

高转换效率腔内倍频外腔面发射蓝光激光器*

伍亚东¹⁾ 朱仁江^{1)†} 晏日¹⁾ 彭雪芳¹⁾ 王涛¹⁾
蒋丽丹¹⁾ 佟存柱²⁾ 宋晏蓉³⁾ 张鹏^{4)‡}

1) (重庆师范大学物理与电子工程学院, 重庆 401331)

2) (中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

3) (北京工业大学理学部, 北京 100124)

4) (重庆师范大学重庆国家应用数学中心, 重庆 401331)

(2023年8月6日收到; 2023年11月21日收到修改稿)

高功率高光束质量的蓝色激光在激光显示与照明、水下通信和成像、有色金属加工等许多领域具有广泛应用前景. 本文利用增益芯片底部的高反镜分布布拉格反射镜、折叠镜以及后端反射镜构成V型谐振腔, 通过腔内插入非线性晶体LBO, 获得了高转换效率的高功率、高光束质量蓝光输出. 实验研究了非线性晶体的长度、基频激光的线宽、倍频走离角的补偿等不同因素对外腔面发射激光器腔内倍频蓝光输出功率的影响. 在LBO的I类相位匹配条件下, 当晶体长度为5 mm, 所用双折射滤波片厚度为1 mm时, 获得超过6 W的491 nm波长蓝光输出, x 和 y 方向的光束质量 M^2 因子均为1.08, 倍频转换效率为63%.

关键词: 腔内倍频, 外腔面发射蓝光激光器, I类相位匹配, 走离角补偿**PACS:** 42.55.-f, 42.55.Px, 42.62.-b**DOI:** 10.7498/aps.73.20231278

1 引言

蓝色激光是激光显示所需的三原色之一, 在激光电视、激光投影和激光照明等领域均存在重要的应用^[1]. 蓝色波段也是激光水下传输的窗口, 在水下激光通信、海洋资源勘探和地质风险预测等方面可发挥重要作用^[2]. 蓝光激光还是有色金属加工中最为理想的激光光源, 在集成电路工艺、新能源电池生产和激光增材制造等诸多方面都具有极其广阔的应用前景^[3-5].

目前获得蓝色激光的方式, 大致有以下几种:

气体激光器, 如氩镭激光器可产生441 nm波长、氙离子激光器能发射488 nm波长的蓝光. 气体激光器的不足之处是设备体积庞大, 功耗也非常大, 激光器的效率和输出功率都不高. 倍频固体激光器, 如Nd:YAG的946 nm, Nd:YVO₄的914 nm, Nd:GdVO₄的912 nm等谱线, 都可以经过倍频后获得蓝色波段激光^[6]. 上述固体激光器中可用于倍频产生蓝光的谱线不仅数量有限, 而且大都属于准三能级系统跃迁谱线, 其发光效率较低, 导致蓝光的输出功率不高. 又因为还要抑制激活离子的其他高增益的谱线, 因而激光器本身结构也比较复杂, 成本居高不下.

* 在渝本科高校与中国科学院所属院所合作项目 (批准号: HZ2021007)、重庆市教委科技计划重大项目 (批准号: KJZD-M201900502)、重庆市教委科技计划 (批准号: KJQN202200557)、国家自然科学基金 (批准号: 61975003, 61790584, 62025506) 和重庆师范大学基金项目 (批准号: 23XLB003) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: 20131121@cqnu.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: zhangpeng2010@cqnu.edu.cn

半导体激光器是比较理想的产生蓝色激光的光源, GaN 或 InGaN 等氮化物半导体材料可辐射波长在 400—480 nm 范围的蓝光^[7-9]. 这些直接发射的蓝光半导体激光器, 如果采用边发射形式, 其光束质量很差; 如果采用面发射形式, 则很小的模式体积会限制其输出功率. 无论是哪种形式的氮化物半导体蓝光激光器, 材料外延生长的难度都使得它们目前的输出功率偏小. 当然也可以用近红外波段的半导体激光器通过倍频来实现蓝光. Kozlovsky 等^[10]利用 KNbO₃ 作为倍频晶体, 通过对 GaAlAs 半导体激光器二极管的直接倍频, 产生了 41 mW 的 428 nm 蓝光. Ye 等^[11]采用 PPLN 作为频率转换晶体, 对半导体激光器直接倍频获得了 14.8 mW 的 488 nm 蓝光输出. 随后, 董景星等^[12]将上述蓝光功率提升到 20 mW. 王旭葆等^[13]则采用 LBO 作为非线性晶体, 直接倍频半导体激光器输出了 25 mW 的 488 nm 蓝光. 但在上述方案中, 半导体激光器很差的光束质量和大的光谱线宽, 使得倍频效率很低, 倍频激光的输出功率处于 mW-量级; 此外, 一般还需要对半导体激光器的光束质量进行整形, 结构也比较复杂, 不大适合于需要较高功率的实际应用.

光泵浦外腔面发射激光器 (vertical-external-cavity surface-emitting laser, VECSEL), 又称半导体碟片激光器 (semiconductor disk laser, SDL), 结合了面发射半导体激光器和固体碟片激光器两者的优点, 能同时获得高的输出功率和良好的光束质量, 且其发射波长可以根据应用场景的需要来进行设计, 近年来受到研究人员的广泛关注^[14,15].

因为具备良好的光束质量和很高的腔内循环功率, 所以 VECSEL 特别适合于腔内倍频产生二次谐波. 利用近红外波段的 VECSEL, 结合腔内倍频, 即可产生高功率、高光束质量的蓝色波段激光. 在 VECSEL 提出之初, Raymond 等^[16]即用一块带凸面的 KNbO₃ 非线性晶体, 在 980 nm 波长 VECSEL 中用腔内倍频获得了 5 mW 的 490 nm 蓝光. 随后, Fan 等^[17]研究了有望取代 488 nm 氩离子激光器的腔内倍频 VECSEL, 980 nm 的基频光通过双折射滤波片 (birefringent filter, BRF) 的调谐, 经过 LBO 晶体倍频, 最后获得了 1.3 W 功率的 488 nm 蓝光输出. Kim 等^[18]研究了可用于激光显示的腔内倍频 VECSEL, 依然是用 LBO 作为非线性晶体, 实验产生了 1.4 W 的 460 nm 蓝色激光. Tinsley 等^[19]则探索了窄线宽的腔内倍频

VECSEL, 用 LBO 进行频率转换, 实验获得了输出功率超过 1 W 的 457.75 nm 和 460.86 nm 蓝光, 可用于铯和镉的原子冷却与俘获. 此外, Hein 等^[20]在提高腔内倍频蓝光 VECSEL 的效率方面做了较好的工作, 获得了泵浦光到倍频光的光-光转换效率为 14.5% 的 460 nm 蓝光 VECSEL. Casel 等^[21]研究了锁模运转的腔内倍频 VECSEL, 实验输出脉冲宽度 5.8 ps, 重复频率 1.88 GHz 的 489 nm 蓝光. Gray 等^[22]则尝试了用周期极化 MgO:PPLN-晶体在 VECSEL 中产生蓝光. 迄今为止, 在蓝色波段通过腔内倍频 VECSEL 获得的最高输出功率是 Chilla 等^[23]报道的 10 °C 下 15 W 的 488 nm 蓝光和 20 °C 下 5 W 的 460 nm 蓝光. 就频率转换蓝光 VECSEL 的倍频转换效率而言, 在 480 nm 波段, 文献^[18]的转换效率为 21.9%, 文献^[20]中的倍频转换效率为 30%, 文献^[19]的转换效率达到 55%. 转换效率最高的是文献^[23]中展示的结果, 即 55.6%.

在上述报道的蓝光 VECSEL 中, 除了相干公司的结果外, 其他的输出功率普遍不高. 本文用 LBO 作为非线性晶体, 从非线性晶体长度、基频激光的线宽、倍频走离角的补偿等方面入手, 较为全面地对腔内倍频 VECSEL 的输出特性进行实验研究, 以寻找较为合理的提高腔内倍频 VECSEL 的转换效率的途径, 得到高的蓝光输出功率, 从而可以满足实际应用场景的需要, 进一步拓展蓝光 VECSEL 的应用范围.

2 实验装置

实验中 VECSEL 增益芯片的外延结构如图 1(a) 所示, 外延片整体上采用逆序生长. 首先在 GaAs 衬底上生长一层高 Al 组分的 AlGaAs, 作为刻蚀阻挡层. 之后是 GaAs 保护层和高 Al 组分的 AlGaAs 窗口层. 接下来为增益芯片的有源区, 包含 12 个 8 nm 厚的 InGaAs/GaAsP 量子阱, 其中 GaAsP 层既是量子阱的势垒层, 同时也起到应力补偿的作用. 然后生长的部分是高反射率的分布布拉格反射镜 (distributed Bragg reflector, DBR), 由 30 对交替的 GaAs/AlGaAs 层构成, 每层材料的光学厚度均为激光波长的 1/4. 最后的外延片结束层是 GaAs. 有源区多量子阱的荧光峰值波长设计值为 980 nm. DBR 的中心波长设计值也为 980 nm, 其反射谱的带宽设计值为 100 nm.

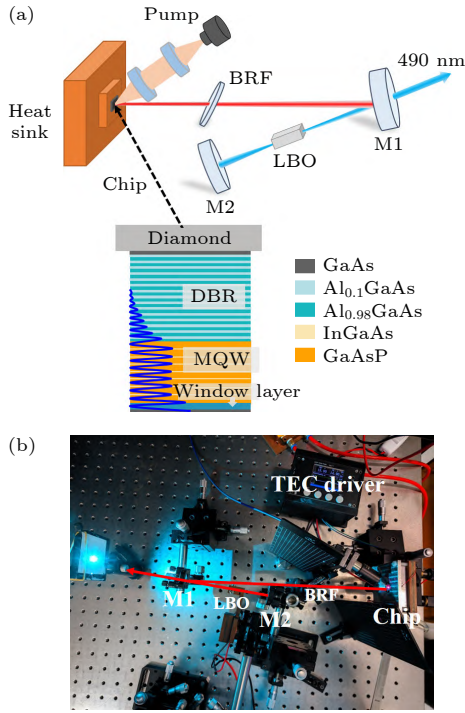


图 1 (a) 倍频蓝光 VECSEL 的光路图及增益芯片的外延结构简图; (b) 倍频蓝光的实物装置图

Fig. 1. (a) Schematics of the frequency-doubled blue VECSEL and the sketch of the epitaxial structure of the gain chip; (b) setup of the frequency-doubled blue VECSEL.

完成了生长的外延片被划分为 $4\text{ mm} \times 4\text{ mm}$ 的小块, 并对外延结束面做金属化处理, 然后键合在一块 $5\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ 的金刚石热沉上, 再焊接在通有冷却水的铜块上面. 图 1(a) 是腔内倍频 VECSEL 实验的光路图, 实验装置的实物图如图 1(b) 所示. 泵浦源为一台最大输出功率为 53 W 的光纤耦合输出 808 nm 半导体激光器, 光纤的芯径为 $400\text{ }\mu\text{m}$. 泵浦光通过准直后聚焦在增益芯片上, 入射光与芯片表面法线夹角约 30° . 因为增益芯片表面未作任何镀膜处理, 所以倾斜入射的泵浦光约有 30% 被反射, 不能被芯片吸收利用. 激光谐振腔的两个端镜为增益芯片底部的 DBR 和后端反射镜 M2. 折叠镜 M1 曲率半径为 100 mm, 镀有对 980 nm 高反射率和 490 nm 高透过率的膜层, 完成频率转换后的蓝光在此输出. 后端反射镜 M2 曲率半径为 50 mm, 镀有对 980 nm 和 490 nm 高反射率的膜层. 谐振腔中包含增益芯片的一臂长度为 260 mm, 包含倍频晶体的一臂长度为 110 mm, 这样的腔长设计是为了在非线性晶体上获得更小的激光束腰, 束腰的直径大约为 $40\text{ }\mu\text{m}$. 折叠腔的折叠角控制在约 10° 以内, 以避免带来像散, 引起

光束质量的劣化. 布儒斯特角放置在谐振腔中的双折射滤光片 BRF 能把基频激光变为线偏振光, 同时起到一定程度压窄基频激光线宽的作用. 非线性晶体 LBO 采用 I 类相位匹配方式, 并置于 M1 和 M2 之间的光腰处.

3 结果与讨论

首先测试 VECSEL 激光增益芯片的基础特性, 结果如图 2 所示. 可以看出, DBR 的反射谱中心波长位于 975 nm, 其反射率在 95% 以上的反射谱宽度约为 75 nm, 与设计值较接近, 能够较好地作为构成激光器谐振腔所需的一个高反射率的端镜. 由图 2 给出的不同吸收泵浦功率下增益芯片的荧光谱可知, 荧光峰值波长随泵浦功率的红移速率约为 0.036 nm/W . 当芯片吸收的泵浦功率为 30 W 时, 其峰值波长已经红移了约 0.9 nm, 而 GaAs 系材料的发光波长随温度红移的速率大约为 0.3 nm/K , 由此可以推知, 30 W 泵浦功率下, 激光增益芯片内部的温度仅上升了约 3 K, 表明芯片散热性能良好.

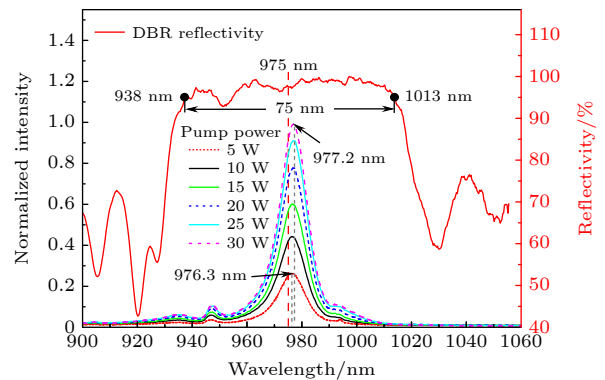


图 2 DBR 的反射谱及其荧光特性图

Fig. 2. Reflectivity of DBR and the photoluminescence of the gain chip.

LBO 晶体在 160—2600 nm 波长范围内都具备良好的透光性能, 是被广泛用于近红外波段的性能优良的二倍角及三倍频晶体. 最重要的是, 对于 I 类相位匹配, 其在 976 nm 到 488 nm 的倍频过程中, 其走离角为 10.02 mrad , 大约只有 BBO (58.86 mrad) 的 $1/6$; 同时, LBO 的可接受角和可接受线宽分别为 $6.09\text{ mrad}\cdot\text{cm}$ 和 $52.40\text{ cm}^{-1}\cdot\text{cm}$, 约是 BBO (分别为 $1.01\text{ mrad}\cdot\text{cm}$ 和 $30.17\text{ cm}^{-1}\cdot\text{cm}$) 的 6 倍和 2 倍. 因此 LBO 特别适合于 VECSEL 这

种线宽偏大的半导体激光器的倍频过程.

接下来研究 I 类相位匹配条件下, 不同 LBO 晶体长度对倍频 VECSEL 蓝光输出功率的影响作用. 为了对比讨论, 实验中特意使穿过晶体的基频激光的束腰大小基本保持不变, 选用的晶体长度则分别为 5, 10, 15 和 20 mm. 图 3 为实验所得的不同晶体长度下倍频蓝光的输出功率曲线, 当环境温度为 15 °C, 晶体长度为 5 mm, 吸收泵浦功率为 37 W 时 (对应泵浦源的最大输出功率 53 W), 获得的蓝光输出功率最大为 6.06 W, 波长为 491 nm. 蓝光的光束质量 M^2 因子在 x 和 y 方向都是 1.08, 表明其优良的光束质量. 需要指出的是, 在最大蓝光输出功率时, 激光器仍未出现热反转.

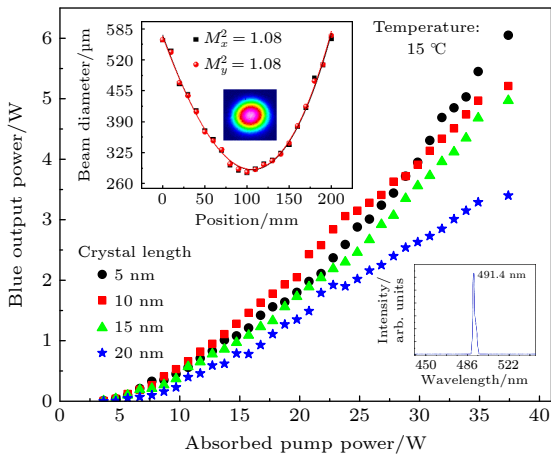


图 3 不同 LBO 长度对应倍频激光输出功率曲线图. 左上插图 of 蓝光光束质量 M^2 因子, 右下插图是倍频蓝光的光谱
Fig. 3. Blue output powers of the lasers with different LBO length. The insert in top left is the M^2 factor and the insert in low right is the spectrum of the blue laser.

在非线性频率变换理论中, 对于波长为 λ , 光束束腰为 ω 的入射光束, 当其在非线性晶体中的走离角为 ρ 时, 晶体的最大作用长度为^[24]

$$l = \sqrt{\pi} \frac{\omega}{\rho}. \quad (1)$$

实验中使用的光束束腰约为 40 μm , 所用非线性晶体 LBO 在 980 nm 处的走离角为 10.02 mrad, 由此得到 LBO 晶体的最佳长度约为 7 mm. 实验中 5 mm 长的晶体取得了最好的蓝光输出功率, 这与理论估算基本相符.

鉴于倍频转换效率与基频激光的线宽有关, 在 I 类相位匹配实验中, 采用不同厚度 d 的 BRF, 以获得不同的基频线宽. 图 4 显示了不同 BRF 厚度下, 在环境温度为 15 °C, LBO 晶体长度为 5 mm

时, 倍频蓝光 VECSEL 所输出的功率曲线. 不同厚度 BRF 所产生的基频激光的光谱宽度也作为内插图展示在图中. 理论上讲, 厚度越大的 BRF 所产生的基频激光线宽越小, 即通过 BRF 的基频激光的线宽为

$$\Delta\delta = \frac{\lambda^2}{2(n_o - n_e)d}. \quad (2)$$

其中, n_o 和 n_e 分别为 BRF 寻常光和非寻常光的折射率. 基频激光线宽越小, 倍频效率则越高, 输出蓝光功率也就越大. 但考虑到越厚的 BRF 带来的吸收损耗也势必越大, 它又会减小蓝光的输出功率, 因而 BRF 的厚度存在可优化的数值. 从图 4 来看, 倍频 VECSEL 所使用的 BRF 的厚度约为 1 mm 时, 蓝光的输出功率最大.

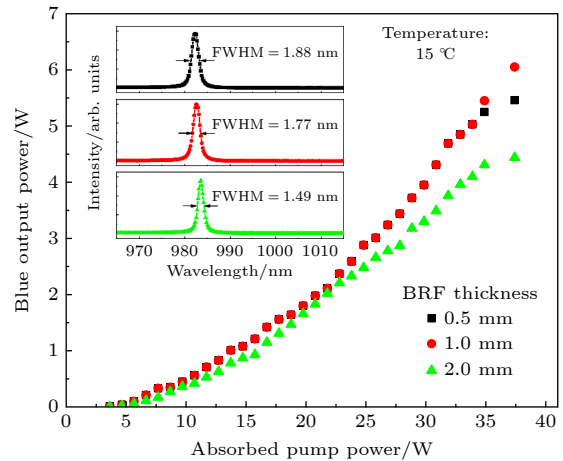


图 4 不同 BRF 厚度对应的倍频蓝光输出功率曲线图. 插图为不同厚度 BRF 对应的基频激光线宽
Fig. 4. Blue output powers of the lasers with different BRF thickness. The insert is the linewidth of the fundamental laser with different BRF thickness.

在 LBO 的 I 类相位匹配中, 晶体内不同偏振态的两束激光之间存在走离效应^[25]. 实验采用 980—490 nm 的 LBO 晶体 I 类相位匹配 ($o+o \rightarrow e$), 晶体切割角 $\theta = 16.9^\circ$, $\varphi = 90^\circ$ 时, 基频激光正入射情况下, 980 nm 基频光为 o 光, 490 nm 倍频光为 e 光, 两者在晶体中的走离角为 10.02 mrad. 这一定程度上会降低从基频激光到倍频激光的转换效率, 因为当基频光与倍频光因走离而相互错开后, 新产生的倍频光将不再与之前的倍频光进行相干叠加, 从而也就影响到了非线性晶体的转换效率.

从图 5 中的插图可以看出, 在两束不同偏振态

的激光之间相互交叠的部分,从基频光转变而来的倍频光可以进行相干叠加.当两束光完全走离时,上述相干叠加将不复存在.如前所述,由于走离效应的限制,实验中所用 LBO 晶体的最大相互作用长度约为 7 mm.

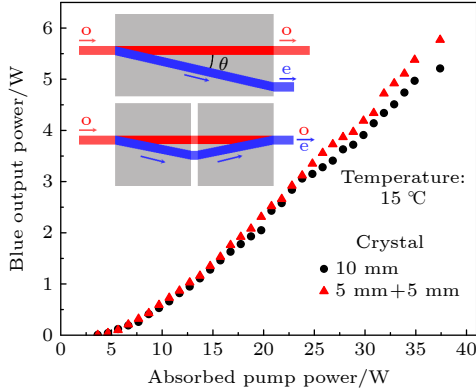


图 5 10 mm LBO 与 5 mm + 5 mm LBO 对应的倍频蓝光输出功率曲线图. 插图为走离角及其补偿示意图
Fig. 5. Blue output powers of the lasers with 10 mm length LBO and 5 mm + 5 mm length LBO. The insert is the schematics of walk-off angle and its compensation.

当选用 LBO 长度为 10 mm 时,基频 o 光和倍频 e 光之间的走离效应将会限制倍频蓝光的输出功率.实验中采用两块对称放置的 5 mm 长 LBO 晶体代替 10 mm 长度 LBO,对晶体中基频 o 光和倍频 e 光之间的走离角进行补偿,如图 5 中的插图所示.所得到的蓝光输出功率如图 5 所示,与没有走离角补偿的情况相比,经过走离角补偿后的倍频蓝光的输出功率有明显的改善.

图 6 为没有放置非线性晶体 LBO 时基频激光的输出功率与实验所得的最大倍频蓝光功率(即 LBO 长度为 5 mm, BRF 厚度为 1 mm 条件下的

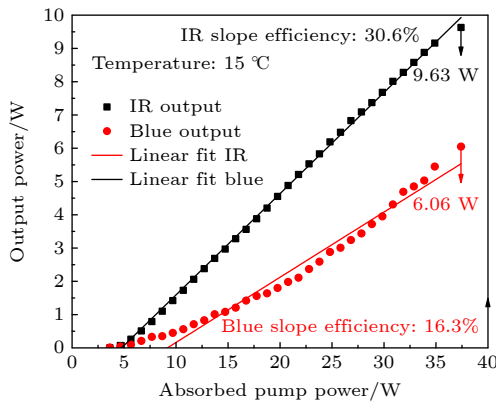


图 6 基频 VECSEL 与倍频蓝光 VECSEL 功率对比曲线
Fig. 6. Output powers of the fundamental VECSEL versus the frequency doubled VECSEL.

蓝光功率).由图可知,当环境温度为 15 °C 时,基频 VECSEL 激光的阈值为 5 W,斜效率为 30.6%.倍频激光的斜效率为 16.3%.在吸收泵浦功率为最大值 37 W 时,基频激光输出功率为 9.63 W,倍频蓝光输出功率为 6.06 W,对应的倍频转换效率为 63%.上述基频激光及倍频蓝光的输出功率均受限于实验中所用泵浦源的最大输出功率.

4 结 论

本文研究了非线性晶体长度、基频激光线宽、倍频激光走离角等不同因素对腔内倍频蓝光 VECSEL 输出功率的影响作用.结果表明,考虑到基频激光与倍频蓝光之间的走离效应,非线性晶体的长度存在一个最佳值;当选用晶体长度超过其最佳值时,则可用两块对称放置的相同晶体,对走离角进行一定程度的补偿.对用于产生线偏振光的 BRF,它在对基频激光线宽进行压窄的同时,又存在腔内吸收损耗,因而其厚度也存在一个折衷的数值.实验选用了 LBO 的 I 类相位匹配,当 LBO 晶体长度为 5 mm, BRF 厚度为 1 mm 时,在环境温度为 15 °C,吸收泵浦功率为 37 W 时,获得的倍频蓝光输出功率超过 6 W,倍频转换效率为 63%,蓝光的光束质量 M^2 因子在 x 方向和 y 方向上都是 1.08.上述蓝光的输出功率受限于实验所使用的泵浦源的最大输出功率.这种高转换效率的高功率、高光束质量腔内倍频蓝光 VECSEL 具有结构简单紧凑,输出性能稳定,光束质量优良等优点,其发射波长还可以根据实际应用场景的需要进行设计,在流式细胞仪等生物检测、荧光激发、DNA 排序及成像等许多方面存在极大的应用价值.

参考文献

- [1] Gao W N, Xu Z Y, Bi Y, Yuan Y 2020 *Strategic Study of CAE* **22** 85 (in Chinese) [高伟男, 许祖彦, 毕勇, 袁园 2020 *中国工程科学* **22** 85]
- [2] Ma J, Zhu X L, Lu T T, Ma H D 2022 *Acta Opt. Sin.* **42** 1714002 (in Chinese) [马剑, 朱小磊, 陆婷婷, 马浩达 2022 *光学学报* **42** 1714002]
- [3] Yang Y Q, Wen Y L, Wang D, Zhou H, Niu Z Q, Lu T J 2022 *T. China Welding Instit.* **43** 80 (in Chinese) [杨永强, 温娅玲, 王迪, 周恒, 牛增强, 卢同杰 2022 *焊接学报* **43** 80]
- [4] Gu B 2021 *MW Metal Forming* **834** 1 (in Chinese) [顾波 2021 *金属加工(热加工)* **834** 1]
- [5] Wang H Z, Wu Y, Wang H W 2021 *Chin. J. Nonferrous Metals* **31** 3059 (in Chinese) [王洪泽, 吴一, 王浩伟 2021 *中国有色金属学报* **31** 3059]

- [6] Gao J, Yu X, Zhang W P, Peng J B, Yu J H, Wang Y Z 2007 *Opt. Tech.* **33** 430 (in Chinese) [高静, 于欣, 张文平, 彭江波, 于俊华, 王月珠 2007 *光学技术* **33** 430]
- [7] Yang T R, Xu H, Mei Y, Xu R B, Zhang B P, Ying L Y 2020 *Chin. J. Lasers* **47** 151 (in Chinese) [杨天瑞, 徐欢, 梅洋, 许荣彬, 张保平, 应磊莹 2020 *中国激光* **47** 151]
- [8] Wang Y K, Zhen Z M, Long H, Mei Y, Zhang B P 2022 *Acta Photon. Sin.* **51** 39 (in Chinese) [王玉坤, 郑重明, 龙浩, 梅洋, 张保平 2022 *光子学报* **51** 39]
- [9] Wang K, Han J L, Liang J H, Shan X N, Wang L J 2023 *Chin. J. Lasers* **50** 62 (in Chinese) [王渴, 韩金樑, 梁金华, 单肖楠, 王立军 2023 *中国激光* **50** 62]
- [10] Kozlovsky W J, Lenth W, Latta E E, Moser A, Bona G L 1990 *Appl. Phys. Lett.* **56** 2291
- [11] Ye Z, Lou Q, Dong J, Wei Y, Lin L 2005 *Opt. Lett.* **30** 73
- [12] Dong J X, Lou Q H, Cheng X S, Ling L, Wei Y R, Ye Z H, Zhou J 2006 *Acta Opt. Sin.* **26** 567 (in Chinese) [董景星, 楼祺洪, 成序三, 凌磊, 魏运荣, 叶震寰, 周军 2006 *光学学报* **26** 567]
- [13] Wang X B, Ding P, Zuo T X 2008 *Infrared Laser Eng.* **S3** 48 (in Chinese) [王旭葆, 丁鹏, 左铁钊 2008 *红外与激光工程* **S3** 48]
- [14] Rahimi-Inan A 2016 *J. Optics-UK* **18** 093003
- [15] Guina M, Rantamäki A, Härkönen A 2017 *J. Phy. D Appl. Phys.* **50** 383001
- [16] Raymond T D, Alford W J, Crawford M H, Allerman A A 1999 *Opt. Lett.* **24** 1127
- [17] Fan L, Hsu T C, Fallahi M, Murray J T, Bedford R, Kaneda Y, Stolz W 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 251117
- [18] Kim G B, Kim J Y, Lee J, Yoo J, Kim K S, Lee S M, Park Y 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 181106
- [19] Tinsley J N, Bandrupally S, Penttinen J P, Manzoor S, Ranta S, Salvi L, Poli N 2021 *Opt. Express* **29** 25462
- [20] Hein A, Demaria F, Kern A, Menzel S, Rinaldi F, Rösch R, Unger P 2010 *IEEE Photonic. Tech. L.* **23** 179
- [21] Casel O, Woll D, Tremont M A, Fuchs H, Wallenstein R, Gerster E, Weyers M 2005 *Appl. Phys. B-Lasers O.* **81** 443
- [22] Gray A C, Woods J R, Carpenter L G, Kahle H, Berry S A, Tropper A C, Gawith C B 2020 *Appl. Opt.* **59** 4921
- [23] Chilla J L, Butterworth S D, Zeitschel A, Charles J P, Caprara A L, Reed M K, Spinelli L 2004 *Solid State Lasers XIII: Technology and Devices* **5332** 143
- [24] Boyd G D, Ashkin A, Dziedzic J M, Kleinman D A 1965 *Phys. Rev.* **137** A1305
- [25] Zondy J J, Bonnin C, Lupinski D 2003 *J. Opt. Soc. Am. B* **20** 1695

Intracavity frequency-doubled external-cavity surface-emitting blue laser with high conversion efficiency*

Wu Ya-Dong¹⁾ Zhu Ren-Jiang^{1)†} Yan Ri¹⁾ Peng Xue-Fang¹⁾ Wang Tao¹⁾
 Jiang Li-Dan¹⁾ Tong Cun-Zhu²⁾ Song Yan-Rong³⁾ Zhang Peng^{4)‡}

1) (*College of Physics and Electronic Engineering, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China*)

2) (*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*)

3) (*Faculty of Sciences, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China*)

4) (*National Center for Applied Mathematics in Chongqing, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China*)

(Received 6 August 2023; revised manuscript received 21 November 2023)

Abstract

Blue laser with high power and high beam quality has many applications such as in laser display, underwater communication and imaging, and non-ferrous metal processing. Optically pumped external-cavity surface-emitting laser combines the advantages of both surface-emitting semiconductor lasers and solid-state disk lasers, and can produce high output power and good beam quality simultaneously. Its high intracavity circulating power is more conducive to intracavity frequency doubling, achieving high-power and high beam quality blue light through fundamental laser in the near-infrared waveband. This paper reports an efficient intracavity frequency doubled 490 nm high power blue light by using a 980 nm fundamental laser in an external-cavity surface-emitting laser. The V-type resonant cavity is formed by the high reflectivity distributed Bragg reflector (DBR) at the bottom of gain chip, a folded flat concave mirror (high reflectivity coated for 980 nm and anti-reflectivity coated for 490 nm), and a flat concave end mirror (high reflectivity coated for 980 nm and 490 nm). By inserting a nonlinear crystal LBO into the cavity at the beam waist formed by the folded mirror and end mirror, and employing a birefringent filter (BRF) to polarize the fundamental laser and narrow the linewidth of the laser, a high power and high beam quality blue laser with high conversion efficiency is obtained. The effects of different factors including the length of nonlinear crystal, the linewidth of fundamental laser, and the compensation of walk off angle on the output power of the blue laser are studied experimentally. The length of the nonlinear crystal is optimized based on the size of the fundamental laser beam waist at the position of the crystal in the resonant cavity. Under the type-I phase matching condition of LBO, over 6 W output power at 491 nm wavelength is obtained when the crystal length is 5 mm and the BRF thickness is 1 mm. The beam quality M^2 factor in the x direction and the y direction are both 1.08, and the conversion efficiency of frequency doubling is 63%. The experimental results also show that symmetrically placed nonlinear crystals can compensate for the walk-off angle during frequency doubling to a certain extent, thereby clearly improving the conversion efficiency of the frequency doubled blue laser.

Keywords: intracavity frequency-doubled, external-cavity surface-emitting blue laser, type-I phase matching, compensation of walk off angle

PACS: 42.55.-f, 42.55.Px, 42.62.-b

DOI: [10.7498/aps.73.20231278](https://doi.org/10.7498/aps.73.20231278)

* Project supported by the Cooperation Project between Chongqing Local Universities and Institutions of Chinese Academy of Sciences, Chongqing Municipal Education Commission (Grant No. HZ2021007), the Science and Technology Research Program of Chongqing Municipal Education Commission, China (Grant No. KJZD-M201900502), the Science and Technology Research Program of Chongqing Municipal Education Commission, China (Grant No. KJQN202200557), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61975003, 61790584, 62025506), and the Chongqing Normal University Foundation, China (Grant No. 23 XLB003).

† Corresponding author. E-mail: 20131121@cqnu.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: zhangpeng2010@cqnu.edu.cn