

1.5 μm 波段量子阱与量子点激光器的研究进展

刘兆悦, 曾丽娜, 许珂, 吴奇寒, 廖芯, 李再金, 赵志斌, 陈浩, 乔忠良, 曲轶, 刘国军, 李林*

海南师范大学, 物理与电子工程学院, 海南省激光技术与光电功能材料重点实验室, 海南 海口

收稿日期: 2021年8月12日; 录用日期: 2021年9月19日; 发布日期: 2021年9月26日

摘要

半导体激光器因其效率高、体积小、发光范围广、价格低廉等优势一直作为激光器中最重要、最实用的一类, 其中1.5 μm 附近是半导体激光器中非常重要的一个波段, 目前该波段已经在医疗、激光雷达、光纤通信、保密通信、军工等领域有广泛应用。1.5 μm 附近半导体激光器在结构上一般使用分布式反馈型和分布式布拉格光栅型结构, 在有源区上, 量子阱结构目前发展得最为成熟, 量子点结构也在不断研究过程中。本文围绕1.5 μm 波段的半导体激光器, 主要讨论量子阱激光器和量子点激光器, 其中包含DFB和DBR结构, 叙述纳米低维结构激光器的技术发展, 分析其技术特点, 对1.5 μm 波段的半导体激光器的技术发展趋势进行了展望。

关键词

半导体激光器, DBR, DFB, 量子阱, 量子点

Research Progress of Quantum Well and Quantum Dot Lasers in the 1.5 μm Band

Zhaoyue Liu, Lina Zeng, Ke Xu, Qihan Wu, Xin Liao, Zaijin Li, Zhibin Zhao, Hao Chen, Zhongliang Qiao, Yi Qu, Guojun Liu, Lin Li*

Key Laboratory of Laser Technology and Optoelectronic Functional Materials of Hainan Province, College of Physics and Electronic Engineering, Hainan Normal University, Haikou Hainan

Received: Aug. 12th, 2021; accepted: Sep. 19th, 2021; published: Sep. 26th, 2021

Abstract

Semiconductor lasers have always been the most important and practical class of lasers due to their high efficiency, small size, wide luminous range, and low price. Among them, near 1.5 μm is a

*通讯作者。

文章引用: 刘兆悦, 曾丽娜, 许珂, 吴奇寒, 廖芯, 李再金, 赵志斌, 陈浩, 乔忠良, 曲轶, 刘国军, 李林. 1.5 μm 波段量子阱与量子点激光器的研究进展[J]. 纳米技术, 2021, 11(4): 248-257. DOI: 10.12677/nat.2021.114028

very important band in semiconductor lasers. At present, this band has been widely used in medical, laser radar, optical fiber communication, confidential communication, military industry and other fields. 1.5 μm nearby semiconductor lasers generally use distributed feedback and distributed Bragg grating structures. In the active region, the quantum well structure is currently the most mature, and the quantum dot structure is also in the process of continuous research. This article focuses on semiconductor lasers in the 1.5 μm band, mainly discusses quantum well lasers and quantum dot lasers, including DFB and DBR structures, describes the technological development of nano low-dimensional structure lasers, analyzes its technical characteristics, and the technical development trend of 1.5 μm band semiconductor lasers is prospected.

Keywords

Semiconductor Laser, DBR, DFB, Quantum Well, Quantum Dot

Copyright © 2021 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

在激光领域, 1.5 μm 波段附近的激光已经有广泛应用, 其中 1.47 μm 波长的光比较容易被人体生物组织的血红蛋白和水吸收, 在医疗方面可以用来治疗前列腺增生的手术[1]和进行肿瘤切割[2]。1.5 μm 的激光位于人眼安全波段即对人眼损害较低, 并且处于大气传输窗口, 因此, 其在激光测距、激光雷达等方面有着广泛的应用[3] [4]。在光纤通信中有两个非常重要的窗口, 分别是 1310 nm 和 1550 nm, 其中 1550 nm 的光在光纤传输过程中损耗最低, 可以用于长距离光纤通信[5], 同时目前很多领域在 1550 nm 波段的光纤通信中需要对信息进行加密, 这里可以通过对激光器添加外光反馈的方式获得混沌输出, 混沌激光可以应用于高速真空密钥的产生, 从而 1550 nm 波段在保密通信中也有很多应用[6]。在战场中, 1.5 μm 附近的激光相比较 1064 nm 的激光穿透性更好, 表 1 列出了激光在各种环境下的消光系数。

Table 1. The mass extinction coefficient of the blurred object under different wavelength lasers

表 1. 不同波长激光下对模糊物的质量消光系数

波长(μm)	质量消光系数				
	白磷	六氯乙烷	油雾	柴油油雾	爆炸尘土
1.06	1.41	2.3	3.5	3.25	0.26
1.5	0.57	1.16	1.66	1.63	0.26

并且 1.5 μm 附近的激光对人眼伤害低, 对人眼的安全阈值是 1064 nm Nd:YAG 激光的 20 万倍, 表 2 列出了不同波长及其对应的人眼安全阈值。

Table 2. Eye safety thresholds under different wavelength lasers

表 2. 不同波长激光下的人眼安全阈值

波长(μm)	1.06	10.6	1.5
最大允许曝光量(J/cm^2)	说 5×10^{-6}	1×10^{-2}	1

同时 $1.5\ \mu\text{m}$ 的激光处于大气窗口, 在空气中的衰减较低, 在不同能见度条件下的大气吸收系数均低于 $1064\ \text{nm}$ 的激光。

在半导体激光器发展过程中, III-V 族化合物的发光范围已经可以从深紫外到远红外阶段, 其中 InP 材料的覆盖范围为 $1250\sim 1700\ \text{nm}$, 所以 InP 系化合物是获得 $1.5\ \mu\text{m}$ 附近激光的重要材料, 比较典型的有 InGaAsP/InP [7] [8] 和 AlGaAsSb/InP [9] [10] 等。半导体激光器在光子产生机理上一般可以分为双极型(PIN)和单极型等器件, 本文中 $1.5\ \mu\text{m}$ 波段所属的近红外光和常见可见光器件都是双极型器件, 在有源区结构上可以分为体材料、量子阱材料、量子点材料等, 在器件结构上可以分为 F-P 型、DFB 型、DBR 型等多种形式, 目前很多研究人员采用外腔结构对半导体激光器进行光束整形, 这样的确可以获得窄线宽激光, 但是其复杂的光学系统增加了激光系统的体积与质量, 并增大了激光系统的装调难度及制造成本。所以人们将光栅结构刻进半导体激光器中, 输出的激光经过选频后拥有波长稳定、窄线宽的特性, 并且激光器还可以在较宽范围内调谐, 其性能指标除了输出功率以外, 其他都比传统的 F-P 腔半导体激光器要高。

自组织量子点在光电器件领域有非常好的发展前景, 如激光器、光存储、探测器等方面越来越能体现出它的优越性。利用量子点作为激光器的有源区会具有很低的阈值电流、极高的特征温度、以及很高的微分增益和极窄的谱线宽度。 $1.5\ \mu\text{m}$ 波段量子点激光器预计比传统的 InP 基量子阱激光器具有更高的调制速率、更高的温度稳定性以及更低的成本, 极有可能成为下一代高速光通信局域网的光源。

2. 结构和原理

2.1. DBR-LD 和 DFB-LD

对于内置布拉格光栅的半导体激光器, 一般可以分为分布反馈型(DFB)半导体激光器和分布式布拉格光栅型(DBR)。DFB-LD 的布拉格光栅刻于谐振腔中, 由于周期性的光栅结构可以对激光进行波长选择和反馈, 这种结构输出激光的单纵模特性稳定[11]。DBR-LD 与其不同的是在谐振腔的端面制作布拉格光栅结构[12]。DBR 光栅具有强烈的波长选择性。来自谐振腔不同纵向模式的光波通过 DBR 光栅时, 可以满足布拉格条件的光反射回谐振腔参与谐振, 从而实现压窄激光线宽、稳定波长的目的[13]。在 $1.5\ \mu\text{m}$ 波长附近, DBR-LD 已经有较多报道。

为获得窄线宽、稳定输出的 $1.5\ \mu\text{m}$ 激光, 在选择合适的材料之后, 也需要对布拉格光栅提出一定的要求, 目前利用电子束光刻制作 DBR 光栅的工艺精度已小于 $10\ \text{nm}$ [14], 并且通过电感耦合等离子体刻蚀技术可以针对小尺寸图形实现高质量刻蚀, 如对 InP 材料中直径为 $200\ \text{nm}$ 的孔, 蚀刻深度高达 $3.5\ \mu\text{m}$, 对于 $40\ \text{nm}$ 的槽, 蚀刻深度可达 $1.8\ \mu\text{m}$ [15]。典型 DBR-LD 结构的结构如图 1 所示。

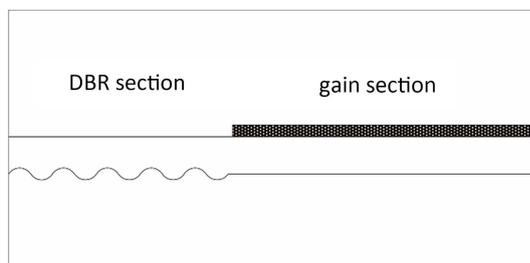


Figure 1. Typical DBR-LD structure

图 1. 典型 DBR-LD 结构

DFB-LD 主要是由上下限制层、上下波导、有源层和刻蚀在有源层或波导上的光栅组成。其中上下限

制层主要是为了把载流子限制在波导内,从而进行有效的受激辐射。有源区是发光区,对光波有放大作用,通常由两个垒层中间夹一个阱层组成如图 2 所示[16]。

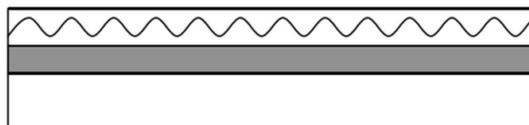


Figure 2. Typical DFB-LD structure
图 2. 典型 DFB-LD 结构

2.2. 量子阱和量子点结构

量子阱的基本特征是由于量子阱宽度的限制,导致载流子波函数在一维方向上的局域化,量子阱中因为有源层的厚度仅在电子平均自由程内,阱壁具有很强的限制作用,使得载流子只在与阱壁平行的平面内具有二维自由度,在垂直方向,使得导带和价带分裂成子带,在具有二维自由度的量子阱中,薄层的阱材料被两层势垒层包围,电子和空穴通常都处于能级最低的阱层。阱层厚度一般在 10 nm 左右,在这个量级的厚度上,电子和空穴的波动效应明显,在阱层厚度方向形成驻波而呈现量子化能级,因此称作量子阱。

量子点是一种重要的低维半导体材料,一般为球形或类球形,其直径常在 2~20 nm 之间。但是量子阱较量子点的 s 函数态密度大得多,非常适合作为载流子的收集层和储存层。所以将具有较大吸收截面的量子阱作为量子点的辅助结构是提高量子点收集效率的一条有效途径。其中不同材料的结构及其态密度如图 3 所示[17]。

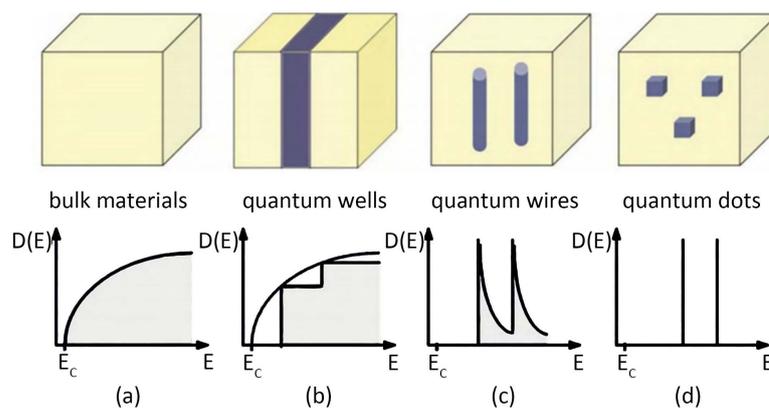


Figure 3. Schematic diagram of the structure and density of states of different materials

图 3. 不同材料的结构及其态密度示意图

3. ~1.5 μm 半导体激光器研究进展

3.1. 量子阱激光器

2010 年, Lu 等人提出了一种刻槽单模半导体激光器[18]。该激光器的有源层采用五量子阱,输出激光波长在 1545 nm 附近。刻槽单模激光器的三维结构示意图如图 4 所示。可以看出,激光器一侧有多个均匀分布的刻槽结构作为有源 DBR。刻槽结构的狭缝宽度为 1.1 μm ,狭缝深度为 1.35 μm ,共 24 对,使其成为一个 37 阶表面 DBR 光栅。这种刻槽单模半导体激光器具 13 mA 的阈值电流,可提供高达 47 dB 的 SMSR,转换效率约 90%。

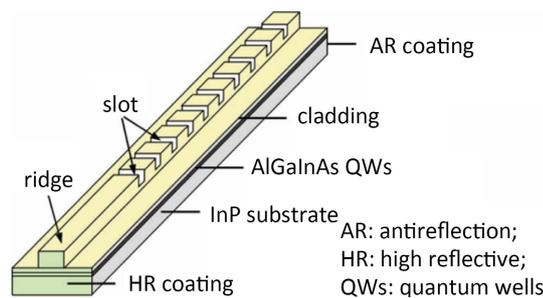


Figure 4. Schematic diagram of the structure of a grooved single-mode semiconductor laser

图 4. 刻槽单模半导体激光器结构示意图

2012 年, Chen 等人基于共振耦合腔的原理研制了双波长 DBR-LD。双波长 DBR-LD 的结构图如图 5 所示[19]。可以看出, 器件由 DBR 光栅、无源相位和有源增益 3 部分组成, 通过全息曝光和反应离子刻蚀形成 DBR 光栅。室温下, 当有源增益部分和 DBR 光栅部分的电流 I 分别为 100 mA 和 18.1 mA 时, 器件在 1534 nm 处实现了双波长激射, 模式间距为 0.596 nm, 2 个波长的峰值功率差为 0.22 dBm。

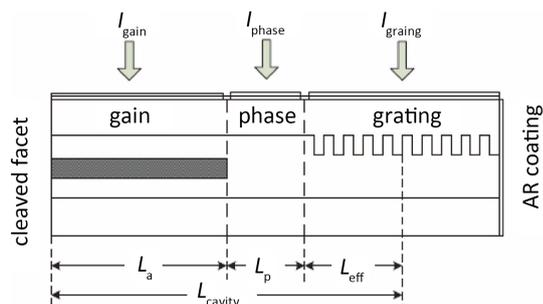


Figure 5. Schematic diagram of dual-wavelength DBR-LD structure

图 5. 双波长 DBR-LD 结构示意图

2017 年, Ludovico Megalini 等人报道了通过金属有机化学气相沉积, 1550 nm InGaAsP 多量子阱 (MQW) 结构[20], 这种结构在密集排列、光滑、高结晶和毫米长在绝缘体硅(SOI)基底上的 InP 纳米基盒中直接生长。团队通过光致发光、扫描电子显微镜和高分辨率 X 射线衍射表征, 将光宽比捕获和选择性面积生长技术与两步生长过程相结合, 获得良好的材料质量。其中透射电镜图像显示了明显的 MQW/InP 界面以及 MQW 层的厚度变化, 原子探针断层扫描分析证实了这一点, 这也表明了 MQW 结构中的各种 III-V 元素的均匀掺入。

同年, 该研究团队采用一种简单的两步生长技术, 通过金属有机化学气相沉积, 将化合物 III-V 在精确定向(001)硅(Si)基质上直接异质外延, 生长大面积 1550 nm 激光结构[21]。激光结构在一个单一的过度生长中生长, 而没有进行任何抛光的平面化。团队采用 X 射线衍射、光致发光、原子力显微镜和透射电子显微镜分析来表征外延材料, 制备了 PIN 二极管, 其发光波段如图 6 所示。

2018 年, SI ZHU 等人报道了第一个 InGaAs/InAlGaAs 多量子阱(MQW)激光器, 通过金属有机化学气相沉积(MOCVD)直接生长在凹槽(001)硅上[22]。在室温脉冲电流注入下, 阈值电流密度为 $J_{th} = 3.3 \text{ kA/cm}^2$, 首次达到接近 1.5 μm 的激光。在 20°C~40°C 范围内测量了高特征温 133 K 的 T_0 。

2019 年, 熊迪等人制备了 AlGaInAs/InP 材料 1.55 μm 小发散角量子阱激光器[9], 该激光器阈值电流

为 56 mA，输出功率为 17.38 mw@120 mA，斜率效率可以达到 0.272 W/A。

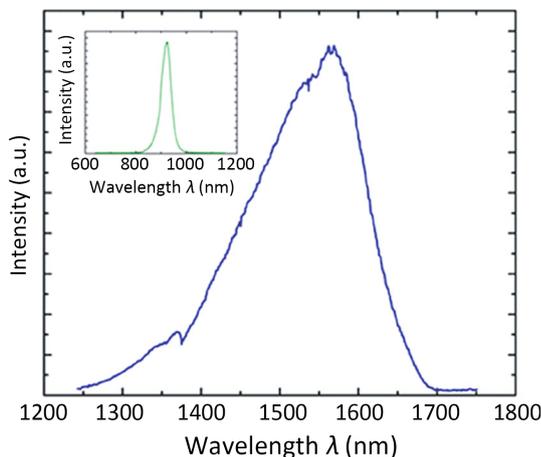


Figure 6. PIN diode light-emitting band diagram
图 6. PIN 二极管发光波段图

2020 年，中科院半导体研究所重点实验室的 Dai-Bing Zhou 等人使用两节式 InGaAsP/InP 分布式布拉格反射器封装出可以达到 10 Gb/s 数据传输 DBR 激光[23]。激光波长为 1550 nm，波长调谐范围为 12.12 nm。传输距离最远为 30 公里。其中增益部分的材料是 InGaAsP，由六个压应变的阱层和七个拉应变的垒层构成，量子阱结构夹在两个分离约束异质结(SCH)中，通过全息光刻技术制备了 DBR 光栅。

2020 年，Hongqiang Li 等人基于三层 Ge/Si 量子阱(QW)推出了波长为 1550 nm 的新型 IV 组侧发射激光器如图 7 所示[24]。激光发光功率在 300 mA 电流下在 1550 nm 的波长下可以达到 2.32 mW。

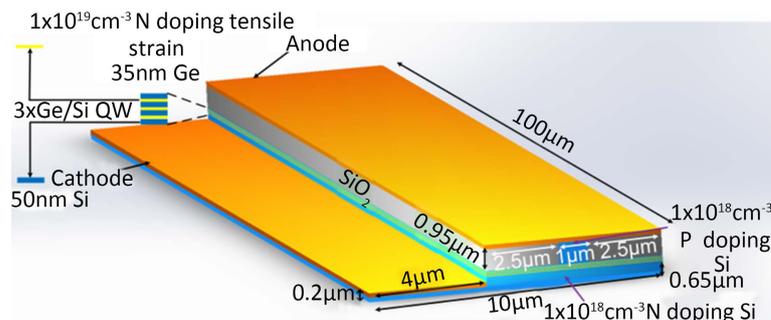


Figure 7. Ge/Si quantum well laser
图 7. Ge/Si 量子阱激光器

2021 年，N A Volkov 等人比较研究了基于 AlGaInAs/InP 异质结构的超窄非对称波导半导体激光器[25]。结果表明，使用这些波导同时增加量子阱深度可以增加输出功率，这种基于强不对称和超窄波导的激光器，在室温和连续波状态下，具有 100 μm 条纹接触宽度的输出功率为 5 W (泵浦电流分别为 11.5 A 和 14 A)。输出波长为 1450~1500 nm。

综上，InP 系材料作为制备 1.5 μm 附近波段量子阱激光器的主流选择，优化其材料生长质量、调整阱层和垒层的数量与厚度、调整上下波导的对称关系等手段可以降低阈值电流并提高输出功率。通讯器件使用 DBR 与 DFB 结构能够有效提高通讯质量，通过 MOCVD 将有源区材料集成与 Si 衬底可以用于新型超紧凑、低功率、纳米电子和光子设备及未来的远程和数据通信应用，也表明了采用这种大面积 InP-on-Si 衬底集成各种 III-V 激光二极管、光电探测器和高速晶体管的潜力。

3.2. 量子点激光器

1987年,世界上第一台以 GaInAsP/InP 量子阱材料的量子点激光器问世[26]。

2006年, Z.Mi 等人研究了 1.45 μm 变形 InAs 量子点隧道注入激光器在砷化镓上的分子束外延生长和特性[27]。实验发现在优化的生长条件下,量子点在室温下表现出光致发光线宽 30 meV 和高强度等特性。激光器的特点是超低阈值电流 63 A/cm², 大频率响应($f_{-3\text{dB}} = 8$ GHz), 并且接近零啁啾。

2008年,该研究团队报道了利用单步和多步分级的 InGaAs 变质缓冲层在砷化镓上生长的 1.5 μm InAs 量子点激光器的分子束外延生长和特性[28]。1.45 μm P 掺杂和隧道注入 InAs 变形量子点激光器生长在单步 In_{0.15}Ga_{0.85}As 缓冲层上,显示出超低阈值电流($J_{\text{th}} \sim 63$ A/cm²), 大调制频率响应($f_{-3\text{dB}} = 8$ GHz), 近零参数的啁啾, 长寿命(~ 2000 h)的特性。在多步分级 InGaAs 变质缓冲层上生长的 InAs 量子点激光器的激光波长也首次扩展到 1.52 μm 。

2016年,德国卡塞尔大学的 Saddam Banyoudeh 等人基于改进的 1.5 μm InAs/InGaAlAs/InP QD 增益材料,制备了短腔脊波导激光器。空腔长度为 230~338 μm , 器件背面有高反射涂层,结果显示在 14 $^{\circ}\text{C}$ 时获得的记录值,无论信号调制性能分别高达 15 GHz 和 36 GBit/s $^{\circ}\text{C}$ 。由于阈值电流的高温稳定性和外部差分效率,激光器在 14 $^{\circ}\text{C}$ ~60 $^{\circ}\text{C}$ 之间也表现出几乎恒定的调制带宽。

同年,该研究团队采用固体源分子束外延(SSMBE)技术制备了基于 InP 衬底的自组织 InAs 量子点(QD)激光器[29]。以 6 个点密度高、点尺寸高度均匀的 InAs QD 层作为活性介质,对不同空腔长度的宽面积(BA)和脊波导(RWG)激光器进行了处理和表征,并研究了生长后快速热退火(RTA)过程对激光特性的影响。激光器每点层的高模态增益为 12~14.5 cm⁻¹, 无限空腔长度的阈值电流密度为 120 A/cm²。在脉冲操作中,空腔长度为 292 μm 的如裂解 BA 激光器最多可达 120 $^{\circ}\text{C}$ 。用 $T_0 = 125$ K (20 $^{\circ}\text{C}$ ~45 $^{\circ}\text{C}$)和 $T_0 = 100$ K~120 $^{\circ}\text{C}$ 获得高特征温度值。在 0.28 W/A 左右的坡度效率可以在高达 100 $^{\circ}\text{C}$ 的宽工作温度范围内保持不变。安装的 RWG 激光器空腔长,在脉冲模式下工作,在 15 $^{\circ}\text{C}$ 时最大输出功率为 120 mW,斜率效率为 0.42 W/A。该激光器可以在 150 $^{\circ}\text{C}$ 下工作,输出功率为 25 mW。这些结果很好地表明,在几乎理想的 QD 激光器中预期的温度不敏感的激光性能,其外延层结构及其组分如图 8 所示。

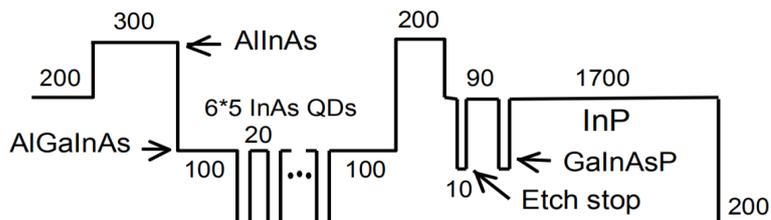


Figure 8. Schematic diagram of epitaxial layer structure and its composition

图 8. 外延层结构及其组分示意图

2017年,该研究团队基于改进的 QD 外延,减小了非均匀的尺寸分布,得到了在 15 GHz 以上的小信号调制带宽和高达 35 GBit/s 的数字调制中的记录值[30]。由于高模态增益和稳健的基态转变,当 $T_0 = 125$ K 和 T_1 的特征温度接近 400 K 时,激光性能的温度依赖性可以大大提高。这使得 15 $^{\circ}\text{C}$ ~60 $^{\circ}\text{C}$ 之间的温度稳定调制带宽足以进行 25 GBit/s 的数字调制。

同年, Zubov 等成功制备出发射波长 1.5 μm 的 InP 基 QDW 激光器,并将 InGaAsP 作为间隔层和波导层,得到特征温度 T 与波导层带隙宽度的关系[31]。

2018年, Zhanguo Li 等人通过分子束外延(MBE)在 GaAs 上生长应变 Sb 多堆叠量子点[32]。在室温下, p 型掺杂可以大大提高 QD 激光器的基态增益。LD 的腔长度为 1000 μm , 条带宽度为 100 μm 。在 20 $^{\circ}\text{C}$

至 80℃ 的温度范围内，器件的阈值电流密度低至 135 A/cm²，并且具有 118 K 以上的特性温度。在室温下获得了高达 32 mW 的连续波，激光器和材料结构如图 9 所示。

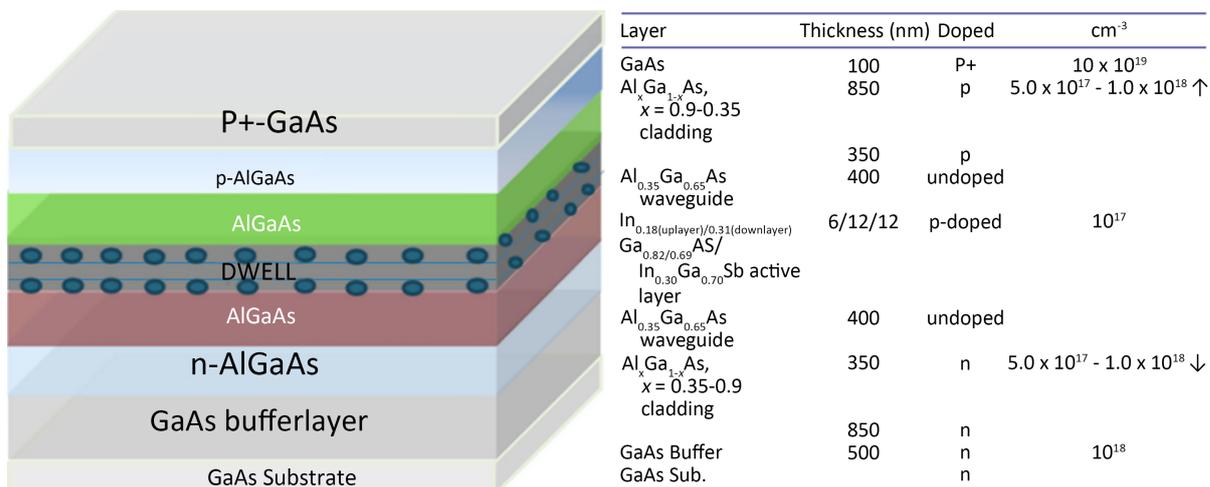


Figure 9. Sb/GaAs quantum dot laser structure and its material composition

图 9. Sb/GaAs 量子点激光器结构及其材料组分

2020 年，Hongqiang Li 等人构造了基于 Si 的 QD 阵列激光器[33]。结果表明，在 2.5 V 电压下，激光功率为 5.31 微瓦，室温下激光波长达到 1519.4 nm，激光器结构如图 10 所示。

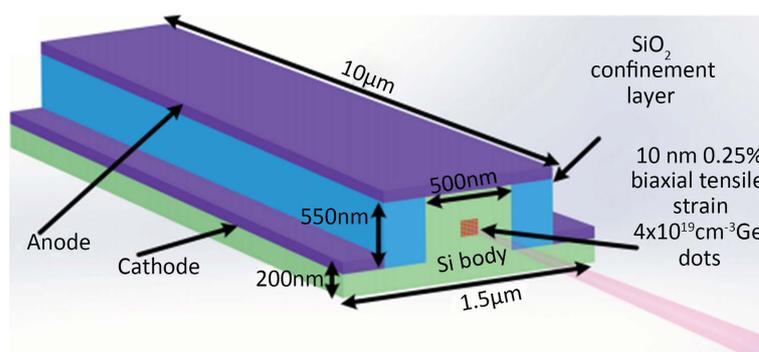


Figure 10. Ge/Si quantum dot laser structure

图 10. Ge/Si 量子点激光器结构

2021 年，Mingxuan Zhang 等人提出了在 InP 平台上通过迁移增强外延和液相外延手段生长 GaAsBi 量子点(QD)/InAlAs 结构来制造 1.55 μm 激光二极管[34]。研究中发现 Bi 掺入可以减小 GaAs_{1-x}Bi_x 的带隙。结果显示在 Bi 含量为 10.5% 的情况下，GaAsBi 预计会在 1.55 μm 处发光。在这项工作中，他们使用有限元方法计算不同 Bi 含量和 QD 尺寸的应变分布和能带结构，发现高 Bi 含量和大 QD 尺寸有利于实现长波长。例如直径为 30 nm，高度为 6 nm，可以发射 1.55 μm 的激光。

综上，通过在 InP 系材料上生长 InAs 量子点是研究制备 1.5 μm 附近波段激光器件较为广泛与成熟的手段。上述研究中器件都拥有较高的特征温度和较宽的调制带宽，说明优化量子点生长质量与样貌可以有效降低温度对激光器的影响。使用其他如 Sb、Bi、Si 等作为掺杂材料或者直接作为量子点材料也可以制备 1.5 μm 附近波段通讯器件，如基于 GaAsBi 的 1.55 μm 激光二极管。除了改进优化材料生长的技术与设备，寻找其他材料及研究其掺杂浓度也是未来获取性能更好的光电器件的挑战与机遇。虽然理论上

半导体量子点激光器应比传统的量子阱激光器有许多优越的性能,如较高的温度稳定性,而实际上量子点激光器的输出特性与温度有强烈的依赖关系。

4. 结论与展望

在 1.5 μm 附近的通信波段,激光器中加入 DBF 和 DBR 结构对半导体激光器的线宽、功率相比较传统 FP 结构有很大提升,并且可以调谐,提高了通信效率。1.5 μm 附近波段使用 InP 系发光材料的量子阱激光器已经发展得比较成熟,对于未来 1.5 μm 附近波段半导体激光器的前景,首先可以优化量子点生长条件,减小界面缺陷的同时使之尺寸更均匀。如果将硅基量子点结构和量子阱结构结合起来将制备出阈值电流更低、温度稳定度更高的激光器。

基金项目

海南省科技项目(ZDYF2020217, ZDYF2020020, ZDYF2020036), 海南省自然科学基金(2019RC190, 2019RC192, 120MS031), 海南省高等学校科学研究项目(Hnky2020ZD-12, Hnky2020-24), 海南省高等学校教学改革项目(Hnjg2021ZD-22), 国家自然科学基金项目(62064004, 61964007, 61864002), 海南省重大科技计划项目(ZDKJ2019005), 中国工程科技发展战略项目(19-HN-XZ-07), 大学生创新训练项目和大学生创新创业开放基金(榕树基金)资助, 大学生创新训练项目(202111658013)和大学生创新创业开放基金(榕树基金 202111658021X)。

参考文献

- [1] 么安亮, 席文娟, 刘健, 等. 1470 nm 半导体激光治疗良性前列腺增生 68 例分析[J]. 中国煤炭工业医学杂志, 2015(7): 72-74.
- [2] 季健, 普超, 朱元全, 等. 高龄高危患者 1470 nm 半导体激光膀胱肿瘤切除术安全性探讨[J]. 局解手术学杂志, 2018, 27(12): 25-29.
- [3] Lisinetskiiva, Y., Eichlerhj, H., Rhee, H., *et al.* (2008) The Generation of High Pulse and Average Power Radiation in Eye-Safe Spectral Region by the Third Stokes Generation in Barium Nitrate Raman Laser. *Optics Communications*, **281**, 2227-2232. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2007.12.016>
- [4] Cheny, F. (2004) Compact Efficient All-Solid-State Eye-Safe Laser with Self-Frequency Raman Conversion in a Nd:YVO₄ Crystal. *Optical Letters*, **29**, 2172-2174. <https://doi.org/10.1364/OL.29.002172>
- [5] 刘丽杰, 吴远大, 王玥, 王亮亮, 安俊明, 赵有文. 面向长距离通讯 1550 nm 垂直腔面发射激光器的研究(英文)[J]. 红外与毫米波学报, 2020, 39(4): 397-400.
- [6] Paul, J., Lee, M.W. and Shore, K.A. (2005) 3.5-GHz Signal Trans-Mission in an All-Optical Chaotic Communication Scheme u-Sing 1550 nm Diode Lasers. *IEEE Photonics Technology Letters*, **17**, 920-922. <https://doi.org/10.1109/LPT.2004.843281>
- [7] Zhou, D.B., *et al.* (2020) A 10 Gb/s 1.5 μm Widely Tunable Directly Modulated InGaAsP/InP DBR Laser. *Chinese Physics Letters*, **37**, 26-29.
- [8] Ke, Q., *et al.* (2015) Fabrication and Optimization of 1.55 μm InGaAsP/InP High-Power Semiconductor Diode Laser. *Journal of Semiconductors*, **36**, 93-96.
- [9] 熊迪, 郭文涛, 郭小峰, 刘海峰, 廖文渊, 刘维华, 张杨杰, 曹营春, 谭满清. 1.55 μm AlGaInAs/InP 小发散角量子阱激光器的仿真和制备(英文)[J]. 红外与毫米波学报, 2019, 38(4): 412-418.
- [10] Gorlachuk, P.V., Ryaboshtan, Y.L., Ladugin, M.A., *et al.* (2013) 1.5 to 1.6 μm Pulsed Laser Diode Bars Based on Epitaxially Stacked AlGaInAs/InP Heterostructures. *Quantum Electronics*, **43**, 822-823. <https://doi.org/10.1070/QE2013v043n09ABEH015283>
- [11] 仕均秀, 秦莉, 叶淑娟, 等. 具有表面二阶金属光栅的 927 nm 分布反馈半导体激光器的研制[J]. 光电子·激光, 2011, 22(10): 1488-1491.
- [12] 贾宝山, 王皓, 李爱民, 等. 窄线宽 1064 nm 分布布拉格反射半导体激光器[J]. 中国激光, 2018, 45(5): 0501006.
- [13] Cui, K.Y., Li, Y.Z., Feng, X., *et al.* (2013) Fabrication of High-Aspect-Ratio Double-Slot Photonic Crystal Waveguide in InP Heterostructure by Inductively Coupled Plasma Etching Using Ultra-Low Pressure. *AIP Advances*, **3**, Article ID: 022122. <https://doi.org/10.1063/1.4793082>

- [14] Hu, C., Wang, X.P., You, C., *et al.* (2017) Application of High Resolution Electron Beam Lithography Technology in Micro- and Nano-Fabrication. *Electronics & Packaging*, **17**, 28-32, 36.
- [15] 范杰, 龚春阳, 杨晶晶, 邹永刚, 马晓辉. 分布布拉格反射器半导体激光器的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(6): 34-48.
- [16] 李杨, 冯源, 李洋, 张昕, 岳光礼, 王志伟, 谢检来, 王霞, 郝永芹. 大功率分布反馈半导体激光器研究进展[J]. 微纳电子技术, 2018, 55(6): 388-396+407.
- [17] 吕尊仁, 张中恺, 王虹, 丁芸芸, 杨晓光, 孟磊, 柴宏宇, 杨涛. 1.3 μm 半导体量子点激光器的研究进展[J]. 中国激光, 2020, 47(7): 222-237.
- [18] Lu, Q.Y., Guo, W.H., Byrne, D., *et al.* (2010) Design of Slotted Single-Mode Lasers Suitable for Photonic Integration. *IEEE Photonics Technology Letters*, **22**, 787-789. <https://doi.org/10.1109/LPT.2010.2045888>
- [19] Chen, C., Zhao, L.J., Qiu, J.F., *et al.* (2012) Dual-Wavelength Distributed Bragg Reflector Semiconductor Laser Based on a Composite Resonant Cavity. *Chinese Physics B*, **21**, Article ID: 094208. <https://doi.org/10.1088/1674-1056/21/9/094208>
- [20] Megalini, L., Bonif, B., Cabinian, B.C., *et al.* (2017) 1550-nm InGaAsP Multi-Quantum-Well Structures Selectively Grown on *v*-Groove-Patterned SOI Substrates. *Applied Physics Letters*, **111**, Article ID: 032105. <https://doi.org/10.1063/1.4994318>
- [21] Megalini, L., Cabinian, B.C., Zhao, H., *et al.* (2018) Large-Area Direct Hetero-Epitaxial Growth of 1550-nm InGaAsP Multi-Quantum-Well Structures on Patterned Exact-Oriented (001) Silicon Substrates by Metal Organic Chemical Vapor Deposition. *Journal of Electronic Materials*, **47**, 982-987. <https://doi.org/10.1007/s11664-017-5887-9>
- [22] Zhu, S., Shi, B., Li, Q., *et al.* (2018) Room-Temperature Electrically-Pumped 1.5 μm InGaAs/InAlGaAs Laser Monolithically Grown on On-Axis (001) Si. *Optics Express*, **26**, 14514-14523. <https://doi.org/10.1364/OE.26.014514>
- [23] Zhou, D.-B., Liang, S., Wang, H.-T., *et al.* (2019) Analysis and Optimization of 1.5- μm InGaAsP/InP MQWs Electroabsorption Modulator. *Optik*, **182**, 1088-1092. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.02.011>
- [24] Li, H., Wang, J., Bai, J., Zhang, S., Zhang, S., Sun, Y., Dou, Q., Ding, M., Wang, Y., Qu, D., Du, J., Tang, C., Li, E. and Prades, J.D. (2020) The Structural, Electronic, and Optical Properties of Ge/Si Quantum Wells: Lasing at a Wavelength of 1550 nm. *Nanomaterials*, **10**, 1006. <https://doi.org/10.3390/nano10051006>
- [25] Volkov, N.A., Svetogorov, V.N., Ryaboshan, Y.L., *et al.* (2021) Comparison of AlGaInAs/InP Semiconductor Lasers ($\lambda = 1450\text{-}1500\text{ nm}$) with Ultra-Narrow and Strongly Asymmetric Waveguides. *Quantum Electronics*, **51**, 283. <https://doi.org/10.1070/QEL17540>
- [26] Miyamoto, Y., Cao, M., Shingai, Y., *et al.* (1987) Light Emission from Quantum-Box Structure by Current Injection. *Japanese Journal of Applied Physics*, **26**, L225-L227. <https://doi.org/10.1143/JJAP.26.L225>
- [27] Mi, Z., Bhattacharya, P. and Yang, J. (2006) Growth and Characteristics of Ultralow Threshold 1.45 μm Metamorphic InAs Tunnel Injection Quantum Dot Lasers on GaAs. *Applied Physics Letters*, **89**, Article ID: 153109. <https://doi.org/10.1063/1.2358847>
- [28] Mi, Z., Wu, C., Yang, J., *et al.* (2008) Molecular Beam Epitaxial Growth and Characteristics of 1.52 μm Metamorphic InAs Quantum Dot Lasers on GaAs. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, **26**, 1153-1156. <https://doi.org/10.1116/1.2889386>
- [29] Banyoudeh, S., Abdollahinia, A., Eyal, O., *et al.* (2016) High-Speed Directly Modulated 1.5- μm Quantum Dot Lasers. *Novel In-Plane Semiconductor Lasers XV*, **9767**, Article ID: 97670L. <https://doi.org/10.1117/12.2209095>
- [30] Banyoudeh, S., Eyal, O., Abdollahinia, A., *et al.* (2017) High-Bandwidth Temperature-Stable 1.55- μm Quantum Dot Lasers. *Novel In-Plane Semiconductor Lasers XVI*, **10123**, Article ID: 1012306. <https://doi.org/10.1117/12.2255749>
- [31] Zubov, F.I., Semenova, E.S., Kulkova, I., *et al.* (2017) On the High Characteristic Temperature of an InAs/GaAs/InGaAsP QD Laser with an Emission Wavelength of 1.5 μm on an InP Substrate. *Semiconductors*, **51**, 1332-1336. <https://doi.org/10.1134/S1063782617100207>
- [32] Li, Z.G., Wang, Y., You, M.H., *et al.* (2019) High Characteristic Temperature 1.5 μm Wavelength Laser Diode via Sb-Based Quantum Dots in Quantum Wells. *Journal of Modern Optics*, **66**, 643-646. <https://doi.org/10.1080/09500340.2018.1559952>
- [33] Li, H., Wang, J., Bai, J., Zhang, S., Zhang, S., Sun, Y., Prades, J.D., *et al.* (2020) Room-Temperature 1550-nm Lasing from Tensile Strain N-Doped Ge Quantum Dots on Si. *Journal of Modern Optics*, **67**, 1-8. <https://doi.org/10.1080/09500340.2020.1811412>
- [34] Zhang, M., Zhang, L., Zhang, Z., *et al.* (2021) GaAsBi Quantum Dots for 1.55 μm Laser Diode. *Electronic Materials Letters*, **17**, 181-187. <https://doi.org/10.1007/s13391-020-00262-9>