

倍频外腔面发射激光器研究进展

蒋丽丹^{1,2} 张晓华^{1,2*} 詹小红^{1,2} 朱仁江^{1,2} 蒋茂华^{1,2} 张鹏^{1,2}

¹重庆师范大学物理与电子工程学院, 重庆 400047

²光电工程与材料重庆市高校重点实验室, 重庆 400047

摘要 腔内倍频垂直外腔面发射激光器(VECSEL)具有较大的腔内循环功率,能够获得较为理想的倍频转换效率。综述了腔内倍频 VECSEL 的研究进展,总结了不同倍频 VECSEL 中倍频晶体的使用情况,并通过倍频 VECSEL 获得的不同波长分析了倍频 VECSEL 的发展趋势及未来工作所面临的一些问题。

关键词 激光器; 倍频; 外腔; 面发射激光器

中图分类号 TN246 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.090001

Progress in Frequency-Doubled External-Cavity Surface-Emitting Lasers

Jiang Lidan^{1,2} Zhang Xiaohua^{1,2} Zhan Xiaohong^{1,2}

Zhu Renjiang^{1,2} Jiang Maohua^{1,2} Zhang Peng^{1,2}

¹ College of Physics and Electronic Engineering, Chongqing Normal University, Chongqing 400047, China

² Chongqing Municipal Key Laboratory of Opto-Electronic Engineering and Materials, Chongqing 400047, China

Abstract The intra-cavity frequency-doubled vertical external-cavity surface-emitting laser (VECSEL) has high intra-cavity circulation power and can obtain ideal frequency-doubling conversion efficiency. The progress in VECSEL is reviewed. The usage of different nonlinear crystals and the achieved harmonic wavebands obtained by different frequency-doubled VECSELs are summarized, and the tendency of VECSEL and the problems confronted in future work are discussed.

Key words lasers; frequency-doubling; external-cavity; surface-emitting lasers

OCIS codes 140.0149; 140.3460; 140.5960; 190.2620

1 引言

垂直外腔面发射激光器(VECSEL)是近年发展起来的一种新型半导体激光器,主要由抽运源、热沉、半导体增益片以及输出耦合镜组成。抽运源可以是电抽运或光抽运方式,研究较为广泛的是光抽运。热沉键合在半导体增益片的后端,可以是高热导率的金刚石或碳化硅薄片,也可以是铜块。半导体增益片主要由对激光波长具有高反射率的分布式布拉格反射镜(DBR)、为激光波长提供增益的多量子阱(MQW)有源区以及高势垒材料构成的窗口层组成,高势垒层用于阻止载流子扩散到增益片表面产生非辐射复合。输出耦合镜与增益片中的 DBR 一起构成激光谐振腔。VECSEL 结合了激光二极管抽运固体激光器和垂直腔面发射激光器(VCSEL)的优势,具有抽运吸收效率高、输出功率大、可调谐运转、发射波长可设计以及能得到高质量的近衍射极限基横模(TEM₀₀)等优点^[1-2]。另外,由于是外腔结构,VECSEL 可放置非线性晶体,进行腔内倍频,将激光输出波长扩展到可见光及紫外波段^[3],也能利用可饱和吸收体进行被动锁模,获得超短激光

收稿日期: 2016-04-19; **收到修改稿日期:** 2016-05-13; **网络出版日期:** 2016-08-28

基金项目: 重庆市基础科学与前沿技术研究重点项目(cstc2015jcyjBX0098)、重庆市教委科学技术研究项目(KJ1400532)

作者简介: 蒋丽丹(1992—),女,硕士研究生,主要从事外腔面发射激光器方面的研究。E-mail: jianglidan2015@163.com

导师简介: 张鹏(1969—),男,博士,教授,主要从事外腔面发射激光器、超短脉冲技术、非线性频率变换及微纳光子器件设计与制作等方面的研究。E-mail: zhangpeng2010@cqu.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: zhangjgs@163.com

脉冲^[4]。上述各种 VECSEL 已广泛应用于光纤通信、数字存储、图像处理、生物医学等工业生产和科研领域。

2 器件结构

图 1 是典型的 VECSEL 结构简图。倍频 VECSEL 通常采用腔内倍频方式,利用高的腔内循环功率增大倍频转换效率,获得高功率倍频光输出。常见的腔内倍频 VECSEL 结构有直腔型和折叠腔型两种。

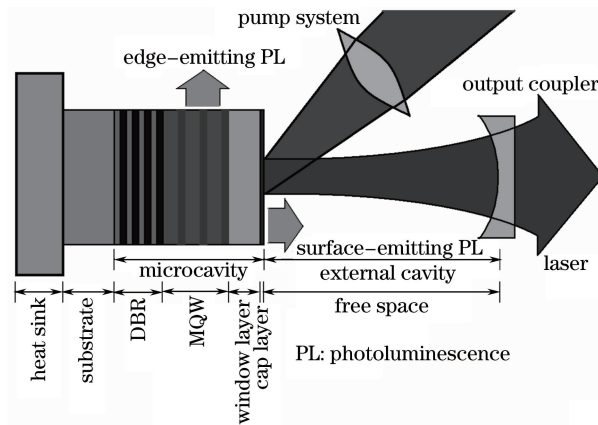


图 1 VECSEL 结构简图

Fig. 1 Schematic of VECSEL

直腔结构如图 2 所示,抽运光居于侧面,倍频晶体放置在尽可能靠近半导体增益片的位置,以获得大的功率密度,产生更高的倍频转换效率。直腔的主要缺点在于其束腰位于增益片内部,单个平凹镜对外腔中的光场控制不理想,模式及光束较差,使倍频晶体内部不能得到理想的光能量密度分布,因而直腔结构中倍频晶体的倍频效率比下文所述 V 型腔结构低。其次,增益片对腔内倍频光存在一定程度的吸收,在减少倍频光的同时增加了增益片内有源区的冗余热量,会在一定程度上加剧激光器的热效应,限制倍频效率及倍频输出功率。

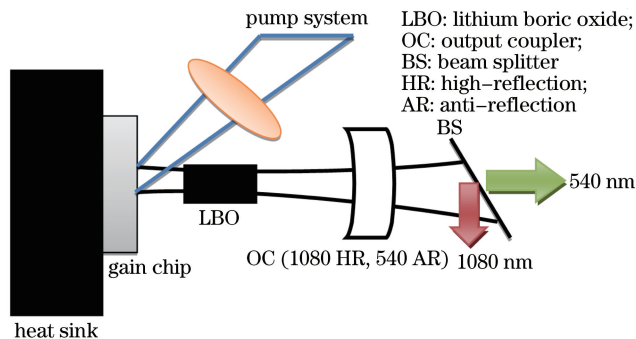


图 2 倍频 VECSEL 直腔示意图

Fig. 2 Straight cavity schematic of frequency-doubled VECSEL

采用折叠腔可以避免直腔的缺点。图 3 所示为 V 型折叠腔,非线性晶体所处臂由双凹镜构成,有利于对光场的控制,可获得较好的模式及光束。当非线性晶体置于光腰位置时,内部能得到较为理想的光能量密度分布,提高倍频晶体的倍频效率。同时,倍频过程中产生的二次谐波从倍频输出镜直接输出,不再返回增益片,防止通过增益片时被其吸收^[2-3]。相比直腔而言,折叠腔的损耗更大,在基频光功率较小时其优势并不明显,所以低功率倍频大多采用较为简单的直腔。

3 非线性晶体在倍频 VECSEL 中的应用

目前使用较为广泛的三硼酸锂(LBO)、 β 相偏硼酸钡(BBO)、硼酸铋(BIBO)、周期极化铌酸锂(PPLN)、

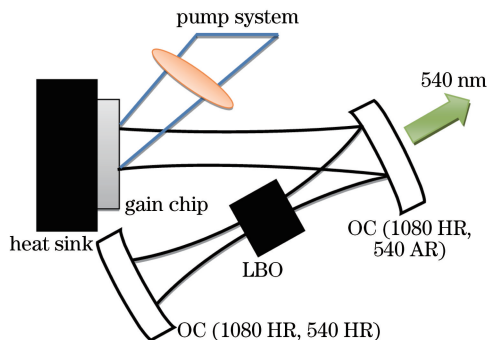


图3 倍频 VECSEL 折叠腔示意图

Fig. 3 Folded cavity schematic of frequency-doubled VECSEL

铌酸钾(KNbO₃)等非线性倍频晶体,在倍频 VECSEL 中均已得到应用。倍频 VECSEL 中非线性晶体的选择应综合考虑不同晶体的有效非线性系数、波长透过范围、倍频接收线宽、倍频接收角、倍频可接收温度、走离角、晶体抗损伤阈值以及晶体的稳定性等众多因素,视具体情况而定。

3.1 LBO 倍频晶体

LBO 晶体由我国著名科学家陈创天等^[5]研制,是倍频 VECSEL 中使用最为广泛的非线性晶体。LBO 的物理化学性质都很稳定,不易潮解。晶体透过波长范围为 155~3200 nm,相位匹配波长为 544~2600 nm,几乎覆盖了已经获得 VECSEL 的所有波长。相比 BBO、BIBO、KNbO₃ 等晶体,LBO 晶体具有较高的光学损伤阈值(18.9 GW/cm²),特别适合功率密度较高的腔内倍频。较大的倍频接收线宽(3.76 nm·cm)、较大的倍频接收角(1.79 mrad·cm)及较小的走离角(7.21 mrad),使 LBO 成为线宽较大的半导体激光器倍频的最佳之选。最重要的是,LBO 晶体 1.15 pm/V 的有效非线性系数也相当可观,在高功率倍频激光器中常被使用。LBO 晶体优良的综合性能决定了其在高功率腔内倍频 VECSEL 中的广泛应用。近年来利用 LBO 晶体获得倍频 VECSEL 的实验成果主要有:2007 年, Kim 等^[6]采用 V 型折叠腔,获得 460 nm 蓝光 VECSEL,输出功率为 1.9 W,晶体长度为 10 mm; Fallahi 等^[7]2008 年报道的 587 nm 黄光 VECSEL,输出功率为 5 W,晶体尺寸为 3 mm×3 mm×10 mm; 2012 年, Rantamaki 等^[8]利用折叠腔获得 785 nm 红光 VECSEL,输出功率为 1 W,晶体长度为 6 mm; 同年, Hessianus 等^[9]通过 V 型折叠腔,获得 589 nm 黄光 VECSEL,输出功率为 4 W。目前利用 LBO 晶体获得较高出光功率的成果有:2014 年, Kantola 等^[10]实验得到的 588 nm 黄光 VECSEL,输出功率达到 20 W,晶体长度为 10 mm; 2015 年, Kantola 等^[11]采用 V 型折叠腔,得到 615 nm 红光 VECSEL,输出功率为 10.5 W,晶体长度为 10 mm。图 4 为文献^[10]使用的倍频腔型结构,腔参数如图所示,808 nm 抽运源经过准直聚焦后投射到 VECSEL 增益片上,抽运光斑直径约为 510 μm,整个腔长为 149 mm,标准具用于窄化基频光谱线宽,双折射滤波片用于波长调谐。

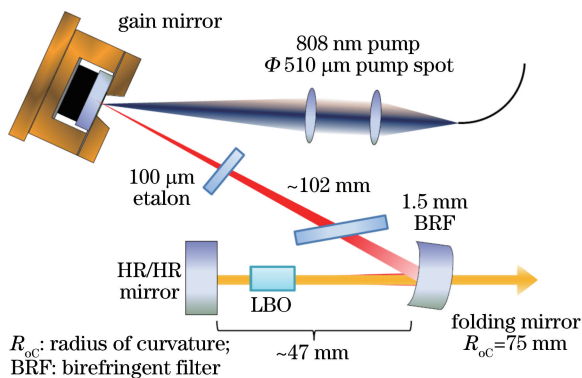


图4 588 nm 腔内倍频黄光 VECSEL

Fig. 4 588 nm intra-cavity frequency-doubled yellow VECSEL

3.2 BBO 倍频晶体

BBO 晶体为负单轴晶体,透光范围为 190~3500 nm,相位匹配范围为 409.6~3500 nm。与 LBO 晶体

相比, BBO 损伤阈值(10 GW/cm^2)远小于 LBO。虽然其非线性系数(2.14 pm/V)略大于 LBO, 但 BBO 晶体的倍频接收角($0.03 \text{ mrad}\cdot\text{cm}$)仅为 LBO 的约 $1/60$ 。BBO 走离角偏大, 对于 1064 nm 波长的基频光, 走离角为 55.99 mrad , 这使 BBO 在倍频 VECSEL 中的应用受到限制。2006 年, Lee 等^[12]报道了 535 nm 绿光 VECSEL, 输出功率为 7 W ; Rantamaki 等^[13]于 2010 年采用 Z 型折叠腔, 得到 650 nm 红光 VECSEL, 输出功率为 3 W , 晶体长度为 4 mm ; 同年 Korpijarvi 等^[14]获得 590 nm 黄橙光 VECSEL, 输出功率达到 6.2 W ; 2011 年, Rautiainen 等^[15]采用折叠腔也得到了 590 nm 黄橙光 VECSEL, 输出功率为 2.5 W , 晶体长度为 4 mm ; 2012 年, Schwarzback 等^[16]获得 328 nm 紫外 VECSEL, 输出功率为 100 mW ; 次年 Paboeuf 等^[17]获得 338 nm 紫外 VECSEL, 输出功率为 26 mW , 晶体长度为 7 mm 。

3.3 BIBO 倍频晶体

BIBO 透光范围为 $300\sim 2500 \text{ nm}$, 相位匹配范围为 $542\sim 3000 \text{ nm}$, 具有较高的损伤阈值和稳定的理化性质。BIBO 有效非线性系数为 3.2 pm/V , 倍频接收线宽为 $1.12 \text{ nm}\cdot\text{cm}$ 。作为一种良好的倍频晶体, BIBO 倍频效率可达 60% , 倍频波长范围覆盖了紫外到近红外波段。相比 LBO 晶体, BIBO 用于腔内倍频 VECSEL 的显著不足是其走离角较大, 对于 1064 nm 的基频波, 倍频走离角为 25.6 mrad 。2010 年, Petrov 等^[18]采用折叠腔, 获得了 $375\sim 435 \text{ nm}$ 可调谐倍频输出, 功率达 830 mW ; 次年 Hein 等^[19]利用 V 型折叠腔得到 460 nm 蓝光 VECSEL, 输出功率为 $1.35\sim 1.61 \text{ W}$, 倍频晶体长度为 3 mm 。

3.4 周期极化晶体 PPLN

PPLN 是一种高效的非线性晶体, 其倍频转换效率理论上随晶体长度增加而线性增大, 因此可以得到高于一般非线性晶体的转换效率。PPLN 透光范围为 $400\sim 4500 \text{ nm}$, 非线性系数较大, 光学损伤阈值较高, 能够实现非临界相位匹配(NCPM), 广泛应用于 1000 nm 以上波长的倍频和 1064 nm 抽运光的光参量放大。在生产设计中为了减小晶体的光学损伤和光折变阈值, 往往对晶体进行掺杂, 常见的掺杂型晶体为 MgO:PPLN ^[2]。PPLN 用于腔内倍频 VECSEL 时成本大大高于 LBO 晶体, 另外, 受工艺技术影响, PPLN 不容易获得理想的厚度和较长的通光长度, 使其在腔内倍频 VECSEL 中的优势不能充分体现。2015 年, Zhao 等^[20]采用直腔获得 532 nm 绿光 VECSEL, 输出功率 3.34 W , PPLN 晶体通光长度 7 mm , 极化周期 $6.94 \mu\text{m}$ 。Field 等^[21]于 2015 年报道的外腔光栅反射镜集成化 $521\sim 555 \text{ nm}$ 绿光 VECSEL 是近年来 VECSEL 腔内倍频技术的一项突破, 输出功率高于 3 W 。激光器共集成了 24 个发射单元, 单元装置如图 5 所示, 耦合输出镜为峰值反射波长与增益片 DBR 反射波长相匹配的体光栅(VBG)。增益片由高反射率的 P 型 DBR、量子阱有源区、低反射率的 N 型 DBR 组成。在 P 型 DBR 处键合的陶瓷散热基板, 再键合在铜热沉上, 构成激光器的散热装置^[21]。图 6 所示为每个单元的光路简图。PPLN 中转换的前向绿光直接通过体光栅的耦合输出, PPLN 中转换的后向绿光则经过腔内放置的分束片后再反射输出, 所以总的输出激光包含 48 束绿光。VECSEL 公司准备批量生产这种外腔光栅反射镜集成化的绿光 VECSEL, 用于激光投影等应用领域。

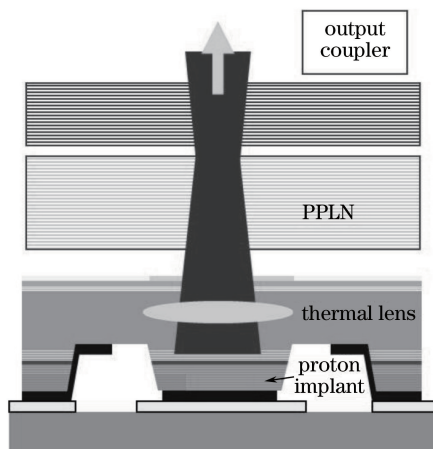


图 5 532 nm 腔内倍频绿光 VECSEL

Fig. 5 532 nm intra-cavity frequency-doubled green VECSEL

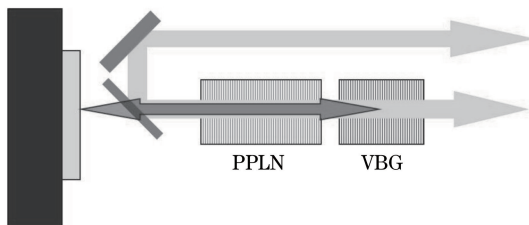


图 6 532 nm 腔内倍频绿光 VECSEL 光路示意图

Fig. 6 Optical path of the 532 nm intra-cavity frequency-doubled green VECSEL

3.5 KNbO₃ 倍频晶体

KNbO₃ 的有效非线性系数高达 12.3 pm/V, 因其高非线性系数而常用于蓝光和绿光倍频 VECSEL 中。相对于 LBO 而言, KNbO₃ 的倍频可接收光谱线宽较小, 仅为 0.27 nm·cm, 倍频可接收角 (0.028 mrad·cm) 较小, 倍频可接收温度 (0.29 K·cm) 也较低。对于半导体激光器而言, 其线宽较大, 波长随温度的漂移较大, 这些性质在很大程度上限制了 KNbO₃ 在腔内倍频 VECSEL 中的应用。目前 KNbO₃ 倍频晶体的主要用途为将 1064 nm 的基频光倍频为 532 nm 波长的绿光输出^[22]。有关 KNbO₃ 倍频晶体的最早报道是 1999 年 Raymond 等^[23] 采用折叠腔获得 490 nm 蓝光 VECSEL, 输出功率为 5 mW, 倍频晶体长度为 7.5 mm。

4 倍频 VECSEL 已实现的波段

4.1 红光 (610~785 nm)

红光在激光技术中常作为准直光, 早期的红光外腔面发射激光器以 GaAsSb/GaAs 作为量子阱材料, 以 LBO 作为倍频晶体, 产生 30 mW 的 610 nm 红光输出^[3]。2009 年 Rautiainen 等^[24] 采用折叠腔, 用 788 nm 抽运源经过准直聚焦后以约 35°角投射到 VECSEL 增益片上, 使用周期极化非线性晶体 PPMgSLT 作为倍频晶体, 获得 730 mW 的 610 nm 红光 VECSEL; Rantamaki 等^[13] 以 980 nm 波长激光作为抽运源, 抽运光斑直径约为 290 μm, 采用 I 类相位匹配, 4 mm 长 BBO 晶体作为倍频晶体, 热层温度控制在 7 °C, 获得 3 W 的 650 nm 红光 VECSEL; 2012 年, Rantamaki 等^[8] 在 2010 年的工作基础上采用 Z 型折叠腔, 用功率为 4.6 W 的 1570 nm 基频光, 获得 1 W 的 785 nm 红光 VECSEL。2015 年, Kantola 等^[11] 将 1230 nm 基频光倍频为 615 nm 红光 VECSEL, 输出功率为 10.5 W, 这是已有报道中波长在 610~630 nm 之间的最大功率, 其光光转换效率为 17.5%。实验装置如图 7 所示, 采用 V 型腔, I 类相位匹配, 808 nm 抽运源经过准直聚焦后投射到 VECSEL 增益片上, 抽运光斑直径约为 400 μm, 量子阱为 GaInNAs 材料。增益片后端键合金刚石热沉, 厚度为 100 μm 的标准具置于腔中, 便于窄化光谱线宽, 双折射滤波片用于波长调谐, LBO 晶体置于折叠镜和后端镜之间束腰的位置, 束腰宽度约为 70~80 μm。后端镜和折叠镜的曲率半径分别为 25 mm 和 50 mm。

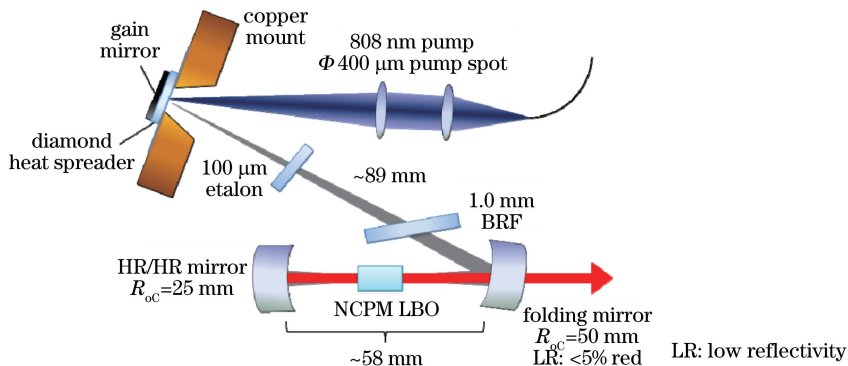


图 7 615 nm 腔内倍频红光 VECSEL

Fig. 7 615 nm intra-cavity frequency-doubled red VECSEL

4.2 黄光 (577~590 nm)

黄光激光器广泛应用于生物医学和天文学。2008 年, Fallahi 等^[7] 采用折叠腔, 以 808 nm 半导体激光

器为抽运源,抽运光斑直径约为 $500\ \mu\text{m}$,获得中心波长在 $1175\ \text{nm}$ 附近的基频光,通过 LBO 倍频晶体,I类相位匹配,获得 $5\ \text{W}$ 的 $587\ \text{nm}$ 黄光 VECSEL;2010年,Korpijarvi等^[14]以 $808\ \text{nm}$ 半导体激光器作为抽运源, $4\ \text{mm}$ 长的 BBO 晶体为倍频晶体,采用 I类相位匹配,热层温度控制在 $9\ ^\circ\text{C}$ 以下,得到 $6.2\ \text{W}$ 的 $590\ \text{nm}$ 黄光 VECSEL;2012年,Hessenius等^[9]通过 V型折叠腔,获得中心波长为 $1178\ \text{nm}$ 的基频光,通过 LBO 倍频晶体倍频,得到 $4\ \text{W}$ 的 $589\ \text{nm}$ 黄光 VECSEL;2014年,Kantola等^[10]采用折叠腔,以 $808\ \text{nm}$ 半导体激光器为抽运源,抽运光斑直径约为 $510\ \mu\text{m}$,将波长范围为 $1170\sim 1180\ \text{nm}$ 的基频光通过 LBO 倍频晶体倍频,得到 $20\ \text{W}$ 的 $588\ \text{nm}$ 黄光 VECSEL,光光转化效率为 28% 。

4.3 绿光($525\sim 532\ \text{nm}$)

绿光激光器广泛应用于显示、显微机械加工、潜艇通信、抽运源以及生物光子成像等领域。应用最为广泛的是波长为 $532\ \text{nm}$ 的绿光激光器,通常是将波长为 $1064\ \text{nm}$ 的基频光通过倍频晶体后产生绿光。2006年, Lee等^[12]采用后端抽运,BBO 倍频晶体,I类相位匹配,获得了 $535\ \text{nm}$ 绿光 VECSEL,输出功率为 $7\ \text{W}$,光光转换效率为 27% 。2007年,Hunziker等^[25]研制出了 TEM₀₀模 $55\ \text{W}$ 、多模 $66\ \text{W}$ 的 $532\ \text{nm}$ 绿光 VECSEL。2012年,Hein等^[26]采用 V型折叠腔,中心波长为 $1050\ \text{nm}$ 的基频光通过 LBO 倍频晶体,以 I类相位匹配,获得 $8\ \text{W}$ 的 $525\ \text{nm}$ 绿光 VECSEL,倍频转换效率达到 22% 。2015年,Zhao等^[20]报道了直腔型电抽运 VECSEL, $1064\ \text{nm}$ 的基频光通过 MgO:PPLN 晶体倍频得到 $3.34\ \text{W}$ 的 $532\ \text{nm}$ 绿光 VECSEL,电光转换效率为 21.2% ,是目前所报道的腔内倍频绿光电抽运 VECSEL 中转换效率最高的研究。实验装置如图 8 所示,采用热电冷却的半导体制冷器(TEC)作为散热装置。增益片有源区由 InGaAs/GaAs 多量子阱构成,发射波长为 $1064\ \text{nm}$ 。非线性晶体后端镀 $1064\ \text{HR}$ (高反)、 $532\ \text{AR}$ (增透)膜,激光腔镜分别由增益片上的 DBR 和非线性晶体后表面构成,通过改变激光腔中透镜的位置,可以改变光束束腰的尺寸。利用布儒斯特片稳定 VECSEL 的偏振态,确保红外光的偏振方向平行于周期极化晶体 PPLN 的电极化方向。插入标准具是为了将基频光的线宽压缩到 $0.2\ \text{nm}$,以满足 PPLN 的可接收线宽要求。

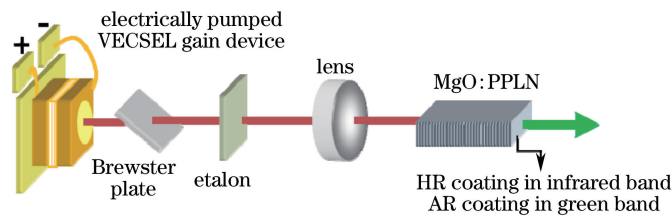


图 8 $532\ \text{nm}$ 绿光腔内倍频 VECSEL

Fig. 8 $532\ \text{nm}$ intra-cavity frequency-doubled green VECSEL

4.4 蓝光($460\sim 490\ \text{nm}$)

1999年, Raymond等^[23]通过最简单的两镜腔,在功率为 $300\ \text{mW}$ 的 $808\ \text{nm}$ 抽运光照射下,产生 $980\ \text{nm}$ 的基频光,利用 $7.5\ \text{mm}$ 长的 KbNO_3 倍频晶体获得功率为 $5\ \text{mW}$ 的 $490\ \text{nm}$ 蓝光,这是最早的蓝光 VECSEL。2007年, Kim等^[6]利用折叠腔,功率为 $4.5\ \text{W}$ 的 $920\ \text{nm}$ 基频光通过 LBO 倍频晶体,以 I类相位匹配,获得了 $1.9\ \text{W}$ 的 $460\ \text{nm}$ 蓝光 VECSEL。之后, Calvez等^[3]利用四镜腔, $30\sim 50\ \text{mW}$ 的 $808\ \text{nm}$ 抽运光,通过 LBO 倍频晶体倍频,分别获得了 $7\ \text{W}$ 的 $460\ \text{nm}$ 蓝光 VECSEL 和 $15\ \text{W}$ 的 $488\ \text{nm}$ 蓝光 VECSEL。2011年,Hein等^[19]利用 BIBO 晶体将 $920\ \text{nm}$ 的基频光倍频为 $460\ \text{nm}$ 的蓝光,输出功率为 $1.35\sim 1.61\ \text{W}$,转换效率达到 41.5% ,实验装置图如图 9 所示。

4.5 紫外($244\sim 355\ \text{nm}$)

紫外光常用于消毒杀菌和防伪标签的识别。2008年, Kaneda等^[27]通过四倍频 VECSEL 获得 $200\ \text{mW}$ 的 $244\ \text{nm}$ 紫外 VECSEL,其中二倍频时使用 LBO、四倍频时使用六硼酸铯锂(CLBO)作为非线性晶体;2009年, Shu等^[28]利用三倍频 VECSEL 获得 $450\ \text{mW}$ 的 $355\ \text{nm}$ 紫外 VECSEL,分别用 I类相位匹配 LBO 作倍频,II类相位匹配 LBO 作和频;2011年, Schwarzback等^[16]采用 V型腔,用 $532\ \text{nm}$ 的半导体激光器作为抽运源,通过 BBO 倍频晶体,获得 $150\ \text{mW}$ 的 $335\ \text{nm}$ 紫外 VECSEL;2012年, Kahle等^[29]使用 V型腔和 BBO 倍频晶体获得 $100\ \text{mW}$ 的 $330\ \text{nm}$ 紫外 VECSEL;2013年, Paboeuf等^[17]采用折叠腔,以 $532\ \text{nm}$ 的半

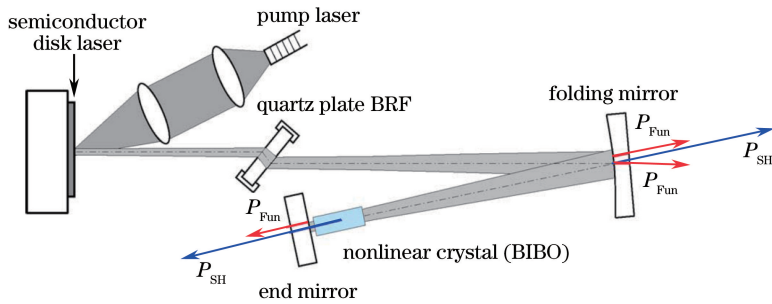


图 9 460 nm 蓝光腔内倍频 VECSEL

Fig. 9 460 nm intra-cavity frequency-doubled blue VECSEL

导体激光器作为抽运源,通过 BBO 倍频晶体将波长为 676 nm 的红光倍频为 26 mW 的 338 nm 紫外光输出;2015 年,Kahle 等^[30]以 532 nm 半导体绿光激光器作为抽运源,将 1.6 W 的 663.2 nm 红光倍频为 429 mW 的 331.6 nm 紫外光输出,量子阱采用 AlGaInP 材料,DBR 由 55 对 Al_{0.45}GaAs/AlAs 构成,势垒层用于阻止载流子扩散到增益片表面产生非辐射复合,热沉温度控制在 15 °C。

图 10 所示为近年来部分腔内倍频 VECSEL 实现的波长、功率及倍频过程中所用倍频晶体。可以看出,倍频波长主要集中在 450~650 nm 可见光范围内。使用最频繁的倍频晶体是 LBO 晶体,其次是 BBO 晶体,原因已在前面阐述。在所有报道的 VECSEL 倍频输出功率中,最大功率已达到 20 W。

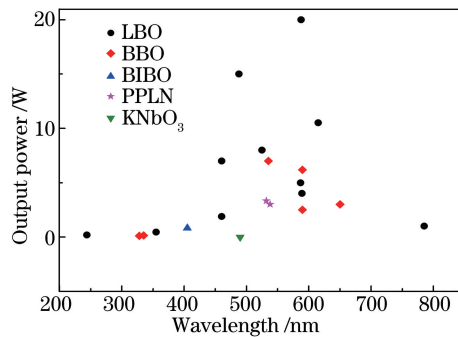


图 10 腔内倍频 VECSEL 所用非线性晶体,实现波长及输出功率

Fig. 10 Nonlinear crystals, harmonic wavelengths and output powers of reported intra-cavity frequency-doubled VECSELs

5 结束语

腔内倍频 VECSEL 具有较大的腔内循环功率,能够获得较为理想的倍频转换效率。与直腔相比,折叠腔既可使非线性晶体放置于更为合适的光腰处,获得较高的基频光功率密度,又可避免倍频光被 VECSEL 增益片再次吸收,减少了 VECSEL 增益片上的冗余热量,提高了倍频转换效率。选择倍频晶体时,一般要求倍频接收线宽较宽、走离角较小且温度接收范围较大,如 LBO、BBO 等晶体。通过腔内倍频,以近红外光作为基频光,很容易得到可见光波段的倍频光输出,推动了激光显示等技术的发展。利用腔内倍频 VECSEL 获得短波长激光输出的研究中,通过四倍频等更高次谐波产生,已得到紫外输出。腔内倍频 VECSEL 未来的发展方向是实现更短波长的高功率输出,继续提高倍频转换效率,以及进一步改善激光器热管理,增强器件的机械稳定性,并向小型化、集成化方向发展,以加快腔内倍频 VECSEL 的商业化进程。

参 考 文 献

- 1 Kuznetsov M. VECSEL semiconductor lasers: A path to high-power, quality beam and UV to IR wavelength by design [M].// Semiconductor disk lasers: Physics and technology. Weinheim: Wiley-VCH, 2010: 1-71.
 - 2 Zhang Peng. Optically pumped external cavity surface emitting lasers—theories, experiments and applications [M]. Beijing: Science Press, 2015: 148-172.
- 张 鹏. 光泵浦外腔面发射激光器——理论、实验及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 148-172.

- 3 Calvez S, Hastie J E, Guina M, *et al.* Semiconductor disk lasers for the generation of visible and ultraviolet radiation[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2009, 3(5): 407-434.
- 4 Keller U, Tropper A C. Passively modelocked surface-emitting semiconductor lasers[J]. *Physics Reports*, 2006, 429(2): 67-120.
- 5 Chen C T, Wu Y C, Jiang A D, *et al.* New nonlinear-optical crystal: LiB_3O_5 [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1989, 6(4): 616-621.
- 6 Kim J Y, Cho S, Lim S J, *et al.* Efficient blue lasers based on gain structure optimizing of vertical-external-cavity surface-emitting laser with second harmonic generation[J]. *Journal of Applied Physics*, 2007, 101(3): 033103.
- 7 Fallahi M, Fan L, Kaneda Y, *et al.* 5-W yellow laser by intracavity frequency doubling of high-power vertical-external-cavity surface-emitting laser[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, 20(20): 1700-1702.
- 8 Rantamäki A, Rautiainen J, Lyytikäinen J, *et al.* 1 W at 785 nm from a frequency-doubled wafer-fused semiconductor disk laser[J]. *Optics Express*, 2012, 20(8): 9046-9051.
- 9 Hessenius C, Guinet P Y, Lukowski M, *et al.* 589-nm single-frequency VECSEL for sodium guidestar applications[C]. *SPIE*, 2012, 8242: 82420E.
- 10 Kantola E, Leinonen T, Ranta S, *et al.* High-efficiency 20 W yellow VECSEL[J]. *Optics Express*, 2014, 22(6): 6372-6380.
- 11 Kantola E, Leinonen T, Penttinen J P, *et al.* 615 nm GaInNAs VECSEL with output power above 10 W[J]. *Optics Express*, 2015, 23(16): 20280-20287.
- 12 Lee J H, Lee S M, Kim T, *et al.* 7 W high-efficiency continuous-wave green light generation by intracavity frequency doubling of an end-pumped vertical external-cavity surface emitting semiconductor laser [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89(24): 241107.
- 13 Rantamäki A, Sirbu A, Mereuta A, *et al.* 3 W of 650 nm red emission by frequency doubling of wafer-fused semiconductor disk laser[J]. *Optics Express*, 2010, 18(21): 21645-21650.
- 14 Korpijärvi V M, Leinonen T, Puustinen T, *et al.* 11 W single gain-chip dilute nitride disk laser emitting around 1180 nm [J]. *Optics Express*, 2010, 18(25): 25633-25641.
- 15 Rautiainen J, Krestnikov I, Nikkinen J, *et al.* Multi-watt orange light generation by intracavity frequency doubling in a dual-gain quantum dot semiconductor disk laser[C]. *SPIE*, 2011, 7917: 791702.
- 16 Schwarzback T, Kahle H, Eichfelder M, *et al.* Wavelength tunable ultraviolet laser emission via intra-cavity frequency doubling of an AlGaInP vertical external-cavity surface-emitting laser down to 328 nm[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(26): 261101.
- 17 Paboeuf D, Schlosser P J, Hastie J E, *et al.* Frequency stabilization of an ultraviolet semiconductor disk laser[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(10): 1736-1738.
- 18 Petrov V, Ghotbi M, Kokabee O, *et al.* Femtosecond nonlinear frequency conversion based on BiB_3O_6 [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2010, 4(1): 53-98.
- 19 Hein A, Demaria F, Kern A, *et al.* Efficient 460-nm second-harmonic generation with optically pumped semiconductor disk lasers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 23(3): 179-181.
- 20 Zhao P, Xu B, van Leeuwen R, *et al.* 21.2% wall-plug efficiency green laser based on an electrically pumped VECSEL through intracavity second harmonic generation[C]. *SPIE*, 2015, 9349: 93490M.
- 21 Field S, Finander M, Niven G, *et al.* Latest achievements of NECSEL visible extended cavity surface emitting lasers[C]. *SPIE*, 2015, 9349: 93490L.
- 22 Alford W J, Smith A V. Wavelength variation of the second-order nonlinear coefficients of KNbO_3 , KTiOPO_4 , KTiOAsO_4 , LiNbO_3 , LiIO_3 , $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$, KH_2PO_4 , and LiB_3O_5 crystals: A test of Miller wavelength scaling[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2001, 18(4): 524-533.
- 23 Raymond T D, Alford W J, Crawford M H, *et al.* Intracavity frequency doubling of a diode-pumped external-cavity surface-emitting semiconductor laser[J]. *Optics Letters*, 1999, 24(16): 1127-1129.
- 24 Rautiainen J, Okhotnikov O G, Eger D, *et al.* Intracavity generation of 610 nm light by periodically poled near-stoichiometric lithium tantalate[J]. *Electronics Letters*, 2009, 45(3): 177-179.
- 25 Hunziker L E, Shu Q Z, Bauer D, *et al.* Power-scaling of optically pumped semiconductor lasers[C]. *SPIE*, 2007, 6451:

64510A.

- 26 Hein A, Menzel S, Unger P, *et al.* High-power high-efficiency optically pumped semiconductor disk lasers in the green spectral region with a broad tuning range[J]. Applied Physics Letters, 2012, 101(11): 111109.
- 27 Kaneda Y, Yarborough J M, Li L, *et al.* Continuous-wave all-solid-state 244 nm deep-ultraviolet laser source by fourth-harmonic generation of an optically pumped semiconductor laser using CsLiB₆O₁₀ in an external resonator [J]. Optics Letters, 2008, 33(15): 1705-1707.
- 28 Shu Q Z, Caprara A L, Berger J D, *et al.* Intracavity-tripled optically-pumped semiconductor laser at 355 nm[C]. SPIE, 2009, 7193: 719319.
- 29 Kahle H, Schwarzbäck T, Eichfelder M, *et al.* UV laser emission around 330 nm via intracavity frequency doubling of a tunable red AlGaIn P-VECSEL[C]. SPIE, 2012, 8242: 82420M.
- 30 Kahle H, Baumgärtner S, Sauter F, *et al.* High-power (>400 mW) laser emission at 332 nm of frequency-doubled, optically pumped AlGaInP disk laser with an optimized quantum well structure[C]. European Conference on Lasers and Electro-Optics, 2015: CB_3_4.