

垂直外腔面发射激光器的模拟分析*

倪滨海,戴特力,梁一平,杜亮,伍喻

(重庆师范大学物理与电子工程学院 重庆市高校光学工程重点实验室,重庆 400047)

摘要 :垂直外腔面发射激光器芯片的生长工艺要求精确到 nm 量级,制作成本高,有必要用软件对设计好的 VECSEL 芯片进行仿真,实现优化。通过 PICS3D 软件对已经设计好的一个底发射的 VECSEL 芯片结构进行仿真,获得了量子阱有源区的带隙结构、材料增益曲线及子腔谐振谱线等特性。结果表明,InGaAs/GaAsP/AlGaAs 材料体系能够有效地吸收 808 nm 的泵浦光,产生足够多的光生载流子(电子—空穴对),这些载流子能轻易地渡越应变补偿层,被量子阱俘获,产生复合发光。其发光带隙 1.25 eV,相应波长 992 nm,接近设计波长 980 nm。InGaAs 的材料增益峰值波长正好在 980 nm 处,增益系数高达 $4\ 000\ \text{cm}^{-1}$ 。InGaAs/GaAsP/AlGaAs 量子阱的谐振峰值波长为 983 nm,与 980 nm 的分布布拉格反射镜(DBR)的反射中心波长非常接近,其峰值功率高达 23 dB,理论上能够获得较大的输出功率。

关键词 : C_4^{2+} 分子;电声耦合; T_d 对称性;哈密顿量;杨-泰勒畸变;能级分裂

中图分类号 :TN248

文献标识码 :A

文章编号 :1672-6693(2011)01-0055-05

近几年来,一种新型的半导体激光器—光泵浦半导体垂直外腔面发射激光器(Optically pumped semiconductor vertical external cavity surface emitting laser, OPS-VECSEL)已引起许多发达国家的重视^[1]。它具有半导体激光器的高效率、小体积、结构紧凑易于集成以及可选波长范围极宽等优点,也具有固体激光器的高功率和高光束质量等优点。除此之外,还能在腔内插入锁模和倍频元件,获得飞秒量级的超短脉冲输出和倍频光输出。因此,垂直外腔面发射激光器在激光显示、光通信、激光雷达、大气探测和生物医疗等诸多领域有着广泛的应用前景。

1997年,美国的 kuznetsov 等^[2-3]成功研制了第一台光泵浦半导体垂直外腔面发射激光器(OPS-VECSEL),引起了各国激光科学家及研究人员的极大关注。随后的十几年,对 OPS-VECSEL 的研究得到了迅速的发展,在一些具有国际水平的实验室,该器件的理论和实验均取得了令人瞩目的进展。美国、英国和瑞士等国在 OPS-VECSEL 研究方面投入最多,也取得了极大的成功,在高功率和飞秒脉冲锁模方面处于国际领先水平^[4-6];韩国的三星公司^[7]等研究单位也做了大量的研究,取得了不错的成果;我国的长春光机所和南开大学等科研机构 and 高校科

研小组^[8-13]也做了很多相应的研究工作,取得了一些成果,但与国际水平还有不小的差距。经分析,其原因之一在于材料生长的精度不够,原因之二在于芯片的结构设计得还不够优化。为了获得预期的输出性能,有必要在实验之前对芯片结构进行模拟分析,得到最优化的芯片结构参数,再进行芯片的生长,以避免不必要的浪费。因此,用 PICS3D 软件对一种底发射的光泵浦半导体垂直外腔面发射激光器^[14]进行了模拟,得到其共振周期增益结构的材料增益特性、量子阱有源区的带隙结构和子腔谐振谱线等器件特性。

1 OPS-VECSEL 结构

由于泵浦光入射方向与激光发射方向的不同,有 2 种形式的 OPS-VECSEL。一种是泵浦光与输出光反向且成一定的夹角,如图 1(a)所示;另一种是泵浦光与输出光同向且同轴,如图 1(b)所示。前者的优点是有较大的泵浦光斑,缺点是泵浦光耦合系统较难架设,且得不到均匀泵浦,后者的优点是泵浦光耦合系统容易架设,结构非常紧凑,其缺点是 DBR(Distributed bragg reflector)必须特别设计为对泵浦光透明。

* 收稿日期 2010-07-27 修回日期 2010-10-11

资助项目:重庆市高校光学工程重点实验室重点项目(No.0705)

作者简介:倪滨海,男,硕士研究生,研究方向为垂直外腔面发射激光器,通讯作者,E-mail:telidai@yahoo.com.cn

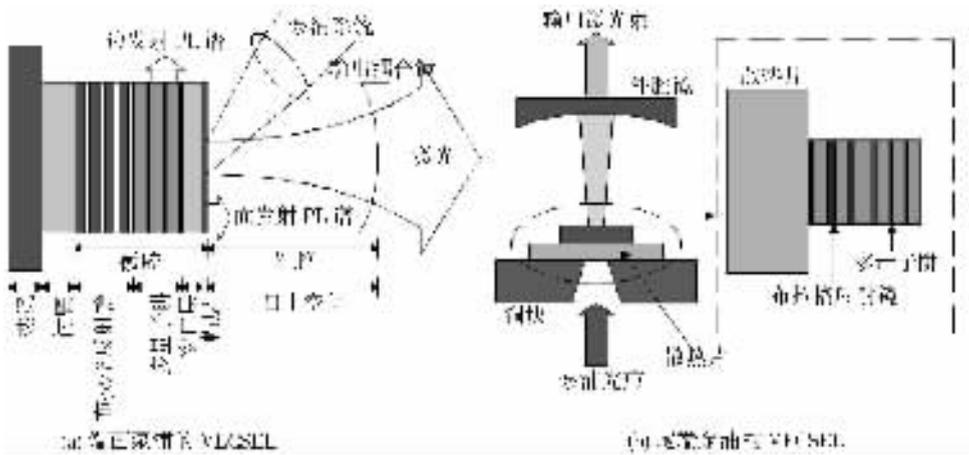


图 1 OPS-VECSEL 结构

对于不同的材料体系,须选用相应的泵浦光,如对于 InGaAs 材料,使用的泵浦光源一般为 808 nm 的激光二极管。激光二极管阵列发射的激光束经整形后耦合到能量光纤(直径 400 μm ,数值孔径 0.22)中,作为 VECSEL 的泵浦源。泵浦光从光纤中出来后,光斑较大($>400 \mu\text{m}$),需对光斑尺寸进行压缩,使其照射在 VECSEL 芯片上的直径约为 100 μm ,才能达到阈值增益所要求的光能量密度。可利用两个凸面相对的平凸透镜组成的基本消像差系统,将光纤出口处的光斑成像到 VECSEL 表面上。根据光学中的拉格朗日定理,光斑缩小必然会导致光束发散角增大,甚至接近 90°。这种象散泵浦光束的部分能量有可能被 VECSEL 芯片的端面反射掉,造成泵浦光的部分浪费,减少芯片的光增益,导致激光的输出功率降低。在 VECSEL 芯片中,由 25 ~ 30 对不同折射率材料交替生长而成的分布布拉格反射镜(DBR)作为激光器的一个后端反射镜,而外腔镜一般为一个曲率半径为 25 mm 的普通平凹镜。其中 10 ~ 16 个量子阱及应变补偿层构成多量子阱(Mul-

tiple quantum well, MQW)共振周期增益结构作为激光器的高增益介质,窗口层和帽层与 DBR 构成子腔,使激光在其中形成谐振。移除衬底后,VECSEL 芯片厚度仅为几个微米,而整个 VECSEL 激光器腔长一般为 20 mm,以便在腔内插入倍频或调 Q 锁模元件,使其获得更广泛的应用。

热效应的问题一直伴随着激光器的诞生与发展。对光泵浦半导体垂直外腔面发射激光器而言,耗散热主要集中在泵浦光斑的范围。因为泵浦光的阈值功率密度达到万 W/cm^2 的水平,在这样大的功率密度的光辐射下,器件温度的上升会使有源层和分布布拉格反射镜材料参数发生变化,设计结构失效,有效增益降低,最终使输出功率减小甚至为零^[15]。为了得到更好的散热,已设计了两种不同的 VECSEL 芯片结构^[5],一种是顶部有散热片的顶发射结构,如图 2(a),另一种是底发射的结构,如图 2(b)所示。

前期的 VECSEL 芯片一般为顶发射结构,可采用分子束外延(Molecular beam epitaxy, MBE)技术生

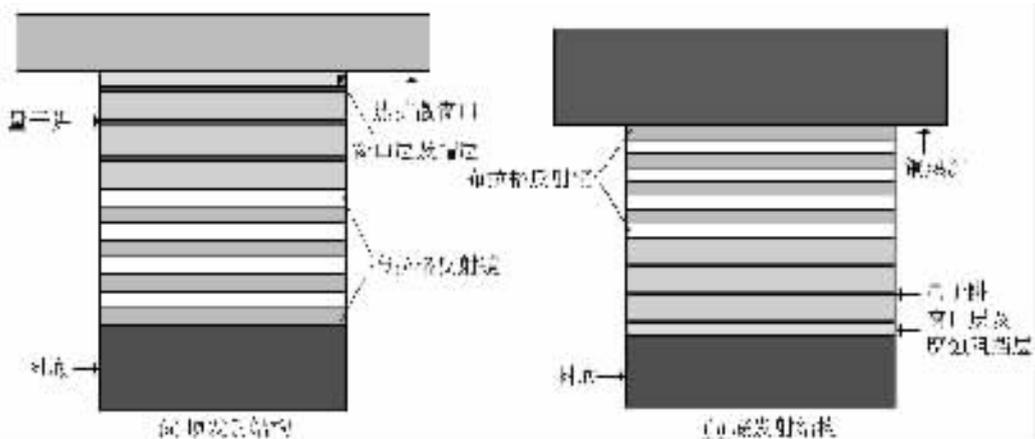


图 2 两种 VECSEL 结构

长在几百微米厚的 GaAs 衬底上。先生长 DBR,再生长 MQW,后生长窗口层和帽层。为使 OPS-VECSEL 运转时有较好的散热性能,激光器芯片的帽层要与 0.3 mm 厚的光学金刚石片,或光学 SiC 片,或蓝宝石片等光学性能好、热导率高的导热片实现液体键合。后面发展起来的底发射的外延片,其生长顺序刚好与顶发射的相反:先在 GaAs 衬底上生长腐蚀阻挡层,然后生长帽层及窗口层,再长 MQW,最后才长 DBR。底发射的芯片的封装是先实现 DBR 表面与导热片的键合,或实现 DBR 与热沉的焊接,再用机械减薄和化学腐蚀工艺将衬底去掉,露出阻挡层。然后实现 DBR 与 0.3 mm 厚的光学金刚石片,或光学 SiC 片,或蓝宝石片的液体键合。顶发射结构 VECSEL 的优点是不需将衬底全部去掉,最后的芯片较厚,封装比较容易。而底发射结构的 VECSEL 要全部去掉衬底,腐蚀后的阻挡层表面不容易实现与导热片的键合,但散热效果最好。

2 OPS-VECSEL 外延片结构

已经公布的外延片结构如图 3 所示^[14],可以利用此结构作动态模拟。该芯片结构如下:先在 GaAs 衬底上生长一层 GaAs 缓冲层,再交替生长 30 对 1/4 波长,即 $\lambda_n = \lambda/n$ 的 1/4 厚度的 $\text{Al}_{0.94}\text{Ga}_{0.06}\text{As}/\text{Al}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{As}$ 形成的 DBR。接着生长多量子阱结构,InGaAs/GaAsP/AlGaAs 构成量子阱,In_{0.16}Ga_{0.84}As 是势阱,Al_{0.06}Ga_{0.94}As 是势垒,GaAs_{0.94}P_{0.06}是应变补偿层,Al_{0.06}Ga_{0.94}As 是吸收层,吸收 808 nm 的泵浦光,产生光子载流子,即激发态的激子(Exciton,电子空穴对),并被紧邻的量子阱捕获。当在激子激发态寿命内积累足够的密度,产生感应辐射,便可输出波长 980 nm 的激光。In_{0.16}Ga_{0.84}As/GaAs_{0.94}P_{0.06}/Al_{0.06}Ga_{0.94}As 的总厚度构成共振周期增益(Resonate periodic gain, RPG)结构,一般生长 10~16 个周期,就能产生足够的光增益。Al_{0.5}Ga_{0.5}As 作为表面限制层,阻止产生的载流子在表面的复合。Al_{0.12}Ga_{0.88}As 是窗口层,用来调整子腔的腔长。最后长一个 GaAs 薄层作为帽层,起保护外延片的作用。

3 模拟结果

模拟时采用了如图 3 所示的 VECSEL 外延片结构,在 PICS3D 中建立的物理模型如图 4 所示。模拟过程中器件半径设为 10 μm ,采用圆柱坐标系, y 轴为光轴且激光发射方向为向上,泵浦光入射方向为

从上到下。图 4(a)中,底部为布拉格反射镜(DBR),共 30 个周期,中间为共振周期增益结构(RPG),量子阱个数为 10 个,上部为窗口层。模拟求解时 DBR 中心波长 980 nm,泵浦波长 808 nm,入射光功率密度为 10 000 W/cm^2 。

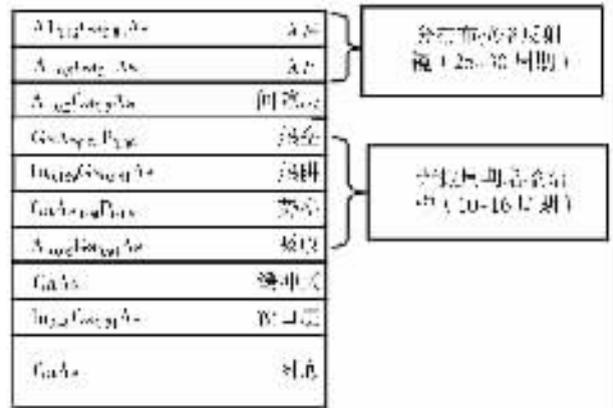


图 3 VECSEL 外延片结构

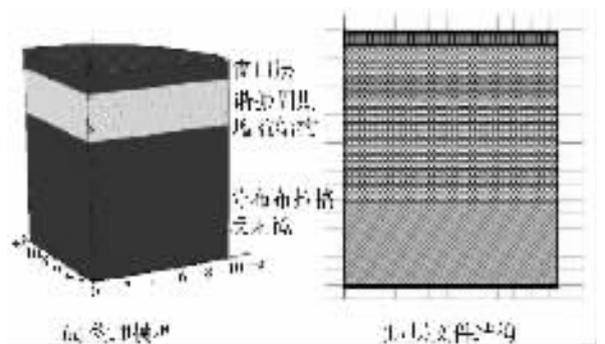


图 4 软件中生成的物理模型及层文件结构

利用 pics3d 软件对上述模型和初始条件进行求解,可获得所设计的 VECSEL 芯片的材料增益系数等一系列结果。图 5 为量子阱增益区的材料增益随波长的变化。不同曲线代表不同的注入载流子浓度,从下到上依次是 1×10^{18} , 3×10^{18} , 5×10^{18} , 7×10^{18} , 9×10^{18} , $11 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ 。由图中可看出增益。峰值波长主要在 980 nm 处,当载流子浓度为 $7 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ 时,980 nm 波长处的材料增益系数就已经在 2000 cm^{-1} 以上了。当注入载流子浓度较大时,在 890 nm 附近出现小的峰值增益,但因为 DBR 和外腔镜对 890 nm 的光的反射率都很低,即使此处有较高的峰值增益,也不会形成有效的激光振荡,不会影响 980 nm 处的发光效率。

图 6 展示了量子阱有源区 RPG 周期共振增益结构的能量分布情况。上面的曲线是导带,下面是价带。势阱处导带底能量为 1.11 eV,价带顶为 -0.14 eV,带隙为 1.25 eV,对应的发射波长为 992 nm,

接近激光器的设计发射波长 980 nm。至于势阱两边的小凹陷,是 $\text{GaAs}_{0.94}\text{P}_{0.06}$ 应变补偿层引起的。在势垒处,导带 1.25 eV,价带 -0.25 eV,带隙为 1.5 eV,已能对光生载流子产生足够的限制。808 nm 泵浦光被 $\text{Al}_{0.06}\text{Ga}_{0.94}\text{As}$ 吸收层吸收,产生足够多的光生载流子(Exciton,电子-空穴对),载流子渡越应变补偿层,落入势阱中复合,从而发射 980 nm 的激光。

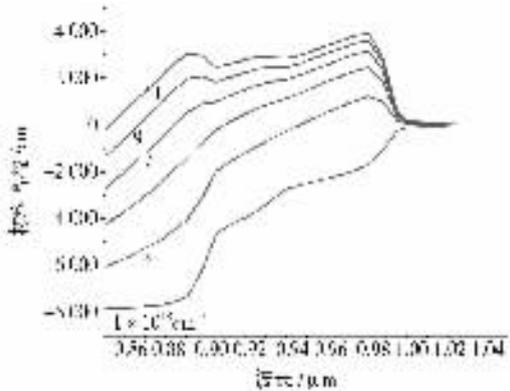


图 5 量子阱材料增益随波长的变化关系

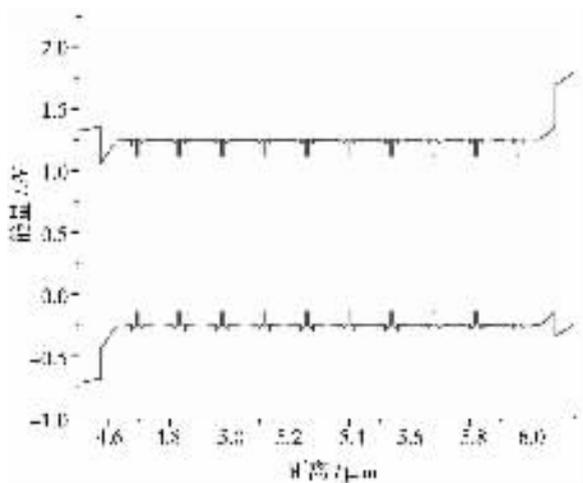


图 6 量子阱区的带隙结构

图 7 表明了 VECSEL 的子腔谐振光谱,最大峰值强度为 23 dB,波长在 983 nm 附近。图中峰值位置与设计要求的 980 nm 波长略有区别,但影响不大,因为谱的位置会随芯片内部温度的变化而发生轻微的改变。在图中可看到除主峰外附近还有 2 个较大的峰及多个较小的峰,由于谐振腔的选模作用,这些峰值处对应的波长均不能起振。

4 结论

软件仿真结果表明, $\text{InGaAs}/\text{GaAsP}/\text{AlGaAs}$ 材料体系能够有效地吸收 808 nm 的泵浦光,产生足够多的光生载流子(电子-空穴对),这些载流子能渡越

应变补偿层,并被量子阱俘获,产生复合发光。其发光带隙 1.25 eV,相应波长 992 nm,接近所需的 980 nm 设计波长。 InGaAs 的材料增益峰值波长正好在 980 nm 处,增益系数为 $4\,000\text{ cm}^{-1}$ 。 $\text{InGaAs}/\text{GaAsP}/\text{AlGaAs}$ 量子阱的发光峰值波长为 983 nm,与 980 nm 的 DBR 中心波长非常接近,其峰值功率高达 23 dB,理论上能够获得较大的输出功率。至于其他相应的结构特征及运转特性,还须进行详细分析。

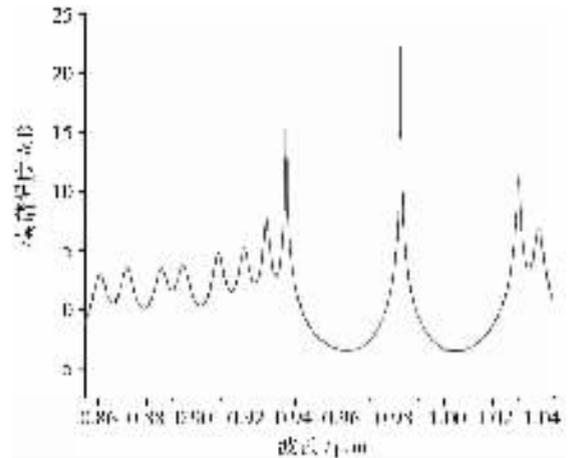


图 7 VECSEL 的子腔谐振光谱

致谢:本文的软件模拟工作得到长春光机所秦莉老师的指导,研究生梁雪梅的帮助。在计算程序编写过程中的一些问题还得到蓝雨软件公司程立文先生的具体解答,在此一并表示感谢。

参考文献:

- [1] 陈柏众,戴特力. 光泵浦半导体垂直外腔面发射激光器的原理与应用[J]. 重庆师范大学学报:自然科学版, 2008, 25(3): 62-65.
- [2] Kuznetsov M, Hakimi F, Sprague R, et al. High-power (> 0.5-W CW) diode-pumped vertical-external-cavity surface-emitting semiconductor lasers with circular TEM_{00} beams [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1997, 9(8): 1063-1065.
- [3] Kuznetsov M, Hakimi F, Sprague R, et al. Mooradian. Design and characteristics of high-power (> 0.5-W CW) diode-pumped vertical-external-cavity surface-emitting semiconductor Lasers with circular TEM_{00} beams [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 1999, 5(3): 561-573.
- [4] Li F. Tunable high-power high-brightness vertical-external-cavity surface-emitting lasers and their applications [D]. American Graduate College of University of Arizona, 2006.

- [5] Kellera U ,Tropper A C. Passively modelocked surface-emitting semiconductor lasers[J]. Physics Reports ,2006 ,429 (2) 67-120.
- [6] Häring R ,Paschotta R ,Aschwanen A ,et al. High-power passively mode-locked semiconductor lasers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics ,2002 ,38(9) :1268-1275.
- [7] Lee J H ,Kim J Y ,Lee S M ,et al. 9.1 W high-efficient continuous-wave end-pumped vertical-external-cavity surface-emitting semiconductor laser[J]. IEEE Photonics Technology Letters ,2006 ,18(20) 2117-2119.
- [8] 何春风,路国光,单肖楠,等. 高功率 980 nm 垂直外腔面发射激光器(VECSEL)的理论研究[J]. 光学精密工程, 2005 ,13(3) 247-252.
- [9] 刘如彬,舒永春,张冠杰,等. 产生超短脉冲的光泵浦垂直外腔面发射激光器的研究进展[J]. 激光杂志, 2006 , 27(2) 9-10.
- [10] 宋晏蓉,张鹏,颜博霞,等. 光抽运垂直外腔面发射半导体倍频绿光激光器[J]. 中国激光, 2007 ,34(12) :1776.
- [11] Zhang P ,Song Y R ,Tian J R ,et al. Gain characteristics of the InGaAs strained quantum wells with GaAs ,AlGaAs , and GaAsP barriers in vertical-external-cavity surface-emitting lasers[J]. Journal of Applied Physics ,2009 ,105 (053103) :1-8.
- [12] Zhang P ,Song Y R ,Tian J R ,et al. Simulation of the surface-emitting photoluminescence spectrum in a semiconductor disk laser[J]. Journal of Optics A :Pure and Applied Optics ,2009 ,11(045503) :1-5.
- [13] Song Y R ,Peng Zhang P ,Zhang X P ,et al. Theoretical analyses and experimental studies on semiconductor disk lasers[J]. Opt Quant Electron ,2009 ,41 39-45.
- [14] 程立文,梁雪梅,秦莉,等. 980 nm OPS-VECSEL 关键参数的理论分析[J]. 发光学报, 2008 ,29(4) :713-717.
- [15] 陈柏众,戴特力,梁一平,等. 用有限元法讨论光抽运垂直外腔面发射半导体激光器的散热性能[J]. 中国激光, 2009 ,36(10) 2745-2750.

Simulation and Analysis of Vertical-external-cavity Surface-emitting Laser

NI Yan-hai , DAI Te-li , LIANG Yi-ping , DU Liang , WU Yu

(Optical Engineering Key Lab. of Chongqing City , College of Physics and Electronic Engineering ,
Chongqing Normal University , Chongqing 400047 , China)

Abstract : The vertical external cavity surface emitting lasers(VECSELs) require a rigorous facture art from a chip that has been grown in MBE or MOCVD that possess the nm precision and is expensive. It's necessary to firstly simulate the operation of a chip designed in order to get the key parameters and then time after time optimize the structure designing until they are grew. The designed bottom-emitting VECSEL structure was simulated by using pics3d sofeware and the properties of quantum well active region such as bandgap structure , material gain curve , the resonate spectrum and so on were obtained. The results shows that InGaAs/GaAsP/AlGaAs material system is able to absorb effectively the pumped light of wavelength 808 nm and to generate enough carriers(electrons and holes). These carriers would be easily go through the strain complement layers and would be captured by the QWs , and then emitting radiation. These semiconductor laser materials have the bandgap of 1.25 ev corresponding wavelength of 992 nm which is very close to the design wavelength 980 nm. The peak gain wavelength of InGaAs material is right at 980 nm and its gain coefficient is high to $4\ 000\ \text{cm}^{-1}$. The InGaAs/GaAsP/AlGaAs QW peak emitting wavelength is 983 nm , is very close to the 980 nm DBR center wavelength , and its peak power reach to 23 dB , so the output power should be relative high in theory.

Key words : vertical external cavity surface emitting lasers(VECSEL) ; optical pump ; multiple quantum well(MQW) ; resonate periodic gain(RPG)

(责任编辑 欧红叶)