材料、结构及工艺

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022081901

覆盖S+C波段的宽光谱带宽InGaAlAs/InP量子阱结构

周　帅，冯　琛*，廖苗苗，罗　晶，彭芳草，贺　勇，段利华，张　靖

（重庆光电技术研究所，重庆 400060）

摘　要： 通过理论仿真和实际制备测试，分析比较了基于非对称量子阱结构（10 nm厚和6 nm厚的量子阱组合）的光放大芯片与对称量子阱结构（10 nm厚量子阱）的光放大芯片的性能。两种结构的理论模式增益同最终实测值符合较好。最终光谱测试结果显示，对称量子阱结构的光放大芯片存在基态增益饱和的现象，在大电流注入情况下，激态跃迁占据优势，从而造成光谱宽度急剧下降。而非对称量子阱结构的光放大芯片的光谱宽度随着注入电流的增加不断拓宽，在600 mA下实现199.7 nm光谱带宽，覆盖S+C波段。由此可见，非对称量子阱结构更有利于实现高功率、宽光谱的光放大芯片。

关键词： 宽光谱；S+C波段；InGaAlAs/InP；对称和非对称多量子阱

中图分类号： TN929.11　**文章编号：** 1001－5868(2022)05－0914－04

Wide Optical Bandwidth InGaAlAs/InP Quantum-Well Structure Covering S+C Band

ZHOU Shuai, FENG Chen, LIAO Miaomiao, LUO Jing,
PENG Fangcao, HE Yong, DUAN Lihua, ZHANG Jing

(Chongqing Optoelectronics Research Institute, Chongqing 400060, CHN)

Abstract: Through theoretical simulation and fabrication, the performance of optical amplification chip based on asymmetric quantum-wells (10 nm and 6 nm mixed quantum-wells) and symmetric quantum-wells (10 nm quantum-wells) was analyzed and compared. The theoretical mode gains of the two structures were in good agreement with the measured results. The final spectral test results show that the fundamental state gain saturation exists in the symmetric quantum-wells optical amplification chip. The excited state transition dominates in the case of large current injection, resulting in a sharp decrease in the spectral bandwidth. With the increase of injection current, spectral width of asymmetric quantum-wells optical amplification chip is widened constantly. The optical bandwidth of 199.7 nm is achieved at 600 mA, covering the S+C bands. Therefore, the asymmetric quantum well structure is more conducive to the realization of high power and wide spectrum optical amplification chip.

Key words: wide spetrum; S+C band; InGaAlAs/InP; symmetric and asymmetric multi-quantum-well

0　引言

宽光谱带宽的半导体光放大芯片技术在诸多领域均有重要应用。如半导体光放大芯片技术可以应用于波分复用系统中的半导体光放大器（SOA）[1]；应用于光学相干层析成像（OCT）的超辐射发光二极管（SLD）[2-3]；应用于可调谐外腔窄线宽半导体激光器（ECL）中的增益芯片[4]。在这些应用中，半导体光放大芯片最重要的特性之一就是光谱宽度。足够宽且平坦度好的光谱宽度，可以拓展应用系统的工作频段，增加通信容量。

收稿日期：2022－08－19.

*通信作者：冯　琛

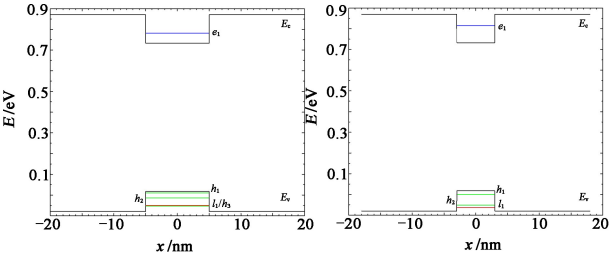
E-mail： feng_chen718@hotmail.com

目前，科研人员仍然在致力于拓展半导体光放大芯片的光谱宽度的研究中，尤其是针对人眼安全的 1.5 μm 波段。Park 等[1]利用传统的 InGaAsP 和 InGaAs 有源层实现了光谱带宽大于 95 nm 的 SOA(C+L 波段)。Faugeron 等[2]利用基于非对称包层结构的厚 InGaAsP 量子阱实现了大于 135 nm 的光谱带宽，覆盖 C+L 波段。Lin 等[5]提出利用非对称的多量子阱来拓展光谱宽度，他们提出利用三对 6 nm $In_{0.67}Ga_{0.33}As_{0.72}P_{0.28}$ 量子阱和两对 15 nm 的 $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ 的非对称量子阱组合来实现光谱拓展。Carrère 等[6]报道了单纯利用激发态到基态跃迁形成近 100 nm 光谱宽度的 1.5 μm SOA。

本文从理论和实际两个方面，比较研究了对称量子阱结构和非对称量子阱结构光放大芯片的光谱特性。从理论上分析了两种结构芯片随注入电流的变化趋势。着重讨论了不同注入载流子密度下，不同量子阱结构的光谱特性，从而针对不同应用背景，可采用不同的量子阱结构。

1　芯片设计及制备

在 n-InP 衬底(100)方向生长 InGaAlAs 量子阱结构。量子阱包括了 $In_{0.64}Ga_{0.32}Al_{0.04}As$ 压应变量子阱，晶格失配度为 0.75%。势垒采用 $In_{0.53}Ga_{0.49}Al_{0.13}As$($\lambda=1.3$ μm)，晶格常数同衬底相当。量子阱经由 15 nm 厚的势垒分开，量子阱和势垒交替分布，从而保证每个量子阱的量子化态彼此不耦合，以期得到所需的能级跃迁[7]。通过求解 Lüttinger-Kohn Hamiltonian 量，我们得到了 10 nm 厚 InGaAlAs/InGaAlAs 量子阱以及 6 nm 厚 InGaAlAs/InGaAlAs 量子阱的能级分布，如图 1 所示。图 1 中蓝色能级代表导带(e)，绿色能级代表价带中的重空穴能级(h)，红色能级代表价带中轻空穴能级。由此可见，不同厚度的量子阱结构能级分布不一致，从而由能级跃迁产生的光发射波长也不一致。可以利用不同结构量子阱的发光范围不一致，通过组合量子阱结构形成发光强度互补的宽谱光信号。



(a)　10 nm 厚量子阱　　(b)　6 nm 厚量子阱

图 1　仿真得到的量子阱结构能级分布

在本文的工作中，制备了两种结构量子阱组合。结构 A 为两个 10 nm 厚的量子阱。结构 B 包含了两种厚度的量子阱，两个 6 nm 厚的量子阱靠近 p 面，一个 10 nm 厚的量子阱靠近 n 面。量子阱结构两边分布了 0.1 μm 厚的 InGaAlAs 非掺杂缓变折射率分别限制层(GRINSCH)。整个量子阱结构夹在 InP-p 面包层和 InP-n 面包层中间。整个光放大芯片利用 SiO_2 掩膜制备脊波导结构实现横模控制，波导宽度为 3.0 μm。波导相对于(011)晶体方向倾斜 10°(如图 2，α 角)，可以有效降低芯片端面反射带来的对发光谱的调制。光放大芯片 p 面电极采用 Ti/Pt/Au，芯片减薄至 110 μm，再制备 n 面 Ti/Pt/Au 电极。合金后，将外延片解理成 1.0 mm 长的巴条，并且在巴条两端镀上 4 层系宽带增透膜。最后将巴条解理为单芯片，单芯片通过共晶焊烧焊至 AlN 热沉上。对光放大芯片加电发射自发辐射(ASE)光。发射的光经由端面增透的单模光纤引入光谱分析仪，在 0.1 nm 的光谱分辨率下对该 ASE 光进行测试。

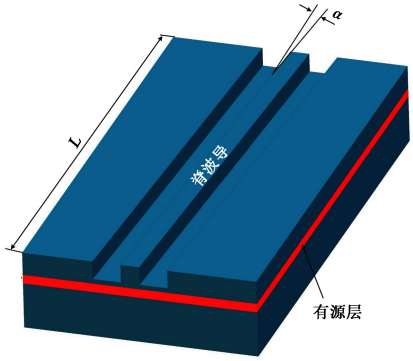
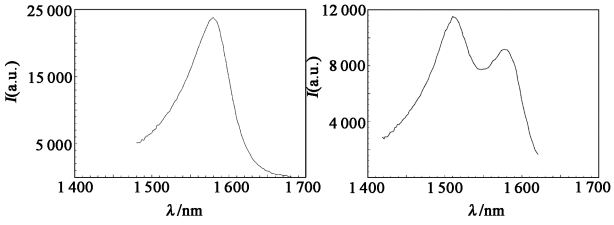


图 2　光放大增益芯片结构示意图

2　仿真结果与测试

图 3(a)，(b)分别显示了结构 A 和 B 在室温下

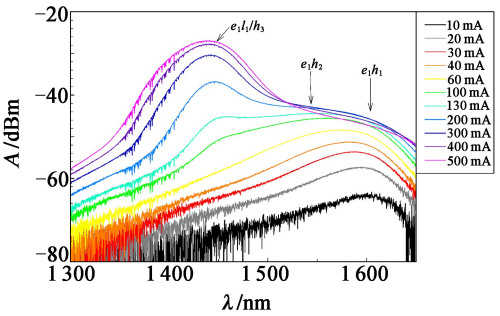


(a)　结构 A　　(b)　结构 B

图 3　仿真得到的室温下的光致发光谱

的仿真光致发光谱(PL)。其中,结构 A 的光谱峰值和半高全宽(FWHM)分别为 1 578.5 和 72.3 nm。结构 B 有明显的两个峰值,分别为 1 510.5 和 1 577.1 nm,FWHM 为 119.8 nm。

对结构 A 的量子阱进行了材料模式增益计算。具体的计算原理及过程参照 Lysak[8-9] 提出的对二维材料模式增益的数值仿真。计算了 6 个不同载流子注入密度下的模式增益,结果如图 4(a)所示。载流子密度分别为 0.2×10^{24},0.3×10^{24},0.4×10^{24},0.5×10^{24},0.7×10^{24},1.0×10^{24} m^{-3}。由图 4(a)结果可知,当注入载流子密度增加时,量子阱结构实现了在激发态的粒子数反转。在 $n=1$ 和 $n\geqslant2$ 的电子和空穴能级之间跃迁,使得光谱带宽显著增加。所有可能的能级跃迁均在图 1(a)和图 4(a)中进行了标注。最低的能级跃迁发生在第一电子能级和第一重空穴能级之间(e_1h_1@0.771 eV,$\lambda=1.609$ μm)。第二能级跃迁发生在第一电子能级和第二重空穴能级之间(e_1h_2@0.795 eV,$\lambda=1.562$ μm)。最高能级跃迁发生在第一电子能级和第三重空穴能级之间(e_1h_3@0.834 eV,$\lambda=1.488$ μm)。实测 ASE 光谱图如图 4(b)所示。图中 A 表示增益芯片出光面经由锥形单模光纤耦合,出纤功率最大时的光谱强度。实验结果显示的光谱值同理论计算模式增益值吻合。从图 4(b)中可以看出,在低电流注入时($I=10$ mA),仅观察到基态能级(e_1-h_1)发生跃迁,对应的峰值 1 605 nm,FWHM 为 66.9 nm。当提升注入电流时($I=40$ mA),观察到了激态能级(e_1-h_2)发生跃迁。继续提升注入电流($I=130$ mA),观察到基态能级(e_1-h_1)和激态能级(e_1l_1/h_3)的发光强度几乎一致,使得整个光谱呈现平顶形状。此时 FWHM 达到该结构最大 174.7 nm。由于(l_1-h_3),e_1l_1 和 e_1h_3 之间能级分裂不明显,因此在室温下未能观察到相应的能级跃迁。当注入电流达到 200 mA时,激态

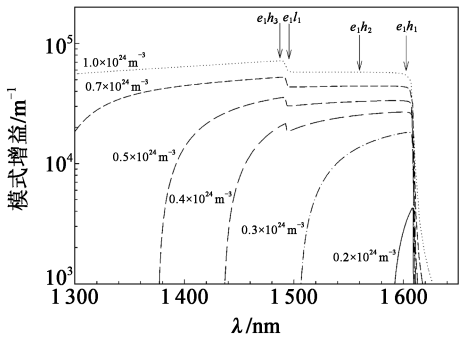


(b) 实测 ASE 曲线

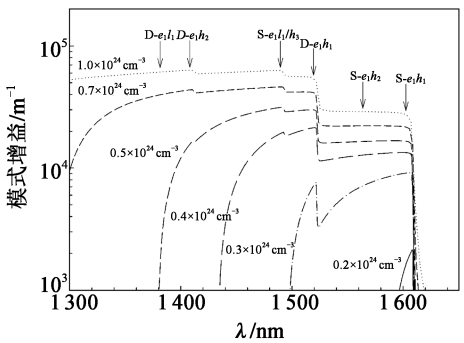
图 4 结构 A 的材料模式增益随电流变化趋势

(e_1l_1/h_3)的能级跃迁谱占据了优势地位。基态的能级因为已经被填满,出现饱和现象。如果继续增大电流,则继续增强激态能级,此时的 FWHM 较电流较低时的 FWHM 急剧下降,直至趋于稳定。

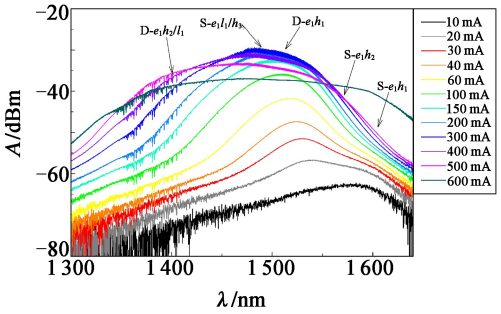
对结构 B 的量子阱进行了材料模式增益计算。计算得到的材料模式增益是一个 10 nm 厚量子阱(S-)和两个 6 nm 厚量子阱(D-)的叠加。10 nm 厚的量子阱能级跃迁发生在 S-e_1h_1,S-e_1h_2 和 S-e_1l_1/h_3 之间,同图 4(a)一致。这里着重讨论 6 nm 厚量子阱的能级跃迁。如图 5(a)所示,最低的能级跃迁发生在第一电子能级和第一重空穴能级之间(D-e_1h_1@0.815 eV,$\lambda=1.523$ μm)。第二能级跃迁发生在第一电子能级和第二重空穴能级之间(D-e_1h_2@0.867 eV,$\lambda=1.432$ μm)。第三能级跃迁发生在第一电子能级和第一轻空穴能级之间(D-e_1l_1@0.879 eV,$\lambda=1.411$ μm)。图 5(b)是实测的结构 B 在室温下的 ASE 曲线。从图 5(b)中可以明显区分出两个不同尺寸量子阱结构对应的光谱峰。在低电流注入时($I=10$ mA),仅能观察到 10 nm 厚量子阱结构基态(S-e_1-h_1)ASE 跃迁。对应的峰值 1 580 nm,FWHM 为 85.9 nm。当注入电流达到 20 mA 时,激态 D-e_1l_1 和 S-e_1l_1/h_3 的跃迁占据主导地位。当注入电流持续增大,达到 500 mA时,FWHM增至



(a) 仿真模拟结果



(a) 仿真模拟结果



(b)　实测 ASE 曲线

图 5　结构 B 的材料模式增益随电流变化趋势

127.1 nm；注入电流 600 mA 时，FWHM 达到 199.7 nm。同时观察到增益峰值有明显下降。这可能是因为非对称量子阱结构中较宽禁带吸收了较窄禁带跃迁的光子能量，造成了整体增益强度的下降。这将在后续的工作中做一进步探讨。

3　结论

本文基于两种不同结构的 InGaAlAs/InP 量子阱光放大芯片，进行了理论仿真比较和实测 ASE 结果比较。结果显示，对于拥有 2 个 10 nm 厚量子阱结构的光放大芯片，随着注入电流的增大，很容易在激态状态下实现粒子数反转。发生在 $n=1$ 和 $n=2$ 电子和空穴之间的能级跃迁随着电流的增大，不断的拓展光谱宽度。在 130 mA 注入电流时，实测 ASE 值显示达到该结构的最大光谱宽度 174.7 nm。随着电流的进一步增大，光谱宽度急剧下降。这主要是因为激态的能级跃迁谱较基态占据了优势地位。大电流注入状态下，基态的能级被填满，出现饱和现象，从而光放大芯片整体光谱宽度降低。而当采用非对称的 2 个 6 nm 厚量子阱组合 1 个 10 nm 厚量子阱结构时，随着注入电流的增加，光谱宽度不断增加。注入电流 600 mA 时，FWHM 达到 199.7 nm。同一电流注入情况下，就光谱宽度性能而言，混合非对称量子阱结构的性能都更加优异。因此，采用混合非对称量子阱结构，有利于实现高增益、宽光谱的光放大芯片。

参考文献：

[1] Park S, Leavitt R, Enck R, et al. Semiconductor optical amplifier for CWDM operating over 1 540～1 620 nm[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2005, 17(5): 980-982.

[2] Faugeron M, Fortin C, Robert Y, et al. Wide optical bandwidth and high output power superluminescent diode covering C and L band[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2014, 26(8): 841-844.

[3] Zhou S, Zhang J, Duan L H, et al. Measurement of junction temperature and thermal resistance in InGaAlAs/AlGaAs quantum-well superluminescent diodes (SLDs)[J]. Modern Phys. Lett. B, 2016, 30(5): 1650046.

[4] Shin D K, Henson B M, Khakimov R I, et al. Widely tunable, narrow linewidth external-cavity gain chip laser for spectroscopy between 1.0～1.1 μm[J]. Opt. Express, 2016, 24(24): 27403-27414.

[5] Lin C F, Su Y S, Wu C H, et al. Influence of separate confinement heterostructure on emission bandwidth of InGaAsP superluminescent diodes/semiconductor optical amplifiers with nonidentical multiple quantum wells[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2004, 16(6): 1441-1443.

[6] Carrère, Truong V G, Marie X, et al. Large optical bandwidth and polarization insensitive semiconductor optical amplifiers using strained InGaAsP quantum wells[J]. Appl. Phys. Lett., 2010, 97(12):121101.

[7] Lin C F, Lee B L. Extremely broadband AlGaAs/GaAs superluminescent diodes[J]. Appl. Phys. Express, 1997, 71(12): 1598-1600.

[8] Lysak V V, Kawaguchi H, Sukhoivanov I A. Gain spectra and saturation power of asymmetrical multiple quantum well semiconductor optical amplifiers [J]. IEEE Proc. Optoelectron., 2005, 152(2): 131-139.

[9] Mustary M H, Lysak V V. Parameter extraction method of band parameters for Ⅲ-Ⅴ compound semiconductors using experimental data of transition energies[J]. Optoelectronics and Advanced Materials-Rapid Communications, 2012, 6(11/12): 971-975.

作者简介：

周　帅(1987—)，男，毕业于电子科技大学凝聚态物理专业，硕士，高级工程师，目前从事超辐射发光二极管研究；

冯　琛(1985—)，女，2012 年毕业于四川大学光学工程专业，获博士学位，现为高级工程师，主要从事半导体光源方面的研究。