

## 波长可调谐克尔锁模外腔面发射激光器

曾盈莹<sup>1</sup>, 沈晓红<sup>1</sup>, 毛琳<sup>1</sup>, 王涛<sup>1</sup>, 朱仁江<sup>1\*</sup>, 罗海军<sup>1</sup>, 佟存柱<sup>2</sup>, 汪丽杰<sup>2</sup>, 宋晏蓉<sup>3</sup>, 张鹏<sup>4\*\*</sup><sup>1</sup>重庆师范大学物理与电子工程学院, 重庆 401331;<sup>2</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;<sup>3</sup>北京工业大学应用数理学院, 北京 100124;<sup>4</sup>重庆师范大学重庆国家应用数学中心, 重庆 401331

**摘要** 利用半导体增益介质中的非线性克尔效应, 结合增益芯片上泵浦光斑形成的软光阑, 在外腔面发射激光器中实现了重复频率为 1.1 GHz、脉冲宽度为 4.3 ps 的连续自锁模。通过在谐振腔内插入不同厚度的双折射滤波片, 实现了可连续调谐的激光波长输出。当双折射滤波片的厚度为 2 mm 时, 获得的波长调谐范围为 30 nm, 最大输出功率为 129 mW, 激光器可在 964~979 nm 波段内维持连续锁模状态, 获得的锁模调谐波长范围为 15 nm。本文还分析了外腔面发射激光器中启动克尔锁模的机理和条件, 同时就双折射滤波片对锁模激光波长的调谐范围进行了讨论。

**关键词** 激光器; 垂直外腔面发射激光器; 克尔锁模; 双折射滤波片; 调谐

中图分类号 TN245

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL202249.2101004

## 1 引言

垂直外腔面发射激光器(VECSELs), 又称半导体薄片激光器, 结合了光泵固体薄片激光器和半导体激光器的优点, 具有效率高、体积小、寿命长、波长可设计等优点<sup>[1]</sup>。VECSELs 灵活的外腔结构允许在腔内插入其他光学元件, 例如: 插入非线性晶体实现频率转换, 使发射波长覆盖范围扩展到紫外及红外波段; 插入双折射滤波片(BRF)对波长进行调谐; 插入可饱和吸收镜使激光器实现调 Q<sup>[2]</sup>以及锁模运转。此外, VECSELs 良好的光束质量和高的输出功率<sup>[3-4]</sup>是其他半导体激光器无法同时实现的(传统的边发射激光器虽然具有较高的输出功率, 但输出光斑呈椭圆形; 传统的面发射激光器虽然具有较好的光束质量, 但输出功率仅为毫瓦量级)。VECSELs 优良的性能使其可被广泛应用于通信<sup>[5-6]</sup>、生物医学<sup>[7]</sup>、光存储、激光显示等领域。

波长可调谐激光器在激光光谱学、生命科学<sup>[8]</sup>、环境监测<sup>[9]</sup>和信息处理等领域具有重要应用。VECSELs 的增益介质具有超过 100 nm 的典型带宽, 非常适合用于波长调谐。可调谐 VECSELs 具有输出功率高、调谐范围宽以及可靠性高等优点, 可以弥补其他类型激光器的缺陷, 例如可以弥补染料可调谐激光

器可靠性差、增益介质寿命短的缺陷<sup>[10-11]</sup>, 还可以弥补固体可调谐激光器波长及调谐范围有限的不足。

VECSELs 具有较大的增益带宽, 可以实现较大的调谐范围, 特别是在 1 μm 波段, VECSELs 具有成熟的带隙工程, 取得了比较显著的成就。2006 年, Fan 等<sup>[12]</sup>以 BRF 作为 V 型腔结构的调谐元件, 获得了中心波长在 980 nm 附近的 20 nm 调谐范围; 在此基础上, 他们<sup>[13]</sup>又以两块增益芯片作为折叠镜, 构成 W 腔结构, 获得了更高的模式增益和更宽的增益带宽, 实现了 33 nm 调谐范围。2011 年, Butkus 等<sup>[14]</sup>在 1040 nm 和 1180 nm 附近分别实现了 60 nm 和 25 nm 的波长调谐范围。2015 年, Saarinen 等<sup>[15]</sup>利用三腔镜结构, 以 BRF 作为调谐元件, 在中心波长 750 nm 处获得了 44 nm 的连续调谐输出。同年, Yang 等<sup>[16]</sup>报道了一种无分布布拉格反射镜(DBR)的可调谐 VECSEL, 实现了中心波长为 1160 nm 的 78 nm 调谐范围; 次年, 该团队<sup>[17]</sup>又在波长 1034 nm 处实现了 80 nm 的宽范围调谐。2017 年, Broda 等<sup>[18]</sup>通过控制有源区温度, 在中心波长 985 nm 处获得了 95 nm 的调谐范围。2021 年, 毛琳等<sup>[19]</sup>利用 2 mm 厚 BRF 获得了 45 nm 连续宽调谐。

锁模产生的激光超短脉冲被广泛应用于激光光谱测量、微波测量<sup>[20]</sup>、高速取样<sup>[21]</sup>、医学诊断和通信系

收稿日期: 2022-03-10; 修回日期: 2022-07-05; 录用日期: 2022-07-21

基金项目: 国家自然科学基金(61904024, 61975003, 61790584, 62025506)、在渝本科高校与中科院所属院所合作项目(HZ2021007)、重庆市教委科技计划重大项目(KJZD-M201900502)

通信作者: \*hhzrj@163.com; \*\*zhangpeng2010@cqu.edu.cn

统等领域。染料锁模激光器增益介质的寿命短,锁模过程复杂。由于增益介质的限制,固体锁模激光器只能获得离散的发射波长,且在高重复频率下存在调 Q 不稳定现象。半导体激光器在实现锁模时不仅不需要复杂的腔型结构和特殊的泵浦源,而且能获得高达几十 GHz 的脉冲重复频率。VECSELs 作为一种新型的半导体激光器,可以通过半导体可饱和吸收器 (SESAM)、单层碳纳米管<sup>[22]</sup> 和石墨烯可饱和吸收体<sup>[23]</sup> 实现锁模。在锁模 VECSELs 中,SESAM 是一种常用的锁模器件,能够获得高的重复频率和峰值功率,但激光器对谐振腔的要求较高,因为 SESAM 上的激光光斑必须足够小,才能使 SESAM 达到饱和,从而启动锁模过程。这给谐振腔的搭建和调节带来了一定困难。

自锁模 VECSELs 可以克服 SESAM 锁模 VECSELs 的上述部分不足。自锁模意味着除了增益介质之外,不需要使用额外的锁模器件,仅通过腔内软光阑或硬光阑就能够实现超短脉冲输出。自锁模的出现不仅避免了额外的锁模器件,使腔体结构变得简单,还降低了可饱和吸收体的结构复杂度以及激光器输出波长的限制,同时极大地减轻了激光器的锁模操作难度,使锁模波长的覆盖范围更广<sup>[24]</sup>。自锁模是在固体激光器中首次获得的<sup>[25]</sup>。到目前为止,在 VECSELs 中实现自锁模的实例屈指可数。2011 年,Chen 等<sup>[26]</sup> 首次报道了无 SESAM 锁模的 VECSELs,他们采用的是结构简单的直腔,获得了 2.17 GHz 的重复频率以及 654 fs 的脉冲宽度;次年,Kornaszewski 等<sup>[27]</sup> 设计了折叠六镜腔结构,并在输出端附近插入硬孔径光阑,获得了重复频率为 210 MHz、脉宽为 930 fs 的脉冲锁模输出;2014 年,Gaafar 等<sup>[28]</sup> 在此基础上将两块折叠镜中的一块替换成增益芯片,微调放置在腔的一个端镜附近的光阑孔径的大小,获得了重复频率为 0.504 GHz、脉宽为 860 fs 的基波锁模。迄今为止,自 SESAM 被动锁模之后,自锁模被认为是实现高功率、高效率 and 低成本超短脉冲激光器的又一有前途的技术手段。

波长可调谐锁模 VECSELs 可被广泛应用于生物医学、光通信、光谱学等领域<sup>[23,29-30]</sup>。2012 年,Morris 等<sup>[31]</sup> 在 Z 型腔中利用 SESAM 实现了重复频率为 1.88 GHz、脉冲持续时间为 1.9 ps 的锁模输出,通过在腔内插入厚度为 25  $\mu\text{m}$  的标准具获得了在 1042 nm 中心波长附近的 13.7 nm 连续调谐。2013 年,Zaugg 等<sup>[32]</sup> 以标准具作为调谐元件,通过设计石墨烯可饱和吸收镜在 0~10% 范围内的吸收,在单增益芯片中实现了 21 nm 的锁模调谐,重复频率为 2.48 GHz,脉冲持续时间为 466 fs。

上述所获得的可调谐锁模都使用了复杂的腔结构,且均将标准具作为调谐元件,将可饱和吸收镜作为锁模器件,这无疑增加了谐振腔的复杂性,而且使用标准具

获得的调谐范围有限。本文报道的可调谐自锁模 VECSEL 连续运转。本团队通过调节谐振腔长以及泵浦输出功率,获得了稳定的锁模脉冲,并采用示波器观察了脉冲序列和脉冲宽度;在锁模的基础上,在腔内插入厚度为 2 mm 的 BRF,获得了波长的连续调谐,且在调谐过程中部分波长范围能保持稳定的锁模运行。

## 2 结果与讨论

### 2.1 实验装置

VECSELs 增益芯片的外延生长方式分为正向生长和逆向生长。正向生长的顺序为:先在基质上生长 DBR,然后依次生长有源区、窗口层和保护层。逆向生长的次序与之相反,先在基质上生长保护层,然后生长窗口层、有源区和 DBR。本文 VECSELs 的增益芯片采用逆向生长制备而成,有源区包含 12 个 InGaAs/GaAsP 多量子阱 (MQWs),阱层 InGaAs 中的镉含量满足设计发射波长 980 nm 的要求。DBR 由 30 对具有高铝含量和低铝含量的 AlGaAs 层交替组成。将生长好的外延片分成 4 mm $\times$ 4 mm 的小块芯片,在外延端的端面上用钛、铂、金对其进行金属化,然后将芯片键合到铜热沉上,再把基质用湿法腐蚀去除掉。

激光谐振腔由半导体增益芯片底部的 DBR 和一个曲率半径为 150 mm 的输出耦合镜 (980 nm 反射率为 99.9%) 构成,如图 1 所示。将 808 nm 波长、200  $\mu\text{m}$  芯径的光纤耦合输出半导体激光器作为泵浦源,泵浦激光以 30° 的入射角通过 1:1 成像透镜耦合到半导体增益芯片上。增益芯片后端采用半导体制冷系统和水冷对其进行散热,以确保激光器具有良好的输出功率。

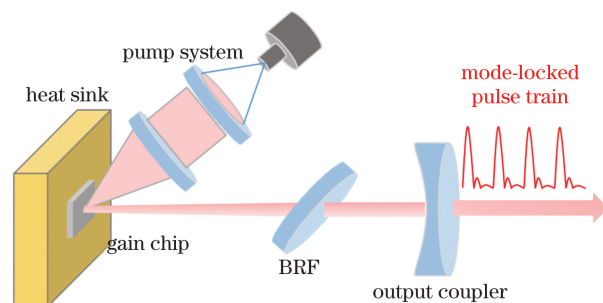


图 1 实验装置简图

Fig. 1 Schematic of experimental setup

VECSELs 的优点之一是其增益介质具有较大的带宽值,因而激光器可以在一个较宽的波长范围内实现调谐。常见的调谐元件有 BRF、F-P 标准具、光栅等。比较以上三种调谐元件可知 BRF 具有极低的损耗、较宽的调谐范围以及较强的模式分辨能力,因此,本次实验采用 BRF 作为调谐元件,在锁模的基础上对激光波长进行调谐。

### 2.2 锁模运转

在实现锁模运转之前,VECSELs 处于连续波运转状态。实验中,与增益芯片相连的热沉保持在

15 °C, 以确保稳定的激光输出。此时, 观察到的输出激光是连续运转的。对 VECSEL 光束质量进行测量, 测量结果显示, X 方向的质量因子  $M_x^2$  是 1.05, Y 方向的质量因子  $M_y^2$  是 1.04。这表明 VECSEL 的输出光束是接近衍射极限的高斯光束, 如图 2 所示。

谐振腔长度设定为 135 mm, 当泵浦功率为 5.5 W 时, 通过细微调节谐振腔长获得良好的模式匹配, 就可以形成稳定的锁模脉冲输出。图 3(a) 是用

10 GHz 带宽示波器测量所得的锁模脉冲序列, 图中的脉冲序列表现出良好的均匀性, 在较长的观测时间内强度基本相同。因此可以认为激光此时处于连续的自锁模状态。用带宽为 7.5 GHz 的频谱仪测量锁模脉冲的重复频率, 测量结果如图 3(b) 所示。图 3(b) 给出的是 0~5 GHz 范围内的测量值, 显然, 锁模脉冲的重复频率为 1.1 GHz (该重复频率严格地与激光谐振腔的长度 135 mm 对应), 其余的是高次谐波。

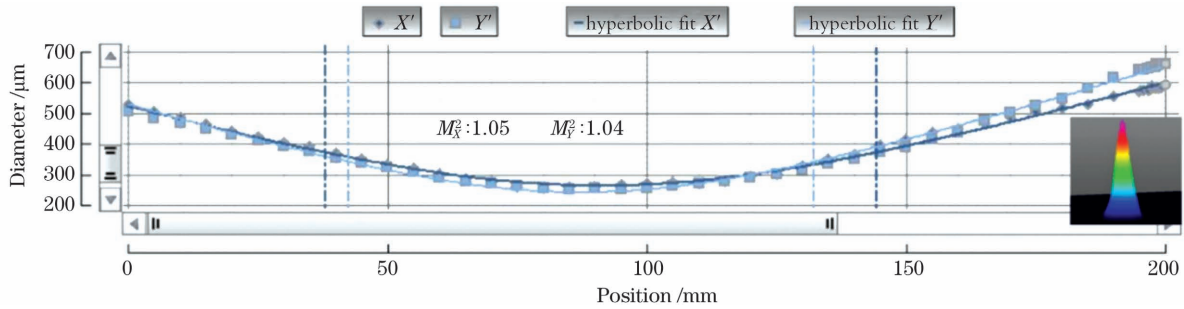


图 2 泵浦功率为 3 W 时的光束质量因子, 右下方插图为光强的三维分布图

Fig. 2 Beam quality factor with 3 W pump power, where the insert at right-lower corner is three-dimensional profile of beam intensity

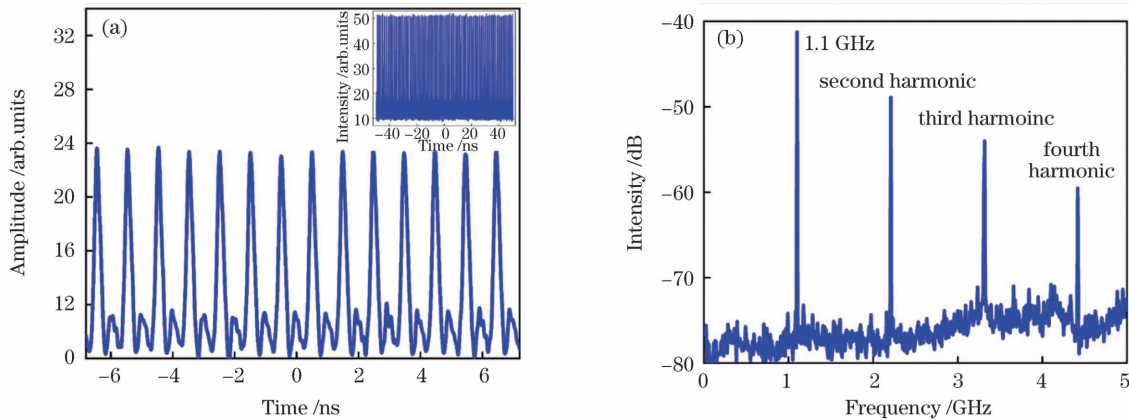


图 3 连续锁模激光的脉冲波形和射频频谱。(a) 脉冲波形; (b) 射频频谱

Fig. 3 Pulse train and radio frequency (RF) spectrum of continuous-wave mode-locked laser. (a) Pulse train; (b) RF spectrum

图 4 是锁模信号的自相关测量结果。从图中的高斯拟合结果可知, 锁模脉冲的时间宽度 (半峰全宽, FWHM) 为 4.3 ps。图 5 所示的是连续锁模状态下的激光光谱, 中心波长为 979 nm, 光谱线宽为 1.25 nm。由此可得出锁模脉冲的时间带宽积为 1.68, 该值是傅里叶变换极限高斯脉冲时间带宽积的近 4 倍。这说明锁模脉冲中存在比较大的啁啾, 这种啁啾应该是由激光增益芯片有源区材料的非线性折射率引起的, 因为非线性折射率会使脉冲在演化过程中产生新的频率成分, 进而产生较大的啁啾。理论上讲, 通过色散补偿机制可以实现脉冲压缩以及脉冲峰值功率的增大, 但由于皮秒脉冲的色散效应并不大, 一般都不会对其进行补偿, 所以本次实验也没有进行补偿。

自锁模激光器通过激光增益介质本身的非线性克尔效应实现锁模。克尔效应的起源是折射率的非线性, 其表达式为

$$n = n_0 + n_2 I, \quad (1)$$

式中:  $n_0$  为线性折射率;  $I$  为激光脉冲的强度;  $n_2$  为非

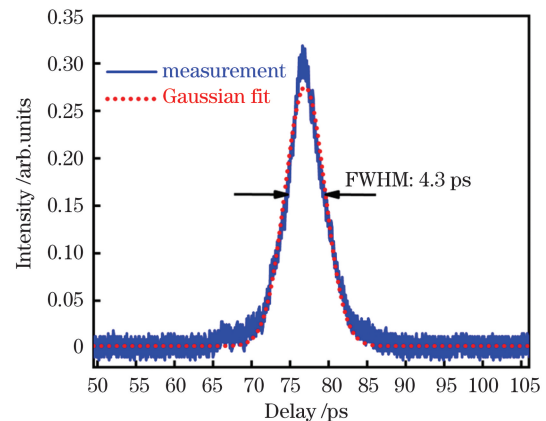


图 4 连续自锁模时输出脉冲的自相关轨迹

Fig. 4 Autocorrelation trace of continuous-wave self-locking-mode laser pulses

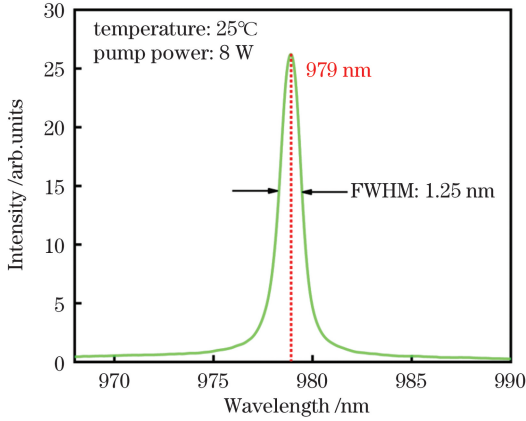


图 5 自锁模波长光谱图

Fig. 5 Self-locking-mode wavelength spectrum diagram

线性折射率系数。由式(1)可知,激光脉冲中心与边缘部分的光强不同,因而在介质中的折射率不同,且折射率的分布与光强分布一致,呈高斯分布。当  $n_2$  为正时,端镜处的光束半径逐渐变小,此时的非线性介质相当于一个透镜,透镜对入射激光聚焦,产生自聚焦效应。Albrecht 等<sup>[33]</sup>通过计算不同焦距下端镜和芯片的光束半径,得出了非线性折射率为正值时,软孔径能够实现锁模的结论。Quarterman 等<sup>[34]</sup>的研究结果显示,当泵浦光强度为 0 时,GaAs 系材料的非线性折射率为负值。但随着泵浦光强度的增加,非线性折射率由负变为正,非线性折射率的数值大小随着泵浦光强的增大呈近似线性增大。在本实验中,较小的泵浦功率下不能获得锁模,只有当泵浦达到一定强度时,即非线性折射率变为正值时,才能获得稳定的锁模输出。这与文献的报道是一致的。

由激光增益介质的非线性折射率导致的光束自聚焦使得光强大的部分脉冲的自聚焦效果强,形成光斑较小的光束,而光强小的部分脉冲的自聚焦效果弱,形成光斑较大的光束。当腔内存在足够强度的噪声脉冲时,该脉冲较高的峰值功率可使增益介质产生克尔效应,形成等效的克尔透镜,对光束实现聚焦。如果此时腔内存在大小合适的光阑,使聚焦光束能通过,而非聚焦光束不能通过,即脉冲光的损耗小于连续光的损耗,上述脉冲即可被选出形成振荡。在腔内循环的脉冲,强度大的部分脉冲(脉冲中心)的损耗小,而强度小的部分脉冲(脉冲边缘)的损耗大(因为光斑较大)。脉冲在腔内多次来回往返,强度小的部分不断被损耗,而强度大的部分得到增益,不断被放大,使得脉冲不断被压窄,由此便产生了短脉冲。

### 2.3 波长调谐

BRF 作为常用的波长可调谐元件,具有插入损耗小、调谐范围宽、色散大以及工作可靠性高等优点。在实验中,BRF 以布儒斯特角放置,其光轴与晶体表面平行,则透过 BRF 的波长为

$$\lambda = \frac{(n_o - n_e)d}{m \sin \theta_B} [1 - \cos^2(\varphi) \cos^2(\theta_B)], \quad (2)$$

式中: $d$  为滤波片的厚度; $m$  为干涉级次; $(n_o - n_e)$  为折射率差, $n_o$  为寻常光折射率, $n_e$  为非常光折射率; $\theta_B$  为布儒斯特角; $\varphi$  为晶体光轴与入射面的夹角,即调谐角。以表面法线为轴旋转 BRF,通过改变入射光束与 BRF 光轴之间的夹角  $\varphi$ ,即可实现对激光波长的调谐。

在原有锁模的基础上,将泵浦功率设置为 8 W,将 2 mm 厚的滤波片以布儒斯特角插入腔内,通过旋转滤波片获得了 30 nm 的波长连续调谐,结果如图 6 所示。在整个调谐过程中,当激光波长处于 950 ~ 963 nm 之间时,输出功率均低于 60 mW,腔内高斯光束的非线性效应较弱,无法形成克尔自聚焦,不能达到锁模的阈值条件,激光器处于连续波运转;当激光波长处于 964 ~ 979 nm 波段时,输出功率有所提升,此时腔内功率密度足够高,也足以引起增益介质中的非线性效应,实现克尔透镜自聚焦,所以在此调谐波段内均能维持稳定的连续锁模现象。在整个波长调谐范围内,波长 971 nm 处获得最大锁模平均输出功率 129 mW(对应的脉冲峰值功率为 27 W),波长 950 nm 处获得最小输出功率 10 mW(无锁模)。

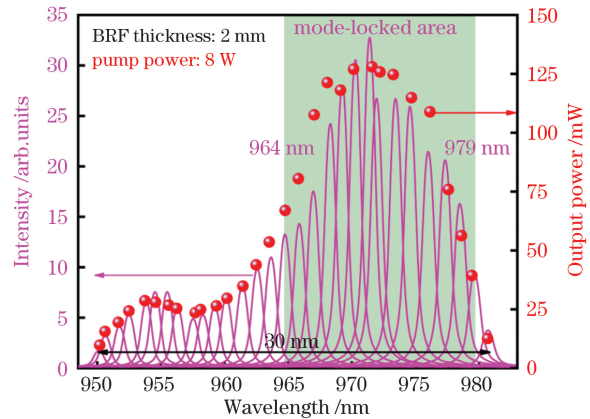


图 6 用 2 mm 厚 BRF 获得的自锁模激光波长调谐图

Fig. 6 Wavelength tuning of self-mode-locked laser with 2 mm thick BRF

调谐实验中的功率偏低,部分原因是输出腔耦合镜反射率为 99.9%,即只有 0.1% 的激光输出,余下的激光在腔内循环。这不仅会限制激光的输出功率,还会增加芯片的热效应,进一步降低激光器的输出功率。限于实验条件,输出镜的透过率并没有经过优化,后续会考虑改进。

为了比较不同厚度的 BRF 对激光波长的调谐能力,本团队对厚度为 4 mm 的 BRF 进行了实验。4 mm 厚 BRF 的调谐特性如图 7 所示。在图 7 中,激光波长可以从 946 nm 连续变化到 968 nm,对应的调谐范围为 22 nm。在 956 ~ 968 nm 之间激光器能够维持连续锁模。从图 7 中对应波长的输出功率可知,在波长为 963 nm 时,激光器的输出功率最大,为 166 mW。

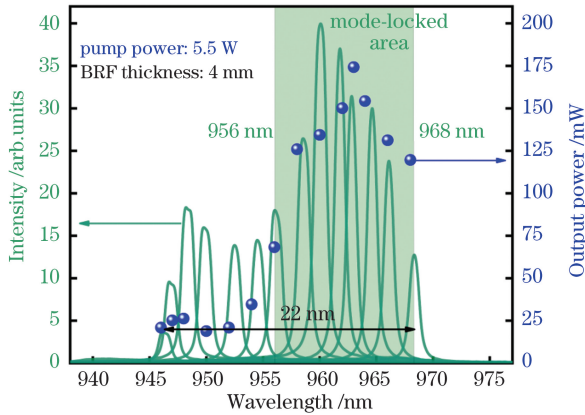


图 7 用 4 mm 厚 BRF 获得的自锁模激光波长调谐图

Fig. 7 Wavelength tuning of self-mode-locked laser with 4 mm thick BRF

作为波长调谐元件, BRF 的波长调谐范围受其自由光谱范围的限制。BRF 自由光谱范围的表达式为

$$\Delta\lambda_F = \frac{\lambda^2}{\Delta n d}, \quad (3)$$

式中:  $\lambda$  为激光波长;  $\Delta n$  为 BRF 的折射率差,  $\Delta n = (n_o - n_e)$ ;  $d$  为 BRF 的厚度。显然, BRF 的厚度越大, 对应的波长调谐范围越小。

结合图 6、图 7 可以看出, BRF 的厚度越大, 对应 VECSEL 的波长调谐能力越小, 即激光器的波长调谐范围越小。这与理论计算结果是一致的。

需要指出的是, 当 BRF 的厚度不同时, 谐振腔的长度会发生改变, 此时如果要维持锁模, 锁模脉冲的重复频率将会发生对应变化, 因为脉冲重复频率取决于腔长。因为锁模脉冲的重复频率的变化并不大, 所以实验中没有给出不同 BRF 厚度对应的不同锁模脉冲的重复频率。

### 3 结 论

本文报道了利用简单的直线腔型实现的波长可调谐的克尔锁模外腔面发射激光器, 获得的锁模脉冲重复频率为 1.1 GHz, 脉冲宽度为 4.3 ps。当腔内插入厚度为 2 mm 的 BRF 时, 获得的波长调谐范围为 30 nm, 最大输出功率为 129 mW, 激光器可在 964~979 nm 的 15 nm 波段内维持稳定的连续锁模状态。当 BRF 的厚度为 4 mm 时, 获得的波长调谐范围为 22 nm, 最大输出功率为 166 mW, 激光器可在 956~968 nm 的 12 nm 波段内维持稳定的连续锁模状态。本文还基于非线性克尔效应分析了外腔面发射激光器中启动自锁模的机理, 以及维持稳定锁模运行的条件。这种波长可调谐的克尔锁模 VECSELs 具有结构简单紧凑、锁模运行稳定、波长调谐范围较大的优点, 在激光光谱学、激光共聚焦显微、相干光通信等领域具有潜在的应用价值。

### 参 考 文 献

[1] 辛国锋, 瞿荣辉, 方祖捷, 等. 大功率半导体激光器的最新进展

[J]. 激光与光电子学进展, 2006, 43(2): 3-8.

Xin G F, Qu R H, Fang Z J, et al. New development of high power semiconductor laser [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2006, 43(2): 3-8.

[2] 张晓健, 潘丽, 曾颖, 等. 调 Q 运转外腔面发射激光器 [J]. 中国激光, 2021, 48(7): 0701003.

Zhang X J, Pan L, Zeng Y, et al. Q-switched external-cavity surface-emitting lasers [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(7): 0701003.

[3] Guina M, Rantamäki A, Härkönen A. Optically pumped VECSELs: review of technology and progress [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2017, 50(38): 383001.

[4] Tilma B W, Mangold M, Zaugg C A, et al. Recent advances in ultrafast semiconductor disk lasers [J]. Light: Science & Applications, 2015, 4(7): e310.

[5] Soldatov A N, Reimer I V, Evtushenko V A, et al. Tunable wavelength laser medical system for treating oncological diseases [J]. Bulletin of the Lebedev Physics Institute, 2010, 37(1): 4-5.

[6] 宁永强, 陈泳屹, 张俊, 等. 大功率半导体激光器发展及相关技术概述 [J]. 光学学报, 2021, 41(1): 0114001.

Ning Y Q, Chen Y Y, Zhang J, et al. Brief review of development and techniques for high power semiconductor lasers [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(1): 0114001.

[7] Wichmann M, Shakfa M K, Zhang F, et al. Evolution of multi-mode operation in vertical-external-cavity surface-emitting lasers [J]. Optics Express, 2013, 21(26): 31940-31950.

[8] Lu B, Wei F, Zhang Z, et al. Research on tunable local laser used in ground-to-satellite coherent laser communication [J]. Chinese Optics Letters, 2015, 13(9): 091402.

[9] Rothe K W, Brinkmann U, Walther H. Applications of tunable dye lasers to air pollution detection: measurements of atmospheric NO<sub>2</sub> concentrations by differential absorption [J]. Applied Physics, 1974, 3(2): 115-119.

[10] Bhatia P S, Keto J W. Precisely tunable, narrow-band pulsed dye laser [J]. Applied Optics, 1996, 35(21): 4152-4158.

[11] Kuehne A J C, Gather M C. Organic lasers: recent developments on materials, device geometries, and fabrication techniques [J]. Chemical Reviews, 2016, 116(21): 12823-12864.

[12] Fan L, Fallahi M, Murray J T, et al. Tunable high-power high-brightness linearly polarized vertical-external-cavity surface-emitting lasers [J]. Applied Physics Letters, 2006, 88(2): 021105.

[13] Fan L, Fallahi M, Zakharian A R, et al. Extended tunability in a two-chip VECSEL [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2007, 19(8): 544-546.

[14] Butkus M, Rautiainen J, Okhotnikov O G, et al. Quantum dot based semiconductor disk lasers for 1-1.3 μm [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2011, 17(6): 1763-1771.

[15] Saarinen E J, Lyytikäinen J, Ranta S N, et al. 750 nm 1.5 W frequency-doubled semiconductor disk laser with a 44 nm tuning range [J]. Optics Letters, 2015, 40(19): 4380-4383.

[16] Yang Z, Albrecht A R, Cederberg J G, et al. Optically pumped DBR-free semiconductor disk lasers [J]. Optics Express, 2015, 23(26): 33164-33169.

[17] Yang Z, Albrecht A R, Cederberg J G, et al. 80 nm tunable DBR-free semiconductor disk laser [J]. Applied Physics Letters, 2016, 109(2): 022101.

[18] Broda A, Wójcik-Jedlińska A, Sankowska I, et al. A 95-nm-wide tunable two-mode vertical external cavity surface-emitting laser [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(24): 2215-2218.

[19] 毛琳, 张晓健, 李春玲, 等. 45 nm 宽带可连续调谐半导体薄片激光器 [J]. 物理学报, 2021, 70(22): 224206.

Mao L, Zhang X J, Li C L, et al. 45 nm broadband continuously tunable semiconductor disk laser [J]. Acta Physica Sinica, 2021, 70(22): 224206.

- [20] Nagatsuma T, Shinagawa M, Sabri N, et al. 1.55  $\mu\text{m}$  photonic systems for microwave and millimeter-wave measurement [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2001, 49(10): 1831-1839.
- [21] Kolner B, Bloom D. Electrooptic sampling in GaAs integrated circuits [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1986, 22(1): 79-93.
- [22] Seger K, Meiser N, Choi S Y, et al. Carbon nanotube mode-locked optically-pumped semiconductor disk laser [J]. Optics Express, 2013, 21(15): 17806-17813.
- [23] Okhotnikov O, Grudinin A, Pessa M. Ultra-fast fibre laser systems based on SESAM technology: new horizons and applications [J]. New Journal of Physics, 2004, 6: 177.
- [24] Rahimi-Iman A, Gaafar M, Möller C, et al. Self-mode-locked vertical-external-cavity surface-emitting laser [J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9734: 97340M.
- [25] Spence D E, Kean P N, Sibbett W. 60-fsec pulse generation from a self-mode-locked Ti:sapphire laser [J]. Optics Letters, 1991, 16(1): 42-44.
- [26] Chen Y F, Lee Y C, Liang H C, et al. Femtosecond high-power spontaneous mode-locked operation in vertical-external cavity surface-emitting laser with gigahertz oscillation [J]. Optics Letters, 2011, 36(23): 4581-4583.
- [27] Kornaszewski L, Maker G, Malcolm G P A, et al. SESAM-free mode-locked semiconductor disk laser [J]. Laser & Photonics Reviews, 2012, 6(6): L20-L23.
- [28] Gaafar M, Möller C, Wichmann M, et al. Harmonic self-mode-locking of optically pumped semiconductor disc laser [J]. Electronics Letters, 2014, 50(7): 542-543.
- [29] Letokhov V S. Laser biology and medicine [J]. Nature, 1985, 316(6026): 325-330.
- [30] Keller U. Recent developments in compact ultrafast lasers [J]. Nature, 2003, 424(6950): 831-838.
- [31] Morris O J, Wilcox K G, Head C R, et al. A wavelength tunable 2-ps pulse VECSEL [J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8242: 824212.
- [32] Zaugg C A, Sun Z, Wittwer V J, et al. Ultrafast and widely tuneable vertical-external-cavity surface-emitting laser, mode-locked by a graphene-integrated distributed Bragg reflector [J]. Optics Express, 2013, 21(25): 31548-31559.
- [33] Albrecht A R, Wang Y, Ghasemkhani M, et al. Exploring ultrafast negative Kerr effect for self-mode-locking vertical external-cavity surface-emitting lasers [J]. Optics Express, 2013, 21(23): 28801-28808.
- [34] Quarterman A H, Tyrk M A, Wilcox K G. Z-scan measurements of the nonlinear refractive index of a pumped semiconductor disk laser gain medium [J]. Applied Physics Letters, 2015, 106(1): 011105.

## Wavelength-Tunable Kerr Mode-Locked External-Cavity Surface-Emitting Laser

Zeng Yingying<sup>1</sup>, Shen Xiaohong<sup>1</sup>, Mao Lin<sup>1</sup>, Wang Tao<sup>1</sup>, Zhu Renjiang<sup>1\*</sup>, Luo Haijun<sup>1</sup>, Tong Cunzhu<sup>2</sup>, Wang Lijie<sup>2</sup>, Song Yanrong<sup>3</sup>, Zhang Peng<sup>4\*\*</sup>

<sup>1</sup> College of Physics and Electronic Engineering, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China;

<sup>2</sup> Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, Jilin, China;

<sup>3</sup> College of Applied Sciences, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

<sup>4</sup> National Center for Applied Mathematics, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China

### Abstract

**Objective** Wavelength-tunable lasers have important applications, particularly in laser spectroscopy, life sciences, environmental monitoring, and information processing. Ultrashort laser pulses produced by mode-locking can be widely used in nonlinear frequency conversion, medical diagnosis, high-speed electro-optic sampling, and laser micro/nano fabrication. Wavelength-tunable mode-locked lasers combine the advantages of these two types of lasers and enable the development of multiple applications such as fluorescence excitation, laser spectroscopy, optical frequency combs, and super-resolution microscopic imaging. External-cavity surface-emitting lasers possess the advantages of both solid-state disk lasers and surface-emitting semiconductor lasers and can simultaneously produce high power with good beam quality. In this study, a wavelength-tunable Kerr mode-locked external-cavity surface-emitting laser is proposed. Wavelength-tuning and mode-locking are realized simultaneously in a linear cavity, and the output performance of the proposed approach is experimentally studied. In addition, relevant physical mechanisms involving wavelength tuning and Kerr mode locking are analyzed to understand the experimental results.

**Methods** Using the nonlinear Kerr effect in a semiconductor gain medium and a soft aperture formed by the overlap between the pump and laser spots on the gain chip, an equivalent saturable absorber can be built into an optically pumped external-cavity surface-emitting laser. The Kerr effect forms an equivalent lens to focus the laser beam, and the soft aperture limits the transverse dimension of the laser. Their combined action, namely saturable absorption, involves selecting a pulse with sufficient strength from the intracavity noises, amplifying and shaping the selected pulse in the round-trip process, and finally maintaining a stable oscillation in the cavity and a steady output pulse train, thereby realizing continuous-wave mode-locking. Wavelength tuning of the laser was achieved by inserting a birefringent filter into

the resonator. The birefringent filter was placed at the Brewster angle, and its optical axis was parallel to the surface of the filter. When the birefringent filter was rotated around the normal to the surface, the transmission wavelength allowed by the filter differed according to the tuning angle, thereby effectively realizing the tuning of the laser wavelength. A plane-concave reflector (radius of curvature: 150 mm) was used as the output coupler, and a 30 W fiber-coupled output semiconductor laser was employed as the pump source.

**Results and Discussions** In the experiment, the length of the resonator is selected as approximately 135 mm for the purpose of mode-matching between the spots of the pump and laser. After the laser output stabilizes, continually increasing the pump power and carefully tuning the resonator can produce continuous-wave mode-locking. When the pump power is 5.5 W, steady Kerr mode-locking with a repetition rate of 1.1 GHz, pulse width of 4.3 ps (Fig. 4) and spectral width of 1.25 nm is achieved (Fig. 5). The time-bandwidth-product of the mode-locked pulse is 1.68, which is approximately 4 times that of the Fourier-transform limit pulse, indicating that the pulses contain an obvious chirp. We believe that this chirp is caused by the nonlinear refractive index in the semiconductor gain medium, because of which new frequency components are generated during the evolution of the pulse, which results in a large chirp. By inserting a 2 mm thick birefringent filter into the cavity, wavelength tuning from 950 to 979 nm can be achieved, and stable mode-locking can be maintained for a 15 nm wavelength range from 964 to 979 nm (Fig. 6). By changing the thickness of the inserted filter from 2 to 4 mm, the wavelength tuning range can be reduced to 22 nm, and the range for maintaining mode-locking is reduced to 12 nm (Fig. 7). The tuning range reduction of the birefringent filter with increased thickness is determined by its free spectral range.

**Conclusions** In summary, we have demonstrated a wavelength-tunable Kerr mode-locked external-cavity surface-emitting laser using a simple linear cavity. The mode-locked pulse repetition rate is 1.1 GHz, and the pulse width is 4.3 ps. When a 2 mm thick birefringent filter is inserted into the cavity, a wavelength tuning range of 30 nm is achieved, the maximum average output power is 129 mW, and stable continuous-wave mode-locking can be maintained in the 15 nm wavelength range of 964–979 nm. When the thickness of the birefringent filter is increased to 4 mm, the wavelength-tuning range is reduced to 22 nm, the maximum output power is 166 mW, and the stable continuous-wave mode-locking range is 12 nm. Wavelength-tunable Kerr mode-locked VECSELS possess a compact structure and enable stable mode-locking with large wavelength tuning range. They have potential applications in laser spectroscopy, laser confocal microscopy, coherent optical communication, and multiple other fields.

**Key words** lasers; vertical-external-cavity surface-emitting laser; Kerr mode-locking; birefringent filter; tuning