

## 45 nm宽带可连续调谐半导体薄片激光器

毛琳 张晓健 李春玲 朱仁江 汪丽杰 宋晏蓉 王涛 张鹏

## 45nm broadband continuously tunable semiconductor disk laser

Mao Lin Zhang Xiao-Jian Li Chun-Ling Zhu Ren-Jiang Wang Li-Jie Song Yan-Rong Wang Tao Zhang Peng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 224206 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20210888

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210888>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

相位调制信号对窄线宽光纤放大器线宽特性和受激布里渊散射阈值的影响

Effect of phase modulation on linewidth and stimulated Brillouin scattering threshold of narrow-linewidth fiber amplifiers

物理学报. 2017, 66(23): 234203 <https://doi.org/10.7498/aps.66.234203>

线宽增强因子对光反馈半导体激光器混沌信号生成随机数性能的影响

Influence of the linewidth enhancement factor on the characteristics of the random number extracted from the optical feedback semiconductor laser

物理学报. 2017, 66(12): 124203 <https://doi.org/10.7498/aps.66.124203>

可调谐掺铒光纤激光器线宽压缩及其超光谱吸收应用

Linewidth compression of tunable Tm-doped fiber laser and its hyperspectral absorption application

物理学报. 2020, 69(3): 034205 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191515>

低阈值单横模852 nm半导体激光器

A low threshold single transverse mode 852 nm semiconductor laser diode

物理学报. 2017, 66(8): 084205 <https://doi.org/10.7498/aps.66.084205>

基于偏振依赖多模-单模-多模光纤滤波器的波长间隔可调谐双波长掺铒光纤激光器

Continuously spacing-tunable dual-wavelength erbium-doped fiber laser based on polarization-dependent in-line multimode-single-mode-multimode fiber filter

物理学报. 2019, 68(15): 154202 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190297>

半导体激光器混沌输出的延时特征和带宽

Time delay signature and bandwidth of chaotic laser output from semiconductor laser

物理学报. 2020, 69(9): 090501 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191881>

## 45 nm 宽带可连续调谐半导体薄片激光器\*

毛琳<sup>1)</sup> 张晓健<sup>1)</sup> 李春玲<sup>1)</sup> 朱仁江<sup>1)</sup> 汪丽杰<sup>2)</sup>  
宋晏蓉<sup>3)</sup> 王涛<sup>1)†</sup> 张鹏<sup>1)‡</sup>

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发光学及应用国家重点实验室, 长春 130033)

3) (北京工业大学应用数理学院, 北京 100124)

(2021 年 5 月 12 日收到; 2021 年 6 月 13 日收到修改稿)

本文报道了一种宽带可连续调谐的半导体薄片激光器. 增益芯片的有源区由满足谐振周期增益结构的 InGaAs 多量子阱构成, 其荧光峰值波长位于 965 nm 附近. 利用增益芯片量子阱的宽带特性, 结合由高反射率外腔镜所构成的直线谐振腔, 可保障激光器较低的损耗和较宽的调谐范围. 在腔内插入不同厚度的双折射滤波片, 可获得连续可调谐的激光波长输出. 当双折射滤波片厚度为 2 mm 时, 激光器的波长调谐范围为 45 nm, 最大输出功率为 122 mW,  $X$  和  $Y$  方向的光束质量  $M^2$  因子分别为 1.00 和 1.02. 文章还对增益芯片面发射谱的温度特性和双折射滤波片对激光线宽的压窄作用进行了讨论.

**关键词:** 半导体薄片激光器, 连续调谐, 双折射滤波片, 窄线宽**PACS:** 42.55.-f, 42.55.Px, 42.62.-b**DOI:** 10.7498/aps.70.20210888

## 1 引言

输出波长可连续调谐的激光器在自由空间光通信<sup>[1]</sup>、光学传感<sup>[2]</sup>、激光雷达、激光光谱学、环境监测<sup>[3]</sup>、生命科学<sup>[4]</sup>等领域都有重要的应用. 可调谐激光器的种类也从最初的染料可调谐激光器发展到后来的固体可调谐激光器, 以及半导体可调谐激光器. 这些激光器在谐振腔的结构、激光增益介质、波长可调谐范围等诸多方面都得到了丰富的拓展.

对于发展最早的染料激光器来讲, 虽然其波长可调谐范围宽, 激光脉冲能量高, 但由于增益介质是有机溶剂, 易产生光化学分解和热分解, 使得激

光运行频率不稳定, 增益介质寿命也较短<sup>[5]</sup>. 此外, 可挥发性的溶剂还会对操作人员和环境造成危害. 因此, 维护困难及可靠性差是染料可调谐激光器的致命缺点<sup>[6]</sup>. 相比之下, 固体可调谐激光器结构紧凑、体积小、输出功率高、光束质量好<sup>[7-9]</sup>. 但固体激光器有如下问题: 其发射波长受增益介质中掺杂离子的限制, 并且其波长可调谐非常有限 (钛宝石激光器除外); 有源区的掺杂离子对泵浦光的吸收带宽很窄, 因此, 固体激光器的输出功率的稳定性依赖于泵浦波长, 泵浦波长的变化会导致激光输出功率的相应变化.

随着半导体材料的发展, 半导体可调谐激光器也获得了长足的进步, 并在激光冷却、光通信及激

\* 国家自然科学基金 (批准号: 61904024)、重庆市教委科学技术研究重大项目 (批准号: KJZD-M201900502)、重庆市基础研究与前沿探索项目 (批准号: cstc2018jcyjAX0319)、教育部 "蓝火计划"(惠州) 产学研联合创新基金 (批准号: CXZJHZ201728)、发光学与应用国家重点实验室开放项目 (批准号: SKLA-2019-04)、重庆市教委科学技术研究项目 (批准号: KJQN201800528) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: wangt@cqu.edu.cn

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

光医疗等众多领域得到了广泛应用<sup>[10]</sup>. 可调谐半导体激光器结合了固体可调谐激光器和染料可调谐激光器的优点, 不仅能运行在从紫外到红外的宽广波段, 而且输出功率高、调谐范围宽、寿命长、转换效率高、可靠性好<sup>[11]</sup>. 美中不足的是, 半导体激光器光束质量很差, 激光输出模式为多横模, 输出光斑为严重畸变的椭圆形.

近年发展起来的半导体薄片激光器 (semiconductor disk lasers, SDLs), 又称外腔面发射激光器 (vertical-external-cavity surface-emitting lasers, VECSELs), 弥补了边发射半导体激光器光束质量差的缺陷, 以及传统面发射半导体激光器功率低的不足, 能同时获得高的输出功率和良好的光束质量<sup>[12–15]</sup>. 半导体薄片激光器采用了和固体薄片激光器一致的几何结构, 不同的是固体薄片激光器的增益介质是掺杂了激活离子的晶体薄片, 而半导体薄片激光器的增益介质是包含了多量子阱结构的半导体外延芯片. 利用成熟的半导体带隙工程, 半导体薄片激光器可以根据实际所需设计其发射波长. 同时, 还可以利用非线性频率转换技术, 进一步把半导体薄片激光器的发射波长扩展到紫外及中红外波段.

半导体量子阱材料增益带宽的典型值超过 100 nm, 再加上灵活的外腔结构, 使得半导体薄片激光器非常适合于可调谐运转<sup>[16]</sup>. 在外延片生长工艺相对成熟的 1  $\mu\text{m}$  波段, 利用 V 型谐振腔结构, 以双折射滤波片 (birefringent filter, BRF) 作为调谐元件, Li Fan 等获得了在中心波长 980 nm 附近的 20 nm 波长调谐范围的半导体薄片激光器<sup>[17]</sup>; 次年又通过双增益芯片的叠加效果, 进一步把上述的波长调谐范围扩展到 33 nm<sup>[18]</sup>; 通过对增益芯片外延结构参数进行优化, Borgentun 等<sup>[19]</sup> 获得了波长从 967 nm 到 1010 nm 的连续调谐输出, 对应的波长调谐范围为 43 nm; 将量子点引入到半导体增益芯片的有源区中, 通过限制载流子为激光提供了额外的宽增益带宽, Butkus 等<sup>[20]</sup> 实现了 1040 nm 波长附近 60 nm 的调谐范围. Yang 等<sup>[21]</sup> 报道了中心波长为 1034 nm、波长调谐范围为 80 nm、芯片中不包含分布布拉格反射镜 (distributed Bragg reflector, DBR) 的可调谐半导体薄片激光器, 而如此宽的调谐范围是以牺牲半导体增益芯片的 DBR 结构为前提的, 该激光器和通常意义上的 SDL 相比, 需要多增加一面激光反射镜作为谐振腔的端

镜, 从而部分失去了 SDL 结构简单紧凑的优点. 到目前为止, 关于可调谐半导体薄片激光器波长调谐范围最宽的报道为 95 nm<sup>[22]</sup>, 该工作采用了所谓的双模微腔结构, 即增益芯片需要特殊设计使其能在在半导体微腔中同时存在两个模式. 而且, 前述 95 nm 的调谐范围是激光器在不同的环境温度下工作时, 几个不同调谐范围的累加, 也就是激光器的调谐不是同一工作条件下的连续调谐.

在以上报道的 1  $\mu\text{m}$  波段可调谐半导体薄片激光器中, 波长调谐范围大于 20 nm 的都使用了特殊的技术手段, 如在有源区使用量子点结构、特殊设计各外延层以满足双模条件、去掉增益芯片的 DBR、分段改变增益芯片的工作温度等, 这些措施增加了增益芯片外延结构的复杂性, 从而增大了外延生长的难度, 使激光器的结构变得复杂, 增加激光器的调节难度, 也一定程度地降低了激光器的紧凑性、稳定性和可靠性.

本文报道了一种宽带可连续调谐的半导体薄片激光器, 它是基于一个普通设计的谐振周期增益结构的芯片, 和一个高反射镜构成的最简单的直线谐振腔, 通过腔内插入双折射滤波片实现对激光波长的连续调谐. 在维持了半导体薄片激光器简单紧凑结构的同时, 获得了 45 nm 的波长调谐范围.

## 2 芯片外延结构

实验中所使用的增益芯片的外延结构如图 1(b) 所示. 首先在 GaAs 衬底上沉积高 Al 成分的 AlGaAs 刻蚀停止层, 然后生长 GaAs 保护层, 再生长具有高势垒的 AlGaAs 窗口层以防止载流子扩散到表面产生非辐射复合. 接下来是由 12 个 InGaAs/GaAsP 多量子阱 (multiple quantum wells, MQWs) 构成的有源区<sup>[23]</sup>. InGaAs 中 In 的含量满足设计的发射波长 965 nm. GaAsP 层在有源区起着应变补偿层、势垒层和泵浦吸收层三种作用, 因此, GaAsP 中 P 的含量必须足以高, 以补偿量子阱的应变; 但同时又不能过高, 以至于不能有效地吸收泵浦能量<sup>[24]</sup>.

有源区的上面是分布布拉格反射镜 DBR, 由 30 对具有高 Al (低折射率) 和低 Al (高折射率) 的 AlGaAs 层交替组成. DBR 的中心波长和高反射带宽分别为 965 nm 和 100 nm. 整个外延生长的结束层是用于抗氧化的 GaAs 层. 在半导体薄片激

光器中,增益芯片底部具有高反射率的 DBR 和前端具有菲涅尔反射的半导体-空气界面构成一个半导体微腔,使得激光在有源区形成驻波场.为了获得较高的增益系数,需要精确地设计和生长外延片中每一层材料的厚度,特别是多量子阱的厚度,以保证所有量子阱都位于激光驻波场的波峰处,从而形成所谓的谐振周期增益结构 [25,26].

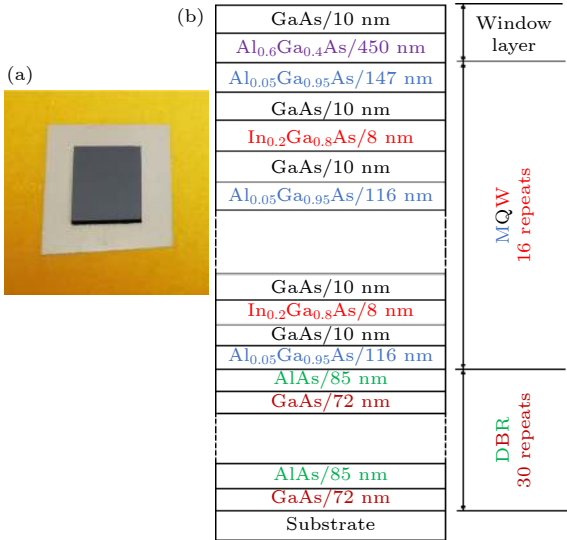


图 1 (a) 增益芯片实物及 (b) 外延片结构示意图

Fig. 1. (a) Photograph and (b) epitaxial structure of the gain chip.

完成生长后的外延片被划分成  $4\text{ mm} \times 4\text{ mm}$  尺寸的小块增益芯片,然后在增益芯片的外延结束端面上依次镀钛、铂、金,并将芯片与铜热沉进行键合,最后用化学腐蚀方法去除 GaAs 衬底,完成增益芯片的封装.

### 3 面发射谱及其温度特性

增益芯片的荧光光谱 (photoluminescence, PL) 直接或间接反映了芯片外延生长的质量,量子阱的组分和厚度等相关参数是否达到设计指标,以及有源区的整体结构是否符合谐振周期增益结构的要求等.另外,由于半导体材料的发光波长对温度极其敏感,因此量子阱的荧光谱也能明显地反映出增益芯片有源区的温度变化,从而得到激光器工作过程中的热性能. SDL 的 PL 谱分为边发射谱和面发射谱两种.边发射谱从外延芯片的侧边出射,没有经过外延多层结构的调制,反映的是量子阱本身的发光特性.测量时,将光谱仪探头置于芯片的侧边

(即平行于表面).面发射谱从垂直于芯片表面的方向出射,会受到外延多层结构的调制,携带了外延结构的信息.测量时只需将光谱仪探头置于芯片的正前方即可接收到光谱.由于 SDL 的激光输出波长是取决于面发射谱而非边发射谱,所以下面的实验及讨论都是针对面发射谱而言.

图 2 是在泵浦功率为 6.5 W 时,不同热沉温度下测得的增益芯片的面发射 PL 谱.当热沉温度为  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,PL 谱的峰值波长是 962 nm;当热沉温度升高到  $22\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,其峰值波长红移到 964 nm 处.由此得到的增益芯片 PL 谱波长随温度红移的速率大约是  $0.17\text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ .对于 GaAs 基的量子阱材料而言,温度引起材料折射率变化导致的微腔腔模随温度红移的理论值约为  $0.1\text{ nm}/^{\circ}\text{C}$  左右.实验中的  $0.17\text{ nm}/^{\circ}\text{C}$  明显大于上述理论值,意味着实验中增益芯片的散热性能欠佳,有源区的温度比理论估值要高,从而导致了更大的 PL 谱波长红移速率.实际上,封装后芯片不太理想的散热性能,也正是使得本实验输出功率不够高的一个主要原因.

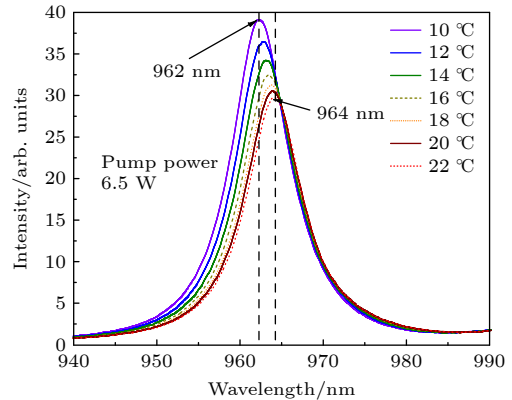


图 2 不同热沉温度下增益芯片的面发射 PL 谱

Fig. 2. Surface-emitting PL spectra of the gain chip under different heatsink temperatures.

图 3 是热沉温度为  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  时不同泵浦功率下增益芯片的面发射 PL 谱.随着泵浦功率的增加,PL 谱的峰值波长从 962 nm 红移到 964 nm,对应的波长红移速率为  $0.29\text{ nm}/\text{W}$ .利用图 1 所得  $0.17\text{ nm}/^{\circ}\text{C}$  的 PL 谱红移速率,可以估计得到,泵浦功率每增加 1 W,有源区量子阱的温度就会上升约  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ .在 SDL 实验中,当泵浦功率增加到一定程度后,量子阱区域温度上升过大,一方面使量子阱发光波长红移,偏离 DBR 的中心波长,降低 DBR 的反射率,即增大了激光器的损耗;另一方面



量子阱本身的增益系数也会随温度上升而急剧减小,大幅度削弱激光器的增益.此外,量子阱发光波长的红移会使量子阱位置偏离有源区激光驻波场的波峰,导致谐振周期增益结构的部分失谐,使激光器模式增益下降.上述诸因素的共同作用会导致激光器最终出现热熄灭,从而限制了激光器的最大输出功率.

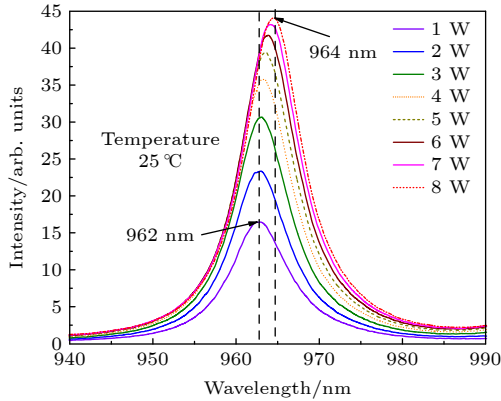


图 3 不同泵浦功率下增益芯片的面发射 PL 谱

Fig. 3. Surface-emitting PL spectra of the gain chip with different pump power.

#### 4 输出功率及光束质量

实验中将  $4\text{ mm} \times 4\text{ mm}$  的增益芯片键合到  $15\text{ mm} \times 15\text{ mm}$  的铜热沉上,铜块后端使用半导体制冷片和水冷系统.激光谐振腔为由增益芯片底部的 DBR 和曲率半径为  $100\text{ mm}$  的高反镜 (对  $980\text{ nm}$  反射率为  $99.9\%$ ) 构成的直线腔.泵浦源是  $808\text{ nm}$  波长的光纤耦合输出半导体激光器.泵浦光束经过  $1:1$  成像透镜以  $30^\circ$  入射角聚焦到增益芯片上,形成的泵浦光斑直径约为  $200\text{ }\mu\text{m}$ . 图 4 是 SDL 的结构示意 图 4(a) 以及实物图 4(b).

在插入 BRF 之前,对自由运转下的激光输出功率做了测量.图 5 是激光器在室温下的输出功率曲线,对应的阈值功率大约为  $2.5\text{ W}$ .在泵浦功率为  $9.5\text{ W}$  时,获得的最大输出功率为  $0.58\text{ W}$ .继续增加泵浦功率,由于前文提到的热效应,将导致输出功率的下降.通过线性拟合得到 SDL 的斜效率 (slope efficient, SE) 为  $7\%$ .激光器输出功率较低的主要原因有两个:一是使用了高反射镜作为输出镜.实验所用输出镜在激光波长处的透过率为  $0.1\%$ ,这不仅使耦合输出效率低,同时还使腔内循环功率高,升高了增益芯片的温度,加剧了激光器的热效应.二是芯片封装工艺没有优化,散热性能

较差,有源区温度上升过快,激光器较早地出现了热熄灭,其原因前面已有表述.如果采用具有合适透过率的输出镜,再对芯片封装工艺进行优化 (如使用热导率更高的金刚石作为热沉、进一步改善键合技术等),SDL 的输出功率尚存在很大的提升空间.

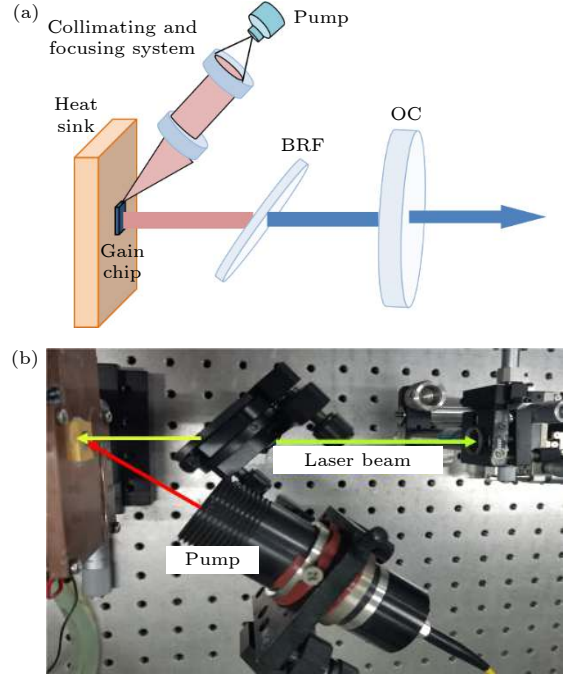


图 4 (a) 宽带可调谐半导体薄片激光器结构示意图及 (b) 实物图

Fig. 4. (a) Schematics and (b) photograph of the broadband tunable semiconductor disk laser.

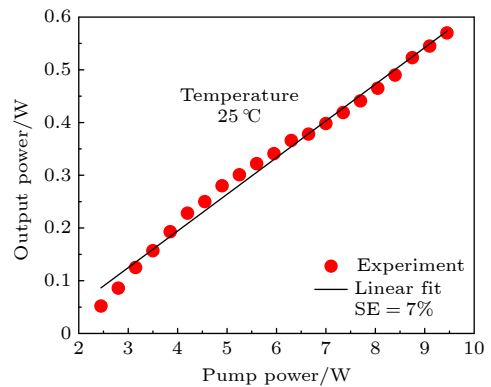
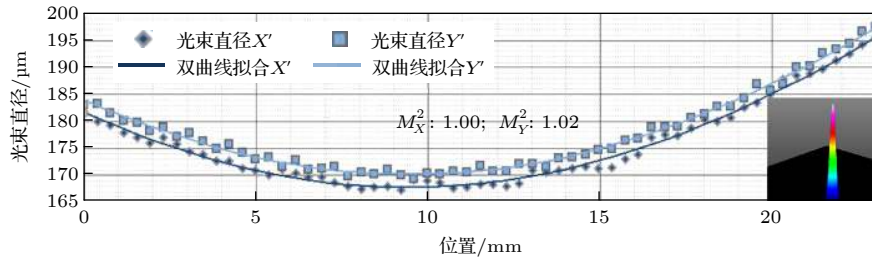


图 5 自由运转下半导体薄片激光器的输出功率

Fig. 5. Output powers of the free-running semiconductor disk laser.

图 6 是激光器在自由运转下最大输出功率为  $0.58\text{ W}$  时测量所得光束质量  $M^2$  因子,其在  $X$  方向为  $1.00$ ,  $Y$  方向为  $1.02$ ,表明半导体薄片激光器的输出是近衍射极限的高斯光束.图中右下方是激光强度分布的三维图.

图 6 最大输出功率为 0.58 W 时, 激光束的  $M^2$  因子Fig. 6.  $M^2$  factor of the laser beam when the maximum output power is 0.58 W.

## 5 波长调谐和线宽压窄

BRF 是连续可调谐激光器中最常用的一种调谐元件, 它具有插入损耗小、抗损伤阈值高、波长调谐范围大、模式分辨能力强等优点. 实验中, BRF 常以布儒斯特角放置于谐振腔中. 如果 BRF 的光轴与晶体表面平行, 以表面法线为轴旋转 BRF, 即可通过改变入射光束与 BRF 光轴之间的夹角来实现对激光波长的调谐<sup>[27]</sup>. BRF 的调谐方程为

$$\lambda = \frac{(n_o - n_e)d \sin^2 \gamma}{m \sin \theta_b} = C_0 (1 - \cos^2 \varphi \cos^2 \theta_b), \quad (1)$$

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;  $C_0 = (n_o - n_e)d/m \sin \theta_b$ , 对一定材料的晶体、一定厚度的晶片;  $C_0$  是一确定量;  $\varphi$  为晶体光轴与入射面夹角, 即为调谐角;  $\theta_b$  为布鲁斯特角;  $\gamma$  是晶体的内光线与晶体光轴夹角.

本实验采用了厚度分别为 2, 4, 6 mm 的 BRF, 相应的调谐特性分别如图 7、图 8 和图 9 所示. 室温下, 将厚度为 2 mm 未镀膜的 BRF 以布儒斯特角插入到谐振腔内, 在 7.5 W 的泵浦功率下, 通过旋转双折射滤波片, 激光波长可以从 950 nm 连续调谐到 995 nm, 对应的波长调谐范围为 45 nm. 因为重点关注的是激光器的波长调谐能力, 所以我们把输出激光的光谱都做了归一化处理. 图 7 中同时画出了不同波长下激光器对应的输出功率. 在波长为 974 nm 处, 激光器有最大的输出功率为 122 mW.

依据 (1) 式, 在图 7 中还作出了不同  $m$  值下 2 mm 厚 BRF 的调谐曲线, 左侧坐标轴表示调谐角. 以干涉级次  $m = 18$  为例, 计算得到的理论调谐范围为 354 nm. 但实际激光器的波长调谐范围不仅与双折射滤波片的理论调谐范围有关, 还受 BRF 自由光谱范围、芯片增益宽带、激光器腔内损耗等因素的限制, 并主要受制于芯片的增益带宽.

由图可知, 在实验能够实现的波长调谐范围内, BRF 对应的调谐角变化范围可以从  $6^\circ$  变化到  $73^\circ$ .

为了比较不同厚度 BRF 对激光波长的调谐能力, 实验中也使用了厚度为 4 mm 和 6 mm 的 BRF, 它们的调谐特性分别如图 8 和图 9 所示. 在图 8

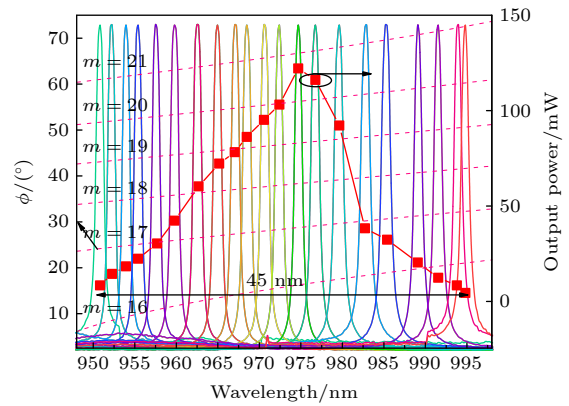
图 7 使用 2 mm 厚度 BRF 的 SDL 的波长调谐特性. 图中同时画出了对应波长的输出功率和不同  $m$  值下 BRF 的调谐曲线

Fig. 7. Tuning characteristics of the SDL with 2 mm thickness BRF. The corresponding output powers at various wavelengths and the tuning curves of the BRF with different  $m$  values are also plotted.

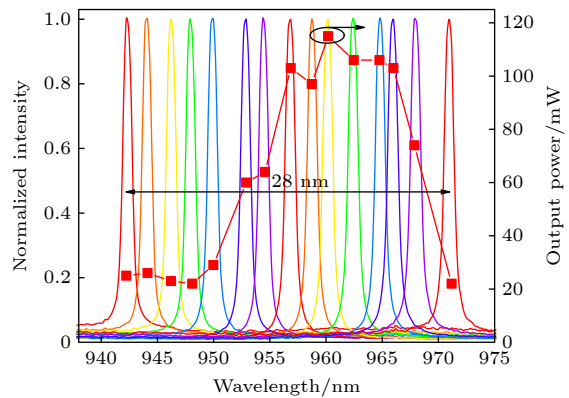


图 8 用 4 mm 厚度 BRF 作调谐元件的 SDL 的调谐特性

Fig. 8. Tuning characteristics of the SDL with 4 mm thickness BRF.

中, 激光波长可以从 942 nm 连续变化到 970 nm, 对应的调谐范围为 28 nm. 从图 8 中对应波长的输出功率可知, 在波长为 960 nm 时, 激光器的输出功率最大, 为 115 mW. 在图 9 中, 激光波长可以从 963 nm 连续变化到 980 nm, 对应的调谐范围为 17 nm. 从图 9 中对应波长的输出功率可知, 在波长为 971 nm 时, 激光器的输出功率最大, 为 38 mW.

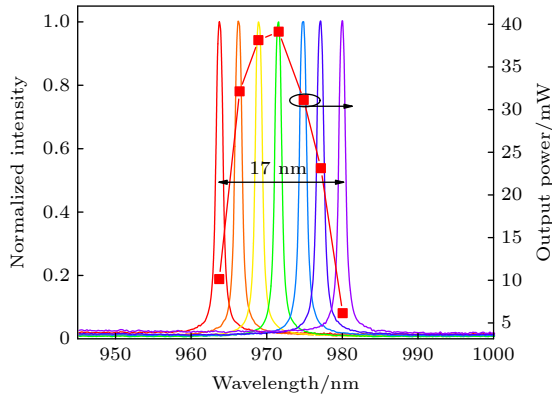


图 9 用 6 mm 厚度 BRF 作调谐元件的 SDL 的调谐特性  
Fig. 9. Tuning characteristics of the SDL with 6 mm thickness BRF.

结合图 7、图 8 和图 9, 很显然, BRF 的厚度越大, 插入后 SDL 的波长调谐能力越小, 即激光器的波长调谐范围越小. 同时, 越厚的 BRF 引入的腔内损耗也越大, 可调谐激光器的输出功率越小. 这

些实验结果都是符合 BRF 元件的调谐规律的.

BRF 的自由光谱范围为

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

式中,  $\Delta n = n_o - n_e$  是双折射滤波片的折射率差,  $d$  为滤波片的厚度,  $\lambda$  为激光波长. 由此可知, BRF 的波长调谐范围与厚度成反比, 即输出波长的调谐范围随 BRF 的厚度增加而减小, 论文中的实验结果与此一致. 实际上, BRF 能提供的调谐范围大多都超出实验本身的需要, 比如 2 mm 厚度石英 BRF 的自由光谱范围为 102.4 nm, 已超过了芯片的增益带宽, 甚至超过了芯片的荧光谱宽. 所以激光器的波长调谐范围的极限源自芯片的增益带宽, 以及谐振腔的损耗等因素.

双折射滤波片用于对激光波长进行调谐的同时, 对激光线宽也具有一定程度的压缩作用. 图 10 为 SDL 自由运转及插入不同厚度 BRF 时输出激光的谱线宽度. 自由运转下激光的线宽为 2.1 nm, 在腔内插入 2, 4, 6 mm 厚度 BRF 情况下, 激光的线宽分别为 1.06, 1.02, 1.01 nm. 显然, 单个使用 BRF 时, BRF 的厚度越大, 激光谱线宽度越窄. BRF 的谱线宽度为

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

可以看出, BRF 调谐的特点是自由光谱范围

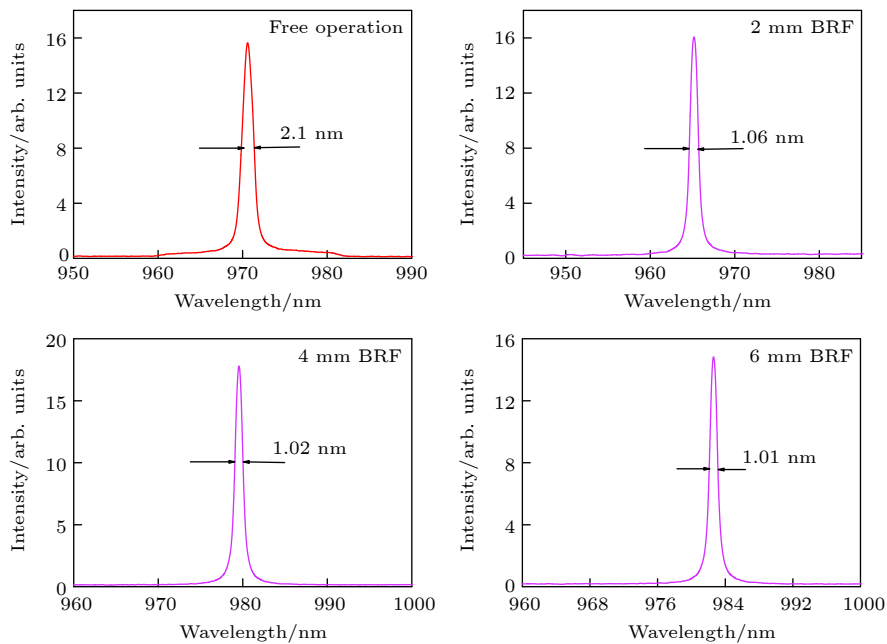


图 10 自由运转及插入不同厚度 BRF 时 SDL 的光谱线宽

Fig. 10. Laser spectra of the SDL under free-running and with different thickness BRF.

大, 但谱线宽度也大. 本实验中输出激光波长的线宽随 BRF 的厚度的增加有减小的趋势, 但这种线宽的变化随 BRF 厚度的改变并不明显, 因为激光线宽本身远小于 BRF 的理论线宽.

## 6 结 论

本文利用最简单最稳定的直线谐振腔 SDL, 在腔内插入厚度分别为 2, 4, 6 mm 的 BRF 作为调谐元件, 通过旋转 BRF, 实现了对激光输出波长的连续调谐. 当双折射滤波片厚度为 2 mm 时, 激光器的波长调谐范围为 45 nm, 最大输出功率为 122 mW,  $X$  和  $Y$  方向的光束质量  $M^2$  因子分别为 1.00 和 1.02. 因为 SDL 可以同时获得较高的输出功率和良好的光束质量, 这种结构简单紧凑、性能稳定、便携性能优良的中等功率的激光器, 具有较宽的波长连续调谐范围, 且其发射波长可以根据实际需求而设计, 可以在生命科学、环境监测、光谱分析等许多领域发挥重要的应用.

## 参考文献

- [1] Lu B, Wei F, Zhang Z, Xu D, Pan Z Q, Chen D J, Cai H W 2015 *Chin. Opt. Lett.* **13** 091402
- [2] Farrell T, McDonald D 2004 *Proc. SPIE* **5594** 66
- [3] Rothe K W, Brinkmann U, Walther H 1974 *Appl. Phys.* **10** 678
- [4] Soldatov A N, Reimer I V, Evtushenko V A, Melnikov K Yu, Malikov A V 2010 *B. Lebedev Phys. Inst.* **37** 4
- [5] Bhatia P S, Keto J W 1996 *Appl. Opt.* **35** 4152
- [6] Kuehne A J C, Gather M C 2016 *Chem. Rev.* **116** 12823
- [7] Fan T Y, Byer R L 1988 *IEEE J. Quantum Electron.* **24** 895
- [8] Byer R L 1988 *Science* **239** 742
- [9] Huber G, Kränkel C, Petermann K 2010 *JOSA B* **27** B93
- [10] Coldren L A, Fish G A, Akulova Y, Barton J S, Colder C W 2004 *J. Lightwave Technol.* **22** 193
- [11] Hao X Q, Chen G X 2010 *Opt. Commun. Technol.* **34** 4 (in Chinese) [郝秀晴, 陈根祥 2010 光通信技术 **34** 4]
- [12] Guina M, Rantamäki A, Härkönen A 2017 *J. Phys. Appl. Phys.* **50** 383001
- [13] Rudin B, Rutz A, Hoffmann M, Maas D J H C, Bellancourt A R, Gini E, Südmeier T, Keller U 2008 *Opt. Lett.* **33** 2719
- [14] Heinen B, Wang T L, Sparenberg M, Weber A, Kunert B, Hader J, Koch S W, Moloney J V, Koch M, Stolz W 2012 *Electron. Lett.* **48** 516
- [15] Hou G Y, Shu S L, Feng J, Popp A, Schmidt B, Lu H Y, Wang L J, Tian S C, Tong C Z, Wang L J 2019 *IEEE Photonics J.* **11** 1
- [16] Fedorova K A, Guoyu H, Wichmann M, Kriso C, Zhang F, Stolz W, Schellrt M, Koch M, Rahimi-Iman A 2020 *Phys. Status Solidi-R* **14** 2000204
- [17] Li F, Mahmoud F, James T, Robert B, Yunshi K, Aramais Z, Jorg H, Jerome V, Wolfgang S, Stephan W 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 21105
- [18] Li F, Fallahi M, Zakharian A R, Hader J, Koch SW 2007 *IEEE Photonic. Tech. L.* **19** 544
- [19] Borgentun C, Bengtsson J, Larsson A, Demaria F, Hein A, Unger P 2010 *IEEE Photonic. Tech. L.* **22** 978
- [20] Butkus M, Rautiainen J, Okhotnikov O G, Hamilton C J, Malcolm G P A, Mikhlin S S, Krestnikov I L, Livshits D A, Rafailov E U 2011 *IEEE J. Sel. Top. Quant.* **17** 1763
- [21] Yang Z, Albrecht R A, Cederberg J G, Sheik-Bahae M 2016 *Appl. Phys. Lett.* **109** 1063
- [22] Artur B, Anna W J, Iwona S, Michal W, Marta W, Jan M 2017 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **29** 2215
- [23] Zhang P, Song Y R, Zhang X P, Dai T L, Liang Y P, Fan S Q 2011 *Opt. Rev.* **18** 317
- [24] Mangold M, Wittwer V J, Sieber O D, Martin H, Igor L K, Daniil A L, Matthias G, Thomas S, Ursula K 2012 *Opt. Express* **20** 4136
- [25] Fan L, Hader J, Schillgalies M, Fallahi M, Zakharian A R, Moloney J V, Bedford R, Murrari J T, Koch S W, Stolz W 2005 *IEEE Photonic Tech. L.* **17** 1764
- [26] Sandusky J V, Brueck S R J 1996 *IEEE Photonic Tech. L.* **8** 313
- [27] Wang Y L, Wang Q, Li W J, Wang Y L 2018 *Opt. Tech.* **44** 88 (in Chinese) [王亚龙, 王庆, 李文静, 王雅兰 2018 光学技术 **44** 88]



# 45 nm broadband continuously tunable semiconductor disk laser<sup>\*</sup>

Mao Lin<sup>1)</sup> Zhang Xiao-Jian<sup>1)</sup> Li Chun-Ling<sup>1)</sup> Zhu Ren-Jiang<sup>1)</sup>  
Wang Li-Jie<sup>2)</sup> Song Yan-Rong<sup>3)</sup> Wang Tao<sup>1)†</sup> Zhang Peng<sup>1)‡</sup>

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

<sup>2)</sup> (*State Key Laboratory of Luminescence and Applications, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*)

<sup>3)</sup> (*College of Applied Sciences, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China*)

( Received 12 May 2021; revised manuscript received 13 June 2021 )

## Abstract

A broadband continuously tunable semiconductor disk laser is reported in this paper. The active region of gain chip is composed of InGaAs multiple quantum wells with resonant periodic gain structure, and its fluorescence peak wavelength is around 965 nm. Using the wideband characteristics of the quantum wells in gain chip, along with the simple linear cavity that is formed by a high reflectivity external mirror, the laser has a low cavity loss and a wide tuning range. The continuously tunable laser wavelength can be obtained by inserting birefringent filters with different thickness into the cavity. When the thickness of the birefringent filter is 2 mm, the wavelength tuning range of the laser is 45 nm, the maximum output power is 122 mW, and the beam quality  $M^2$  factors in the  $X$ - and the  $Y$ -directions are 1.00 and 1.02, respectively. The temperature characteristics of the surface-emitting spectra of gain chip and the narrowing effect of birefringent filter on laser linewidth  $\Delta\lambda$  are also discussed.

**Keywords:** semiconductor disk laser, continuous tuning, birefringent filter, narrow linewidth

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

**DOI:** 10.7498/aps.70.20210888

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61904024), the Science and Technology Research Program of Chongqing Municipal Education Commission, China (Grant No. KJZD-M201900502), the Chongqing Research Program of Basic Research and Frontier Technology, China (Grant No. cstc2018jcyjAX0319), the “Blue Fire Plan” (Huizhou) Foundation of Industry University Research Joint Innovation of Ministry of Education, China (Grant No. CXZJHZ201728), the State Key Laboratory of Luminescence and Applications, China (Grant No. SKLA-2019-04), and the Scientific and Technological Research Program of Chongqing Municipal Education Commission, China (Grant No. KJQN201800528).

† Corresponding author. E-mail: [wangt@cqu.edu.cn](mailto:wangt@cqu.edu.cn)

‡ Corresponding author. E-mail: [zhangpeng2010@cqu.edu.cn](mailto:zhangpeng2010@cqu.edu.cn)