

文章编号: 1000-7032(2023)12-2258-07

基于InGaAs/GaAs量子阱结构的辐射标定因子实验研究

王 伟, 杨舒婷, 汪雅欣, 王宇轩, 王 茹, 于庆南*

(无锡学院 江苏省集成电路可靠性技术及检测系统工程研究中心, 江苏 无锡 214105)

摘要: 辐射标定因子作为半导体激光器的重要物理参数,在揭示器件性能方面一直扮演着重要角色。本文提出了一种测量辐射标定因子的实验方法,利用这一方法开展了对980 nm InGaAs/GaAs量子阱结构的辐射特性研究。该方法通过收集InGaAs/GaAs边发射结构两侧辐射的光致发光(PL)光谱,利用构建的理论公式,获得了该结构在不同注入载流子浓度下的辐射标定因子,均值波动范围约为 $7.16 \times 10^{10} \sim 3.36 \times 10^{11} \text{ W}^{-1} \cdot \text{eV}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。最后利用固体模型理论和载流子填充规律对该结果进行了分析,揭示了该结构在不同热平衡状态下的非平衡载流子能带填充水平,以及电子和空穴准费米能级的变化规律。该项研究提出了一种测量辐射标定因子的新方法,在揭示发光材料辐射机制和推动激光器发展方面具有较重要研究价值。

关键词: InGaAs/GaAs; 辐射标定因子; 光致发光光谱; 能带填充水平

中图分类号: O482.31

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20230249

Experimental Study of Emission Scaling Factor Based on InGaAs/GaAs Quantum Well Structure

WANG Wei, YANG Shuting, WANG Yaxin, WANG Yuxuan, WANG Ru, YU Qingnan*

(Jiangsu Province Engineering Research Center of Integrated Circuit Reliability Technology and Testing System, Wuxi University, Wuxi 214105, China)

* Corresponding Author, E-mail: qnyu@cxwu.edu.cn

Abstract: InGaAs/GaAs semiconductor lasers have shown great application potential in many fields with their excellent optical properties. The emission scaling factor is an important physical parameter in assessing and revealing semiconductor laser performance. In this paper, a novel experimental measurement approach of emission scaling factor for 980 nm InGaAs/GaAs quantum well structures is proposed and described, which is used to reveal and analyze the carrier-injected band-filling effect and radiation characteristics of semiconductor lasers. The theoretical formula between photoluminescence (PL) spectra and emission scaling factor of InGaAs/GaAs quantum well structures are established. In this method, the PL spectra emitted from the dual facets of InGaAs/GaAs edge-emitting laser structure are collected at room temperature 300 K, which is pumped by 808 nm fiber coupled lasers. The emission scaling factors of InGaAs/GaAs structure are obtained with the various carrier densities of 9.0×10^{17} , 9.2×10^{17} , 9.4×10^{17} , $9.6 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. The measurement results show that the emission scaling factor has an almost uniform distribution under the same thermal equilibrium state. In addition, the factors gradually increase to 7.98×10^{10} , 1.68×10^{11} , 2.65×10^{11} , $3.36 \times 10^{11} \text{ W}^{-1} \cdot \text{eV}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ with the rise of carrier densities. This is because the band-filling levels of electrons and holes gradually increase as the carrier densities increase, which lead to the separation of the quasi-Fermi levels of electrons (E_{Fn}) and holes (E_{Fp}) and a move to conduction band and valence band, respectively. The Fermi level represents the

收稿日期: 2023-10-22; 修订日期: 2023-11-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(62204172); “锡山英才计划”高校创新领军人才项目(2023xsyc002); 江苏省高等学校基础科学(自然科学)研究项目(22KJB140016); 江苏省双创博士项目(JSSCBS20210870, JSSCBS20210868); 南京信息工程大学滨江学院人才启动经费(550221009, 550221036)

Supported by National Natural Science Foundation of China(62204172); The Innovative Leading Talents in the Universities of Xishan Talents Program(2023xsyc002); The Natural Science Foundation of Jiangsu Higher Education Institutions (22KJB140016); Shuangchuang Ph.D Award in Jiangsu Province (from World Prestigious Universities) (JSSCBS20210870, JSSCBS20210868); The Startup Foundation for Introducing Talent of NUIST Binjiang College(550221009, 550221036)

boundary between quantum states that are basically occupied or empty. Therefore, the quantum state within the quasi-Fermi energy spacing is basically filled by carriers, and the quantum state larger than that is basically empty. This causes the emission scaling factor to gradually decrease at the quasi-Fermi energy spacing. The great significance of this work lies in that it can not only propose a novel experimental method for the emission scaling factor, but also reveal the energy filling levels of non-equilibrium carrier under different thermal equilibrium states. This study has important research value for revealing the radiation mechanism and promoting the development of semiconductor lasers.

Key words: InGaAs/GaAs; emission scaling factor; photoluminescence spectra; band-filling effect

1 引言

InGaAs/GaAs 半导体激光器由于其优良特性,已经广泛应用于通信传输、医疗卫生、空间探测等领域^[1-8]。辐射标定因子作为揭示半导体激光器件工作机制和特性的重要参数,是设计和评估半导体激光器的重要指标,它表征了载流子分布、光学增益、自发辐射速率、自发辐射等参数之间的内在联系^[9],是关于电子和空穴复合产生有效发光的程度描述。该参数统一概括了自发辐射强度在任意单位和不同光场模式下的转换关系,可以将从端面收集到的自发辐射(任意单位)转换为真实的辐射强度^[10]。然而,现阶段国内外关于辐射标定因子的报道较少,大都只给出了以上物理量和辐射标定因子的理论公式,并未给出具体的测量方法,也未提及该因子的具体数值^[11-12]。因此,本文提出一种新的测量方法来探究辐射标定因子的数值大小和分布。虽然该参数可以通过理论仿真获得,但在计算中有些特殊参数的具体数值难以获得,不得不进行近似处理。同时,理论计算还忽略了器件制备和工艺处理过程中可能引入的结构缺陷,因此理论仿真仅是一种理想情况下的计算结果,无法真实地反映激光器的实际辐射特性。InGaAs/GaAs 量子阱结构具有极其优良的光学特性,在超宽调谐激光器以及同步双频激光器等领域已经展现出了巨大应用潜力^[13-14]。因此,如何通过有效的实验方法来获得该量子阱结构的辐射标定因子对探究其辐射特性意义重大。本文通过测量 InGaAs/GaAs 量子阱外延结构芯片两侧辐射的光致发光光谱(PL),计算获得了不同光注入浓度下的辐射标定因子,对探究和评估半导体激光器的性能具有较大参考价值。

本文首先利用金属有机化学气相沉积系统(MOCVD)生长获得 InGaAs/GaAs 量子阱结构,利用 808 nm 光纤耦合光源作为泵浦能源,通过光泵

技术测量和分析了由该量子阱结构产生的 PL 光谱。通过对其中一个端面进行增透处理,结合该结构两端辐射的 PL 光谱,测量并获得了在不同载流子注入浓度下的辐射标定因子。最后,利用固体模型理论对该参数进行了分析和讨论。

2 InGaAs/GaAs 量子阱结构及测量装置

2.1 材料结构

本文设计 InGaAs/GaAs/GaAsP 材料体系作为量子阱结构的有源区,基本材料组成及波导微观结构如图 1 所示。所采用的 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 势阱的铟含量 $x=0.17$,层厚为 10 nm。InGaAs 材料被嵌入在两个厚度为 2 nm 的 GaAs 应变缓冲层之间,缓冲层外侧分布有 8 nm 厚的 $\text{GaAs}_{0.92}\text{P}_{0.08}$ 势垒,用以吸收泵浦光。 $\text{In}_{0.17}\text{Ga}_{0.83}\text{As}$ 和 GaAs 材料的晶格常数 a 分别为 0.572, 0.565 nm, GaAsP 的晶格常数利用插值法^[15]求得,即 $a(\text{GaAs}_{0.92}\text{P}_{0.08})=0.92 \times a(\text{GaAs})+0.08 \times a(\text{GaP})=0.563$ nm。因此, GaAs 层的作用是为了缓解和补偿 $\text{In}_{0.17}\text{Ga}_{0.83}\text{As}$ 势阱和 $\text{GaAs}_{0.92}\text{P}_{0.08}$ 势垒之间的高晶格失配和应变,以减少在材料生长过程中由应力导致的缺陷。该量子

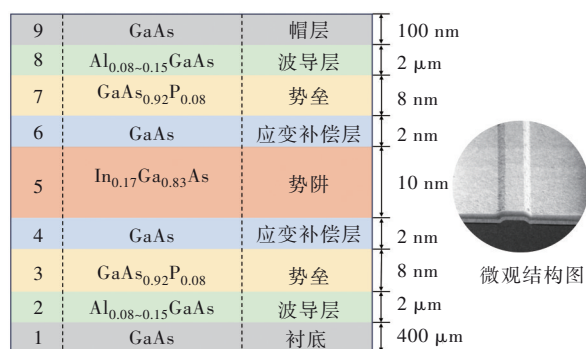


图 1 InGaAs/GaAs 量子阱结构的基本材料组成及波导结构图

Fig.1 Basic material composition and waveguide structure of InGaAs/GaAs quantum well

阱结构在 660 °C 和 10^4 Pa 的生长环境下以 $0.7 \mu\text{m}/\text{h}$ 的速率进行沉积, V 族源和 III 族源的量比 V/III 为 $40^{[16]}$ 。

2.2 测量装置

为了测量获得 InGaAs/GaAs 量子阱结构的辐射标定因子, 本文对样品的端面进行了特殊处理。一端镀有增透膜, 透过率为 99.9%; 另一端为自然解理面, 反射率 $R=30\%$ 。由于量子阱层厚度 (10 nm) 远小于波导层厚度 ($2 \mu\text{m}$), 所以端面反射率 R 主要取决于波导层 AlGaAs 材料。端面反射率可由以下公式确定^[17]

$$R = \left(\frac{n_{\text{AlGaAs}} - n_{\text{air}}}{n_{\text{AlGaAs}} + n_{\text{air}}} \right)^2, \quad (1)$$

其中 n_{air} 和 n_{AlGaAs} 分别表示空气和波导层材料折射率。

本文建立了如图 2(a) 所示的实验测量系统。使用 808 nm 光纤耦合激光器 (公司: 北京镭志威光电技术有限公司, 型号: LWIRL808-40W-F) 作为泵浦能源, 利用光纤耦合系统对 InGaAs/GaAs 量子阱外延结构双侧辐射的 PL 光谱进行收集测量。注入光功率 P 与载流子浓度 N 的转换关

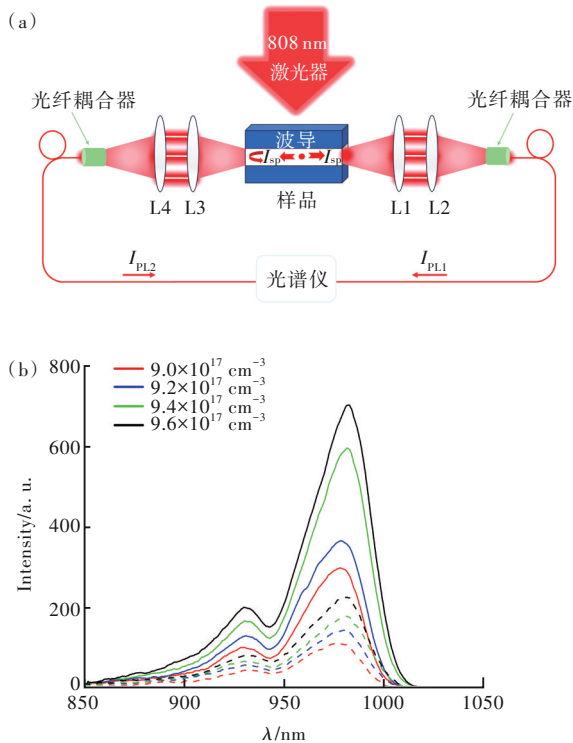


图 2 (a) PL 光谱测量原理图; (b) 不同载流子浓度的 PL 光谱。

Fig.2 (a) The measurement principle of PL spectra. (b) The PL spectra with various carrier densities.

系为^[18]:

$$N = \frac{\eta_{\text{abs}} P}{h\nu N_{\omega} L_{\omega} A_p} \tau(N), \quad (2)$$

其中 η_{abs} 为泵浦吸收效率, $h\nu$ 为光子能量, A_p 为泵浦光斑面积, τ 为载流子寿命, N_{ω} 和 L_{ω} 分别为增益介质中量子阱的个数和厚度。

为了规避热效应对测量结果的影响, 提高测量精度, 利用信号发生器将泵浦光源调制为脉冲工作方式, 脉宽为 20 ms。在室温 300 K 下, 利用上述实验装置测量获得了 InGaAs 量子阱样品在不同载流子注入浓度下材料两侧辐射的 PL 光谱, 测量结果如图 2(b) 所示。其注入载流子浓度分别为 9.0×10^{17} (红), 9.2×10^{17} (蓝), 9.4×10^{17} (绿), $9.6 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ (黑), 其中实线和虚线分别表示从端面 1 ($T=99.9\%$) 和端面 2 ($R=30\%$) 采集的 PL 光谱 I_{PL1} 和 I_{PL2} 。

图 2(b) 中的 PL 光谱呈现出特殊的双峰特征, 这是由于在生长高应变 InGaAs/GaAs 材料时的富铜岛效应导致的。铜原子迁移将导致材料内部包含两种不同组分的有源区, 其光谱叠加导致了光谱的双峰现象^[19]。

3 测量原理

为了建立 InGaAs/GaAs 量子阱结构辐射标定因子和双侧 PL 光谱强度的公式关系, 本文首先建立 InGaAs 材料 PL 光谱强度和模式增益 G 之间的关系为^[20]:

$$I_{\text{PL1}} = \frac{I_{\text{sp}}}{G} (e^{GL} - 1) (Re^{GL} + 1), \quad (3)$$

$$I_{\text{PL2}} = \frac{(1-R)I_{\text{sp}}}{G} (e^{GL} - 1), \quad (4)$$

其中 L 表示 InGaAs 量子阱外延结构长度, I_{sp} 表示自发辐射强度, I_{PL1} 和 I_{PL2} 是分别从材料两个端面 ($T=99.9\%$ 和 $R=30\%$) 测量的 PL 光谱强度。通过公式 (3) 和 (4) 可以获得模式增益 G 的表达式为:

$$G = \frac{1}{L} \ln \frac{(1-R)I_{\text{PL1}} - I_{\text{PL2}}}{R \times I_{\text{PL2}}}, \quad (5)$$

将公式 (5) 代入公式 (4), 即可获得自发辐射强度的表达式为:

$$I_{\text{sp}} = \frac{R I_{\text{PL2}}^2}{L \left[(1-R)^2 I_{\text{PL1}} - (1-R^2) I_{\text{PL2}} \right]} \ln \frac{(1-R)I_{\text{PL1}} - I_{\text{PL2}}}{R \times I_{\text{PL2}}}, \quad (6)$$

为了通过实验获得量子阱结构的辐射因子, 我们

引入反转因子 $P_F^{[21]}$:

$$P_F = \left[1 - \exp\left(\frac{h\nu - \Delta E_f}{k_B T}\right) \right], \quad (7)$$

其中, ΔE_f 表示电子和空穴的准费米间距, 该参数可由材料增益零点确定; T 为温度; k_B 表示玻尔兹曼常数; $h\nu$ 代表光子能量。辐射标定因子 C 的表达式为^[21]:

$$C = \frac{1}{P_F} \frac{1}{\Gamma} \left(\frac{2n^2 h^2 \nu^2}{3\pi^2 \hbar^3 c^2} \right) \left(\frac{G}{I_{sp}} \right), \quad (8)$$

其中 c 表示真空中的光速; n 代表有源层的折射率, 值约为 1.5; Γ 表示光限制因子, 与波导层厚度有关, 大小约为 0.002 49。

将公式(5)、(6)、(7)代入公式(8)可获得辐射标定因子 C 的表达式为:

$$C = \frac{2n^2 h^2 \nu^2 \left[(1 - R)^2 I_{PL1} - (1 - R^2) I_{PL2} \right]}{3\pi^2 \hbar^3 c^2 \Gamma R I_{PL2}^2 \left[1 - \exp\left(\frac{h\nu - \Delta E_f}{k_B T}\right) \right]}, \quad (9)$$

由公式(9)可知, 只要确定了费米间距 ΔE_f , 就可以通过 InGaAs 外延结构两端辐射的 PL 光谱求得该材料的辐射标定因子。

4 结果与分析

由公式(9)可知, 要想获得辐射标定因子, 除了 PL 光谱, 还需求得电子和空穴的准费米间距 ΔE_f , 其大小可由材料增益零点确定。为了获得 InGaAs 结构电子和空穴的费米间距 ΔE_f , 首先建立材料增益 g 与模式增益 G 的关系为 $g = (G + a) / \Gamma^{[22]}$, 其中 a 表示 InGaAs 材料内部损耗, 主要来源于材料内部散射和吸收, 可由模式增益评估产生^[23-24]。因此, 将图 2(b) 中测量的 PL 光谱带入公式(5), 计算获得不同光注入浓度下的模式增益 G , 结果如图 3(a) 所示, 内部损耗评估约为 $a = 5.0 \text{ cm}^{-1}$ 。同理, 利用损耗系数 a 和图 3(a) 中的模式增益 G , 可计算获得该结构的材料增益 g , 结果如图 3(b) 所示。

根据图 3(b) 材料增益零点对应的光子能量可获得电子和空穴在不同载流子注入浓度下的费米间距 ΔE_f ^[22]。室温 300 K 下, 载流子注入浓度为 $9.0 \times 10^{17}, 9.2 \times 10^{17}, 9.4 \times 10^{17}, 9.6 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 时对应的准费米间距分别为 1.357, 1.363, 1.380, 1.398 eV。将图 2(b) 中的光谱数据带入公式(9), 结合上述准费米间距, 可计算获得 InGaAs 量子阱结构的辐射标定因子 C , 结果如图 4 所示。

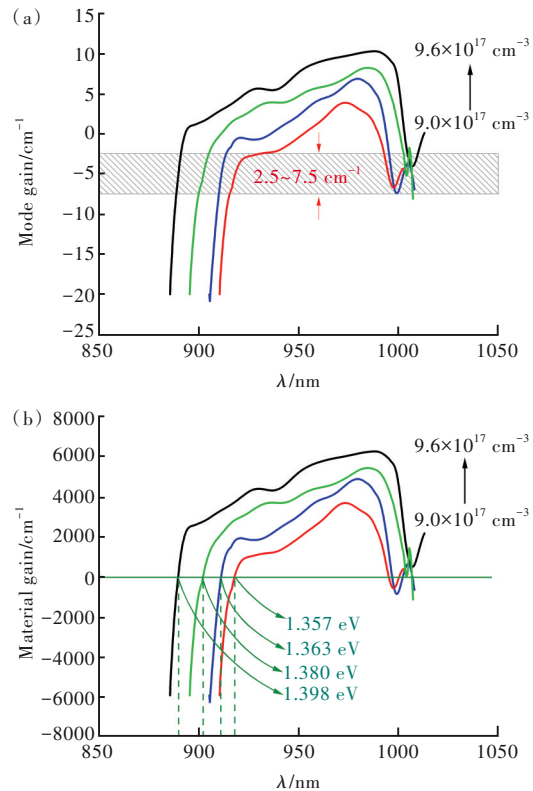


图 3 不同光注入浓度下的模式增益 G (a) 和材料增益 g (b)

Fig.3 The mode gain G (a) and material gain g (b) with different carrier densities

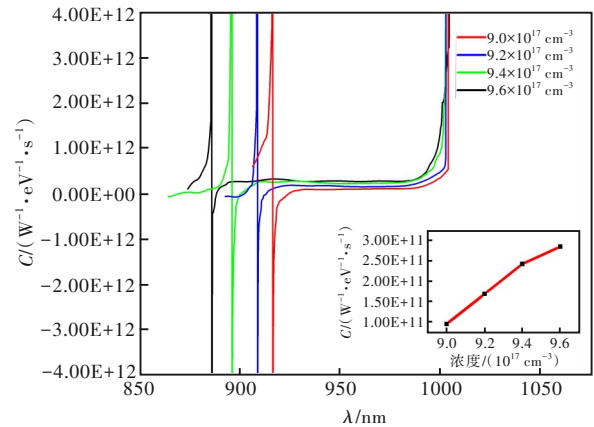


图 4 不同光注入浓度下的辐射标定因子曲线及其变化趋势

Fig.4 The curves of emission scaling factor under different carrier densities and their variations

由图 4 分析可知, 在同一热平衡状态下(相同的载流子注入浓度和工作温度), 该 InGaAs 量子阱结构具有统一的辐射标定因子, 该参数随不同工作条件下的变化趋势如图 4 中插图所示。该曲线清晰地反映出辐射标定因子 C 随注入浓度的增加逐渐增大, 这是由于随着光泵浦功率的增加, 注

入的非平衡载流子浓度逐步增大,使得电子-空穴对的复合几率增大所致。同时,随着载流子注入浓度增大,辐射标定因子增加的幅度逐渐变缓,这是由载流子的填充逐渐饱和引起的。

此外,图 4 还反映了辐射标定因子在费米间距处发生转折,随能量的增大逐渐降低,在数值上由正转负,这是由于粒子数反转在准费米能级发生突变所致。辐射标定因子表征电子和空穴的有效复合程度,该因子依赖于载流子反转分布程度以及能带填充水平。当对半导体材料施加光照时,光生载流子首先占据低能级并实现粒子数反转,可以实现电子和空穴的有效辐射复合,光子的产生率大于吸收率,产生正的辐射标定因子。而对于未能实现载流子反转分布的高能级,无法获得电子和空穴的有效辐射,光子的产生率小于于吸

收率,产生负的辐射标定因子。本文利用载流子的填充规律对其进行了阐述,具体如图 5 所示。非平衡载流子的注入将导致电子和空穴的准费米能级 E_{Fn} 和 E_{Fp} 分开并逐渐向高能级移动。费米能级代表了量子状态基本被载流子填充或者基本空余的分界线,因此准费米间距以内的能级基本被载流子填充,大于准费米间距的能级状态基本为空。因此,辐射标定因子在准费米能级处逐渐减小,该结论与图 4 中的变化规律一致,验证了该测量方法的准确性,同时揭示了该结构在不同热平衡状态下的非平衡载流子填充水平。

5 结 论

本文提出了一种测量辐射标定因子的实验方法,通过实验装置收集样品两端辐射的光致发光 (PL) 光谱,计算获得了 InGaAs 量子阱结构在不同载流子注入浓度下的辐射标定因子,其结果分别为 7.98×10^{10} , 1.68×10^{11} , 2.65×10^{11} , $3.36 \times 10^{11} \text{ W}^{-1} \cdot \text{eV}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。最后利用能带结构对该结果进行了讨论和分析,揭示了该结构在不同热平衡状态下电子和空穴的准费米能级变化规律和非平衡载流子填充水平的关系。该项研究不仅提出了一种测量辐射标定因子的新方法,也对揭示发光材料辐射机制和推动激光器发展具有重要研究价值。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:
<http://cjil.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20230249>.

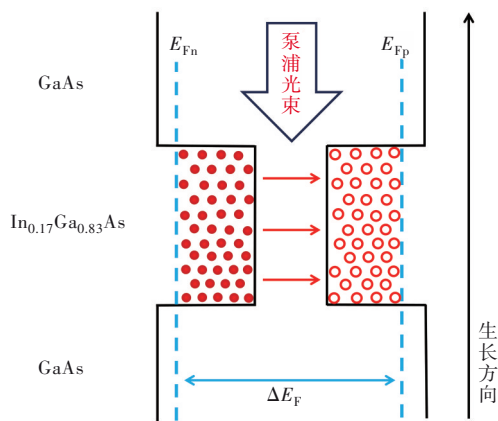


图 5 载流子填充规律

Fig.5 The band-filling rules of electrons and holes

参 考 文 献:

- [1] CHEN T, LIU Z Q, YANG Q C, *et al.* 4×10 Gbps WDM communication system based on a tunable V-cavity semiconductor laser [J]. *Opt. Express*, 2023, 31(17): 28174-28184.
- [2] ZHOU P, ZHU J, ZHANG R H, *et al.* Bandwidth-enhanced LFM waveform generator based on dynamic control of an optically injected semiconductor laser [J]. *Opt. Lett.*, 2022, 47(15): 3864-3867.
- [3] 黄润宇, 赵伟林, 曾辉, 等. InP 基单光子探测器的发展和应用 [J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(10): 1011009.
 HUANG R Y, ZHAO W L, ZENG H, *et al.* Development and application of InP-based single photon detectors [J]. *Laser Optoelectron. Prog.*, 2021, 58(10): 1011009. (in Chinese)
- [4] 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): 1-19.
 WANG L J, NING Y Q, QIN L, *et al.* Development of high power diode laser [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2015, 36(1): 1-19. (in Chinese)
- [5] 唐恒敬, 吕衍秋, 张可锋, 等. 空间遥感用 InGaAs 短波红外探测器 [J]. *激光与光电子学进展*, 2007, 44(5): 42-49.
 TANG H J, LÜ Y Q, ZHANG K F, *et al.* Short-wavelength infrared InGaAs photodetector for spatial remote sensing [J].

- Laser Optoelectron. Prog.*, 2007, 44(5): 42-49. (in Chinese)
- [6] 李再金, 芦鹏, 李特, 等. 1.06 μm InGaAs/InGaAsP 量子阱半导体激光器的温度特性 [J]. *发光学报*, 2012, 33(6): 647-650.
- LI Z J, LU P, LI T, *et al.* Temperature characteristic of 1.06 μm InGaAs/InGaAsP quantum well laser diode [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2012, 33(6): 647-650. (in Chinese)
- [7] 宁永强, 刘云, 王立军, 等. InGaAs 量子点激光器光增益的温度特性 [J]. *红外与毫米波学报*, 2002, 21(4): 285-288.
- NING Y Q, LIU Y, WANG L J, *et al.* Temperature dependence of optical gain in InGaAs quantum dots laser [J]. *J. Infrared Millimeter Waves*, 2002, 21(4): 285-288. (in Chinese)
- [8] 徐华伟, 宁永强, 曾玉刚, 等. 852 nm 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, 33(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]. *Chin. J. Lumin.*, 2012, 33(6): 640-646. (in Chinese)
- [9] YU Q N, JIA Y, LU W, *et al.* Experimental characterization of true spontaneous emission rate of optically-pumped InGaAs/GaAs quantum-well laser structure [J]. *AIP Adv.*, 2017, 7(8): 085319.
- [10] LEWIS G M, SMOWTON P M, BLOOD P, *et al.* Measurement of transverse electric and transverse magnetic spontaneous emission and gain in tensile strained GaInP laser diodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, 80(19): 3488-3490.
- [11] OSIŃSKI M. Diode lasers and photonic integrated circuits [J]. *Opt. Eng.*, 1997, 36(2): 616-617.
- [12] SHIELDS P A, NICHOLAS R J, TAKASHINA K, *et al.* Observation of magnetophotoluminescence from a GaN/Al_x-Ga_{1-x}N heterojunction [J]. *Phys. Rev. B*, 2002, 65(19): 195320.
- [13] 王傲, 邹永刚, 李明宇, 等. 高调谐效率 V 型腔可调谐半导体激光器设计与研究 [J]. *发光学报*, 2020, 41(8): 977-983.
- WANG A, ZOU Y G, LI M Y, *et al.* Design and research of high tuning efficiency V-cavity tunable semiconductor laser [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2020, 41(8): 977-983. (in Chinese)
- [14] 赵佳生, 夏治民, 李乔力, 等. 低成本可调谐半导体激光器研究进展 [J]. *光学学报*, 2022, 42(17): 1714003.
- ZHAO J S, XIA Y M, LI Q L, *et al.* Research progress in low-cost tunable semiconductor lasers [J]. *Acta Opt. Sinica*, 2022, 42(17): 1714003. (in Chinese)
- [15] 王嘉宾. InGaAs/GaAsP 超晶格在 GaAs/Si 异质外延中作用研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2023.
- WANG J B. *Effect of InGaAs/GaAsP Superlattice on GaAs/Si Heteroepitaxy* [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2023. (in Chinese)
- [16] 于庆南, 刘子健, 王新宇, 等. InGaAs 阱簇复合结构中镉原子自适应迁移的临界厚度研究 [J/OL]. *光学学报*, 2023: 1-12. [2023-10-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1252.04.20230629.0919.020.html>.
- YU Q N, LIU Z J, WANG X Y, *et al.* Study on critical thickness of the indium atoms self-fit migration in InGaAs well-cluster composite structure [J/OL]. *Acta Opt. Sinica*, 2023: 1-12. [2023-10-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1252.04.20230629.0919.020.html>. (in Chinese)
- [17] 马明磊, 吴坚, 杨沐, 等. 基于两端自发荧光辐射的 808 nm 半导体激光器增益偏振特性实验表征和能带分析 [J]. *物理学报*, 2013, 62(17): 174209.
- MA M L, WU J, YANG M, *et al.* Experimental characterization of polarization gain properties of 808 nm semiconductor laser and analysis of energy band based on amplified spontaneous emissions from double facets [J]. *Acta Phys. Sinica*, 2013, 62(17): 174209. (in Chinese)
- [18] KUZNETSOV M, HAKIMI F, SPRAGUE R, *et al.* Design and characteristics of high-power (>0.5-W CW) diode-pumped vertical-external-cavity surface-emitting semiconductor lasers with circular TEM/sub 00/ beams [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.*, 1999, 5(3): 561-573.
- [19] YU H P, ROBERTS C, MURRAY R. Influence of indium segregation on the emission from InGaAs/GaAs quantum wells [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1995, 66(17): 2253-2255.
- [20] MA M L, WU J, NING Y Q, *et al.* Measurement of gain characteristics of semiconductor lasers by amplified spontaneous emissions from dual facets [J]. *Opt. Express*, 2013, 21(8): 10335-10341.
- [21] LEWIS G M, SMOWTON P M, THOMSON J D, *et al.* Measurement of true spontaneous emission spectra from the facet

- of diode laser structures [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, 80(1): 1-3.
- [22] THOMSON J D, SUMMERS H D, HULYER P J, *et al.* Determination of single-pass optical gain and internal loss using a multisection device [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, 75(17): 2527-2529.
- [23] WESTERFELD D, SUCHALKIN S, KASPI R, *et al.* Absorption and single-pass gain measurements in optically pumped type-II midinfrared laser structures [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2004, 40(12): 1657-1662.
- [24] JIA Y, YU Q N, LI F, *et al.* Experimental investigation of loss and gain characteristics of an abnormal $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ quantum well structure [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2018, 16(1): 011402.



王伟(1984-),男,江苏泰兴人,博士,高级工程师,2012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、半导体激光器及可靠性方面的研究。
E-mail: 860009@cw Xu. edu. cn



于庆南(1990-),男,山东济宁人,博士,讲师,硕士生导师,2020年于北京航空航天大学获得博士学位,主要从事InGaAs半导体结构的超宽调谐特性和双频激射特性的研究。
E-mail: qnyu@cw Xu. edu. cn