

文章编号: 1000-7032(2023)09-1621-15

红外波段超辐射发光二极管研究进展

杨静航, 晏长岭*, 刘云, 李奕霏, 冯源, 郝永芹, 李辉, 逢超

(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 130022)

摘要: 超辐射发光二极管(SLD)具有高功率、宽光谱和低相干性等光学特性,在光纤通信、工业国防、生物影像和痕量气体检测等领域具有极高的应用价值。本文聚焦于SLD的输出功率与光谱宽度特性,综合评述了量子阱、量子点近红外SLD与量子级联中红外SLD的研究进展。详细介绍了InP基量子短线、混合量子点量子阱与异维量子点量子阱等新型有源结构,以及量子点掺杂与区域混杂等相关工艺技术。最后,概述了SLD的应用前景,并对SLD的潜在研究方向和技术发展应用趋势进行了展望。

关键词: 超辐射发光二极管; 量子阱; 量子点; 量子级联; 光学相干层析成像

中图分类号: TN312.8 文献标识码: A DOI: 10.37188/CJL.20230064

Research Progresses on Infrared Superluminescent Diodes

YANG Jinghang, YAN Changling*, LIU Yun, LI Yifei, FENG Yuan, HAO Yongqin, LI Hui, PANG Chao

(State Key Laboratory on High-power Semiconductor Lasers, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

* Corresponding Author, E-mail: changling_yan@126.com

Abstract: Superluminescent diode (SLD) has optical characteristics such as high power, wide spectrum and low coherence, and has high application value in the fields of optical fiber communication, industrial defense, biological imaging and trace gas detection. This paper focuses on the output power and spectral bandwidth characteristics of SLD, and comprehensively reviews the research progress of quantum well, quantum dot near-infrared SLD and quantum cascade mid-infrared SLD. Among them, the novel active structure of InP based quantum dash, hybrid quantum well/quantum dots and hybrid quantum well-dots, as well as quantum dot doping and selective area intermixing are introduced in detail. Finally, the application prospects of SLD are outlined, and the potential research directions and technological application trends of SLD are discussed.

Key words: superluminescent diode; quantum well; quantum dot; quantum cascade; optical coherence tomography

1 引 言

超辐射发光二极管(SLD)是一种光学性质介于激光二极管(LD)和发光二极管(LED)之间的半导体光源,具有比LD更宽的发光光谱和更短的相干长度、比LED更高的输出功率和更高的调制带宽。SLD发光原理与LD类似,都是利用其内部放大的自发辐射。与LD不同的是,SLD器件会

采取一定的抑制光学反馈的措施(如“J”形波导、斜波导、无源吸收区与腔面膜工艺技术等),抑制光在器件腔面之间传播时的激光振荡与选模,实现宽光谱高功率发光。在Kurbotov等提出自发单程放大现象的理论基础上^[1],1973年,美国贝尔实验室Lee等首次成功研制了AlGaAs/GaAs双异质结SLD器件^[2],SLD进入了一个迅速发展的新阶段。随着理论研究^[3-4]与制备工艺的不断改进,

收稿日期: 2023-03-05; 修订日期: 2023-04-16

基金项目: 吉林省科技厅项目(20220101122JC); 长春理工大学项目(6270111102)

Supported by Project of Department of Science and Technology of Jilin Province (20220101122 JC); Project of Changchun University of Science and Technology (6270111102)

SLD有源结构经历了三维体材料、二维量子阱^[5]、零维量子点^[6]、一维量子线^[7]以及混合结构的演进,SLD外延结构先后发展了AlGaAs/GaAs、InGaAlAs/InP、InGaSb/GaSb和InGaN/GaN^[8]等典型材料体系,SLD发光波长从~850 nm近红外波段拓展到~7 μm 中红外波段与~420 nm蓝紫光波段^[9-10]。

高功率和宽光谱是SLD器件的关键性特征。然而,同时实现高功率和宽光谱是相对困难的。在半导体器件的发射机制中,半导体增益介质中随机产生的自发辐射通过受激增益过程放大。受激增益过程中产生的光子具有相同的相位、频率以及偏振特性,故受激增益的光谱宽度比自发辐射的光谱宽度小得多。随着器件中注入电流的增大,SLD受激增益变大导致输出功率增加,同时降低了光谱宽度。这意味着SLD在高功率和宽光谱之间存在权衡关系。

本文聚焦于SLD的输出功率与光谱宽度特性,分别阐述了量子阱、量子点近红外SLD与量子级联中红外SLD的材料体系、外延结构、器件结构、工艺技术、研究成果及现存问题。其中,量子阱SLD分别从GaAs衬底、InP衬底与GaSb衬底三个角度展开论述,并特别介绍了InP基量子短线有源结构;量子点SLD分别从阱中点、啁啾多层量子点、量子点量子阱混合和异维量子点-量子阱四种有源结构展开论述,并单独介绍了量子点掺杂技术与选择区域混杂技术。最后,概述了红外波段SLD的应用前景,并展望了SLD今后可能的发展趋势与方向。

2 量子阱超辐射发光二极管研究进展

进入20世纪80年代以来,随着分子束外延(MBE)和金属有机化学气相沉积(MOCVD)等晶体外延技术的迅速发展,量子阱(QW)有源结构SLD开始成为宽光谱领域的研究热点,常采用的几种量子阱能带结构如图1所示。

图1(a)为单量子阱(SQW)能带结构示意图,由于单量子阱材料高增益特性,单量子阱SLD极易得到较高的功率输出。但是,由于单量子阱对非平衡载流子的收集能力较弱,SQW SLD器件温度稳定性不理想。当较大电流注入时,单量子阱子能级跃迁导致输出光谱中出现多个峰包凸起,使SLD器件光谱波纹与光谱稳定性急剧下降。图

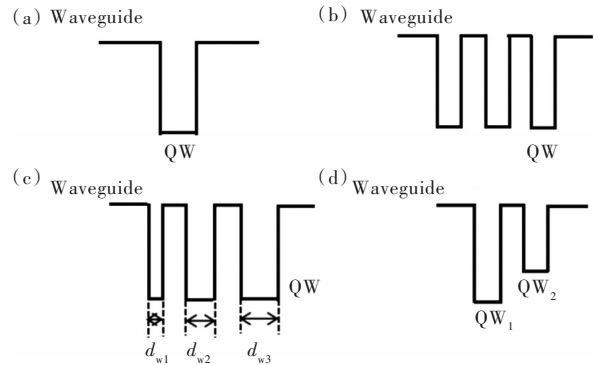


图1 量子阱能带结构示意图。(a)单量子阱;(b)多量子阱;(c)不同阱宽的多量子阱;(d)非对称双量子阱。

Fig.1 Schematic diagram of quantum well band structure. (a)Single quantum well. (b)Multi-quantum well. (c) Multi-quantum wells with different well width. (d) Asymmetric double quantum well.

1(b)为多量子阱(MQW)能带结构示意图,多量子阱能够缓解子能级跃迁对光谱稳定性的影响。同时,MQW SLD在远场分布^[11]与器件寿命^[12]等方面表现出巨大潜力。在MQW SLD的基础上,利用不同阱宽或不同增益波长的SQW连接形成的MQW有源结构,在拓展器件谱宽方面具有显著效果,图1(c)为不同阱宽 d_w 的多量子阱能带结构示意图,图1(d)为不同增益波长的非对称双量子阱(DQW)能带结构示意图。另外,利用量子阱和垒材料晶格常数失配形成的应变量子阱有源结构也得到了广泛的应用,如张应变QW SLD易于获得低偏振性光束、压应变QW SLD易于获得较大的光学增益与量子效率^[13-14]。

量子阱SLD研究热点主要集中在实现高功率和宽光谱输出。在提高QW SLD输出功率方面,增大SLD有源区域的体积^[15]是提高SLD输出功率最为简单直接的方法。这种方法常采用的手段有多模干涉有源(Active-MMI)器件结构^[16]与锥形腔器件结构等,但这种方法会在有源区内产生多种空间模式,导致发射光谱形状对注入电流具有强烈依赖性。其次,优化量子阱外延材料体系与利用应变量子阱结构等手段提高电流的注入效率^[17],进而提高QW SLD的输出功率,但这种方法对外延工艺要求较高。另外,阵列集成技术^[18]也能够有效提高SLD输出功率,但这种方法需要考虑光束整形与器件散热问题。

在拓宽SLD光谱宽度方面,不同阱宽或不同增益波长的多量子阱有源结构是最为普遍且有效的方法^[19],但这种方法拓宽光谱的能力有限。其

次,量子阱混杂技术产生带隙渐变 QW 结构^[20]能够拓展 SLD 光谱宽度,但实现量子阱混杂技术的离子注入工艺或激光加热工艺等工艺难度大、稳定性低。第三,降低量子阱内多种模式间的竞争,充分发挥量子阱子能级跃迁对 SLD 光谱宽度的贡献,常用的手段有多量子阱有源结构^[21]、非对称波导包层结构^[22]以及多段紧凑器件结构^[23],但这种方法会导致光谱波纹增大、光谱稳定性降低。另外,利用宽带光纤耦合器的空间合束技术也能够有效拓展 SLD 光谱宽度,但这种方法外部设备过多且系统复杂。

目前,量子阱 SLD 能够实现 0.6~2.6 μm 近红外波段的输出。量子阱 SLD 的有源区材料大多由 III~V 族半导体化合物材料组成,材料组成体系与发光波长如图 2 所示,不同的材料体系与不同组分导致发光中心波长不同。以下将分别详细介绍 GaAs 基量子阱 SLD、InP 基量子阱 SLD 以及 GaSb 基量子阱 SLD 的研究进展。

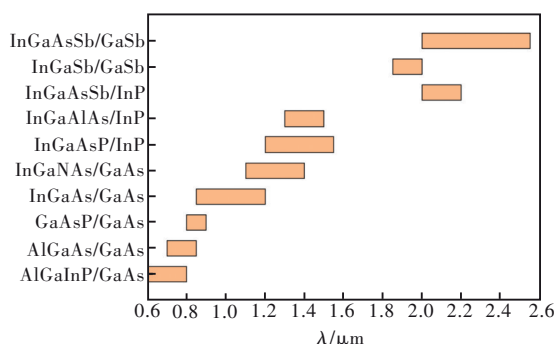


图2 量子阱 SLD 发光波长与材料体系关系图

Fig.2 Relationship between luminescence wavelength and material system of quantum well SLD

2.1 GaAs 基量子阱超辐射发光二极管

自 Paoli 等成功研制了高功率 AlGaAs 量子阱 SLD 器件^[24]开始, GaAs 基量子阱 SLD 器件得到了

迅速发展与广泛应用。早期 GaAs 基 QW SLD 主要采用 AlGaAs/GaAs 材料体系, ~850 nm 波段 AlGaAs/GaAs 材料体系 QW SLD 相关工艺技术发展相对比较成熟^[25],并在检测领域得到了广泛的应用。近年来, InGaAs/GaAs 材料体系 QW SLD 得到了广泛研究,已经实现在 ~1.0 μm 波段高性能输出^[26]; Ohgoh 等优化非对称 InGaAs 双量子阱(DQW)之间的发射波长差,能带结构示意图如图 1(d)所示,获得了光谱半高全宽(FWHM)77.5 nm 的 SLD 器件^[19],为当前该波段 QW SLD 最大光谱 FWHM; Duan 等利用该材料体系研制了调制带宽高达 1.7 GHz 的 SLD 器件^[27]; Kiethe 等利用该材料体系研制了二阶相干特性低至 $g^{(2)}(0) \approx 1.2$ 的 SLD 器件^[28]。

GaAsP/GaAs 材料体系在 QW SLD 偏振特性研究方面表现出巨大优势, Liu 等研制了 0.8 μm 张应变 $\text{GaAs}_{0.92}\text{P}_{0.08}/\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$ 双量子阱有源结构 SLD 器件,器件测试结果表明偏振度降低为 4%^[29]。 GaInNAs/GaAs 材料体系在 QW SLD 高功率输出方面表现出巨大潜力, Aho 等研制了 GaInNAs/GaAs 单量子阱 SLD,室温连续波条件下允许 2 000 mA 高电流注入,在 1.2 μm 波段连续输出功率高达 418 mW,为该波段当前最高功率输出水平^[17]。同时,长春理工大学高功率半导体激光实验室自 2006 年开始 GaAs 基 QW SLD 相关工艺技术研究^[30-31],并取得了 ~850 nm 波段非均匀 MQW SLD 室温连续输出功率 14.36 mW^[32]、~970 nm 波段非均匀 MQW SLD 室温连续输出功率 74 mW^[33] 的成果。目前, AlGaInP/GaAs、AlGaAs/GaAs、InGaAs/GaAs、GaAsP/GaAs、GaInNAs/GaAs 等材料体系 QW SLD 能够实现 0.6~1.3 μm 波段高性能输出,表 1 归纳了 GaAs 基量子阱 SLD 的输出性能。

表 1 GaAs 基量子阱 SLD 研究进展

Tab. 1 Research progress on GaAs-based quantum well SLD

研究机构	工作条件	增益结构	波长/nm	功率/mW	FWHM/nm	年份	参考文献
Opton LLC	CW, 20 °C	AlGaInP MQW	675	40	15	2017	[11]
Tampere University	CW, 20 °C	GaInNAs SQW	1 160	418	22	2019	[17]
FUJIFILM Corporation	CW, RT	InGaAs DQW	1 050	33.4	77.5	2013	[19]
重庆光电研究所	CW, 25 °C	InGaAs DQW	1 053	2.5	24	2014	[27]
	CW, RT	GaAsP DQW	824	11.2	25	2018	[29]
长春理工大学	CW, RT	AlGaAs MQW	850	14.63	22	2018	[32]
	CW, RT	InGaAs MQW	970	74	24	2022	[33]

2.2 InP基量子阱超辐射发光二极管

InP基 QW SLD 通常采用 AlGaInAs/InP 材料体系与 GaInAsP/InP 材料体系, 实现在 1.3~1.6 μm 波段发光。由于 InP 基量子阱结构中电子、空穴波函数重叠较少以及自发辐射效率低的问题, InP 基 QW SLD 发射波长被限制在小于 1.9 μm , 但 InGaAsSb/InP 材料体系成功地将 InP 基 QW SLD 输出中心波长拓展为 2.1 μm ^[34]。

2.2.1 InP基量子阱有源结构

InGaAsP/InP 材料体系 SLD 发展相对比较成熟^[35-36], 能够实现室温连续波输出功率高达 115 mW^[37], 输出光谱 FWHM 达 130 nm^[38]。并且, Beal 等采用 GaInAsP/InP 材料体系进行红外激光快速热退火 (IR Laser-RTA) 工艺, 促进点缺陷在结构中的扩散, 获得渐变带隙量子阱混杂 (QWI) SLD 的光谱 FWHM 比退火工艺前增加 33%^[20]。AlGaInAs/InP 材料体系具有比 GaInAsP/InP 材料体系更大的导带偏移^[39], 增强了量子阱中的电子局部化, 降低了非辐射俄歇复合的负面影响, 提高了器件在高温下的工作能力^[40]。Sabitov 等采用该材料体系, 研制了压应变 (晶格失配度 1.4%) MQW SLD, 在中心波长 1.5 μm 处获得大于 5 mW 单模光纤输出功率与大于 60 nm 的谱宽^[41]; Kostin 等利用空间合束技术将三个组分不同 $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}$ 的 SLD 耦合, 在中心波长 1.3 μm 处 FWHM 高达 180 nm^[42]。同时, 长春理工大学研制的 AlGaInAs 材料体系 SLD, 实现了 ~1.3 μm 波段室温连续输出功率 42.2 mW^[43]、~1.5 μm 波段室温连续输出功率 26.1 mW^[44]。

值得关注的是, 应用于高灵敏度光纤陀螺仪与光纤光栅传感领域的宽带光源应具有较低的偏振灵敏度^[45]。然而, SLD 中横向电场 (TE) 和横向磁场 (TM) 模式之间的光输出功率差异很大, 即存在较高的偏振灵敏度。实现低偏振灵敏度 SLD 的有效手段是采用较大的张应变 MQW 有源结构^[46],

使轻空穴带的能级低于重空穴带, 增加 TM 模式的材料增益^[47]。Ma 等在 InGaAsP/InP 材料体系中, 通过三个压应变量子阱 (晶格失配度 1.1%) 和两个张应变量子阱 (晶格失配度 -1.0%) 相结合的有源结构, 获得了 1.3 μm 波段的偏振不敏感多量子阱 SLD 器件^[48]。与之相反, Hsiao 等利用较高压应变 (晶格失配度 1.2%) InGaAsP MQW 有源结构, 开展了增大 SLD 偏振灵敏度的研究^[49]。

2.2.2 InP基量子短线有源结构

自组装技术在 InP 衬底上的尝试导致了量子短线的发现, 量子短线 (Qdash) 是一种高度和宽度与量子点 (QD) 相似、但长度更长的有限长的线状纳米结构, 具有显著的面内延伸率。Qdash 的应用潜力已通过多种方式得到证明, 如基于 InAs/InP 量子短线 (Qdash) 材料的激光二极管具有低声、低阈值电流密度^[50]、高模态增益波长宽带放大^[51]以及良好的温度稳定性^[52], 能够实现 1.3~2.0 μm 波段上基态跃迁。为了精确控制 Qdash 结构的波长及能级结构, 通常将 Qdash 结构嵌入三元四元化合物的 QW 中形成阱中短线 (Dash-in-well) 有源结构。随着注入能级的增加, Qdash 具有独特的准一维行为, 在纵向上具有不同的量化效应和带填充效应, 这使得 Qdash 有源增益结构在实现 SLD 宽光谱输出方面表现出巨大潜力^[53]。Khan 等采用垒层厚度不同的 InAs/InGaAlAs Qdash 压应变四量子阱结构, 使 QW 与 Qdash 同时进行放大自发辐射过程, 实现 SLD 器件发射带宽大于 700 nm, 覆盖了整个 O-E-S-C-L-U 通信频段^[54]。次年, 该研究小组通过改进器件结构实现了 SLD 器件室温连续波输出功率大于 22 mW^[55]。这种新型 InP 基 InAs Qdash 有源结构 SLD 在产生超宽连续激光光谱方面表现出独特优势。

表 2 归纳了上述 InGaAsP/InP、AlGaInAs/InP 材料体系与 InAs 量子短线 (Qdash) 结构的 InP 基 QW SLD 的输出性能。

表 2 InP 基量子阱 SLD 研究进展

Tab. 2 Research progress on InP-based quantum well SLD

研究机构	工作条件	增益结构	波长/ μm	功率/mW	光谱宽度/nm	年份	参考文献
KAUST	0.01%DC, RT	InGaAsP MQW	1.3	70	125 (3 dB)	2015	[21]
CEA-LETI	CW, 20 $^{\circ}\text{C}$	InGaAsP MQW	1.6	27	135 (3 dB)	2014	[22]
中国科学院半导体研究所	CW, RT	InGaAsSb MQW	2.1	30	41	2018	[34]
北京邮电大学	CW, 22 $^{\circ}\text{C}$	InGaAsP MQW	1.34	37.6	21.7	2017	[35]
吉林大学	1%DC, RT	InGaAsP QWI	1.5	210	37	2004	[36]

表2(续)

研究机构	工作条件	增益结构	波长/ μm	功率/mW	光谱宽度/nm	年份	参考文献
University of Maryland	CW, 13 °C	InGaAsP MQW	1.5	20	130	2000	[37]
Kyushu University	CW, RT	InGaAsP MQW	1.55	115	50 (3 dB)	2010	[38]
LLC Sigplus	CW, 25 °C	AlGaInAs MQW	1.55	5	60	2020	[41]
Superlum Diodes	CW, RT	AlGaInAs MQW	1.33	4	180 (3 dB)	2015	[42]
长春理工大学	CW, RT	AlGaInAs MQW	1.55	25.6	44	2018	[43]
	CW, RT	AlGaInAs MQW	1.3	42.2	10	2021	[44]
Lehigh University	0.1%DC, 20 °C	InAs Qdash	1.6	2	140	2008	[53]
KAUST	CW, 20 °C	InAs Qdash	1.6	1.3	700	2013	[54]
	CW, RT	InAs Qdash	1.55	22	82 (3 dB)	2014	[55]

注:未特殊标注的光谱宽度为FWHM。

2.3 GaSb基量子阱超辐射发光二极管

随GaSb高质量增益材料的发展,GaInAsSb/GaSb材料体系^[56]与GaInSb/GaSb材料体系^[57]SLD均实现了2~3 μm 波段高性能输出。GaInSb/GaSb材料体系QW SLD已经在~2 μm 波段实现室温连续波输出功率120 mW^[58]。随着波长增加而增加的俄歇复合过程,导致长波GaSb基SLD输出特性发生严重退化,研究人员通过对GaInAsSb/GaSb材料体系有源组分、应变以及富In团簇的探索,打破了GaSb基QW SLD输出波长低于2.5 μm 的限制。Viz-

baras等通过控制有源结构中 $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ 压应变量子阱的组分,分别调制SLD器件输出波长为2.05, 2.25, 2.4 μm ^[59]; Nouman等采用2%较高压应变 $\text{Ga}_{0.54}\text{In}_{0.46}\text{As}_{0.13}\text{Sb}_{0.83}$ /GaSb量子阱有源结构,将GaSb基SLD中心输出波长拓展为2.55 μm ,但器件只能在脉冲条件下工作^[60]。2019年,Kurka等提出了一种增加量子阱中铟含量并形成铟团簇的方法,引起晶格缺陷导致发射峰红移到3.5 μm ^[61],有望应用于SLD中进一步拓展其输出波长范围。表3归纳了GaSb基量子阱SLD的输出性能。

表3 GaSb基量子阱SLD研究进展

Tab. 3 Research progress on GaSb-based quantum well SLD

研究机构	工作条件	增益结构	波长/ μm	功率/mW	FWHM/nm	年份	参考文献
Tampere University of Technology	CW, RT	GaInSb DQW	1.9	60	60	2016	[56]
University of Iowa	5%DC, 295 K	GaInAsSb MQW	2.4	1	150	2014	[57]
Tampere University	CW, 20 °C	GaInSb DQW	2	120	43	2019	[58]
			2.05	40	40		
Brolis Semiconductors	CW, RT	GaInAsSb DQW	2.25	10	80	2015	[59]
			2.4	5	—		
Tampere University of Technology	5%DC, 20 °C	GaInAsSb DQW	2.55	16	123	2018	[60]

综上所述,量子阱有源结构SLD在获得高功率输出方面具有独特优势,GaAs基QW SLD室温连续波输出功率大于400 mW,InP基与GaSb基QW SLD均能够实现室温连续波输出功率大于100 mW。GaAs基与InP基量子阱SLD发展相对比较成熟,GaAs基与InP基QW SLD的其他输出特性也引起了研究人员的广泛关注,如偏振灵敏度、二阶相干特性以及光谱调制特性。但GaSb基QW SLD发展相对缓慢,主要集中在I类量子阱SLD的研究,并且国内关于GaSb基SLD的研究比

较欠缺。在QW SLD有源结构方面,MQW SLD发展相对成熟并得到了广泛应用,Qdash SLD在拓宽光谱宽度上表现出巨大潜力,但Qdash外延生长工艺相对复杂、自发辐射增益等相关研究较少以及载流子热效应问题加剧。同时,由于QW SLD存在较高的电流密度带来的散热问题、光谱形状不规则问题、载流子分布不均匀问题以及光子重吸收问题等,实现高功率宽波段QW SLD器件仍然具有挑战性。

3 量子点超辐射发光二极管研究进展

基于 Stranski-Krastanov (S-K) 外延生长模式构建的自组装量子点 (QD) 结构在制备高性能 SLD 方面表现出巨大潜力。首先, 由于 QD 结构的热分布远小于体结构和 QW 结构, 极易获得高波长稳定性和高温稳定性的光电器件^[62]。其次, 由于 QD 结构天然的大尺寸不均匀性, 能够导致几十毫电子伏特的光谱展宽, 有利于 SLD 的宽光谱输出。此外, 由于量子点基态 (GS) 发光能够在低电流下达到饱和增益, QD 易于产生激发态 (ES1、ES2) 发光。不同尺寸量子点的基态 (GS) 与激发态 (ES1、ES2) 能级重叠, 使得量子点的能级近似连续分布, 可以进一步拓宽 SLD 光谱宽度, 并获得近似高斯分布光谱^[63]。由于 QD 材料的独特优势, 国内外众多研究机构陆续开展了 QD SLD 的研究工作。

3.1 量子点 SLD 有源结构

QD SLD 有源结构主要分为阱中点结构 (DWELL)、啁啾多层量子点结构 (Chirped multiple QD, CM QD)、量子点量子阱混合结构 (QW/DWELL) 以及异维量子点-量子阱结构 (QWD)。DWELL 即在量子阱中生长量子点, 其主要研究方向是使用原子力显微镜与光致发光等表征方法优化 DWELL 结构外延生长参数, 如生长速率、生长温度^[64]等。简单多层 InAs/InGaAs DWELL SLD 已经实现 3 dB 带宽高达 292 nm^[65]。另外, Lu 等直接在 Si 衬底上生长 InAs DWELL 有源结构, 该结构 SLD 输出功率 3.8 mW、3 dB 带宽 103 nm^[66], 促进了 SLD 在硅光子集成领域的应用。

对于啁啾多层量子点 (CM QD) SLD, 通常采用控制外延结构中 InAs 量子点尺寸大小^[67]、InGaAs 应力缓冲覆盖层的 In 组分或厚度^[68]等手段, 实现啁啾多层量子点结构中各层发射能量不同, 达到进一步拓宽光谱宽度的目的。Tsuda 等通过三层 InAs/In_{0.1}Ga_{0.9}As CM QD 有源结构, 实现了 QD SLD 器件 240 nm 超宽带宽输出^[69]。在提高啁啾多层量子点 SLD 输出功率方面, 主要手段是增加 CM QD 的层数、密度以及结合锥形腔波导结构^[70]。Zhang 等研制了五层 InAs/In_{0.2}Ga_{0.8}As CM QD-SLD, 实现了 200 mW 高功率输出^[71]。

量子点量子阱混合 (QW/DWELL) 结构是指

有源区是由先后生长的单量子阱与多层阱中量子点组合形成。理论上设计 QW 发射波长与量子点第二激发态 (QD ES2) 发射波长一致, 增强了短波长 QD ES2 对输出谱宽的贡献^[72]。QW/DWELL 有源结构打破了 SLD 高功率与宽光谱的制约关系, 实现了 SLD 输出功率与光谱宽度均随注入电流的增加而增大。Chen 等外延生长了 In_{0.34}Ga_{0.66}As SQW 与六层 InAs DWELL 混合有源结构, 并观察到了 QD GS、QD ES1 与 QW_{e1-hh1,2,3} 多态共同发射, 器件在室温 10% 占空比脉冲条件下 3 dB 带宽高达 290 nm^[73]。通过提高 QW/QWELL 混合结构中量子点层的密度与层数^[74], 有望在保持 QD SLD 较宽光谱输出的同时获得较高的输出功率。

异维量子点-量子阱结构 (QWD) 是指 In 组分在 30%~50% 范围内的 InGaAs/GaAs 异质结构形成的新型纳米结构, 该纳米结构结合了量子阱和量子点的一些优点。Mintairov 等在 GaAs 衬底上观察到 In_{0.4}Ga_{0.6}As 薄膜的结构转变, 出现了二维量子阱结构、富 In 岛 (QD1) 以及 InGaAs 岛 (QD2)^[75], 并表现出较高的模式增益特性。该研究小组研制了单层 QWD 结构 SLD 器件, 输出功率为 17 mW, 光谱 FWHM 为 36 nm^[76]。QWD 有源结构在实现 QD SLD 高功率输出方面表现出极大的优势。

3.2 量子点 SLD 工艺技术

在 QD SLD 工艺技术方面, 量子点掺杂技术和量子点选择性区域混杂技术被证明能够提高 SLD 输出特性。量子点掺杂技术是指在 QD 结构中进行 n 型 (Si)^[77] 或 p 型^[78] (C、Be) 掺杂, 提高光电器件的输出特性与热稳定特性。Hou 等通过对 InAs DWELL 结构中的 GaAs 垒层进行 Be 掺杂工艺, 发现 Be 掺杂带来的大量空穴显著增强了 QD 中载流子的辐射复合, 提高了 QD SLD 器件的热稳定性^[79]。Lv 等通过在 CM QD 中直接掺杂 Si, 有效钝化 QD 附近或内部的非辐射复合中心, Si-doped QD SLD 室温连续波输出功率为 20.5 mW, 比未掺杂器件输出功率提高 12%^[80]。量子掺杂技术为生产制造高性能自组装 InAs/GaAs QD SLD 器件开辟了可能性。

量子点选择性区域混杂技术通常是指利用外延生长后退火工艺, 在单片上实现量子点材料带隙能量的空间变化。研究人员已经证明, 在 QD 材料中引入 p 型掺杂可以提高 QD 在退火过程中

的热稳定性,进而实现高性能的QD混杂SLD器件^[81]。但量子点区域混杂技术工艺难度依然很大,退火过程中覆盖层材料、退火温度与退火时间等工艺条件对QD区域混合的效果影响较大^[82]。Zhang等报道了热退火工艺形成的选择性区域混杂QD SLD,由长度4 mm的SiO₂覆盖层与长度2 mm的GaAs覆盖层在700 °C下退火5 min形成,实现了QD SLD中心波长1 145 nm处光谱宽度310 nm^[83]。量子点选择性区域混杂技术在进一步拓宽QD SLD光谱宽度方面表现出巨大潜力。

综上所述,QD SLD因其独特的优势备受研究人员的关注,国内外众多研究小组分别在QD有源结构、外延生长、能级跃迁、掺杂技术以及区域混杂技术等方面取得了显著的成果。表4归纳了GaAs基QD SLD的输出特性,QD SLD能够

实现室温连续输出功率大于100 mW、输出带宽大于200 nm。QD SLD通常表现出更宽的增益,对应于较低的功率谱密度与较低的输出功率,获得高功率宽光谱QD SLD器件还具有一定的挑战性。量子点量子阱混合与异维量子点-量子阱新型有源结构在实现高功率宽光谱SLD方面表现出巨大潜力,但是新型有源结构中QD与QW之间的模式增益特性以及空间调制特性等理论研究匮乏,新型有源结构QD SLD器件工作稳定性较低。QD SLD相关工艺技术能够有效地提高器件输出性能,但仍然存在工艺难度较大和技术推广困难的问题。另外,QD SLD的输出波长被限制在1~1.3 μm范围内,QD SLD的优势不能得到进一步发挥,使其不能应用于其他长波宽光谱光源系统。

表4 GaAs基量子点SLD研究进展

Tab. 4 Research progress on GaAs-based quantum dot SLD

研究机构	工作条件	增益结构	功率/mW	光谱宽度/nm	年份	参考文献
中国科学技术大学	RT,CW	DWELL	40	91(3 dB)	2022	[63]
Effat University	20 °C,CW	DWELL	1.33	292(3 dB)	2018	[65]
University College London	RT,CW	DWELL	3.8	103	2020	[66]
University of Sheffield	RT,CW	CM QD	—	120	2016	[68]
Heriot-Watt University	RT,CW	CM QD	137.5	30	2019	[70]
University of Sheffield	RT,10%DC	QW/DWELL	1.1	213(3 dB)	2013	[72]
			2.4	290(3 dB)	2015	[73]
Alferov University	RT,CW	QWD	17	36	2020	[76]
中国科学院半导体研究所	RT,CW	Si-doped CM QD	16.6	114	2022	[77]
中国科学院纳米所	RT,CW	Be-doped DWELL	—	95	2018	[79]
中国科学院半导体研究所	RT,CW	Si-doped CM QD	20.5	105	2020	[80]
University of Sheffield	RT,5%DC	Be-doped DWELL intermixed	—	310	2012	[83]

注:未特殊标注的光谱宽度为FWHM。

4 量子级联超辐射发光二极管研究进展

量子级联(QC)是指由多层半导体材料形成的周期性量子阱超晶格结构,是量子工程和精细材料生长技术相结合的产物。基于能带工程理论的量子级联结构突破了带间跃迁的模式限制,实现了半导体发光器件3~300 μm波长的输出^[84]。2002年,美国贝尔实验室Gmachl等首次提出了中红外量子级联“超连续光谱”的制造与潜在应用^[85],奠定了量子级联宽带光源的发展基础。2006年,英国Sheffield大学Zibik等首次研制了包

含11个不同量子级联有源结构SLD^[86],QC SLD开始进入广大研究人员的视线。

QC SLD不同于传统的p-i-n型半导体发光器件,是基于导带中电子的子带间跃迁的单极性半导体中红外光源。由于量子级联材料中自发辐射效率低的问题,QC SLD的研究热点主要集中在提高功率方面。研究人员发现,在室温下更薄更长的腔有助于实现最大的自发辐射,因此提高QC SLD输出功率的常用手段是提高器件腔长^[87],但过长的腔长大大加剧了器件制备工艺难度。Aung等设计了紧凑型螺旋腔结构QC SLD,室温下12 mm腔长器件获得了高达57 mW的输出功

率,为该波段当前最高功率水平^[88]。中国科学院苏州纳米所 Hou 研究小组报道了基于双声子共振设计的应变补偿 $\text{In}_{0.678}\text{Ga}_{0.322}\text{As}/\text{In}_{0.365}\text{Al}_{0.635}\text{As}$ QC SLD, 室温准连续条件下输出中心波长 $5\ \mu\text{m}$ 、FWHM 大于 $200\ \text{cm}^{-1}$ 、峰值功率 $0.5\ \text{mW}$ ^[89]。另外,国内外众多研究小组陆续开展了 QC SLD 模式增益^[90]、多段紧凑器件结构^[91]以及长波腔面减反膜^[92]等方面的研究。

目前, QC SLD 的研究发展还处于起步阶段,相关工艺技术发展相对缓慢。表 5 归纳对比了国

内外量子级联 SLD 的特性参数, QC SLD 相关研究主要基于 InP 基 InGaAs/InAlAs 材料体系, 输出波长集中在 $5\sim 7\ \mu\text{m}$ 波段, 器件只能在低占空比脉冲条件下工作。并且, 现有 QC SLD 辐射跃迁模式大多采用垂直跃迁(即电子的辐射跃迁发生在同一个量子阱中), 有源区设计局限为高微分增益有源区与双声子共振有源区两种结构。另外, 由于量子级联材料中子带间跃迁过程非辐射载流子寿命非常短, 导致其自发辐射效率非常低, 因此实现高性能的超辐射输出具有挑战性。

表 5 量子级联 SLD 研究进展

Tab. 5 Research progress on quantum cascade SLD

研究机构	工作条件	波长/ μm	功率/mW	FWHM/ cm^{-1}	相干长度/ μm	年份	参考文献
Princeton University	0.05%DC, 250 K	5	10.2	95	77	2014	[87]
	0.05%DC, 250 K	5	57	63	117	2015	[88]
中国科学院苏州纳米所	10%DC, 300 K	5	0.5	200	30	2018	[89]
ETH Zurich	10%DC, 243 K	6.6	0.038	230	—	2015	[90]
中国科学院苏州纳米所	3%DC, 80 K	5	1.8	135	—	2020	[92]

5 超辐射发光二极管的应用

近年来, SLD 器件得到了迅速的发展, QW SLD 实现了 $0.6\sim 2.6\ \mu\text{m}$ 波段高性能输出, QD SLD 实现了 $1\sim 1.2\ \mu\text{m}$ 波段高性能输出, QC SLD 实现了 $4\sim 7\ \mu\text{m}$ 波段输出。量子点与量子阱等不同有源结构 SLD 的输出功率与光谱宽度分别如图 3 和图 4 所示。高输出性能 SLD 在光纤陀螺仪 (FOG)^[93-94]、光学相干断层成像技术 (OCT)、波分复用技术 (WDM)、光时域反射仪 (OTDR)、可调谐外腔激光器、光纤传感器和光纤测试等领域中被广泛应用。下面主要介绍 SLD 器件近年来的新应用方向及潜在应用。

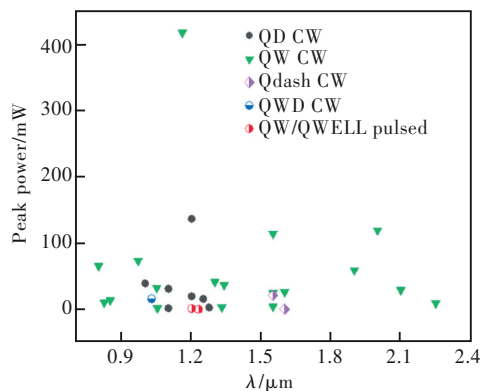


图 3 不同有源结构 SLD 输出功率

Fig.3 SLD output power of different active structures

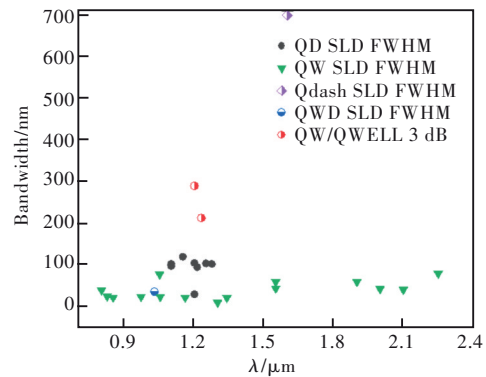


图 4 不同有源结构 SLD 光谱宽度

Fig.4 SLD spectral bandwidths of different active structures

光学相干层析技术 (OCT) 是基于光学低相干干涉测量原理, 对生物组织实现非接触、无损伤和高分辨实层成像的一种新型光学测量技术^[95]。具有高功率和宽带发射的 SLD 光源能够提高 OCT 系统的轴向分辨率, 是 OCT 系统最为理想的光源。现阶段, $850\ \text{nm}\sim 1\ \mu\text{m}$ 波段 SLD 被应用于眼科 OCT 检查^[96], $\sim 1.2\ \mu\text{m}$ 波段 SLD 用于皮肤组织成像^[97]。与此同时, Israelsen 等证明了 $\sim 4\ \mu\text{m}$ 超连续光谱中红外 OCT 成像深度远大于近红外 OCT, 能够对嵌入介质中的微观结构进行详细成像^[98]。中红外 OCT 在检测较短波长下具有强烈散射特性的样品时表现出巨大潜力, 如 $6\sim 8\ \mu\text{m}$ 波段能够检测胶原蛋白酰胺、氟化钙^[99]、磷酸盐和碳酸盐等

组织结构和生化成分^[100]。中红外 QC SLD 能够满足 OCT 对长波光源的需求,有望取代超连续谱与量子级联激光器成为中红外 OCT 的理想光源。

太赫兹互相关光谱系统(Thz CCS)是指依赖于光混合装置中激光光源光谱成分叠加产生的拍频,调制并加速太赫兹频率范围内电荷载流子产生太赫兹光谱进行互相关检测。该系统常用的驱动光源为多模激光二极管,由于驱动光源腔内的多种模式,产生的太赫兹光谱不具有连续特性。为此,Molter 等提出使用 1.55 μm SLD 取代 LD 成为该检测系统的驱动光源,产生了连续太赫兹光谱,并在对 α -乳糖一水合物、对氨基苯甲酸(PABA)以及空气中水蒸气等样品检测中表现出普适性^[101]。2022 年,Tybussek 等进一步分析了 SLD 光源与生成的太赫兹光谱之间的关系^[102]。进一步拓展 1.3 μm 、1.5 μm 光纤低损耗窗口 SLD 的光谱宽度,能够增加太赫兹互相关光谱系统信号的动态范围。

痕量气体检测在许多领域都有着重要作用,如工业过程检测、人体呼吸气体检测以及大气环境监测。SLD 在单独检测和量化混合物中的多种气体过程中,能够消除多气体交叉干扰效应与散射效应。Divya 等基于 1.5 μm SLD 的吸收光谱技术检测了 NH_3 与水蒸汽混合气体中 NH_3 含量^[103],充分证明了 SLD 在痕量气体检测方面的应用前景。进一步地,工作在 2~3 μm 与 8~12 μm 大气窗口的宽带 SLD 有望被应用于检测空气中 CO_2 ^[104]和 N_2O ^[105]等微量气体,以应对环境气候变化、空气变化与工业过程监测。

另外,低相干特性 836 nm SLD 被应用于光学多普勒测速仪检测混合流体速度^[106],在工业与医疗行业具有广阔应用前景,对 SLD 光源低相干特性提出了新需求;835 nm SLD 与数字显微镜装置结合使用产生具有显著降低像差的光学电势,获得了比激光光源更逼真、对比度更高的图像^[107];1.2 μm SLD 经典光源实现了波长域的“鬼”成像,对经典“鬼”成像模式中空间域和光谱域之间进行了类比^[108],对 SLD 光源二阶相干特性提出新需求;1.5 μm SLD 与光子晶体纳米腔结合应用于定量测定空气中离子的密度,有效解决了静电放电导致电子设备故障的问题^[109],对 SLD 光谱宽度与温度稳定性提出了新需求;SLD 替代碱性放电灯成为原子磁强计的探测光源,为原子光学旋转检测提供

了一种更实用的方法,有望应用于心磁图、脑磁图系统^[110]。

6 总结与展望

本文分别从量子阱、量子点以及量子级联有源结构出发,综合评述了红外超辐射二极管近年来的研究进展。近十年来,SLD 器件向着更长波长、更高功率与更宽光谱宽度发展。QW SLD 在获得高功率输出方面表现出巨大优势,GaAs 基、InP 基与 GaSb 基 QW SLD 均能够在室温连续波条件下实现输出功率大于 100 mW;QD SLD 充分发挥了 QD 材料在光谱展宽方面的独特优势,室温连续波条件下 FWHM 大于 100 nm;QWD SLD 与 QW/DWELL SLD 能够在较高注入电流条件下同时放大 QW 与 QD 基态以及激发态自发辐射,在同时获得高功率与宽光谱输出方面表现出巨大潜力;Qdash SLD 基于同时放大 QW 与 Qdash 的自发发射,能够获得高达 700 nm 的光谱宽度。另外,InP 基 QC SLD 在 5~7 μm 中红外波段已经实现毫瓦级输出功率与约 200 cm^{-1} 光谱带宽。

虽然红外波段 SLD 研究已经取得了显著的成果,但仍存在一定的工艺技术问题,如 QW SLD 光谱宽度比较窄,QD SLD 输出功率比较低;QWD、QW/DWELL 以及 Qdash 混合结构中 QD 与 QW 或 Qdash 与 QW 间的空间调制特性、载流子复合特性以及模式竞争特性等理论研究匮乏;QWD、QW/DWELL 以及 Qdash 混合结构 SLD 器件载流子热效应问题加剧,器件工作稳定性较差;量子点掺杂与区域混杂技术工艺难度大,技术效果不稳定;QC SLD 宽光谱能带工程理论研究匮乏,有源结构、跃迁机制以及材料体系较为单一,只能在脉冲条件下工作,输出功率较低。进一步扩展红外 SLD 的商业化应用,仍然需要在以下三个方面进行深入探讨:(1)SLD 输出特性研究。通过 QWD 与 QW/DWELL 等新型有源结构的理论研究与外延工艺研究,充分结合量子阱高增益与量子点宽光谱的特性,打破 SLD 高功率与宽光谱的制约关系;在有源结构方面,完善多量子阱外延结构设计与 Qdash 带隙工程理论,发展宽光谱 QC 不同能量能级跃迁以及斜跃迁机制等能带理论;在工艺技术方面,优化 MQW、Qdash 以及 QC 等精细外延生长工艺,优化量子点掺杂以及区域混杂等工艺技术;在器件结构方面,设计新型微腔结构或电注入结构实现抑制光反馈目的,发展过渡热沉等散热

封装结构;充分结合并发挥有源结构、工艺技术以及器件结构三者的优势,进一步提高SLD输出功率、光谱带宽、工作寿命与稳定性;同时开展应变量子阱SLD其他输出特性的研究,如调制特性、光谱波纹、二阶相干特性与和偏振特性等。(2)波长拓展研究。发展InP衬底自组装量子点技术,进一步发挥QD材料拓宽光谱的优势,将QDSL D输出波长拓展到1.4~1.5 μm 波段;发展InP/In-GaAsSb材料体系SLD的外延结构与器件结构,使QW SLD输出波长覆盖1.6~1.9 μm 波段;发展GaSb基SLD光子带隙工程及富钢团簇等相关技术,将QW SLD输出波长拓展到3~4 μm 波段;发

展InP基、GaAs基以及GaSb基QC SLD能带工程、外延生长工艺以及长波腔面膜技术,将QC SLD输出波长拓展到长波红外波段乃至太赫兹波段输出。(3)光电集成研究。通过SLD过渡热沉散热封装工艺以及空间合束技术等的研究,促进SLD阵列以及选阵集成发展;通过对硅基键合集成技术、硅基外延生长工艺以及硅光波导等技术的研究,促进SLD硅光电子集成发展。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:
<http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20230064>.

参 考 文 献:

- [1] KURBATOV L N, SHAKHIDZHANOV S S, BYSTROVA L V, *et al.* Investigation of superluminescence emitted by a gallium arsenide diode [J]. *Sov. Phys. Semicond.*, 1971, 5(4): 1739-1744.
- [2] LEE P T, BURRUS C, MILLER B. A stripe-geometry double-heterostructure amplified-spontaneous-emission (superluminescent) diode [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1973, 9(8): 820-828.
- [3] MILANI N M, ABSALAN H, GOLZAN M M, *et al.* Effects of cavity parameters on the output characteristics of InGaN/GaN superluminescent light emitting diodes [J]. *Iran. J. Sci. Technol. Trans. A Sci.*, 2021, 45(4): 1485-1490.
- [4] PARK J, XUN L. Theoretical and numerical analysis of superluminescent diodes [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, 24(6): 2473-2480.
- [5] CHEN T R, ENG L, ZHUANG Y H, *et al.* Quantum well superluminescent diode with very wide emission spectrum [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, 56(14): 1345-1346.
- [6] SUN Z Z, DING D, GONG Q, *et al.* Quantum-dot superluminescent diode: a proposal for an ultra-wide output spectrum [J]. *Opt. Quantum Electron.*, 1999, 31(12): 1235-1246.
- [7] BANERJEE D, SANKARANARAYANAN S, KHACHARIYA D, *et al.* Superluminescent light emitting diodes on naturally survived InGaN/GaN lateral nanowires [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2016, 109(3): 031111-1-4.
- [8] FELTIN E, CASTIGLIA A, COSENDEY G, *et al.* Broadband blue superluminescent light-emitting diodes based on GaN [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, 95(8): 081107-1-3.
- [9] XIONG W, HU L, LIU J P, *et al.* High power GaN-based blue superluminescent diodes with low spectral modulation [J]. *AIP Adv.*, 2021, 11(4): 045202-1-5.
- [10] GOLDBERG G R, KIM D H, TAYLOR R J E, *et al.* Bandwidth enhancement in an InGaN/GaN three-section superluminescent diode for optical coherence tomography [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2020, 117(6): 061106-1-5.
- [11] ANDREEVA E V, ANIKEEV A S, IL'CHENKO S N, *et al.* Highly efficient red single transverse mode superluminescent diodes [J]. *Quantum Electron.*, 2017, 47(12): 1154-1157.
- [12] ANDREEVA E V, IL'CHENKO S N, KURNYAVKO Y V, *et al.* Highly reliable high-power superluminescent diodes with three single-mode active channels. [J]. *Quantum Electron.*, 2016, 46(7): 594-596.
- [13] KOLBAS R M, ANDERSON N G, LAIDIG W D, *et al.* Strained-layer InGaAs-GaAs-AlGaAs photopumped and current injection lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1988, 24(8): 1605-1613.
- [14] SUEMUNE I. Theoretical study of differential gain in strained quantum well structures [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1991, 27(5): 1149-1159.
- [15] ANDREEVA E V, BATRAK D V, BOGATOV A P, *et al.* High-power multimode superluminescent diode emitting at 840 nm [J]. *Quantum Electron.*, 2007, 37(11): 996-1000.
- [16] WANG F F, JIN P, WU J, *et al.* Active multi-mode-interferometer broadband superluminescent diodes [J]. *J. Semicond.*, 2016, 37(1): 014006-1-6.

- [17] AHO A T, VIHARIÄLÄ J, VIRTANEN H, *et al.* High power GaInNAs superluminescent diodes emitting over 400 mW in the 1.2 μm wavelength range [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2019, 115(8): 081104-1-4.
- [18] CAUSA F, BURROW L. Ripple-free high-power super-luminescent diode arrays. [J] *IEEE J. Quantum Electron.*, 2007, 43(11): 1055-1059.
- [19] OHGOH T, MUKAI A, YAGUCHI J, *et al.* Demonstration of 1.0 μm InGaAs high-power and broad spectral bandwidth superluminescent diodes by using dual quantum well structure [J]. *Appl. Phys. Express*, 2013, 6(1): 014101-1-5.
- [20] BEAL R, MOUMANIS K, AIMEZ V, *et al.* Enhanced spectrum superluminescent diodes fabricated by infrared laser rapid thermal annealing [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2013, 54: 401-406.
- [21] KHAN M Z M, ALHASHIM H H, NG T K, *et al.* High-power and high-efficiency 1.3 μm superluminescent diode with flat-top and ultrawide emission bandwidth [J]. *IEEE Photonics J.*, 2015, 7(1): 1600308-1-9.
- [22] FAUGERON M, FORTIN C, ROBERT Y, *et al.* Wide optical bandwidth and high output power superluminescent diode covering C and L band [J]. *IEEE Photonics Technol.*, 2014, 26(8): 841-844.
- [23] FU L, SCHWEIZER H, ZHANG Y S, *et al.* Design and realization of high-power ripple-free superluminescent diodes at 1300 nm [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2004, 40(9): 1270-1274.
- [24] PAOLI T L, THORNTON R L, BURNHAM R D, *et al.* High-power multiple-emitter AlGaAs superluminescent diodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1985, 47(5): 450-452.
- [25] YAN Z H, ZHOU S. Bonding stress and reliability of low-polarization quantum-well superluminescent diode [J]. *Phys. E Low-Dimens. Syst. Nanostruct.*, 2019, 109: 140-143.
- [26] OHGOH T, ASANO H, HAMAMOTO K. Reliability Improvement of superluminescent diodes emitting at 1.0 μm band using InGaAsP barrier structure [J]. *Electron. Lett.*, 2013, 49(6): 409-410.
- [27] DUAN L H, FANG L, ZHANG J, *et al.* Fabrication and characteristics of high speed InGaAs/GaAs quantum-wells superluminescent diode emitting at 1053 nm [J]. *Semicond. Sci. Technol.*, 2014, 29(5): 055004-1-6.
- [28] KIETHE J, HEUER A, JECHOW A. Second-order coherence properties of amplified spontaneous emission from a high-power tapered superluminescent diode [J]. *Laser Phys. Lett.*, 2017, 14(8): 086201-1-4.
- [29] LIU S J, ZHOU Y, ZHOU S, *et al.* Structural design and fabrication of 830 nm GaAsP/AlGaAs low polarization superluminescent diode with tensile-strained wells [J]. *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, 2018, 29(12): 10102-10108.
- [30] 李辉, 王玉霞, 李梅, 等. 高功率 850 nm 宽光谱大光腔超辐射发光二极管 [J]. 中国激光, 2006, 33(5): 613-616.
LI H, WANG Y X, LI M, *et al.* High-power 850 nm large optical cavity wide spectrum superluminescent diode [J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, 33(5): 613-616. (in Chinese)
- [31] 李梅, 李辉, 王玉霞, 等. GaAlAs/GaAs 非均匀阱宽多量子阱超辐射发光管材料制备及表征 [J]. 发光学报, 2007, 28(6): 885-889.
LI M, LI H, WANG Y X, *et al.* Research on material characteristics of GaAlAs/GaAs superluminescence diodes [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2007, 28(6): 885-889. (in Chinese)
- [32] 祝子翔, 张晶, 孙春明, 等. 增益钳制式 850 nm 波长超辐射发光二极管设计研究 [J]. 兵工学报, 2018, 39(2): 325-330.
ZHU Z X, ZHANG J, SUN C M, *et al.* Development of gain-clamped 850 nm superluminescent diode [J]. *Acta Armament.*, 2018, 39(2): 325-330. (in Chinese)
- [33] 刘帅男. 970 nm 应变量子阱超辐射发光二极管的研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2022.
LIU S N. *Study on 970 nm Strained Quantum Well Superluminescent Light Emitting Diode* [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2022. (in Chinese)
- [34] WANG D B, ZHANG J C, HOU C C, *et al.* High performance continuous-wave InP-based 2.1 μm superluminescent diode with InGaAsSb quantum well and cavity structure suppression [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2018, 113(16): 161107-1-5.
- [35] 王龙, 陈佳, 刘昊, 等. 1.3 μm 镉磷基多量子阱激光器的制备及关键特性研究 [EB/OL]. 2017-05-16. <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/201705-926>.
WANG L, CHEN J, LIU H, *et al.* Preparation and key characteristics of 1.3 μm indium phosphorus-based multi-quantum well laser [EB/OL]. 2017-05-16. <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/201705-926>. (in Chinese)
- [36] XU C D, DU G T, SONG J F, *et al.* Enhancement of the spectral width of high-power 1.5 μm integrated superluminescent light source by quantum well intermixing process [J]. *Chin. Phys. Lett.* 2004, 21(5): 963-965.

- [37] ZANG Z G, MINATO T, NAVARETTI P, *et al.* High-power (>110 mW) superluminescent diodes by using active multi-mode interferometer [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2010, 22(10): 721-723.
- [38] SONG J H, CHO S H, HAN I K, *et al.* High-power broad-band superluminescent diode with low spectral modulation at 1.5 μm wavelength [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2000, 12(7): 783-785.
- [39] VURGAFTMAN I, MEYER J R, RAM-MOHAN L R. Band parameters for III-V compound semiconductors and their alloys [J]. *J. Appl. Phys.*, 2001, 89(11): 5815-5875.
- [40] SABITOV D R, SVETOGOROV V N, RYABOSHTAN Y L, *et al.* Compact superluminescent AlGaInAs/InP strain-compensated quantum-well diodes for fibre-optic gyroscopes [J]. *Quantum Electron.*, 2022, 52(6): 577-579.
- [41] SABITOV D R, RYABOSHTAN Y L, SVETOGOROV V N, *et al.* Superluminescent diodes in the spectral range of 1.5–1.6 μm based on strain-compensated AlGaInAs/InP quantum wells [J]. *Quantum Electron.*, 2020, 50(9): 830-833.
- [42] KOSTIN Y, CHAMOROVSKIY A, YAKUBOVICH S D. Broadband superluminescent diode light source at 1 330 nm with 180 nm spectral bandwidth [J]. *Electron. Lett.*, 2015, 51(5): 408-409.
- [43] 王拓, 陈红梅, 贾慧民, 等. 1 310 nm 高功率超辐射发光二极管的制备及性能研究 [J]. *光子学报*, 2021, 50(6): 0623002-1-9.
WANG T, CHEN H M, JIA H M, *et al.* Performance research and fabrication 1 310 nm superluminescent diodes with high power [J]. *Acta Photon. Sinica*, 2021, 50(6): 0623002-1-9. (in Chinese)
- [44] 孙春明, 张晶, 祝子翔, 等. 利用三量子阱结构拓宽 1 550 nm InGaAlAs 超辐射发光管光谱 [J]. *固体电子学研究与进展*, 2018, 38(2): 121-126.
SUN C M, ZHANG J, ZHU Z X, *et al.* Spectrum broadening of 1 550 nm InGaAlAs superluminescent diode using three-quantum well structure [J]. *Res. Prog. SSE*, 2018, 38(2): 121-126. (in Chinese)
- [45] BOHM K, MARTEN P, PETERMANN K, *et al.* Low-drift fibre gyro using a superluminescent diode [J]. *Electron. Lett.*, 1981, 17(10): 352-353.
- [46] SEOIJIN P. 100 mW high-power depolarized-superluminescent diode at 1 550 nm wavelength [C/OL]. [2023-04-16]. <https://doi.org/10.1117/12.646517>.
- [47] 周勇, 段利华, 张靖, 等. 低偏振高功率 1 310 nm 超辐射发光二极管的液相外延生长 [J]. *发光学报*, 2015, 36(1): 69-74.
ZHOU Y, DUAN L H, ZHANG J, *et al.* 1 310 nm polarization-insensitive high power superluminescent diodes fabricated by liquid phase epitaxy [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2015, 36(1): 69-74. (in Chinese)
- [48] MA H, CHEN S H, YI X J, *et al.* High power polarization-insensitive 1.3 μm InGaAsP-InP quantum-well superluminescent emission diodes grown by MOVPE [J]. *Semicond. Sci. Technol.*, 2004, 19(7): 823-827.
- [49] HSIAO C W, FANG Y H, CHEN Y J, *et al.* Fabrication of superluminescent diode (SLD) for gyro light source with broadband, high power, and large polarization-extinction ratio performance [C]. *2020 Opto-Electronics and Communications Conference (OECC), Taiwan, China*, 2020.
- [50] SCHWERBTERGER R, GOLD D, REITHMAIER J P, *et al.* Long-wavelength InP-based quantum-dash lasers [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2002, 14(6): 735-737.
- [51] GOSSET C, MERGHEM K, MARTINEZ A, *et al.* Subpicosecond pulse generation at 134 GHz using a quantum-dash-based fabry-perot laser emitting at 1.56 μm [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, 88(24): 241105-1-3.
- [52] ZELLER W, LEGGE M, SOMERS A, *et al.* Singlemode emission at 2 μm wavelength with InP based quantum dash DFB lasers [J]. *Electron. Lett.*, 2008, 44(5): 354-355.
- [53] OOI B S, SUSANTO DJIE H, WANG Y, *et al.* Quantum dashes on InP substrate for broadband emitter applications [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2008, 14(4): 1230-1238.
- [54] KHAN M Z M, MAJID M A, NG T K, *et al.* Simultaneous quantum dash-well emission in a chirped dash-in-well superluminescent diode with spectral bandwidth >700 nm [J]. *Opt. Lett.*, 2013, 38(19): 3720-3723.
- [55] KHAN M Z M, NG T K, OOI B S. High-performance 1.55 μm superluminescent diode based on broad gain InAs/InGaAlAs/InP quantum dash active region [J]. *IEEE Photonics J.*, 2014, 6(4): 1-8.
- [56] WOOTTEN M B, TAN J, CHIEN Y J, *et al.* Broadband 2.4 μm superluminescent GaInAsSb/AlGaAsSb quantum well diodes for optical sensing of biomolecules [J]. *Semicond. Sci. Technol.*, 2014, 29(11): 115014-1-10.
- [57] ZIA N, VIHÄRÄLÄ J, KOSKINEN R, AHO A, *et al.* High power (60 mW) GaSb-based 1.9 μm superluminescent

- diode with cavity suppression element [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2016, 109(23): 231102-1-3.
- [58] ZIA N, VIHERRÄLÄ J, KOIVUSALO E, *et al.* High-power single mode GaSb-based 2 μm superluminescent diode with double-pass gain [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2019, 115(23): 231106-1-4.
- [59] VIZBARAS K, DVINELIS E, ŠIMONYTĖ I, *et al.* High power continuous-wave GaSb-based superluminescent diodes as gain chips for widely tunable laser spectroscopy in the 1.95–2.45 μm wavelength range [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2015, 107(1): 011103-1-4.
- [60] ZIA N, VIHERRÄLÄ J, KOIVUSALO E, *et al.* GaSb superluminescent diodes with broadband emission at 2.55 μm [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2018, 112(5): 051106-1-4.
- [61] KURKA M, DYKSIK M, SUOMALAINEN S, *et al.* GaInAsSb/AlGa(In)AsSb type I quantum wells emitting in 3 μm range for application in superluminescent diodes [J]. *Opt. Mater.*, 2019, 91: 274-278.
- [62] UVIN S, KUMARI S, DE GROOTE A, *et al.* 1.3 μm InAs/GaAs quantum dot DFB laser integrated on a Si waveguide circuit by means of adhesive die-to-wafer bonding [J]. *Opt. Express*, 2018, 26(14): 18302-18309.
- [63] JIANG C, WANG H P, CHEN H M, *et al.* Broadband quantum dot superluminescent diode with simultaneous three-state emission [J]. *Nanomaterials*, 2022, 12(12): 1431-1-8.
- [64] MAJID M A, HUGUES M, CHILDS D T D, *et al.* Effect of deposition temperature on the opto-electronic properties of molecular beam epitaxy grown InAs quantum dot devices for broadband applications [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2012, 51(2S): 02BG09-1-5.
- [65] MAJID M A. High-performance GaAs-based superluminescent diode with 292-nm emission bandwidth using simple dot-in-a-well structures [J]. *J. Nanophoton.*, 2018, 12(2): 026007-1-6.
- [66] LU Y, CAO V, LIAO M Y, *et al.* Electrically pumped continuous-wave O-band quantum-dot superluminescent diode on silicon [J]. *Opt. Lett.*, 2020, 45(19): 5468-5471.
- [67] YOO Y C, HAN I K, LEE J I. High power broadband superluminescent diodes with chirped multiple quantum dots [J]. *Electron. Lett.*, 2007, 43(19): 1045-1047.
- [68] OZAKI N, CHILDS D T D, SARMA J, *et al.* Superluminescent diode with a broadband gain based on self-assembled InAs quantum dots and segmented contacts for an optical coherence tomography light source [J]. *J. Appl. Phys.*, 2016, 119(8): 083107-1-7.
- [69] TSUDA M, INOUE T, KITA T, *et al.* Broadband light sources using InAs quantum dots with InGaAs strain-reducing layers [J]. *Phys. Status Solidi C*, 2011, 8(2): 331-333.
- [70] FORREST A F, KRAKOWSKI M, BARDELLA P, *et al.* High-power quantum-dot superluminescent tapered diode under CW operation [J]. *Opt. Express*, 2019, 27(8): 10981-10990.
- [71] ZHANG Z Y, WANG Z G, XU B, *et al.* High-performance quantum-dot superluminescent diodes [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2004, 16(1): 27-29.
- [72] CHEN S M, ZHOU K J, ZHANG Z Y, *et al.* Hybrid quantum well/quantum dot structure for broad spectral bandwidth emitters [J]. *IEEE J. Select. Top. Quantum Electron.*, 2013, 19(4): 1900209-1-9.
- [73] CHEN S M, LI W, ZHANG Z Y, *et al.* GaAs-based superluminescent light-emitting diodes with 290-nm emission bandwidth by using hybrid quantum well/quantum dot structures [J]. *Nanoscale Res. Lett.*, 2015, 10(1): 340-1-8.
- [74] PEYVAST N, CHEN S, ZHOU K, *et al.* Development of broad spectral bandwidth hybrid QW/QD structures from 1 000–1 400 nm [C]. *Proceedings of the 9002, Novel In-plane Semiconductor Lasers XIII, San Francisco, USA, 2014*: 900204-1-6.
- [75] MINTAIROV S A, KALYUZHNYI N A, LANTRATOV V M, *et al.* Hybrid InGaAs quantum well-dots nanostructures for light-emitting and photo-voltaic applications [J]. *Nanotechnology*, 2015, 26(38): 385202-1-7.
- [76] MAXIMOV M V, GORDEEV N Y, SHERNYAKOV Y M, *et al.* Optoelectronic devices with active region based on InGaAs/GaAs quantum well-dots [C]. *Proceedings of the 11356, Semiconductor Lasers and Laser Dynamics IX, Online, France 2020*: 113560A-1-7.
- [77] WANG H, LV Z R, WANG S, *et al.* Broadband chirped InAs quantum-dot superluminescent diodes with a small spectral dip of 0.2 dB [J]. *Chin. Phys. B*, 2022, 31(9): 027501-1-6.
- [78] ZHANG Z Y, JIANG Q, LUXMOORE I J, *et al.* A p-type-doped quantum dot superluminescent LED with broadband and flat-topped emission spectra obtained by post-growth intermixing under a GaAs proximity cap [J]. *Nanotechnology*,

- 2009, 20(5): 055204-1-4.
- [79] LIU Q L, HOU C C, CHEN H M, *et al.* Effects of modulation P-doping on thermal stability of InAs/GaAs quantum dot superluminescent diodes [J]. *J. Nanosci. Nanotechnol.*, 2018, 18(11): 7536-7541.
- [80] WANG H, LV Z R, ZHANG Z K, *et al.* Enhanced performance of InAs/GaAs quantum dot superluminescent diodes by direct Si-doping [J]. *AIP Adv.*, 2020, 10(4): 045202-1-5.
- [81] ZHANG Z Y, JIANG Q, HOGG R A. Tunable interband and intersubband transitions in modulation C-doped InGaAs/GaAs quantum dot lasers by postgrowth annealing process [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, 93(7): 071111-1-3.
- [82] ZHANG Z Y, JIANG Q, HOPKINSON M, *et al.* Effects of intermixing on modulation p-doped quantum dot superluminescent light emitting diodes [J]. *Opt. Express*, 2010, 18(7): 7055-7063.
- [83] ZHOU K J, JIANG Q, ZHANG Z Y, *et al.* Quantum dot selective area intermixing for broadband light sources [J]. *Opt. Express*, 2012, 20(24): 26950-26957.
- [84] CONSOLINO L, JUNG S, CAMPA A, *et al.* Spectral purity and tunability of terahertz quantum cascade laser sources based on intracavity difference-frequency generation [J]. *Sci. Adv.*, 2017, 3(9): 1603317-1-8.
- [85] GMACHL C, SIVCO D L, COLOMBELLI R, *et al.* Ultra-broadband semiconductor laser [J]. *Nature*, 2002, 415(6874): 883-887.
- [86] ZIBIK E A, NG W H, REVIN D G, *et al.* Broadband $6\ \mu\text{m} < \lambda < 8\ \mu\text{m}$ superluminescent quantum cascade light-emitting diodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, 88(12): 121109-1-3.
- [87] AUNG N L, YU Z C W, YU Y, *et al.* High peak power ($\geq 10\ \text{mW}$) quantum cascade superluminescent emitter [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2014, 105(22): 221111-1-4.
- [88] ZHENG M C, AUNG N L, BASAK A, *et al.* High power spiral cavity quantum cascade superluminescent emitter [J]. *Opt. Express*, 2015, 23(3): 2713-2715.
- [89] HOU C C, SUN J L, NING J Q, *et al.* Room-temperature quantum cascade superluminescent light emitters with wide bandwidth and high temperature stability [J]. *Opt. Express*, 2018, 26(11): 13730-13739.
- [90] RIEDI S, CAPPELLI F, BLASER S, *et al.* Broadband superluminescence, $5.9\ \mu\text{m}$ to $7.2\ \mu\text{m}$, of a quantum cascade gain device [J]. *Opt. Express*, 2015, 23(6): 7184-7187.
- [91] HOU C C, CHEN H M, ZHANG J C, *et al.* Near-infrared and mid-infrared semiconductor broadband light emitters [J]. *Light: Sci. Appl.*, 2017, 7: 17170-1-7.
- [92] SUN J L, HOU C C, CHEN H M, *et al.* Quantum cascade superluminescent light emitters with high power and compact structure [J]. *J. Semicond.*, 2020, 41(1): 012301-1-6.
- [93] WANG P H. $1.3\ \mu\text{m}$ superluminescence diode with butterfly package for fiber gyroscope [J]. *Semicond. Photonics Technol.*, 2001, 7(3): 155-157.
- [94] KIM J H, AN S K, LEE S J, *et al.* $1.55\ \mu\text{m}$ InGaAsP/InP tapered stripe superluminescent diodes with potential optical sensor system applications [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2004, 36(3): 255-258.
- [95] KRAY S, LENZ M, SPÖLER F, *et al.* Increased tissue contrast by high resolution simultaneous dual-band optical coherence tomography in three dimensions [C]. *European Conference on Biomedical Optics, Munich, Germany*, 2011: 809209.
- [96] LI P, AN L, LAN G P, *et al.* Extended imaging depth to 12 mm for $1\ 050\text{-nm}$ spectral domain optical coherence tomography for imaging the whole anterior segment of the human eye at 120-kHz A-scan rate [J]. *J. Biomed. Opt.*, 2013, 18(1): 016012-1-4.
- [97] BARAN U, CHOI W J, WANG R K. Potential use of OCT-based microangiography in clinical dermatology [J]. *Skin. Res. Technol.*, 2016, 22(2): 238-246.
- [98] ISRAELSEN N M, PETERSEN C R, BARH A, *et al.* Real-time high-resolution mid-infrared optical coherence tomography [J]. *Light: Sci. Appl.*, 2019, 8: 11-1-13.
- [99] COLLEY C S, HEBDEN J C, DELPY D T, *et al.* Mid-infrared optical coherence tomography [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2007, 78(12): 123108-1-7.
- [100] LÓPEZ-LORENTE Á I, MIZAIKOFF B. Mid-infrared spectroscopy for protein analysis: potential and challenges [J]. *Anal. Bioanal. Chem.*, 2016, 408(11): 2875-2889.
- [101] MOLTER D, KOLANO M, VON FREYMAN G. Terahertz cross-correlation spectroscopy driven by incoherent light

- from a superluminescent diode [J]. *Opt. Express*, 2019, 27(9): 12659-12665.
- [102] TYBUSSEK K H, KOLPATZECK K, CHERNIAK V, *et al.* Spectral shaping of a superluminescent diode for terahertz cross-correlation spectroscopy [J]. *Appl. Sci.*, 2022, 12(4): 1772-1787.
- [103] DIVYA K, SULOCHANA K, VASA N J. Superluminescent diode-based multiple-gas sensor for NH₃ and H₂O vapor monitoring [J]. *IEEE J. Select. Top. Quantum Electron.*, 2012, 18(5): 1540-1546.
- [104] WEBBER M E, CLAPS R, ENGLISH F V, *et al.* Measurements of NH₃ and CO₂ with distributed-feedback diode lasers near 2.0 μm in bioreactor vent gases [J]. *Appl. Opt.*, 2001, 40(24): 4395-4403.
- [105] HERBIN H, PICQUÉ N, GUELACHVILI G, *et al.* N₂O weak lines observed between 3 900 and 4 050 cm⁻¹ from long path absorption Spectra [J]. *J. Mol. Spectrosc.*, 2006, 238(2): 256-259.
- [106] ROVATI L, CATTINI S, PALANISAMY N. Measurement of the fluid-velocity profile using a self-mixing superluminescent diode [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2011, 22(2): 025402-1-9.
- [107] SMITH A, EASTON T, GUARRERA V, *et al.* Generation of optical potentials for ultracold atoms using a superluminescent diode [J]. *Phys. Rev. Res.*, 2021, 3(3): 033241-1-7.
- [108] JANASSEK P, BLUMENSTEIN S, ELSÄBER W. Ghost spectroscopy with classical thermal light emitted by a superluminescent diode [J]. *Phys. Rev. Appl.*, 2018, 9(2): 021001-1-6.
- [109] TAKAHASHI Y, FUJIMOTO M, KIKUNAGA K, *et al.* Detection of ionized air using a photonic-crystal nanocavity excited by broadband light from a superluminescent diode [J]. *Opt. Express*, 2022, 30(7): 10694-10708.
- [110] LIU X J, LI Y, CAI H W, *et al.* Optical rotation detection for atomic spin precession using a superluminescent diode [J]. *Photonic Sens.*, 2019, 9(2): 135-141.



杨静航(1994-),女,吉林白山人,博士研究生,2020年于长春理工大学获得硕士学位,主要从半导体光电子器件的研究。
E-mail: 807857750@qq.com



晏长岭(1971-),男,河北保定人,博士,研究员,博士生导师,2000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子学与激光技术的研究。
E-mail: changling_yan@126.com