

文章编号: 1005-5630(2024)02-0036-10

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5630.202303190068

# 体布拉格光栅外腔倍频半导体激光器研究

刘荣战

(武汉锐科光纤激光技术股份有限公司, 湖北 武汉 430000)

**摘要:** 为提高绿光激光器的输出特性, 设计了一种体布拉格光栅外腔倍频半导体激光器。采用反射型体布拉格光栅作为反馈元件构成外腔半导体激光器, 并使用三硼酸锂晶体进行倍频, 研究了基频光的光束及光谱特性对倍频光的光束及光谱特性的影响。实验结果表明, 使用体布拉格光栅进行外腔锁波时, 所得到的倍频光同样能实现窄带宽输出, 同时倍频光的远场分布与基频光的远场分布一致。使用衍射效率为 10% 的体布拉格光栅作为外腔输出镜, 可将半导体激光器的输出波长稳定锁定在 1 064 nm, 所得到的倍频光波长稳定在 532 nm 附近, 光谱线宽压缩至 0.4 nm 左右, 输出功率可达 73 mW。

**关键词:** 半导体激光器; 绿光; 体布拉格光栅; 倍频

**中图分类号:** TN 248.4 **文献标志码:** A

## Study on volume Bragg grating external cavity second harmonic generation semiconductor laser

LIU Rongzhan

(Wuhan Raycus Fiber Laser Technologies Co., Ltd., Wuhan 430000, China)

**Abstract:** To improve the output characteristics of green light lasers, a volume Bragg grating external cavity second harmonic generation semiconductor laser is designed. A reflective volume Bragg grating was used as a feedback element to construct an external cavity semiconductor laser, and a lithium triborate crystal was used for second harmonic generation. The influence of the beam and spectral characteristics of the fundamental frequency light on the beam and spectral characteristics of the frequency doubling light was studied. The experimental results showed that when volume Bragg grating for external cavity mode locking was used, the obtained second harmonic generation also could achieve narrow bandwidth output, and the far field distribution of second harmonic generation was consistent with that of fundamental frequency light. A volume Bragg grating with a diffraction efficiency of 10% was used as an external cavity output mirror. The output wavelength of the semiconductor laser could be stably locked at 1 064 nm. The obtained second harmonic generation wavelength could be stabilized around 532 nm. The spectral linewidth was compressed to about 0.4 nm, and the output power could reach 73 mW.

**Keywords:** semiconductor laser; green light; volume Bragg grating; second harmonic

收稿日期: 2023-03-19

第一作者: 刘荣战(1993—), 男, 工程师, 研究方向为高功率半导体激光器。E-mail: 374739613@qq.com

## 引言

近年来，由于光电器件相关的材料以及外延设备、技术的蓬勃发展，半导体激光器也得到了迅猛发展，尤其是用于工业加工以及泵浦的半导体激光器，其商用单芯片输出功率已突破 50 W。相比于大批量商用的近红外波段的半导体激光器，可见光波段的半导体激光器发展非常缓慢，特别是对于激光显示等所需的绿光半导体激光器，其亮度和稳定性仍存在较大的挑战<sup>[1-3]</sup>。

从上世纪末起，绿光半导体激光器的研究工作开始逐步展开，许多学者对绿光半导体激光器都做了相关研究工作<sup>[4-11]</sup>。2010年，Sizov等<sup>[12]</sup>实现了中心波长为 520 nm，输出功率为 15 mW 的绿光半导体激光器。2011年，Sizov等<sup>[13]</sup>又实现了输出功率为 20 mW 的绿光半导体激光器。2012年，Avramescu等<sup>[14]</sup>报道了使用寿命达 10 000 h 以上的绿光半导体激光器，其中心波长为 519 nm，最大输出功率大于 100 mW。2017年，Tian等<sup>[15]</sup>通过 InGaN/GaN 结构实现了绿光单管输出，其功率可为 58 mW。绿光作为光的三原色之一，在激光显示应用中的作用变得极为重要，另外在工业精密加工、激光医疗、军事等领域也有着潜在应用前景<sup>[16]</sup>。传统的绿光半导体激光器以 GaN 衬底为基础进行外延生长，芯片以 TO 结构进行封装，然而由于芯片外延工艺的复杂性，绿光半导体激光器的光谱特性和光束特性均较差，无法适用于高光束质量、高亮度以及高色彩饱和度要求的应用。本文设计了一种体布拉格光栅外腔锁波倍频半导体激光器，研究了基频光特性对倍频光的影响，通过对基频光的调制得到窄线宽输出的倍频光。

## 1 体布拉格光栅外腔倍频半导体激光器

### 1.1 实验原理

体布拉格光栅 (volume Bragg grating, VBG) 是一种通过紫外曝光和热处理的方式，在特种光敏玻璃内形成周期性折射率变化结构的衍射光学

元件，其具有一定的波长选择性和角度选择性。当半导体激光器出射光经过体布拉格光栅时，不满足光栅波长选择性和角度选择性的光会直接透射出光栅，而满足相应条件的光则会被反馈回发光区形成外腔结构振荡，实现器件锁波。体布拉格光栅的衍射光由衍射方程决定<sup>[17]</sup>

$$|\cos \theta| = \frac{\lambda}{2\Lambda n} \quad (1)$$

式中： $\theta$  是光入射到光栅的角度； $\lambda$  是反馈光波长； $\Lambda$  是光栅周期； $n$  是光栅的平均折射率。由此可知，当出射光满足体布拉格光栅的角度条件时，只有一个波长会被反馈回发光区。

### 1.2 体布拉格光栅外腔倍频半导体激光器结构

实验采用宽条形半导体激光器，发光区宽度为 100  $\mu\text{m}$ 。经测试，出射光波长在 1 064 nm 左右，连续输出功率在 5 W 以上，温漂约为 0.7 nm/ $^{\circ}\text{C}$ ，快慢轴发散角为  $40^{\circ} \times 10^{\circ}$ 。使用焦距为 0.36 mm 的非球面平凸透镜作为快轴准直透镜 (fast axis collimator, FAC)。使用焦距为 9 mm 的球面平凸透镜作为慢轴准直透镜 (slow axis collimator, SAC)。使用反射式体布拉格光栅作为外腔反馈输出镜，波长锁定在 1 064 nm 左右，具体结构参数如表 1 所示。倍频晶体采用三硼酸锂 (lithium triborate, LBO) 晶体，选用 I 类相位匹配，切割角 ( $\theta$ ,  $\varphi$ ) 为 ( $90^{\circ}$ ,  $11.2^{\circ}$ )，尺寸 3.0 mm  $\times$  3.0 mm  $\times$  6.0 mm，两端镀双波长增透膜 (透射率  $> 99.5\%$  @ 1 064 nm + 532 nm)。半导体激光器使用半导体制冷片 (thermoelectric cooler, TEC) 温度控制器对器件的工作温度进行控制。TEC 控制器的温度控制精度为  $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 。基频光和倍频光经过滤光片后分离，使用光纤光谱仪和光束质量分析仪测量倍频光的特征。

表 1 体布拉格光栅参数  
Tab. 1 Parameters of VBG

衍射效率/%	布拉格波长/nm	尺寸/(mm $\times$ mm $\times$ mm)	衍射带宽/nm
10	1064	3.0 $\times$ 2.0 $\times$ 6.0	0.1
10	1064	3.0 $\times$ 2.0 $\times$ 1.5	0.3

体布拉格光栅可将满足布拉格选择条件的光束反馈回芯片有源区，从而实现特定波长的选择

和锁定。如图 1 所示，锁波后的光束经过 LBO 倍频晶体倍频，出现 532 nm 的倍频光，在经过分光片时将 532 nm 的倍频光分离出去。通过使用不同衍射带宽的 VBG 进行外腔锁波，分析体

布拉格光栅外腔锁波下的倍频光特性，研究体布拉格光栅外腔锁波下的基频光的光谱与光场特性对倍频光的光谱与光场分布的影响。

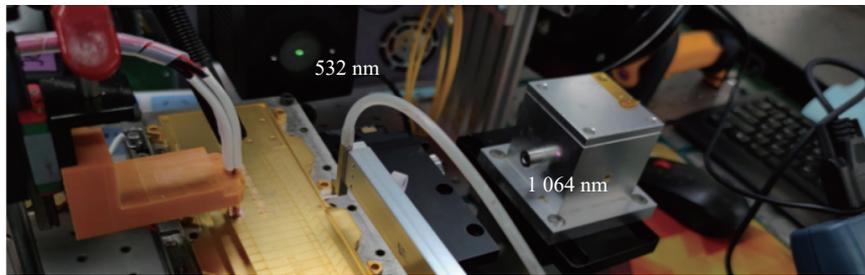
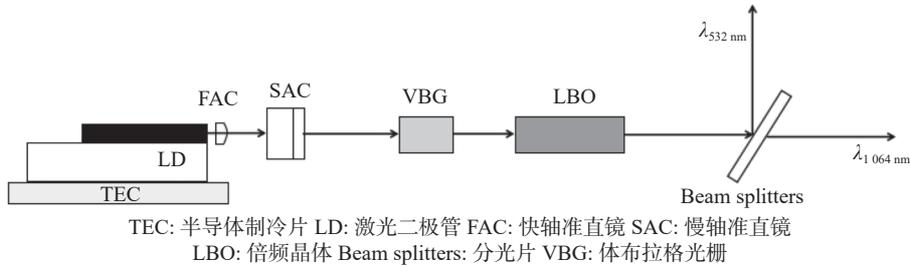


图 1 体布拉格光栅外腔倍频半导体激光器结构图

Fig. 1 Structure of a VBG external cavity second harmonic generation semiconductor laser

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 自由出射半导体激光器

半导体激光器的输出功率以及光谱会随着温度以及电流的变化而变化。图 2 和图 3 分别为半导体激光器在不同温度以及不同电流下自由出射时的功率特性和光谱特性。

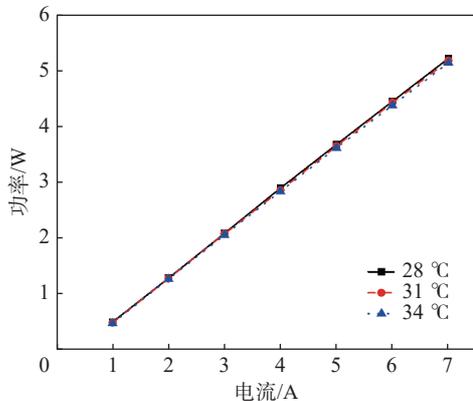


图 2 自由出射时半导体激光器的功率特性

Fig. 2 Power characteristics of semiconductor lasers during free emission

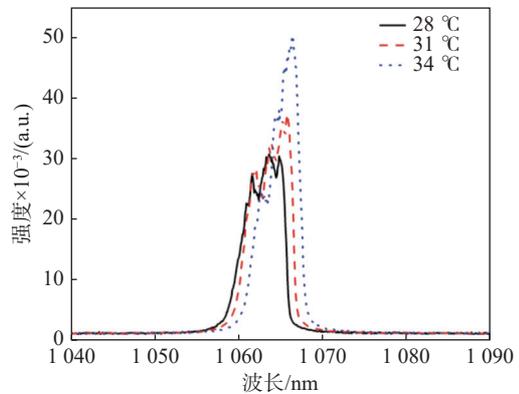


图 3 不同温度下自由出射时半导体激光器的光谱特性

Fig. 3 Spectral characteristics of semiconductor lasers under free emission at different temperatures

如图 2 所示，随着电流的增加输出功率逐渐上升，当 TEC 温度为 28 °C 时，7 A 电流下的输出功率达到 5.23 W。随着 TEC 温度的升高，输出功率逐渐衰减，在 7A 电流下，当 TEC 温度为 34 °C 时的输出功率为 5.13 W。图 3 为 7 A 时不同温度下的光谱分布，结果显示峰值波长随工作温度的增加发生红移，移动量约为 0.7 nm/°C，这是因为半导体材料的禁带宽度随工作温度的变化而变小，导致波长向长波方向移动。如图 4 所示，自由出射时的光谱半高宽较大，约为 5 nm，

且随着工作电流的增加而增加，工作电流每增加 1A，光谱半高宽增加量为 1~2 nm。

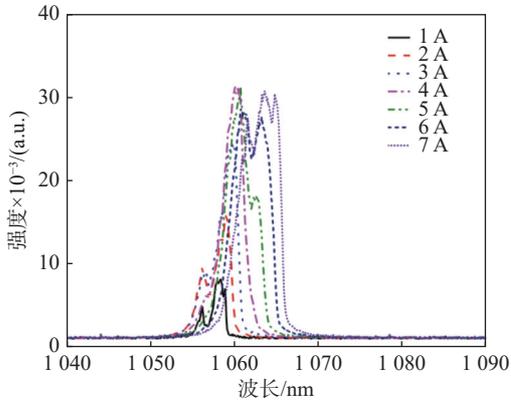


图 4 28 °C 自由出射时半导体激光器的光谱特性

Fig. 4 Spectral characteristics of semiconductor lasers under free emission at 28 °C

为研究温度对半导体激光器光场分布的影响，使用 FAC 和 SAC 对输出光束进行准直，然后用光束分析仪对输出光进行测试分析。图 5 为自由输出半导体激光器远场光场分布，结果表明，随着器件温度的增加，同样电流下输出光的

光场分布并未发生明显变化，说明温度对光场分布的影响要弱于其对功率和光谱的影响。

为研究半导体激光器的倍频特性，采用 LBO 晶体进行腔外倍频。半导体激光器输出的基频光在准直后，经过晶体倍频得到 532 nm 的倍频光。如图 6 所示，随着器件工作温度的升高，倍频光的输出功率随之下降，这是因为器件温度的升高使得基频光的输出功率衰减，从而导致倍频光的功率同步衰减。图 7 为 7 A 电流时不同温度下的倍频光光谱分布，结果显示峰值波长随器件工作温度的增加发生红移，移动量约为 0.33 nm/°C，这是因为器件温度升高导致基频光发生红移，而倍频光会随着基频光的红移也发生红移。图 8 为 28 °C 温度下的倍频光谱特性，结果显示随着电流的增加，倍频光的半高宽同步发生展宽。当输出电流为 7A 时，倍频光的半高宽约为 4 nm。

器件工作温度对倍频光的远场光场分布影响较小，不同温度下倍频光的光场分布与基频光的光场分布基本一致。因此认为，倍频晶体仅改变

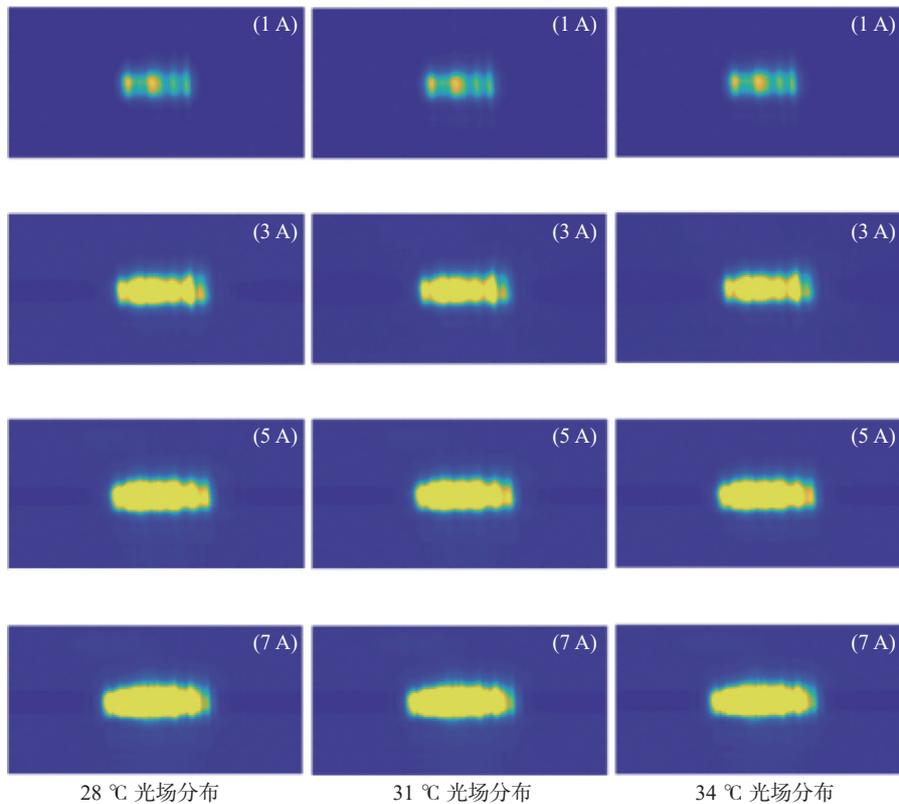


图 5 不同温度和不同电流下自由出射时半导体激光器的远场光斑

Fig. 5 Far-field spot of semiconductor lasers at different temperatures and currents for free emission

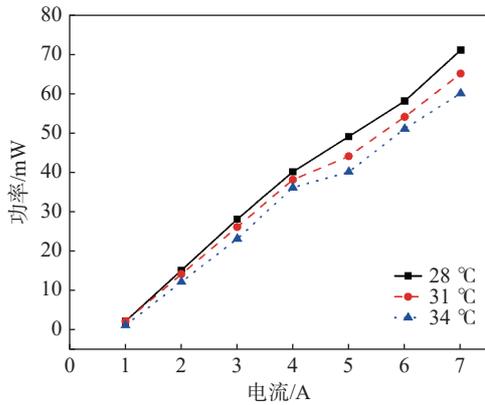


图 6 自由出射时半导体激光器倍频光的功率特性  
 Fig. 6 Power characteristics of second harmonic generation in the semiconductor lasers during free emission

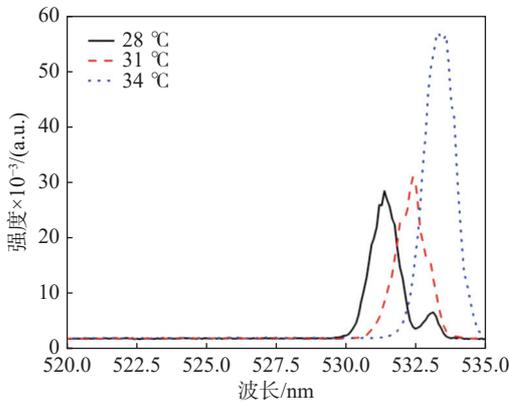


图 7 不同温度下自由出射时半导体激光器倍频光的光谱特性

Fig. 7 Spectral characteristics of second harmonic generation in the semiconductor laser under free emission at different temperatures

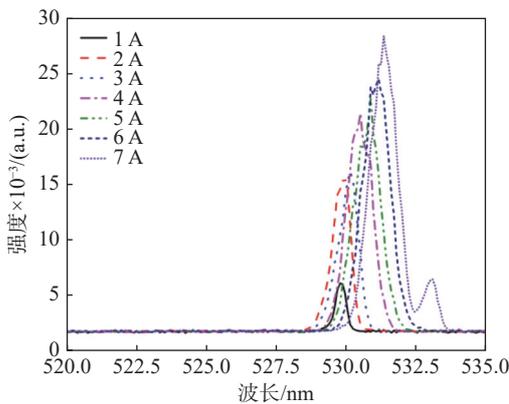


图 8 28 °C 自由出射时半导体激光器倍频光的光谱特性  
 Fig. 8 Spectral characteristics of second harmonic generation in the semiconductor laser at 28 °C free emission

基频光的频率，而不改变由基频光所产生的倍频光的远场分布。

## 2.2 衍射带宽 0.3 nm 体布拉格光栅外腔锁波倍频半导体激光器

反射式体布拉格光栅可将满足布拉格条件波长的光反馈回芯片有源区。反馈光影响有源区内的模式竞争，使布拉格波长的光损耗较小，并可以优先达到阈值输出，表现为器件只输出该单一波长的光束，从而实现外腔结构对波长的锁定，且锁定后随着器件温度和电流的增加波长偏移量极小。

使用衍射效率为 10%，衍射带宽为 0.3 nm 的体布拉格光栅做为外腔输出镜，对半导体激光器进行锁波。如图 9 所示，在 28 °C 的工作温度下，7 A 的输出功率达到 5.03 W。图 10 为不同

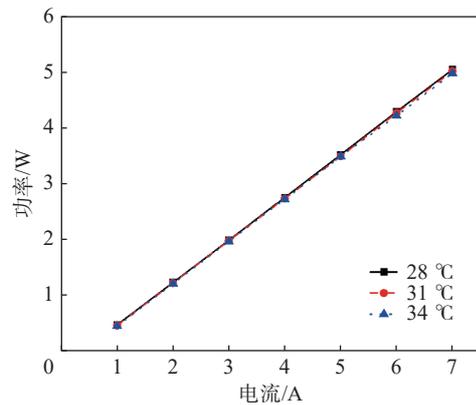


图 9 衍射带宽 0.3 nm 体布拉格光栅外腔半导体激光器的功率特性

Fig. 9 Power characteristics of a VBG external cavity semiconductor laser with a diffraction bandwidth of 0.3 nm

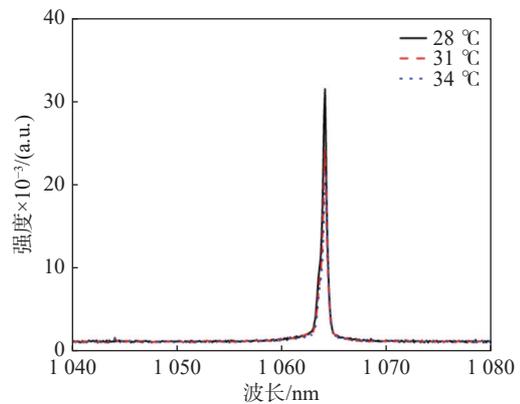


图 10 不同温度下衍射带宽 0.3 nm 体布拉格光栅外腔半导体激光器的光谱特性

Fig. 10 Spectral characteristics of a VBG external cavity semiconductor laser with a diffraction bandwidth of 0.3 nm at different temperatures

温度下锁波后的光谱分布，可以看出峰值波长稳定锁定在 1064 nm 附近，锁波后带宽约为 0.3 nm，其温漂系数约为 0.014 nm/°C，波长稳定性提高了约 47 倍。说明体布拉格光栅将满足布拉格衍射条件的反馈光反馈回芯片有源区，而反馈过程中的透镜吸收损耗、透镜准直损耗以及芯片波导损耗是造成激光功率下降的因素。

图 11 为 0.3 nm 体布拉格光栅外腔锁波半导体激光器的远场光场分布，可以看出与图 5 自由

输出时的远场光场分布相比，体布拉格光栅外腔锁波半导体激光器的光斑在快、慢轴两个方向并未发生展宽，说明快、慢轴准直透镜将芯片发散角度控制在体布拉格光栅的布拉格角度范围以内，实现了更高效的反馈。同时，随着器件工作温度的增加，体布拉格光栅外腔锁波下的半导体激光器光场分布差异较小，说明远场分布对温度的敏感性较小。

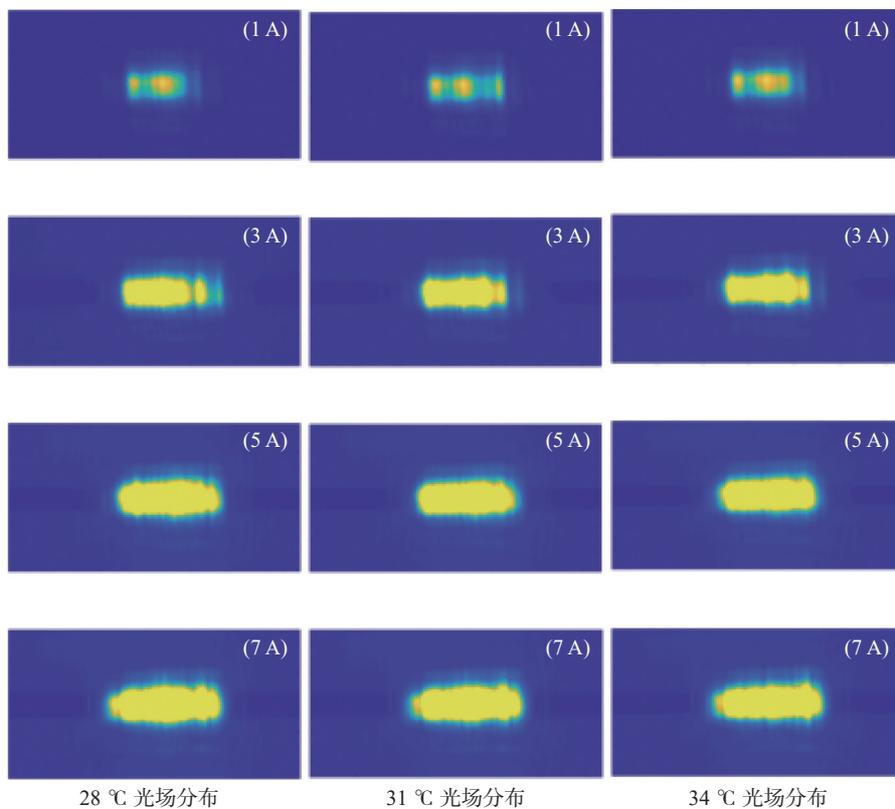


图 11 不同温度和不同电流下行射带宽 0.3 nm 体布拉格光栅外腔半导体激光器的远场光斑

Fig. 11 Far-field spot of a VBG external cavity semiconductor laser with a reflection bandwidth of 0.3 nm at different temperatures and currents

如图 12 所示，随着器件温度的增加，体布拉格光栅外腔锁波半导体激光器的倍频光功率出现减小，当工作温度由 28 °C 升高至 34 °C 时，7 A 电流下的倍频光功率从 71 mW 下降至 67 mW。由图 13 和图 14 可以看出，体布拉格光栅外腔锁波半导体激光器倍频光的光谱出现锁波状态，且随着温度的增加光谱并未发生明显展宽及红移，这是因为体布拉格光栅将基频光的波长和带宽在晶体倍频波长范围内进行了良好的锁定，导

致倍频光可以实现窄线宽输出，倍频光半高宽约 0.6 nm，温漂系数约为 0.08 nm/°C。

为研究体布拉格光栅外腔半导体激光器倍频光的远场特性，使用分光片将基频光和倍频光进行分束，再利用光束分析仪对倍频光的光场分布进行测试。0.3 nm 体布拉格光栅外腔半导体激光器倍频光的远场光场分布，与基频光的光场分布相同。倍频晶体仅对光束频率进行改变，对光场分布改变较小。

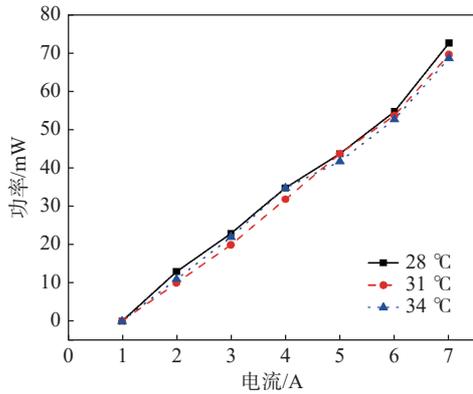


图 12 衍射带宽 0.3 nm 体布拉格光栅外腔半导体激光器倍频光的功率特性

Fig. 12 Power characteristics of second harmonic generation in a 0.3 nm diffraction bandwidth VBG external cavity semiconductor laser

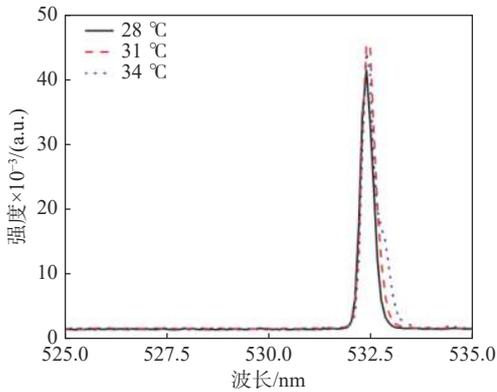


图 13 不同温度下衍射带宽 0.3 nm 体布拉格光栅外腔半导体激光器倍频光的光谱特性

Fig. 13 Spectral characteristics of second harmonic generation in a 0.3 nm VBG external cavity semiconductor laser at different temperatures

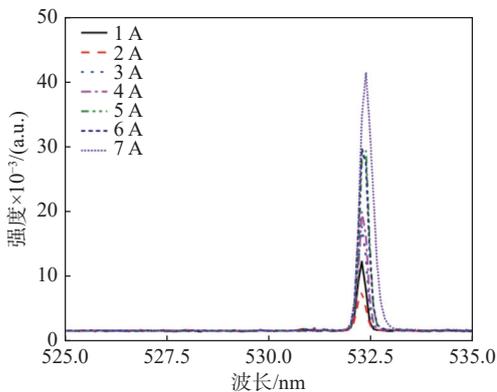


图 14 28 °C 衍射带宽 0.3 nm 体布拉格光栅外腔半导体激光器倍频光的光谱特性

Fig. 14 Spectral characteristics of second harmonic generation in a 28 °C diffraction bandwidth of 0.3 nm VBG external cavity semiconductor laser

### 2.3 衍射带宽 0.1 nm 体布拉格光栅外腔锁波倍频半导体激光器

为了进一步研究体布拉格光栅外腔对倍频光的影响，使用衍射效率为 10%，衍射带宽为 0.1 nm 的体布拉格光栅作为外腔反馈镜进行锁波，锁波后的温漂系数约为 0.014 nm/°C。

如图 15 所示，在 28 °C 工作温度下，7 A 的输出功率达到 5.1 W，锁波后带宽约为 0.2 nm，略宽于体布拉格光栅衍射带宽。造成带宽略宽的主要原因是：体布拉格光栅不能将全部的反馈光返回半导体激光器发光区，而部分未被反馈的波长则会直接出射；测试信号光通过光谱仪的传输光纤时存在传输损耗以及传输噪声，导致测试信号光频率发生变化；所使用的光纤光谱仪带宽测试精度为 0.2 nm，因此测试设备存在一定的测量误差，从而导致 0.1 nm 体布拉格光栅外腔半导体激光器测试带宽与体布拉格光栅衍射带宽略有差异。与 0.3 nm 体布拉格光栅外腔结构激光器的输出功率差异较小，说明衍射效率是影响体布拉格光栅外腔半导体激光器输出功率的主要因素。由图 16 可知，当器件工作温度在 34 °C 时，光谱出现轻微展宽。这是因为随着温度的升高，器件输出波长发生红移，且红移量超出体布拉格光栅的波长选择范围，导致锁波质量下降。

图 17 为衍射带宽 0.1 nm 体布拉格光栅外腔锁波半导体激光器的远场光场分布，可以看出使用窄带宽度布拉格光栅进行外腔锁波时对远场光场分布影响较小。这是因为，体布拉格光栅将满

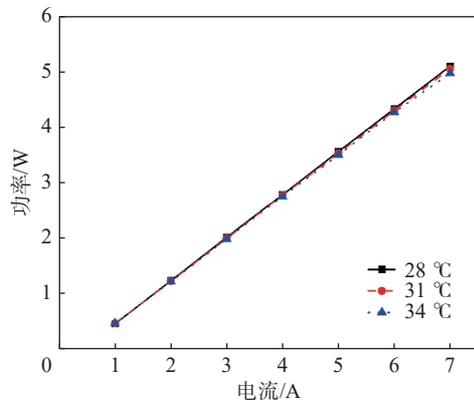


图 15 衍射带宽 0.1 nm 体布拉格光栅外腔半导体激光器的功率特性

Fig. 15 Output characteristics of a VBG external cavity semiconductor laser with a diffraction bandwidth of 0.1 nm

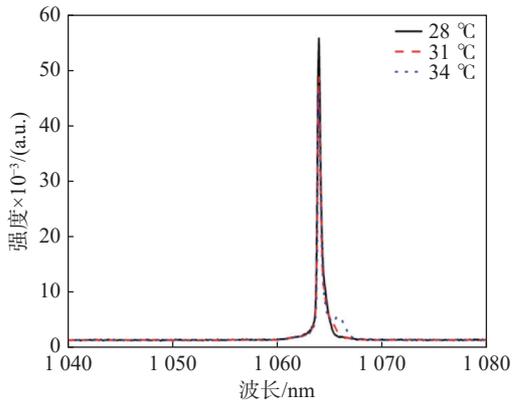


图 16 不同温度下衍射带宽 0.1 nm 体布拉格光栅外腔半导体激光器的光谱特性

Fig. 16 Spectral characteristics of a VBG external cavity semiconductor laser with a diffraction bandwidth of 0.1 nm at different temperatures

足布拉格波长选择条件的模式反馈回芯片有源区内参与腔内模式竞争，对有源区近场特性的影响较小，而一般远场特性可由近场进行傅里叶变换得到。

图 18 为衍射带宽 0.1 nm 体布拉格光栅外腔锁波半导体激光器倍频光功率特性。可以看出当器件温度为 28 °C 时，7 A 电流下的倍频光功率为 73 mW，倍频光光谱半高宽约 0.4 nm，温漂系数约为 0.07 nm/°C。倍频光功率的变化主要是受基频光功率的影响，倍频光光谱特性同样受到基频光光谱特性的影响，更窄的基频光光谱带宽可得到较窄的倍频光光谱带宽，因此通过调整基频光的输出特性可对倍频光的输出特性进行调制。由图 19 和图 20 可以看出，使用 0.1 nm 衍

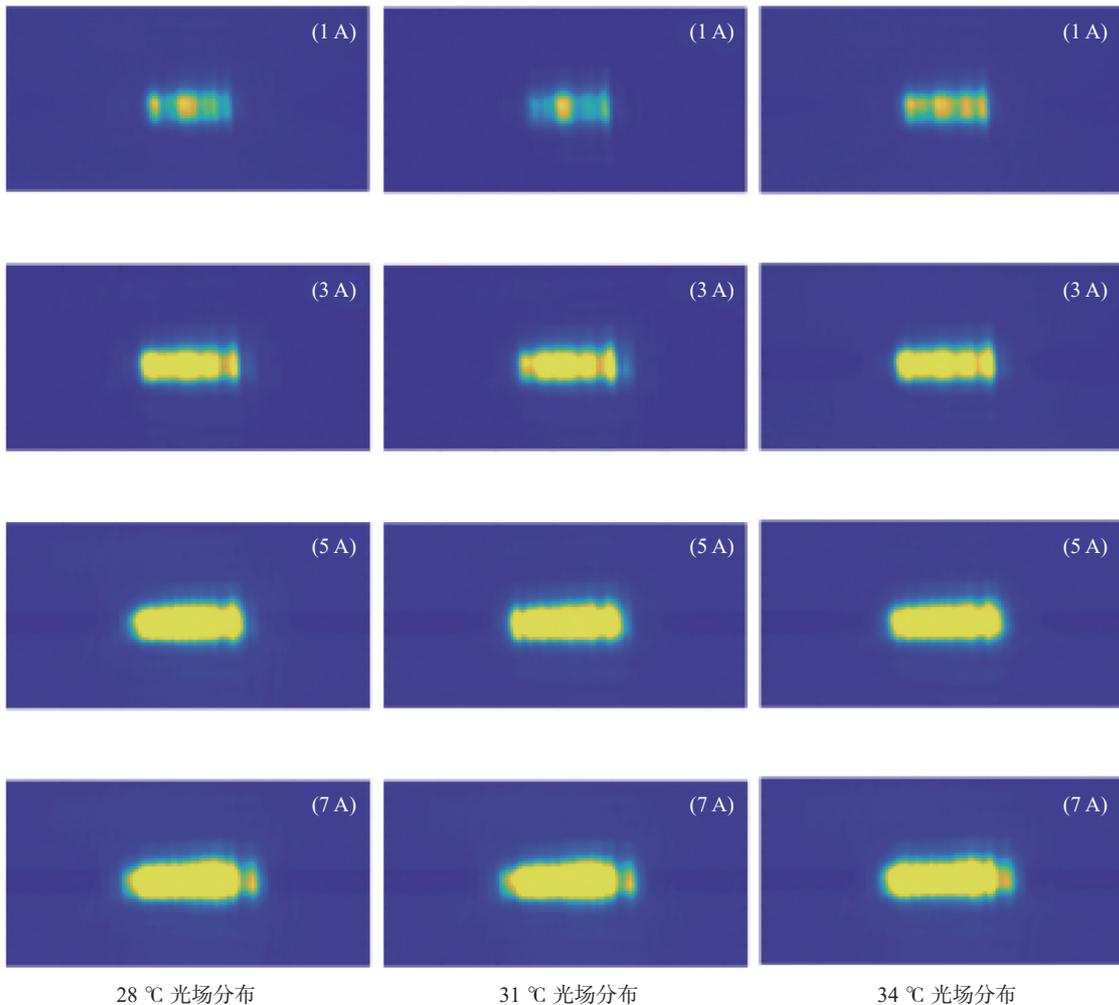


图 17 不同温度和不同电流下衍射带宽 0.1 nm 体布拉格光栅外腔半导体激光器的远场光斑

Fig. 17 Far-field spot of a VBG external cavity semiconductor laser with a reflection bandwidth of 0.1 nm at different temperatures and currents

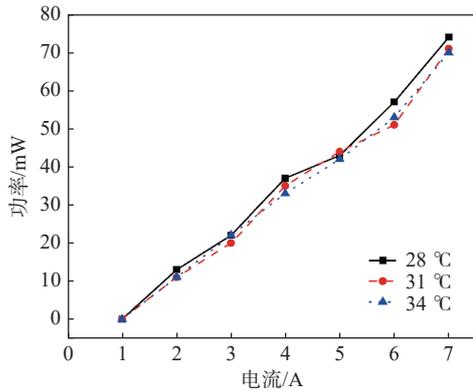


图 18 衍射带宽 0.1 nm 体布拉格光栅外腔半导体激光器倍频光的功率特性

Fig. 18 Power characteristics of second harmonic generation in a 0.1nm diffraction bandwidth VBG external cavity semiconductor laser

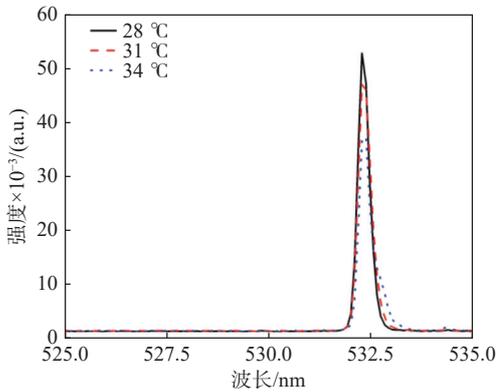


图 19 不同温度下衍射带宽 0.1 nm 体布拉格光栅外腔半导体激光器倍频光的光谱特性

Fig. 19 Spectral characteristics of second harmonic generation in a 0.1 nm VBG external cavity semiconductor laser at different temperatures

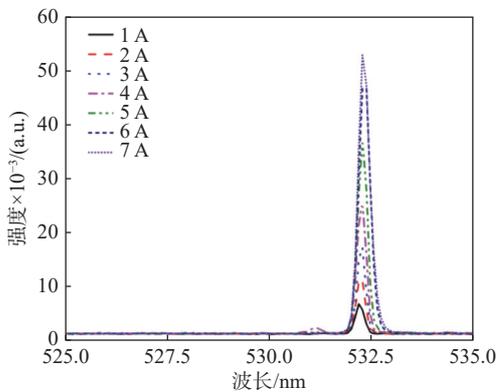


图 20 28 °C 衍射带宽 0.1 nm 体布拉格光栅外腔半导体激光器倍频光的光谱特性

Fig. 20 Spectral characteristics of second harmonic generation in a 28 °C diffraction bandwidth of 0.1 nm VBG external cavity semiconductor laser

射带宽的体布拉格光栅可以使得倍频光稳定锁定在 532 nm 附近。

为研究不同带宽锁波对倍频光远场分布的影响,使用 0.1 nm 体布拉格光栅作为外腔输出镜测试分析倍频光的远场光场分布。测试结果显示,不同带宽的体布拉格光栅作为外腔输出镜时,倍频光的远场光场分布差异较小,说明倍频光场分布主要由基频光场决定,倍频晶体无法对输出光场进行调制。

### 3 结 论

采用体布拉格光栅作为外腔反馈元件,通过倍频晶体对输出光束进行倍频,设计并搭建了体布拉格光栅外腔倍频半导体激光器结构,分析了基频光的光束、光谱特性以及锁波质量对倍频光的光束和光谱特性的影响。实验采用 10% 衍射效率,衍射带宽分别为 0.1 nm 和 0.3 nm 的 2 种体布拉格光栅进行外腔锁波,对比分析了不同衍射带宽体布拉格光栅外腔锁波下的基频光对倍频光的影响。实验结果表明,使用带宽较窄、锁波质量较好的体布拉格光栅进行锁波时,可以得到窄带宽的倍频光,且倍频光的光束特性与基频光保持一致。实现了体布拉格光栅外腔锁波状态下倍频光的稳定输出和高效工作。在 28 °C 的工作温度下,当输入 7 A 电流时,得到的倍频光的光谱宽度约 0.4 nm,最大输出功率为 73 mW。

### 参 考 文 献:

- [1] 刘荣战,薄报学,么娜,等.体布拉格光栅外腔红光半导体激光器实验研究[J].发光学报,2019,40(11):1401-1408.
- [2] 孟雪,宁永强,张建伟,等.面向激光显示的红光半导体激光器的研究进展[J].激光与光电子学进展,2019,56(18):180001.
- [3] 王玉,张玲,杨盈莹,等.高功率蓝紫光半导体激光器及其光场匀化研究[J].半导体光电,2019,40(1):38-41.47.
- [4] RARING J W, SCHMIDT M C, POBLENZ C, et al. High-performance blue and green laser diodes based on nonpolar/semipolar bulk GaN substrates[C]// Proceedings of SPIE 7939, Gallium Nitride Materials

- and Devices VI. San Francisco, California, United States: SPIE, 2011: 79390.
- [ 5 ] NAKAMURA S. InGaN-based blue laser diodes[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 1997, 3(3): 712 – 718.
- [ 6 ] MIYOSHI T, MASUI S, OKADA T, et al. 510-515 nm InGaN-Based Green Laser Diodes on *c*-Plane GaN Substrate[J]. *Appl. Phys. Express* 2, 2009: 062201.
- [ 7 ] SCHEIBENZUBER W G, SCHWARZ U T, VEPREK R G, et al. Calculation of optical eigenmodes and gain in semipolar and nonpolar InGaN/GaN laser diodes[J]. *Physical Review B*, 2009, 80(11): 115320.
- [ 8 ] HU W T, YANG X D, WANG C, et al. Ultracompact visible R-G-B lasers for defense applications[C]//Proceedings of SPIE 7325, Laser Technology for Defense and Security V. Orlando, Florida, United States: SPIE, 2009: 73250Q.
- [ 9 ] IRONSIDE C N, FIGUEIREDO J M L, ROMEIRA B, et al. Resonant tunneling diode-laser diode optoelectronic integrated circuit operating as a voltage controlled oscillator[C]//Proceedings of SPIE 7366, Photonic Materials, Devices, and Applications III. Dresden, Germany: SPIE, 2009: 736614.
- [10] LERMER T, SCHILLGALIES M, BREIDENASSEL A, et al. Waveguide design of green InGaN laser diodes [J]. *Physica Status Solidi A*, 2010, 207(6): 1328 – 1331.
- [11] JIANG L R, LIU J P, ZHANG L Q, et al. Suppression of substrate mode in GaN-based green laser diodes[J]. *Optics Express*, 2020, 28(10): 15497 – 15504.
- [12] SIZOV D S, BHAT R, ZAKHARIAN A, et al. Impact of carrier transport on aquamarine-green laser performance[J]. *Applied Physics Express*, 2010, 3(12): 122101.
- [13] SIZOV D S, BHAT R, ZAKHARIAN A, et al. Carrier transport in InGaN MQWs of aquamarine- and green-laser diodes[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2011, 17(5): 1390 – 1401.
- [14] AVRAMESCU A, LERMER T, MÜLLER J, et al. True green laser diodes at 524 nm With 50 mW continuous wave output power on *c*-plane GaN[J]. *Applied Physics Express*, 2010, 3(6): 061003.
- [15] TIAN A Q, LIU J P, ZHANG L Q, et al. Green laser diodes with low threshold current density via interface engineering of InGaN/GaN quantum well active region[J]. *Optics Express*, 2017, 25(1): 415 – 421.
- [16] 周闯. 绿光半导体激光器单管合束及光纤耦合技术研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019: 1 – 10.
- [17] 刘荣战, 蒋威, 宋健. 体布拉格光栅外腔半导体激光器温度特性研究 [J]. *光电子·激光*, 2022, 33(12): 1263 – 1270.

(编辑: 李晓莉)