原子与光子相互作用、原子碰撞及原子与电磁场的动力学过程依赖精密时间测量;大地测量、射电天文学和脉冲天文学需依靠稳定的本地频率基准与时间标定;卫星导航、导弹精确定位以及通信与电力网络系统则要求区域时间频率与国家或国际标准保持高度同步^[49-50]。原子钟是唯一能够满足上述高精度与高稳定度要求的计时装置。1967年,国际计量局(BIPM)将秒定义为铯-133原子基态超精细能级跃迁辐射周期的 9 192 631 770 倍^[51-55]。自 1948 年问世以来^[56-57],原子钟在国防军事与空间探测等领域已获得广泛应用。在众多种类的铯原子钟中,精确度和稳定度最高的铯原子钟是光选态中使用激光冷却的方法制作出的冷原子钟,又称为铯原子喷泉钟。铯原子喷泉钟^[58-65]是一种能够通过复现国际单位制(SI)单位秒、提供高精度时间频率信号的装置,在量子精密测量^[66]、卫星定位导航^[67]和地质勘探^[68]等领域得到广泛应用。

铯原子钟作为高精度频率与时间基准的核心装置,在卫星导航^[69]、通信同步网^[70]及精密计量等领域具有不可替代的地位。其基于铯原子超精细能级跃迁原理,具备优异的长期稳定性与频率准确性,广泛应用于全球导航卫星系统(如全球定位系统、北斗等)和国家时频体系^[71]。852 nm 半导体激光器在铯原子钟中发挥关键作用,是实现高性能原子钟的核心器件之一。在传统磁选态铯钟中,852 nm 激光逐步应用于光学检测与状态选择;而在新一代激光抽运铯钟中,该激光器直接用于原子能级的精确抽运和荧光探测,大幅提高了原子利用率和信噪比,显著改善了短期频率稳定度。在冷原子铯钟等前沿系统中,852 nm 激光还承担激光冷却与原子态制备的任务,通过精准操控原子运动状态,极大提升了频率准确度和系统抗干扰能力。该激光器的应用不仅推动了铯原子钟向小型化、低功耗和高可靠性方向发展,也为北斗系统等国家重大工程中的自主可控时频技术提供了坚实支撑,体现出重

要的科学研究与工程应用价值。

852 nm 半导体激光器是铯原子钟中实现原子光学泵浦的核心光源,其光谱纯度与功率稳定性直接决定钟的频标精度。2007 年,法国 Alcatel Thales III-V 实验室研究^[72]表明,采用无铝有源区的分布式反馈(DFB)激光器可在 852.12 nm 波长处实现 40 mW 的高功率输出,边模抑制比超过 50 dB,且在 12 °C 至 90 °C 宽温范围内保持单频特性,线宽最低达 800 kHz(20 mW, 12 °C)。该激光器尤其适用于热原子束型铯钟(如磁选态-光检测钟),其 1 MHz 量级的窄线宽与高功率特性可有效提升 Ramsey 谱线的信噪比,从而提高短期频率稳定度。此外,其良好的温度稳定性与空间模式质量($M^2 < 1.5$)为原子钟在复杂环境下的可靠运行提供了保障,是实现高性能小型化铯原子钟的重要技术路径。

在铯原子钟系统中,852 nm 激光作为驱动源用于铯原子基态超精细能级的光抽运过程,是实现原子态制备与频率锁定的关键光源。普通自由运行 Fabry-Perot 半导体激光器确实容易受到电流噪声、温度漂移和纵模竞争影响,难以直接满足高分辨率铯原子光谱和高性能原子钟的稳频需求;但外腔半导体激光器、DFB 激光器、DBR 激光器以及体布拉格光栅(Volume Bragg Grating, VBG)稳频半导体激光器已经能够在 852 nm 附近实现 kHz 至 MHz 量级线宽和较好的单频稳定性,是当前铯原子光物理系统中的重要光源方案。相较而言,光纤激光器通常具有较好的光束质量、较高系统稳定性和便于光纤化集成等优势。2009 年,中国科学技术大学研究^[73]表明,采用 852 nm 可调谐光纤激光器可显著提升光源性能,其输出功率大于 20 mW,线宽小于 20 GHz,信噪比优于 30 dB,且可在 851~853 nm 内连续调谐,具有良好的频率适配性和长期稳定性。虽然在线宽方面远不如半导体激光器,但是在输出功率、波长连续调谐、信噪比和系统集成适配性方面,为国产化铯原子钟光源方案提供了有价值的技术参考。

2020 年,北京大学信息光电子研究所的研究通过调制转移光谱(MTS)技术实现了高稳定性、窄线宽的 852 nm 半导体激光器,并将其成功应用于紧凑型光泵浦铯原子钟系统^[28],如图 24 所

示。该激光器频率不稳定性在 5 s 平均时间内达 2.6×10^{-13} , 线宽仅为 3.2 kHz, 显著优于传统商用激光器。将其作为泵浦和探测光源引入铯原子钟后, 通过优化原子通量与光强参数, 钟的频率稳定度提升至 2×10^{-12} , 并在半日内达到 1×10^{-14} , 性能优于已报道的同类紧凑型铯钟。研究表明, 低噪声激光有效提升了 Ramsey 条纹的信噪比, 是提升微波原子钟短期稳定性的关键因素, 为精密计量、时间保持及未来小型化光学频率标准的实现提供了重要技术支持。

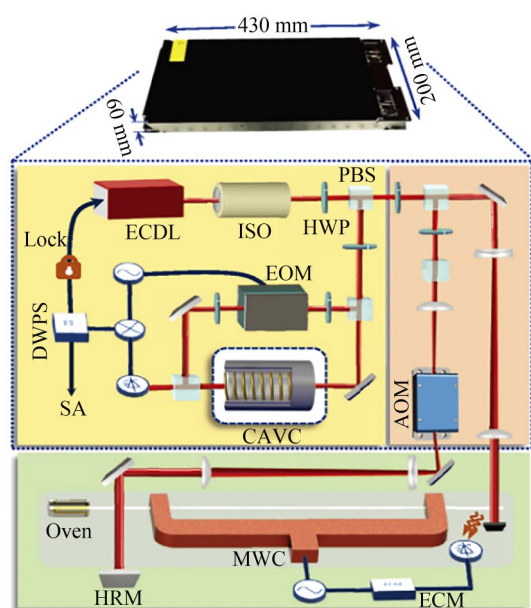


图 24 基于高稳定性激光的紧凑型光泵束原子钟的整体配置^[28]

Fig. 24 Overall configuration of a compact optically pumped cesium beam atomic clock based on high-stability lasers^[28]

852 nm 半导体激光器在铯原子钟中主要用于原子态的制备与检测, 是实现高稳定频率锁定的核心光源。2024 年, 北京大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室研究^[74]表明, 国产 DFB 激光管在磁选态-光检测型铯束钟中已实现应用, 其线宽约为 2 MHz, 频率稳定度达 1×10^{-11} (100 s), 在国产铯束管上可实现 1.45×10^{-12} (100 s) 的标准指标。尽管相较于进口器件仍有一定差距, 国产激光管已具备替代能力, 其稳定性与窄线宽特性直接影响 Ramsey 谱线的信噪比, 进而决定原子钟的短期频率稳定度。未来

需进一步压窄线宽、提升长期稳定性, 以支撑更高性能的小型铯原子钟发展。

6 未来展望

本文围绕 852 nm 半导体激光器在铯原子 D_2 线相关应用中的研究进展, 系统综述了其有源区材料体系、器件结构类型、核心性能指标、商用产品现状以及在铯原子钟和量子传感系统中的应用。852 nm 半导体激光器的发展并非单一性能指标的提升, 而是材料可靠性、器件结构设计和系统应用需求共同驱动的结果。在材料体系方面, AlGaAs/GaAs 体系依托成熟外延工艺和较强载流子限制能力, 为早期 852 nm 激光器奠定了基础, 但其含铝组分易引发腔面氧化、灾变性光学镜面损伤和暗线缺陷增殖。无铝 InGaAsP/GaAs 体系通过降低腔面氧化风险和表面复合速率, 显著提高了器件可靠性和寿命, 但在高温载流子限制方面仍存在不足。InAlGaAs 体系则通过应变工程、较深量子阱势垒、界面优化和腔面钝化等技术, 在高温稳定性、可靠性和电光转换效率之间取得了更好的平衡, 为后续 DFB、VCSEL 和高功率边发射器件的发展提供了重要材料基础。

器件结构不同, DFB 激光器、VCSEL、外腔反馈半导体激光器、VECSEL 以及边发射高功率激光器分别对应不同的应用需求。DFB 激光器依靠内置布拉格光栅实现单纵模输出, 兼具较窄线宽、高边模抑制比和较好的工程封装稳定性, 适合铯原子钟和紧凑型原子光谱系统。VCSEL 具有低阈值、低功耗、垂直出光、易阵列化和小型化封装优势, 是芯片级原子钟和小型化量子传感系统的重要候选光源。外腔反馈半导体激光器和 VECSEL 通过增加有效腔长或引入频率选择元件, 可进一步压窄线宽, 适用于高分辨率光谱、冷原子实验和频率稳定要求更高的实验平台。边发射宽面积、脊形和非对称波导激光器则主要面向高功率输出和光束质量优化, 为冷原子装载、多路分光和高功率光抽运提供功率裕量。

围绕 852 nm 半导体激光器的 4 个核心评价维度, 研究进展可概括如下: 在线宽方面, DFB、外腔反馈、VECSEL 和多腔耦合 VCSEL 等结构

通过增强模式选择、增加光子寿命和降低相位噪声,推动器件由普通 MHz 量级线宽向亚 MHz 甚至更窄线宽方向发展。窄线宽性能直接决定激光与铯原子跃迁线相互作用时的频率噪声水平,是铯原子钟、饱和吸收谱、冷原子操控和量子传感系统中的关键指标。在输出功率方面,宽波导、非对称波导、脊形波导、锥形放大和高可靠腔面处理等技术显著提高了 852 nm 激光器的输出能力,但高功率提升必须与单横模控制、光束质量、腔面损伤阈值和热管理协同优化。在斜率效率方面,应变量子阱、大光学腔、低损耗波导和优化掺杂结构可提高载流子注入效率和光场限制能力,从而降低系统功耗和热负荷,对小型化铯原子钟和便携式量子传感系统尤为重要。在温度特性方面,材料能带设计、增益-腔模失谐控制、热阻优化和封装散热设计共同决定阈值电流、输出功率和激光波长的温度稳定性,是保证激光器长期锁定于铯原子 D_2 线附近的基础。

852 nm 半导体激光器研究未来会继续围绕铯原子钟、量子磁力计、原子干涉仪、冷原子实验和小型化精密测量系统的实际需求展开。在窄线宽方向,需要进一步降低自由运行频率噪声,提高长期频率稳定性和无跳模调谐能力;在高功率方向,需要在提高输出功率的同时保持良好光束质量、偏振稳定性和端面可靠性;在高效率方

向,需要通过低损耗外延结构和优化电流注入设计降低器件功耗;在温度稳定性方向,需要提高器件在宽温区内的波长稳定性和功率稳定性,减少对复杂温控系统的依赖。此外,面向工程应用,还需要加强 852 nm DFB, DBR, VCSEL 和增益芯片的国产化研制能力,提高芯片一致性、封装可靠性和批量制造水平。

综上所述,852 nm 半导体激光器的后续研究不宜仅追求单一性能极限,而应在窄线宽、高功率、高斜率效率和优异温度稳定性之间实现综合优化。通过材料体系、器件结构、封装工艺和系统锁频技术的协同发展,852 nm 半导体激光器有望进一步满足铯原子钟、量子传感和精密测量系统对小型化、低功耗、高稳定和高可靠光源的需求。

作者贡献声明:

孙龙龙:论文撰写,相关文献整理;

唐吉龙:论文指导,文献收集与整理;

张 聪:论文构思与修改,数据整理,终稿审阅;

代 千:文献筛选与分析整理;

宋海智:论文修改,相关文献整理;

魏志鹏:论文修改,相关文献整理,项目管理。

参考文献:

- [1] GUAN J, GUO S X, WANG J Y, *et al.* Analysis of origin of measured $1/f$ noise in high-power semiconductor laser diodes far below threshold current [J]. *Microelectronics Reliability*, 2016, 59: 55-59.
- [2] QIAO Y B, CHEN Y N, SHAO J, *et al.* Investigation of thermomechanical stress characteristics in high-power 808-nm AlGaAs/GaAs laser diode bars [C]. 2016 17th International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT). August 16-19, 2016, Wuhan, China. IEEE, 2016: 1132-1134.
- [3] 王立军, 宁永强, 秦莉, 等. 大功率半导体激光器研究进展[J]. 发光学报, 2015, 36(1): 1.
WANG L J, NING Y Q, QIN L, *et al.* Development of high power diode laser[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2015, 36(1): 1. (in Chinese)

- [4] LIU C X, LI B K, XU A B. Transurethral anatomical enucleation of prostate with high-power 980 nm semiconductor laser (a report of 53 cases) [J]. *International Journal of Urology*, 2016, 23: 15-16.
- [5] WANG X, WANG C L, WU X, *et al.* Researching the 915 nm high-power and high-brightness semiconductor laser single chip coupling module [J]. *Journal of Semiconductors*, 2017, 38(2): 024006.
- [6] LI J J, FU Y Y, WANG Y C, *et al.* High wall-plug efficiency 1060 nm high power semiconductor laser [J]. *Optics and Photonics Journal*, 2016, 6(8): 170-176.
- [7] MÖLLER C, FUCHS C, BERGER C, *et al.* Type-II vertical-external-cavity surface-emitting laser with Watt level output powers at 1.2 μm [J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 108(7): 071102.
- [8] 廖翌如. 852 nm 半导体激光器的工艺制备及其特性分析[D]. 北京: 北京工业大学, 2017.

- LIAO Y R. *The Fabrication and Analysis of Characteristics of a 852 nm Semiconductor Lasers* [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [9] 米国鑫. 852 nm 半导体激光器的结构设计与制备 [D]. 北京: 北京工业大学, 2017.
- MI G X. *Structure Design and Fabrication of Semiconductor Laser Diodes Emitting at 852 nm* [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [10] VANIER J. Atomic clocks based on coherent population trapping: a review [J]. *Applied Physics B*, 2005, 81(4): 421-442.
- [11] KONONENKO V K. History and developments of semiconductor lasers [J]. 2010. DOI: 10.13140/RG.2.1.2729.9288.
- [12] WALKER C L, BRYCE A C, MARSH J H. Improved catastrophic optical damage level from laser with nonabsorbing mirrors [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2002, 14(10): 1394-1396.
- [13] LIU Y X, EBADI K, SUNNETCIOGLU A K, *et al.* Elimination of catastrophic optical mirror damage in continuous-wave high-power laser diodes using multi-section waveguides [J]. *Optics Express*, 2022, 30(18): 31539.
- [14] PENDSE D R, CHIN A K, DABKOWSKI F P, *et al.* Reliability comparison of GaAlAs/GaAs and aluminum-free high-power laser diodes [J]. *Semiconductor Lasers III*, 1998, 3547: 79.
- [15] PANKOVE J I, MASSOULIE M J. Semiconductor diode lasers: Early history [J]. *OSA Century of Optics*, 107.
- [16] VERMERSCH F J, LECOMTE M, CALLIGARO M, *et al.* High-power Al-free active region ($\lambda=852$ nm) laser diodes for atomic clocks and interferometry applications [J]. *Novel In-Plane Semiconductor Lasers IV*, 2005, 5738: 398.
- [17] VERMERSCH F J, LECOMTE M, CALLIGARO M, *et al.* High-power Al-free active region InGaAsP/GaAs ($\lambda=852$ nm) laser diodes for atomic clocks and interferometry applications [J]. *Solid State Laser Technologies and Femtosecond Phenomena*, 2004, 5620: 170.
- [18] KUO Y K, CHEN J R, CHEN M L, *et al.* Numerical study on strained InGaAsP/InGaP quantum wells for 850-nm vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. *Applied Physics B*, 2007, 86(4): 623-631.
- [19] LIGERET V, VERMERSCH F J, BANSROPUN S, *et al.* Al-free active region ($\lambda=852$ nm) DFB laser diodes for atomic clocks and interferometry applications [J]. *Semiconductor Lasers and Laser Dynamics II*, 2006, 6184: 61840A.
- [20] CAYRON C, LIGERET V, RESNEAU P, *et al.* High-power, high-reliability, and narrow linewidth, Al-free DFB laser diode for Cs pumping (852nm) [J]. *Novel In-Plane Semiconductor Lasers IX*, 2010, 7616: 76160Z.
- [21] VERMERSCH F J, LIGERET V, BANSROPUN S, *et al.* High-power narrow linewidth distributed feedback lasers with an aluminium-free active region emitting at 852 nm [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, 20(13): 1145-1147.
- [22] 李忠辉, 王玉霞, 王玲, 等. 850 nm 有源区无铝高功率 SCH-SQW 激光器 [J]. *中国激光*, 2002, 29(1): 5-6.
- LI Z H, WANG Y X, WANG L, *et al.* 850 nm Al-free active-region high power SCH-SQW laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2002, 29(1): 5-6. (in Chinese)
- [23] LI Z M, BRADFORD T. A comparative study of temperature sensitivity of InGaAsP and AlGaAs MQW lasers using numerical simulations [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1995, 31(10): 1841-1847.
- [24] WANG B, ZENG Y G, YU X Z, *et al.* Impact of the interruption duration on photoluminescence properties of MOCVD-grown GaAsP/InAlGaAs quantum well structures [J]. *Nanomaterials*, 2024, 14(18): 1469.
- [25] 徐华伟, 宁永强, 曾玉刚, 等. 852 nm 半导体激光器量子阱设计与外延生长 [J]. *光学精密工程*, 2013, 21(3): 590-597.
- 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)
- [26] 徐华伟, 宁永强, 曾玉刚, 等. 852nm 半导体激光器 InGaAlAs、InGaAsP、InGaAs 和 GaAs 量子阱的温度稳定性 [J]. *发光学报*, 2012(6): 640-646.
- XU H W, NING Y Q, ZENG Y G, *et al.* Temperature stability of InGaAlAs, InGaAsP, InGaAs and GaAs quantum-wells for 852 nm laser diode [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2012(6):

- 640-646. (in Chinese)
- [27] NAZARUK D E, BLOKHIN S A, MALEEV N A, *et al.* Single-mode temperature and polarisation-stable high-speed 850nm vertical cavity surface emitting lasers[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2014, 572(1): 012036.
- [28] SHANG H S, ZHANG T Y, MIAO J X, *et al.* Laser with 10^{-13} short-term instability for compact optically pumped cesium beam atomic clock [J]. *Optics Express*, 2020, 28(5): 6868.
- [29] GE Z Y, ZHU C W, WANG Y Q, *et al.* A Voigt laser lasing on Cs 852 nm transition[J]. *IEEE Access*, 2024, 12: 196171-196177.
- [30] MØRK J, XIONG M, SEEGER K, *et al.* Nanostructured semiconductor lasers [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2025, 31(2: Pwr. and Effic. Scaling in Semiconductor Lasers): 1502717.
- [31] ZORABEDIAN P. *Tunable External-Cavity Semiconductor Lasers*[M]. Tunable Lasers Handbook. Academic Press, 1995: 349-442.
- [32] LAURENT P, CLAIRON A, BREANT C. Frequency noise analysis of optically self-locked diode lasers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1989, 25(6): 1131-1142.
- [33] RAAB E L, PRENTISS M, CABLE A, *et al.* Trapping of neutral sodium atoms with radiation pressure [J]. *Physical Review Letters*, 1987, 59(23): 2631-2634.
- [34] SERKLAND D K, KEELER G A, GEIB K M, *et al.* Narrow linewidth VCSELs for high-resolution spectroscopy [J]. *Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers XIII*, 2009, 7229: 722907.
- [35] SERKLAND D K, PEAKE G M, WOOD M G, *et al.* Mode selection and tuning of single-frequency short-cavity VECSELs [C]. *Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers XXII. January 27-February 1*, 2018. San Francisco, USA. SPIE, 2018: 5.
- [36] HUANG M, SERKLAND D K, CAMPARO J. A narrow-linewidth three-mirror VCSEL for atomic devices[J]. *Applied Physics Letters*, 2022, 121(11): 114002.
- [37] XUN M, PAN G Z, SUN Y, *et al.* Longitudinal multi-cavity coupled VCSELs with narrow linewidth and high single mode power for quantum sensing [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2024, 42(17): 5949-5955.
- [38] WANG Y N, XUN M, PAN G Z, *et al.* High single-mode power 852-nm two-junction cascade VCSELs with stable polarization for quantum sensing [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2025, 46(10): 1817-1820.
- [39] 张永明, 钟景昌, 赵英杰, 等. 850nm 氧化物限制型 VCSEL 的温度特性[J]. *Journal of Semiconductors*, 2005(5): 1024-1027.
- ZHANG Y M, ZHONG J CH, ZHAO Y J, *et al.* Temperature characteristics of 850nm oxide confined VCSELs [J]. *Journal of Semiconductors*, 2005(5): 1024-1027. (in Chinese)
- [40] DI GAETANO E, WATSON S, MCBREARTY E, *et al.* Sub-megahertz linewidth 780.24 nm distributed feedback laser for ^{87}Rb applications[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(13): 3529.
- [41] COCQUELIN B, LUCAS-LECLIN G, GEORGES P, *et al.* Design of a low-threshold VECSEL emitting at 852nm for Cesium atomic clocks [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2008, 40(2): 167-173.
- [42] 刘金玉, 何军, 王军民. 852nm 窄带滤光片外腔反馈半导体激光器的优化[J]. *量子光学学报*, 2018, 24(1): 98-106.
- LIU J Y, HE J, WANG J M. Optimization of 852-nm external-cavity diode laser with narrow-bandwidth filter[J]. *Acta Sinica Quantum Optica*, 2018, 24(1): 98-106. (in Chinese)
- [43] KARACHINSKY L Y, NOVIKOV I I, SHERNYAKOV Y M, *et al.* High power GaAs/AlGaAs lasers (λ -850nm) with ultranarrow vertical beam divergence[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89(23): 231114.
- [44] 刘储. 脊型波导 852 nm 半导体激光器模式特性研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2017.
- LIU CH. *Fundamental Lateral Mode Characteristics of the 852 nm Ridge Waveguide Semiconductor Laser Diode* [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [45] 李耀斌, 李明, 邱平平, 等. 高功率低损耗 852 nm 法布里-珀罗激光器的研制[J]. *激光与光电子学进展*, 2022(3): 139-147.
- LI Y B, LI M, QIU P P, *et al.* Design of high power low loss 852 nm Fabry-Perot laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022(3): 139-147. (in Chinese)
- [46] 刘储, 关宝璐, 米国鑫, 等. 低阈值单横模 852

- nm 半导体激光器[J]. 物理学报, 2017, 66(8): 125-131.
- LIU CH, GUAN B L, MI G X, *et al.* A low threshold single transverse mode 852 nm semiconductor laser diode [J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(8): 125-131. (in Chinese)
- [47] 黄海华, 刘云, 杨晔, 等. 850nm 锥形半导体激光器的温度特性[J]. 中国光学, 2013(2): 201.
- HUANG H H, LIU Y, YANG Y, *et al.* Temperature characteristics of 850 nm tapered semiconductor lasers[J]. *Chinese Optics*, 2013(2): 201. (in Chinese)
- [48] 廖望如, 关宝璐, 李建军, 等. 低阈值 852nm 半导体激光器的温度特性[J]. 发光学报, 2017, 38(3): 331-337.
- LIAO Y R, GUAN B L, LI J J, *et al.* Thermal characteristics of the low threshold 852 nm semiconductor lasers[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2017, 38(3): 331-337. (in Chinese)
- [49] *Optical Amplifiers and Their Applications* [M]. Wiley, 1994.
- [50] SHIRAZ H G. Laser diode amplifier [J]. *John Wiley and Sons*, 1995.
- [51] DESURVIRE E, AMPLIFIERS E D F. Principles and applications[J]. 1994.
- [52] O' MAHONY M J. Semiconductor laser optical amplifiers for use in future fiber systems[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1988, 6(4): 531-544.
- [53] OLSSON N A. Semiconductor optical amplifiers [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1992, 80(3): 375-382.
- [54] SPIEKMAN L H. *Semiconductor Optical Amplifiers* [M]. Optical Fiber Telecommunications IV-A. Academic Press, 2002: 699-731.
- [55] YAMAMOTO Y. Characteristics of AlGaAs Fabry-Perot cavity type laser amplifiers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1980, 16(10): 1047-1052.
- [56] MUKAI T, YAMAMOTO Y, KIMURA T. S/N and error rate performance in AlGaAs semiconductor laser preamplifier and linear repeater systems [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1982, 18(10): 1560-1568.
- [57] SIMON J. GaInAsP semiconductor laser amplifiers for single-mode fiber communications[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1987, 5(9): 1286-1295.
- [58] ABGRALL M, CHUPIN B, DE SARLO L, *et al.* Atomic fountains and optical clocks at SYRTE: Status and perspectives [J]. *Comptes Rendus Physique*, 2015, 16(5): 461-470.
- [59] HEAVNER T P, JEFFERTS S R, DONLEY E A, *et al.* NIST-F1: recent improvements and accuracy evaluations [J]. *Metrologia*, 2005, 42(5): 411.
- [60] FANG F, LI M S, LIN P W, *et al.* NIM5 Cs fountain clock and its evaluation [J]. *Metrologia*, 2015, 52(4): 454.
- [61] LEVI F, CALONICO D, CALOSSO C E, *et al.* Accuracy evaluation of ITCsF2: a nitrogen cooled caesium fountain [J]. *Metrologia*, 2014, 51(3): 270.
- [62] BEATTIE S, JIAN B, ALCOCK J, *et al.* First accuracy evaluation of the NRC-FCs2 primary frequency standard [J]. *Metrologia*, 2020, 57(3): 035010.
- [63] SZYMANIEC K, PARK S E, MARRA G, *et al.* First accuracy evaluation of the NPL-CsF2 primary frequency standard [J]. *Metrologia*, 2010, 47(4): 363.
- [64] 魏荣, 李耀, 汪凌珂, 等. 冷原子微波频标的原理与发展[J]. 中国激光, 2024, 51(11): 1101019.
- WEI R, LI Y, WANG L K, *et al.* Principle and development of microwave frequency standards of cold atoms[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2024, 51(11): 1101019. (in Chinese)
- [65] GUÉNA J, WEYERS S, ABGRALL M, *et al.* First international comparison of fountain primary frequency standards via a long distance optical fiber link[J]. *Metrologia*, 2017, 54(3): 348.
- [66] PARTHEY C G, MATVEEV A, ALNIS J, *et al.* Improved measurement of the hydrogen 1S - 2S transition frequency [J]. *Physical Review Letters*, 2011, 107(20): 203001.
- [67] BAUCH A. Caesium atomic clocks: function, performance and applications [J]. *Measurement Science and Technology*, 2003, 14(8): 1159.
- [68] LI T C, LI M, LIN P W, *et al.* NIM4 cesium fountain primary frequency standard: performance and evaluation[C]. *Proceedings of the 2004 IEEE International Frequency Control Symposium and Exposition*, 2004. August 23-27, 2004, Montreal, QC, Canada. IEEE, 2005: 702-705.
- [69] 陈江, 李得天, 王骥, 等. 导航铯原子钟的发展现状

- 状及趋势[J]. 国际太空, 2016(4): 20-24.
- CHEN J, LI D T, WANG J, *et al.* Development and trend of navigation cesium atomic clock [J]. *Space International*, 2016(4): 20-24. (in Chinese)
- [70] 于佳亮. 通信同步网铯原子钟应用探讨[J]. 电信技术, 2017, (01): 79-81.
- YU J L. Application of cesium atomic clocks in telecommunication synchronization networks [J]. *Telecommunications Technology*, 2017, (01): 79-81. (in Chinese)
- [71] LOMBARDI M A. The use of GPS disciplined oscillators as primary frequency standards for calibration and metrology laboratories [J]. *NCSLI Measure*, 2008, 3(3): 56-65.
- [72] LIGERET V, BANSROPUN S, LECOMTE M, *et al.* Narrow spectral linewidth between 10°C and 90 °C for High-Power Al-Free Active Region DFB operating at 852nm for Atomic Clocks applications [C]. 2007 *European Conference on Lasers and Electro-Optics and the International Quantum Electronics Conference*. June 17-22, 2007, Munich, Germany. IEEE, 2007: 1.
- [73] 沈炎龙. 铯原子钟驱动源: 852 nm 可调谐光纤激光器研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2009.
- SHEN Y L. *Research on 852 nm Tunable Fiber Laser For Cs Atomic Clock Pumping Source* [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2009. (in Chinese)
- [74] 范利锋, 李源昊, 刘晨, 等. 国产激光管在磁选态光检测铯原子钟中的应用研究[J]. 计测技术, 2024, 44(3): 111-117.
- FAN L F, LI Y H, LIU CH, *et al.* Research on the application of domestic lasers in the optically detected magnetic-state-selection cesium atomic clock [J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2024, 44(3): 111-117. (in Chinese)

作者简介:



孙龙龙(1999—),男,河南驻马店人,硕士研究生,2023年于长春理工大学获得学士学位,主要从事半导体光电探测与激光技术的研究。E-mail: 1692674040@qq.com

通讯作者:



魏志鹏(1978—),男,吉林长春人,博士,教授,2000年于吉林大学获得学士学位,2008年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事半导体光电探测与激光技术的研究。E-mail: zpweicust@126.com

通讯作者:



张 聪(1990—),男,吉林白城人,博士后,副研究员,2015年、2018年于延边大学分别获得学士和硕士学位,2022年于东北师范大学获得博士学位,主要从事半导体光电探测与激光技术的研究。E-mail: czhang@cust.edu.cn