

光泵浦半导体垂直外腔面发射激光器的原理与应用*

陈柏众,戴特力

(重庆师范大学 物理学与信息技术学院,重庆 400047)

摘要 光泵浦半导体垂直外腔面发射激光器(OPS-VECSEL)是二极管泵浦的多量子阱增益介质半导体激光器。近年来,光泵浦垂直外腔面发射激光器作为半导体能带工程的新成果,在理论和实验方面均取得了令人瞩目的进展。该器件具有较高的输出功率、卓越的光束质量和紧凑的结构。薄片式的激活介质避免了棒状介质的热透镜效应,周期性共振增益(PRG)结构提高了多量子阱内的受激辐射截面,分布布拉格反射器(DBR)减少了谐振腔的损耗。相对于晶体棒作激活介质的固体激光器来说,这种新型激光器可以通过半导体能带工程提供更加广泛的波长选择范围。它克服了电泵浦边发射和电泵浦面发射半导体激光器的限制,可以提供近衍射极限的基模或 TEM_{01} 模的圆形光斑。

关键词 光泵浦半导体垂直外腔面发射激光器;周期性共振增益结构;分布布拉格反射器;电泵浦面发射半导体激光器;边发射半导体激光器

中图分类号:TN248.4

文献标识码:A

文章编号:1672-6693(2008)03-0062-05

近几年来,一种半导体前沿技术发展的新成果,光泵浦垂直外腔面发射激光器(Optics Pumping Semiconductor Vertical External Cavity Surface Emitting Laser, OPS-VECSEL)已引起许多发达国家的重视。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。该器件是20世纪90年代末期发展起来的新技术,它兼顾了二极管泵浦固体激光器(DPL)和电泵浦垂直腔面发射半导体激光器(VCSEL)的优点,是半导体激光技术中的新型器件。因其较高的功率密度,紧凑的几何结构和良好的光束质量,受到了激光产业界的关注^[1]。

大家所熟知的GaAs/GaAlAs双异质结激光二极管,即边发射窄条激光二极管(LD),单条单横模输出时只能达到0.4 W,发射光束为像散高斯光束,快轴发散角约 50° ,慢轴发散角约 10° 。用光刻的方法让几个窄条LD排成宽 $120\ \mu\text{m}$ 的发射区,腔长1 mm时,单横模输出可大于2 W,输出光束也是像散的。40~80 W的大功率二极管条(LDbar)是由13,19,25或49个 $120\ \mu\text{m}$ 发射区构成的线阵,发光孔径 $1\ \text{mm}\times 0.1\ \text{mm}$ 。这种线阵光源的快、慢轴两正交方向很不对称,发射的光束在空间也不对称,两正交方向的拉格朗日常数相差大,必须作复杂的光

束整形,才能耦合进光纤。电抽运的垂直腔面发射激光器(VCSEL),可以输出圆形单横模的光束,功率低于10 mW,多模输出,功率可大于100 mW。

光泵浦的VECSEL就是在克服上述缺点的过程中逐步完善的。

1 OPS-VECSEL的增益材料和激光器

1.1 OPS-VECSEL的增益材料制作

OPS-VECSEL的增益材料是在GaAs衬底材料上外延生长的。图1按生长顺序由下而上地表示出芯片的结构。主体主要分3个部分,即帽层、多量子阱共振周期增益区(RPG)和分布布拉格反射镜(DBR)。对泵浦波长为808 nm,工作波长约980 nm的OPS-VECSEL而言,在GaAs衬底上先外延生长DBR,即布拉格反射镜。这是在GaAs衬底上生长30对 $1/4$ 波长厚度的AlAs/GaAs交替结构形成的。对于所选择的波长反射率要求达到99.5%。对于常规的DBR,从折射率高的介质到折射率低的介质相位无变化,相反从折射率较低的介质到折射率较高的介质方向传播相位改变 π 。所以对布拉格中心波长,各界面的反射光相位是同步增长的。反射率最大时的膜厚为波长的 $1/4 n$, n 是该波长在该

* 收稿日期 2008-04-03

资助项目 重庆市高校光学工程重点实验室项目(No. 0705)

作者简介 陈柏众(1980-)男,硕士研究生,研究方向为半导体激光器件及其应用。通讯作者 戴特力,Email:telidai@yahoo.com.cn

介质中的折射率。DBR层结构终止于宽禁带的窗口层以进一步防止载流子泄漏,便于控制有源层的光子密度^[2]。DBR层充当谐振腔的后反镜,与外置输出镜一起构成激光器的谐振腔。DBR生长完成后,接着生长RPC,即共振周期增益区。该区是由15个量子阱构成。每个量子阱由10 nm的窄带InGaAs(阱),121.5 nm的宽带AlGaAs(势垒)和14.5 nm的应变补偿GaAsP构成。用于近红外的OPS-VECSEL还可以在GaAs衬底上生长晶格匹配的GaAs/AlGaAs量子阱,其工作波长约850 nm。最近的报道显示,其它材料体系的VECSEL可实现从红外到可见光的不同波长范围的应用,但使用的衬底不同。上述的外延生长可以在MBE,即分子束外延装置中完成,也可以在MOCVD,即金属氧化物化学汽相淀积装置中完成。

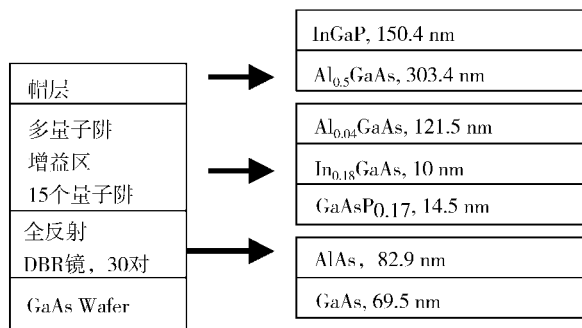


图1 OPS-VECSEL增益材料外延生长结构图

1.2 OPS-VECSEL芯片的工作原理^[4-5]

图2表示上述芯片的工作原理。为了说明问题,图的比例被放大,而且是一个能带图。从上到下是导带(CONDUCTION BAND)、禁带(FORBIDEN BAND)和价带(VALENCE BAND)。与图1的从下到上对应的是图2的从左到右,依次是布拉格反射镜(DBR,或MULTI-LAYER MIRROR),呈共振周期结构的多量子阱增益区。在这个结构中虽然合金的层数教多,但其发射激光的势阱实际上总共只有10 nm的15倍,即150 nm,或0.150 μm,而有源层总厚度不过2.3 μm。图中的激光驻波(LASER OPTICAL STANDING WAVE)就是谐振腔内的驻波,在文中波长是980 nm。在DBR与激活区界面上,该驻波是波腹,在芯片与空气的界面上,也是波腹。这就要求严格控制多量子阱的生长厚度,这是由设备和操作人员的技术来保证。从图上还可看出,10 nm的量子阱被(121.5 + 14.5) nm的势垒和应变补偿层隔开。每一个量子阱都处在激光驻波腹的位置,使受激辐射的几率最大,即受激辐射的截面最大。这就是共

振周期增益的原理。波长为808 nm的泵浦光从芯片的表面垂直或倾斜入射,单程通过有源层,有80%的能量被垒区(Al_{0.04}GaAs)吸收,产生光生载流子,即电子-空穴对,也称为激子(EXCITON)。它们扩散到阱区,电子处于导带,空穴在价带,形成激子的粒子数反转。当自发辐射被受激辐射放大并在谐振腔内振荡时,就发射出波长为980 nm的激光。

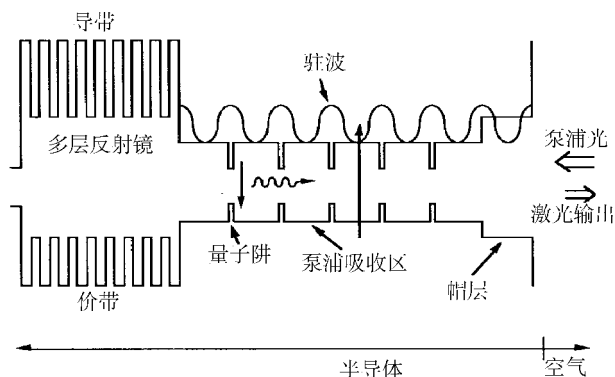


图2 OPS-VECSEL能带图和运行机理^[3]

1.3 OPS-VECSEL的谐振腔结构^[4-8]

上述激光谐振腔的结构如图3所示。芯片的GaAs衬底在封装前已被腐蚀掉,用钎焊安装在冷却器上。

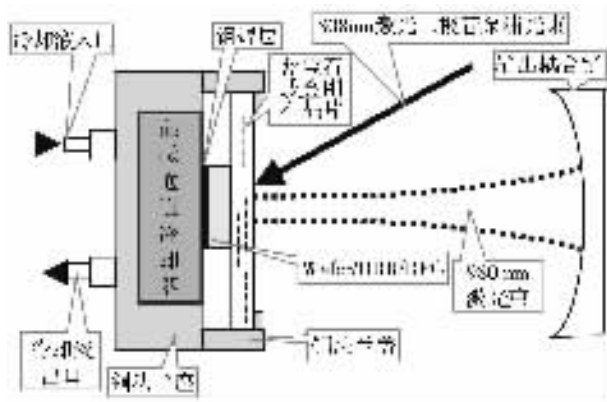


图3 wafer/DBR/RPG/sapphir材料封装和OPS-VECSEL装配

增益区的上面生长一层Al_{0.5}GaAs,目的是防止垒区产生的载流子扩散到材料表面,称为帽层或窗口层。帽层上面生长一层150.4 nm厚的InGaP,防止Al_{0.5}GaAs与空气直接接触而氧化。封装时,芯片面上键合一片0.5 mm的金刚石,可以提高散热效果。激光器的增益带宽、微分增益、峰值增益波长和微量子效率等都敏感地依赖于载流子浓度和温度。工作区的吸收层是为泵浦光进入限制层和量子阱区域提供光学窗口。对OPS-VECSEL而言,激光

器工作波长和抽运波长能根据设计选择。几种成熟的半导体材料体系,如 InGaAs-AlGaAs-GaAs, InGaAs-InGaAsP-GaAs 和 InGaAsP-InP-4 J, 都可以用来制造不同波长的激光器。多数 VECSEL 都是在 GaAs 衬底上制作,使用高折射率比值的 GaAs/AlAs 反射镜,用于近红外方面的应用。这些激光器主要工作在两个波长段:使用晶格匹配 GaAs/AlGaAs 量子阱的激光器,工作波长为 850 nm 左右;使用压应变 InGaAs/GaAs 量子阱的激光器,波长在 1000 nm 附近。最近的报道显示,其它材料体系的光泵浦 VECSEL 可实现从红外到可见光的不同波长范围的应用^[5]。

1.4 衬底的腐蚀和 OPS-VECSEL 散热^[1-2,9-10]

抽运光子与激光光子之间的能量差及俄歇复合会在 VECSEL 芯片中产生热量。VECSEL 芯片中热问题引起的升温主要有 3 个负面作用:一是随温度的升高量子阱增益会逐渐减小;二是温度升高使量子阱的发射波长以约 0.3 nm/K(对于 GaAs 结构)的速度红移,导致量子阱与驻波模交叠减小,RPG 结构失谐,从而减小激光单程增益;三是量子阱的发射波长以约 0.3 nm/K 红移时,材料折射率也随波长变化,导致子腔(DBR)与半导体-空气界面构成谐振波长同方向移动,但其漂移速度大约只有 0.1 nm/K。一旦作更快移动的激光波长移出子腔共振之外,激光将消失。所以,有效的散热是 OPS-VECSEL 正常运行的关键。

衬底层的存在延缓了热量通过布拉格反射镜向热沉传递的过程,所以最早的办法就是利用蚀刻法去除衬底层,在布拉格反射镜后粘贴热沉。但蚀刻会导致表面质量问题,引入很大的损耗。更好的办法是让热从增益区直接扩散掉,这也是目前为止最好的散热处理。如图 3,在芯片表面键合一片 0.5 mm 的金刚石片,就可以及时扩散增益区产生的热。在 DBR 和芯片表面同时散热效果更好。

为了腐蚀掉 GaAs 衬底,发展了一种逆向腐蚀的工艺。首先在衬底上生长一层高铝掺杂 AlGaAs,以阻挡衬底的化学腐蚀液对芯片内部结构的破坏。然后,将多量子阱层生长在刻蚀阻挡层之上。最后,才将高反射率($R > 99.5$)的 DBR 生长在多量子阱有源层之上。为了达到低阈值、高斜效率和卓越的光束质量,在半导体与空气之间的界面要求有很高的表面质量,以减小由于表面不清洁而产生的散射和衍射损耗。由于模式和激光波长依赖于微腔结构的厚度,因此控制好衬底的移除是非常重要的。为

减少芯片与热沉之间的热阻抗,要在其间加一层钎焊料。加焊料前,先将外延面和热沉表面用磁控溅射蒸镀 Ti/Pt/Au,然后将蒸镀好的表面再蒸发一层钎焊料。对衬底的处理,首先用一定比例的 $H_2SO_4:H_2O:H_2O_2$ 混合溶液将衬底移除掉大部分,接着用一定比例的 $C_6H_8O_7:H_2O_2$ 的混合溶液腐蚀直到将衬底全部移除,露出阻止面。将衬底移除掉后,要在其表面在蒸镀 Si_3N_4 的双增透膜,该膜对泵浦光和激光都是增透的。最后,将外延片焊接在硅微沟道冷却器的微沟道背面。该冷却器的 200 条硅微沟道,深 140 μm ,宽 25 μm ,间距 50 μm ,长 1400 μm ,冷却水流动过微沟道可以及时带走芯片的好散热^[11]。

2 OPS-VECSEL 的特点和发展前景

2.1 OPS-VECSEL 的特点

根据 OPS-VECSEL 的结构和原理,可以把它的特点归纳如下。

图 3 所示的光抽运垂直外腔面发射激光器(OPS-VECSEL)兼有 LD 抽运固体激光器和电泵浦半导体量子阱(QW)面发射激光器的优点。二极管的泵浦光束被聚焦在多量子阱(MQW)表面,激光腔由生长在量子阱上的分布布拉格反射镜(DBR)和外部的球面输出镜构成。多量子阱为激光器提供增益,外反射镜控制激光器运行模式。

与电流注入的面发射激光器相比,光泵浦的 VECSEL 有许多优点。首先,OPS-VECSEL 的芯片没有 pn 结,是用不掺杂的半导体材料生长的。不掺杂外延生长的特点是工艺相对简单。没有 pn 结,受激发射过程没有电流参与,可靠性高。光抽运的能量从发射激光的表面输入,不用电极,材料直径较小,比如 5 mm \times 5 mm 或更小。OPS-VECSEL 运行时,所需泵浦光的表面光强相对于晶体片状激光器低,光斑直径可达到 400 μm ,光学表面损伤可能性小。利用多重泵浦和增益元件串联,OPS-VECSEL 在保持良好光束质量的前提下,连续功率可以增加至 10 W。如果排列成面阵,可以输出更大的连续功率。与二极管激光器相比较,OPS-VECSEL 具有更明显的优点。有几种成熟的半导体材料体系用来制作 OPS-VECSEL 可提供好几个令人们感兴趣的波长范围。比如 InGaAs/AlGaAs/GaAs, InGaAs/InGaAsP/GaAs 和 InGaAsP/InP 等材料就是如此。适用于制作 OPS-VECSEL 的现有半导体材料的波长范围基本上覆盖了从紫外到可见直到红外的所有光波

段。基于半导体多量子阱结构的能带工程可得到低阈值,高输出功率,高转换效率,以及宽波长调节范围(可以超过 100 nm)的芯片材料。激光器的运行波长和泵浦波长还可以通过优化设计进行一定的选择。半导体量子阱材料本身就有较宽的泵浦吸收带(>40 nm),对二极管泵浦辐射有良好的光谱耦合,无须对二极管运行实行温度控制。此外,半导体对泵浦光的吸收系数高,即吸收长度较短,容易实现有效的泵浦吸收。因此,要求泵浦光强的空间分布和激光腔内的横向模式分布之间有一个很好的交叠。正如前面所述,光泵浦的 VECSEL 芯片的制作工艺中,半导体材料无需参杂。这个特点带来的另一好处是减少了由于自由载流子的吸收所产生的光损失。在边沿发射半导体激光器中,为形成双异质结,在 GaAs 激活区的包覆层参杂,导致了自由载流子对受激辐射的吸收而限制了输出功率。光泵浦无需电流注入,排除了寄生电阻的电功率损失。芯片的能带工程结构可以使泵浦光吸收分配均匀,排除了多量子阱载体的输运限制。OPS-VECSEL 谐振腔内的循环功率是输出功率的 20~50 倍,这使得腔内倍频效率高,容易发射二次谐波,扩大了激光器的波长范围。相比之下,边沿发射二极管激光器的内循环功率与输出功率是同一数量级,非线性频率转换效率低,不利于谐波发生^[2,12]。

良好的空间光束模式^[13]、大的激光功率范围、体积小、可集成、高光束质量等优点使 OPS-VECSEL 具有诱人的应用前景。光通讯,高速激光打印,高密度光存储,超快激光,非线性光学器件,激光雷达等领域迫切需要这种器件。

2.2 OPS-VECSEL 的发展前景

半导体外延技术的发展以及半导体材料在很宽的范围内可改变的吸收带,使 OPS-VECSEL 成为非常有潜力的半导体激光器件。特别是 OPS-VECSEL 同半导体可饱和吸收镜(SESAM)集成在一起,可制成高功率输出、高重复频率的超短脉冲激光器。这种器件在光通讯和激光测距方面有着广阔的应用前景。

另一方面,为了 OPS-VECSEL 的商品化,要求高效、小型化和更可靠的封装。在小型化超快脉冲源领域,VECSEL 具有相当大的发展潜力。注入抽运通过精细的晶片设计,实现介质功率器件的优化,有可能制造带有复杂谐振腔的高度小型化的 VECSEL 器件。OPS-VECSEL 集成外腔是一种非常理想,也

有可能实现的结构,集成抽运激光器的可能性也值得进一步探讨。在这些集成结构中,反射镜将与增益结构整合,结合其它非线性和光谱滤波功能,将有望发展出带有高级功能的超小型器件。

参考文献:

- [1] FALLAHI M, MOLONEY J V, LI F. High Power Vertical-external-cavity Surface-emitting Lasers and Their Applications[J]. *Quantum Electron*, 2006, 30(2):102-110.
- [2] 伊贺键一. 面发射激光器基础与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [3] KUZNETSOV M. Design and Characteristics of High-power(>0.5 W-CW) Diode-pumped Vertical External-cavity Surface-emitting Semiconductor Lasers with Circular TEM₀₀ Beams[J]. *IEEE Journal Of Selected Topics In Quantum Electron*, 1999, 5(3):57-61.
- [4] 钟正根, 范嗣强, 戴特力. 高斯正支共焦非稳腔光束质量测量结果与分析[J]. *重庆师范大学学报(自然科学版)*, 2007, 24(4):62-66.
- [5] KELLER U, TROPPER A C. Passively Modelocked Surface-emitting Semiconductor Lasers[J]. *Physics Reports*, 2006(2):67-120.
- [6] TROPPER A C, HOOGLAND S. Review Extended Cavity Surface-emitting Semiconductor Lasers[J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2006(30):1-43.
- [7] SILLEK T, ALBRECHT P, BRICK. Vertical-External-cavity Surface-emitting Laser with Monolithically Integrated Pump Lasers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2007, 12(15):19-24.
- [8] KIM K S, YOO J, KIM G. Enhancement of Pumping Efficiency in a Vertical-external-cavity Surface-emitting Laser[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2007, 12(1):19-23.
- [9] HARING R, PASCHOTTA R, ASCHWANDEN A. High-Power Passively Mode-locked Semiconductor Lasers[J]. *IEEE Journal of Selected Topics In Quantum Electron*, 2002, 9(9):107-112.
- [10] 张冠杰, 舒永春. 光抽运垂直外腔面发射激光器特性与研究进展[J]. *激光技术*, 2006, 30(4):351-354.
- [11] 何春风, 路国光. 高功率 980nm 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.
- [12] 戴特力. 半导体二极管泵浦固体激光器[M]. 成都: 四川大学出版社, 1993.
- [13] 李宾中, 曾林泽, 薛晋惠, 等. 激光二极管光束特性的研究[J]. *西华师范大学学报(自然科学版)*, 2003, 24(2):167-170.

The Principle and Application of the Optically Pumped Vertical-external-cavity Surface-emitting Laser

CHEN Bai-zhong , DAI Te-li

(College of Physics and Information Technology , Chongqing Normal University , Chongqing 400047 , China)

Abstract :The semiconductor vertical external cavity surface emitting laser pumped by light (OPS-VECSEL) is a diode pumped solid state laser with a semiconductor multi-quantum well gain medium. Recently as a new harvest of the bandgap engineering of the semiconductor , OPS-VECSEL is a promising candidate of a high quality laser in science research and industry process. OPS-VECSEL has shown some excellence in power , beam quality and structure. The disk about 2 thickness and 5×5 mm area of OPS-VECSEL material gain avoids thermo-optic effects in the crystal rod. Its resonant periodic gain(RPG) structure enhances the stimulated emission section and the distributed bragg reflector(DBR) , which is also a epitaxy stack on the RPG and reduces loss of the optical resonator. Compared OPS-VECSEL to solid-state lasers , the new type of laser may provide significantly increased wavelength variability by material selection and bandgap engineering of the semiconductor. It overcomes the limitation of conventional electricity pumped edge- or/and surface- emitting semiconductor lasers and can offer either near diffraction limited fundamental mode or TEM_{01} mode.

Key words :optically pumped vertical external cavity surface emitting laser ;resonant periodic gain structure ;distributed Bragg reflector ; electricity pumped surface-emitting semiconductor lasers ;edge emission semiconductor lasers

(责任编辑 欧红叶)