

低重复频率被动锁模半导体碟片激光器*

贺亮¹⁾ 彭雪芳¹⁾ 沈小雨¹⁾ 朱仁江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) (北京工业大学理学院, 北京 100124)

4) (重庆师范大学重庆国家应用数学中心, 重庆 401331)

(2024 年 3 月 28 日收到; 2024 年 4 月 22 日收到修改稿)

锁模半导体碟片激光器 (semiconductor disk laser, SDL) 兼具输出功率高与光束质量好的优点, 但半导体增益介质 ns 量级很短的载流子寿命限制了锁模脉冲重复频率的降低, 因而在一定程度上限制了锁模脉冲峰值功率的提高. 本工作中增益芯片内较浅的量子阱所对应的载流子寿命相对较长, 结合特殊设计的较小饱和通量的半导体可饱和吸收镜 (semiconductor saturable absorption mirror, SESAM), 获得了低重复频率、高功率的被动锁模 SDL. 当温度为 12 °C 时, 利用六镜谐振腔产生的被动锁模激光脉冲重复频率低至 78 MHz, 为迄今为止在 SESAM 锁模 SDL 中所获得的最低重复频率. 锁模 SDL 的平均输出功率为 2.1 W, 脉冲宽度为 2.08 ps, 对应的脉冲的峰值功率 12.8 kW, 为已有报道最高值的近 2 倍.

关键词: 半导体碟片激光器, 半导体可饱和吸收镜, 锁模, 峰值功率**PACS:** 42.55.-f, 42.55.Px, 42.62.-b**DOI:** 10.7498/aps.73.20240441

1 引言

光泵浦半导体碟片激光器 (optically-pumped semiconductor disk laser, OP-SDL) 结合了传统固体激光器和半导体激光器的优点, 具有发射波长覆盖广、光束质量好、输出功率高等优点^[1]. 此外, 其可调的外腔便于插入其他光学元件如倍频晶体、双折射滤波片等, 可用于实现波长调谐、频率转换、线宽压缩等目的^[2,3].

SDL 中实现锁模的方式包括主动锁模、被动锁模、自锁模等, 其中以半导体可饱和吸收镜^[4] (semiconductor saturable absorption mirror, SESAM)

作为可饱和吸收体来实现的被动锁模以其结构紧凑、成本较低、性能稳定的优点而被广泛使用. 现已报道的锁模 SDL 的一些重要成果见表 1, 2000 年, Hoogland 等^[5] 利用量子阱 (quantum well, QW) SE SAM 在中心波长为 974 nm 的增益芯片腔内实现了首例被动锁模 SDL, 获得了 5 ps 的短脉冲. 此后, 锁模 SDL 经过二十多年的发展, 在脉冲宽度方面取得了许多重要进展. 2002 年, Gamache 等^[6] 第一次实现了飞秒量级的锁模 SDL, 脉冲宽度为 477 fs. 迄今为止, 在基频锁模中, Klopp 等^[7] 把 SESAM 锁模的脉冲宽度降低至 107 fs, Quarterman 等^[8] 甚至利用高调制深度 SESAM 基于光学斯塔克自吸收调制效应实现了脉宽仅为 60 fs 的脉冲.

* 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 (批准号: KJQN202200557, KJQN 202300525)、国家自然科学基金 (批准号: 61975003, 61790584, 62025506) 和重庆师范大学基金 (批准号: 23XLB003) 资助的课题.

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

表 1 已报道锁模 SDL 的重要成果一览表
Table 1. List of important results of mode-locked SDL have been reported.

年份	平均功率/W	峰值功率/kW	脉宽/fs	重复频率/GHz	波长/nm	参考文献
2000	0.0153	—	5000	2.5	974	[5]
2002	0.1	0.152	477	1.21	1040	[6]
2006	0.1	—	3300	50	960	[13]
2009	0.035	—	60	—	1037	[8]
2011	0.003	—	107	5.136	1030	[7]
2012	5.1	—	682	1.71	1030	[9]
2012	1.5	6.8	930	0.21	985	[12]
2012	0.9	—	830	193	1050	[14]
2013	0.36	—	—	0.0857	989	[15]
2013	3.3	4.35	400	1.67	1013	[10]
2017	1.14	6.3	410	0.39	1030	[11]

在平均功率方面, 以 Scheller 等^[9]在 2012 年实现了最高平均功率为 5.1 W. 在峰值功率方面, Wilcox 等^[10]在 2013 年实现了峰值功率为 4.35 kW 的 SESAM 锁模脉冲; 在 2017 年, Baker 等^[11]在 SESAM 锁模上实现了峰值功率的大突破, 将记录保持在 6.3 kW. 而在不使用 SESAM 的自锁模上, Kornaszewski 等^[12]在 2012 就已经将峰值功率达到了创纪录的 6.8 kW.

在重复频率方面, Lorensen 等^[13]在 2006 实现了到目前为止基频 SESAM 锁模最高的频率, 达到 50 GHz; 在 2012 年, Saarinen 等^[14]在 SESAM 高次谐波锁模上实现了高达 193 GHz 的重复频率. Butkus 等^[15]在 2013 年首次实现了低于 100 MHz 的 SDL 锁模脉冲, 利用半导体量子点 SESAM 和量子阱 SDL 在 989 nm 处实现了具有 85.7 MHz 的低重复频率锁模脉冲.

SDL 的锁模脉冲重复频率覆盖范围相当大, 从几十 MHz 到上百 GHz 都有分布, 但一般在 GHz 重复频率下工作^[16]. 这种限制源于半导体增益材料中短的、ns 级的载流子寿命^[17–19]. 虽然这种特性有利于高重复频率应用和噪声抑制, 但其也的确限制了在较低重复频率下可实现的参数. 这与具有微秒乃至毫秒量级上能级寿命的固体激光增益材料形成鲜明对比^[20]. 正是因为较长的载流子能级寿命, 使得锁模固体激光器可以在几十 MHz 甚至更低的重复频率下工作, 实现大的脉冲能量和高的峰值功率.

近年来, 生物医学光子学、化学和非线性显微镜等领域对低重复频率脉冲的商业需求不断增

加, 激发了人们对低重复频率激光的研究兴趣. 寻求低重复率、高峰值功率的激光器, 以替代传统而昂贵 Ti:Sapphire 激光器 (重复频率低至几十乃至几 MHz^[21,22]), 也是低重复频率激光器研究领域的一个重要方向. 与 Ti:Sapphire 激光器相比, SDL 具有更好的波长灵活性、更简单紧凑的结构、更好的稳定性、以及更低的成本. Butkus 等^[15]在 2013 年首次实现了低于 100 MHz 的 SDL 锁模脉冲重复频率, 为 85.7 MHz, 是已报道的 SESAM 锁模 SDL 的最低值. 对固体激光器而言, 其载流子寿命较长, 容易实现数十 MHz 的锁模重复频率, 而半导体由于载流子寿命很短 (ns 量级), 获得稳定的低于 100 MHz 的锁模则比较困难.

本工作中所使用的增益芯片有源区内的量子阱相对较浅, 一定程度地提高了载流子寿命. 再结合特殊设计的较小饱和通量的 SESAM, 获得了低重复频率、高峰值功率的被动锁模 SDL. 在温度为 12 °C 时, 利用六镜谐振腔产生的被动锁模激光脉冲重复频率低至 78 MHz, 为迄今为止在 SESAM 锁模 SDL 中所获得的最低重复频率. 锁模 SDL 的平均输出功率为 2.1 W, 脉冲宽度为 2.08 ps, 对应的脉冲的峰值功率 12.8 kW, 为已有报道最高值 (6.3 kW) 的近 2 倍.

2 实验装置

实验中使用的 SDL 设计发射波长为 980 nm, 具体的增益结构如图 1 所示. 依次是最外层已经去掉的基质层、高 Al 组分的 AlGaAs 刻蚀阻挡层、

抗氧剂 GaAs 帽层、具有高势垒的 AlGaAs 窗口层、In_{0.2}GaAs/GaAsP 构成的多量子阱有源区、分布式布拉格反射镜 (distributed Bragg reflection, DBR)、GaAs 保护层, 以及通过金属化焊接在一起的金刚石片. 增益部分包含 15 个 In_{0.2}GaAs/GaAsP 量子阱, 其中 GaAsP 既作为势垒层, 也起着应变补偿层的作用. 该增益结构是在具有 30 对 $\lambda/4$ 厚的高 Al (较低的折射率) 和低 Al (较高的折射率) 组分的交替 AlGaAs 层组成的 DBR 上谐振生长的. 其设计的中心波长和高反射带宽分别为 980 nm 和 100 nm. 将生长的半导体芯片晶圆切割成一块块约 4 mm×4 mm 大小的芯片, 然后金属化键合到金刚石热扩散层上, 并进一步焊接在散热铜块上. 实验中为了使芯片能更好地散热, 会采用化学刻蚀的方法去除导热性很差的基底层.

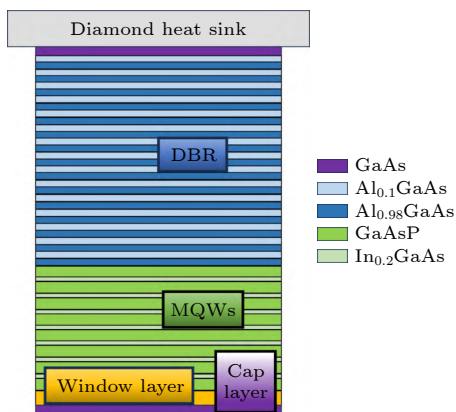


图 1 增益芯片外延结构简图
Fig. 1. Diagram of the epitaxy structure of gain chip.

SESAM 的前端包含单个 InGaAs/GaAs 量子阱, 其厚度为 10 nm, 吸收带边为 1020 nm. SESAM 的后端为对激光波长 980 nm 高反射率的 DBR, 由 28 对 $\lambda/4$ 厚的 GaAs/Al_{0.1}GaAs 交替生长而成. 为了降低 SESAM 的饱和通量, InGaAs 量子阱被有意地设置在偏离激光驻波场的波峰处. 最终测得 SESAM 的调制深度为 3.5%, 非饱和损耗为 0.5%, 饱和通量为 80 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$.

为了实现低重复频率, 利用增益芯片、SESAM、输出耦合镜 (output coupler, OC) 和 3 个高反射镜搭建了一个传统的六镜腔, 总腔长约为 1.92 m, 原理图如图 2 所示. 芯片作为折叠镜使光能两次通过产生更大的功率输出, 芯片一端包括 3 个对 980 nm 高反射率的反射镜和 SESAM, 其中 M1, M2 和 M3 的曲率半径 (radius of curvature, ROC)

分别为 -300 mm, -200 mm, -150 mm, SESAM 作为腔端反射镜之一, 它们之间的长度分别为 610 mm, 345 mm, 543 mm, 105 mm. 芯片另外一端为输出耦合镜, 其曲率半径为 300 mm, 对 980 nm 激光的透过率为 3%, 与芯片距离为 320 mm.

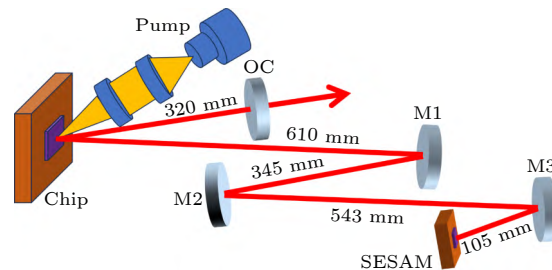


图 2 低重复频率 SESAM 锁模 SDL 光路图
Fig. 2. Schematic of the low repetition frequency SESAM mode-locked SDL.

实验装置的实物图如图 3 所示, 除了必备的泵浦源、反射镜、输出耦合镜、SESAM 和芯片之外, 还包括热电制冷器 (thermoelectric cooler, TEC) 温控装置、衰减片、光电探头和示波器等. 将 808 nm 光纤耦合半导体激光器准直聚焦在增益芯片上, 泵浦光斑直径为 400 μm , 泵浦激光二极管与半导体增益芯片之间的夹角尽可能小, 以保证泵浦二极管与腔模式之间更好的模式匹配.

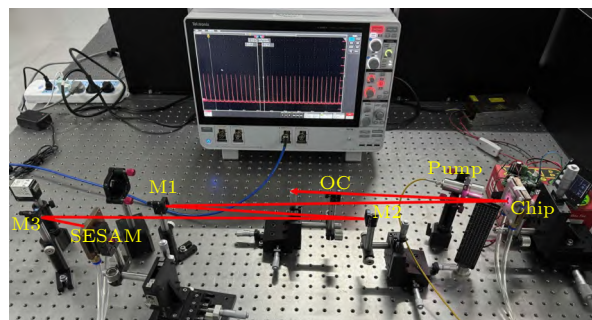


图 3 SESAM 锁模 SDL 实物图, 图中标出了谐振腔中各元件及光路
Fig. 3. Photograph of the SESAM mode-locked SDL. The resonant cavity and optical path are also plotted.

在整个装置中, 热量的有效散除是得到高的输出功率的关键, 因此添加散热装置势在必行. 考虑到芯片要承受高的泵浦光的照射, 因此将焊接芯片的铜块与 TEC 紧贴, 背部再与接通水冷的铜块紧密贴合, 达到散热的目的. 考虑到实验室的温度一般在 20 $^{\circ}\text{C}$, 湿度在 50% 左右, 计算出来的露点在 9 $^{\circ}\text{C}$ 左右. 众所周知, 更低的温度对更高功率的获得有巨大帮助, 但为了避免芯片表面产生水雾从而

对芯片造成不可逆的损害, 因此 TEC 的设置温度应高于露点 2°C 以上, 而水冷机设置的最低温度为 10°C , 故我们把 TEC 温度设置在 12°C . 不仅仅是芯片, SESAM 过热也会导致锁模不稳定和功率降低, 因此我们在 SESAM 和接通水冷的铜块之间加入导热硅脂使其紧密贴合, 以便于 SESAM 的散热.

为了确立最优的锁模腔型, 对两种器件上的谐振腔模式进行了精心设计. 谐振腔内模光斑大小随位置的变化情况如图 4 所示. 最后增益芯片和 SESAM 的束腰半径分别约为 $200\text{ }\mu\text{m}$ 和 $38\text{ }\mu\text{m}$, 模式面积比约为 25:1.

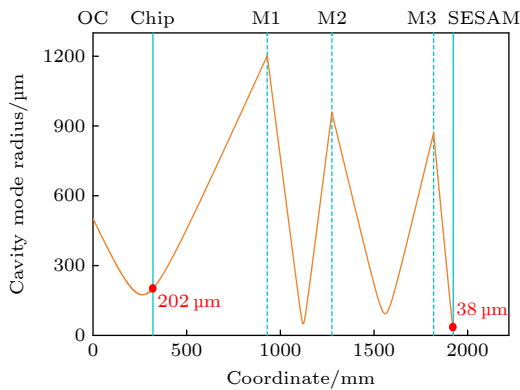


图 4 谐振腔中激光腔模半径大小随位置的变化
Fig. 4. Evolution of the radius of cavity mode in the resonator.

在下面的实验中, 我们使用 pulseCheck NX 50 自相关仪测量自相关迹线, 其重复频率为 10 Hz , 扫描范围为 $5\text{--}150\text{ ps}$, 分辨率为 50 as , 可测脉冲宽度为 $5\text{ fs--}15\text{ ps}$. 激光光谱由 Maya2000 Pro 光谱仪记录, 波长范围为 $165\text{--}1100\text{ nm}$, 分辨率为 0.025 nm . 锁模激光脉冲使用带宽为 6 GHz 、波长范围为 $800\text{--}1700\text{ nm}$ 的 Thorlabs DET08C 高速探测器探测, 并由带宽为 10 GHz 、采样率为 50 Gs/s 的泰克公司 MSO68B 示波器记录. 采用 Rigol DSA800 射频频谱分析仪测量锁模脉冲序列的重复频率, 其带宽为 7.5 GHz , 分辨率为 $100\text{ Hz--}1\text{ MHz}$. 激光器输出功率由 Ophir 12A-P 探测器和 NOVA II 功率计获得.

3 结果与讨论

在实现 SESAM 锁模之前, 先研究了 SDL 连续运转的输出特性, 其输出功率如图 5 所示. 此时,

SESAM 并未发挥其启动锁模的功能, 在谐振腔中仅起到平面反射镜的作用. 由图 5 可知, 当吸收泵功率为 32.2 W 时, 在 $T = 3\%$ 的输出耦合镜下, 连续光获得最大输出功率为 5.26 W , 斜效率为 19.2% . 图 5 中的插图为连续光的光谱, 其中心波长在 980.3 nm , 半高全宽 (full width half maximum, FWHM) 为 1.24 nm .

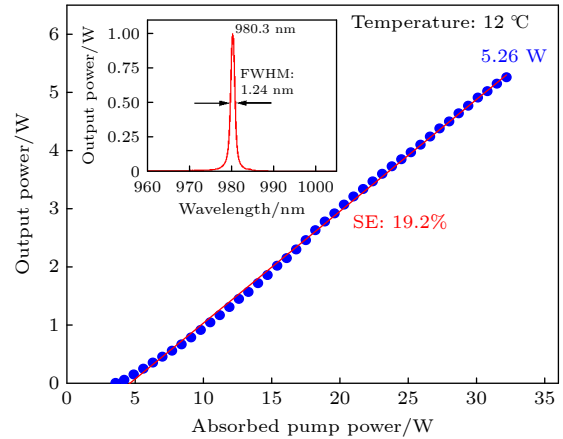


图 5 连续光功率随吸收泵功率的变化, 内插图为激光光谱

Fig. 5. Output power of the continuous-wave laser vs. absorbed pump power, the inset is the laser spectrum.

同时, 我们对 3 块高反镜的透过率损耗进行测量. 采用 $T = 3\%$ 的输出耦合镜, 在输出功率为 1 W 时分别对 3 个高反镜的透过光功率进行了测量, 测得 M1, M2, M3 的输出功率分别为 8 mW , 6 mW , 8 mW . 从而算出高反镜的反射率在 99.98% 左右, 透过损耗很小, 对实验的整体运行影响很小, 可以忽略.

在 SESAM 被动锁模 SDL 中, 启动锁模的关键是 SESAM 必须先于增益达到饱和, 因此, SESAM 上的光功率密度必须数倍于增益芯片上的光功率密度, 两者比值的典型值为 30 左右. 而对我们设计的谐振腔, 使腔内启动锁模的关键步骤是调节 SESAM 所在臂的长度, 因其长度改变对腔内损耗影响巨大, 同时也会使增益芯片和 SESAM 上的模式面积发生较大的变化, 进而使二者模式面积比足够合适以至启动锁模. 相较而言, 其他位置的调节更多的是稳定锁模以及对输出功率的优化.

实现锁模后, 为了详细表征锁模运行的结果, 对输出激光脉冲的时域波形、射频频谱和激光光谱进行了如下表征. 如图 6 所示, 显示了一个基频的锁模运转, 每个腔的单脉冲往返时间为 12.68 ns .

在右上角插入了一个 40 μs 的时域图, 表明振幅几乎一致, 没有调制包络, 证明了在 40 μs 的时间范围内能得到稳定的锁模脉冲。

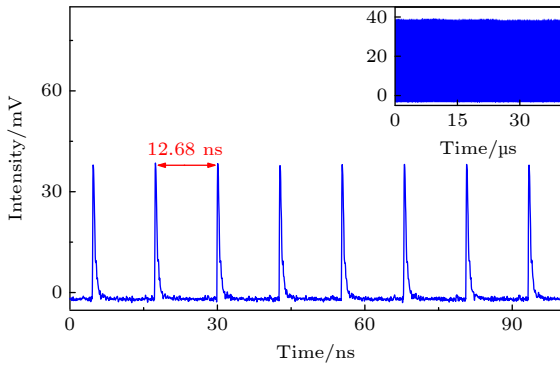


图 6 78 MHz 锁模 SDL 时域波形图
Fig. 6. Pulse train of the 78 MHz mode-locked SDL.

同时也用频谱仪对锁模脉冲进行频谱分析, 如图 7 所示, 基频锁模脉冲的重复频率为 78 MHz, 与设计腔长相对应的频率比较吻合 (插图展示了前 9 次谐波的射频频谱)。

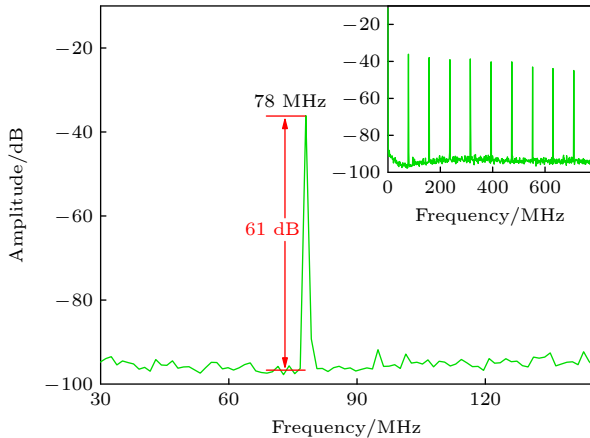


图 7 78 MHz 锁模 SDL 射频频谱图
Fig. 7. Radio frequency spectrum of the 78 MHz mode-locked SDL.

图 8(a) 是锁模激光的光谱, 其中心波长为 981.7 nm, 对比连续光发生了一定的红移, 是由芯片的热效应导致的. 对应的 FWHM 为 1.61 nm, 与连续光相比有一定程度的展宽. 锁模脉冲的自相关测量如图 8(b) 所示. 高斯拟合的 FWHM 为 2.08 ps. 计算得锁模脉冲的时间带宽积为 1.0417, 接近理想高斯脉冲傅里叶变换极限 (0.441) 的约 2 倍。

图 9 给出了 SESAM 锁模激光输出的平均功率在不同透过率的输出耦合镜下随吸收泵浦功率

的变化. 从图 9 可以得知, 当吸收泵浦功率为 25.2 W 时, 在输出耦合镜的透过率分别为 $T = 2\%$, 3% , 5% 时, 锁模脉冲光获得最大输出功率分别为 1.34, 2.1, 1.62 W. 对锁模稳定性进行观察, 当吸收泵浦功率不超过 25.2 W 时, 锁模脉冲时域波形和射频频谱比较稳定, 谐振腔输出功率也相对稳定, 没有发生热翻转. 而当吸收泵浦功率继续提高时, 则难以实现稳定的锁模. 可能的原因是在泵浦功率较高的情况下, 芯片和 SESAM 上面的热效应比较严重, 尤其是 SESAM 很可能达到了热翻转, 因为其只采用基础的水冷铜块散热. 后续若想进一步提高锁模输出功率, 可以考虑将 TEC 与 SESAM 配合使用来增强 SESAM 的散热能力, 提高其热翻转的功率阈值, 通过拉高泵浦功率来实现更高的输出功率。

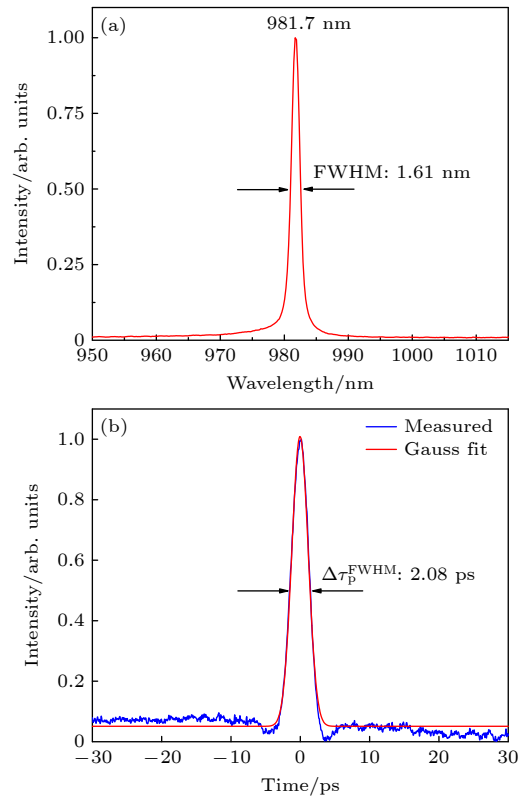


图 8 (a) 78 MHz 锁模 SDL 光谱图; (b) 脉冲宽度的自相关测量结果

Fig. 8. (a) Spectrum of the 78 MHz mode-locked SDL; (b) autocorrelation trace of the mode-locked pulses.

对不同透过率的输出耦合镜的数据进行计算, 在 $T = 3\%$ 时得到最大脉冲峰值功率为 12.8 kW; 在 $T = 2\%$ 和 $T = 5\%$ 时的脉冲峰值功率分别为 8.17 kW 和 9.88 kW. 我们可以发现输出耦合镜的透过率在 $T = 3\%$ 时得到了最高的脉冲峰值功率,

在 $T = 5\%$ 时次之, 在 $T = 2\%$ 时最小. 可能的原因是在 $T = 3\%$ 时谐振腔内的损耗与芯片的增益之间的动态平衡最稳定, 锁模转换效率最高; 而在另外两个透过率下, 增益和损耗之间的动态平衡被打破后重组成了一个锁模转换效率降低的新平衡, 从而脉冲峰值功率也降低. 对 $T = 2\%$ 的输出耦合镜来说, 相比于 $T = 3\%$ 的输出耦合镜, 腔内能量密度更高, 但损耗却降低, 之前的平衡被打破; 而对 $T = 5\%$ 的输出耦合镜来说, 腔内能量密度降低, 损耗增大, 同样打破了之前的平衡.

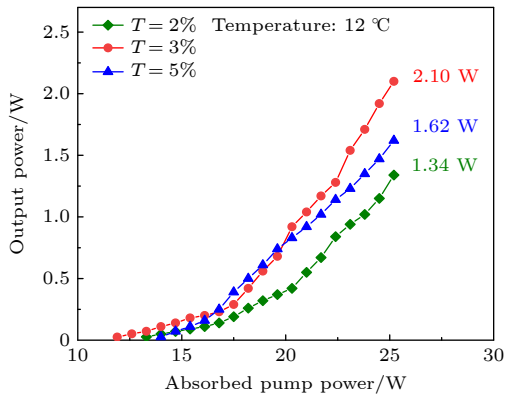


图9 不同输出镜透过率下锁模 SDL 的输出功率

Fig. 9. Output power of the mode-locked SDL under different OC with various transmittance.

有源区载流子寿命理想上应该大于基态锁模脉冲的脉冲周期, 以便导带中激发载流子的所有能量都能作用于脉冲放大. 对于低重复频率的 SDL, 入射脉冲与半导体增益芯片中激发载流子的相互作用时间比腔内往返时间要短, 激发载流子在脉冲间隙时间内参与自发复合, 并降低差动效率. 因此, 半导体增益芯片本质上更适合于高重复频率系统, 并且基态锁模的不稳定性在低重复频率 SDL 中更加可能发生. 此外, 已经证明大部分增益恢复发生在几 ps 内, 在低重复频率下, 恢复时间比几个乃至十几个 ns 的腔内往返时间更快, 有利于增益的分裂, 导致激光腔内多个脉冲的循环.

根据本工作中获得的 78 MHz 脉冲重复频率, 可以初步估算一下 SDL 的增益芯片中所使用的 $\text{In}_{0.2}\text{GaAs}$ 量子阱中载流子的寿命. 根据 Carlin 等^[23] 2013 年的报道, $\text{In}_{0.14}\text{Ga}_{0.86}\text{As}$ 量子阱内的载流子寿命约为 110 ns, 而 $\text{In}_{0.17}\text{Ga}_{0.83}\text{As}$ 量子阱内的载流子寿命约为 25 ns, 其趋势是载流子寿命随 In 含量增大而减小, Ongstad 等^[24] 也得到了类似的结

论. 由此可知, 本实验所用增益芯片中 $\text{In}_{0.2}\text{GaAs}$ 量子阱中载流子的寿命不会超过 25 ns. 另一方面, 78 MHz 脉冲重复频率所对应的腔内往返时间为 12.68 ns, 所以, $\text{In}_{0.2}\text{GaAs}$ 量子阱中载流子的寿命大致介于 12.68—25 ns 之间.

为了进一步探究载流子的寿命, 采用一种载流子寿命公式来粗略地计算^[25]:

$$R(n) = An + Bn^2 + Cn^3, \quad (1)$$

$$\frac{1}{\tau} = \frac{\partial R}{\partial n}, \quad (2)$$

式中 n 为载流子密度; A , B , C 分别为带间杂质复合、带间复合和俄歇复合系数; τ 为载流子寿命. 而 InGaAs 的 $A = 1 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$, $B = 5 \times 10^{-11} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $C = 6 \times 10^{-30} \text{ cm}^6 \cdot \text{s}^{-1}$ ^[25], n 估算为 $5.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. 计算可估计出载流子寿命约为 16.4 ns, 符合前面的推论.

4 结 论

综上所述, 通过搭建一个在芯片上光斑与 SESAM 上光斑半径分别约为 200 μm 和 40 μm , 腔长约为 1.92 m 的六镜长腔, 实现了 78 MHz 的迄今为止最低重复频率的 SESAM 被动锁模 SDL. 在 $T = 3\%$ 的输出耦合镜下, 得到了 2.1 W 的平均功率. 此时脉冲持续时间为 2.08 ps, 对应的脉冲峰值功率达 12.8 kW, 为已有最高峰值功率的约 2 倍. 在 $T = 2\%$ 和 $T = 5\%$ 时, 获得的平均功率分别为 1.34 W 和 1.62 W, 其所对应的脉冲峰值功率分别为 8.17 kW, 9.88 kW. 实验中所使用的增益芯片中 $\text{In}_{0.2}\text{GaAs}$ 量子阱内载流子的寿命估计为 16.4 ns. 这种高功率的锁模半导体碟片激光器在生物医学光子学、化学和非线性显微镜等领域具有重要的潜在应用价值.

参考文献

- [1] Li Y J, Zong N, Peng Q J 2018 *Laser Optoelectron. Prog.* **55** 49 (in Chinese) [李玉娇, 宗楠, 彭钦军 2018 激光与光电子学进展 **55** 49]
- [2] Rahimi-Iman A 2016 *J. Optics-UK* **18** 093003
- [3] Guina M, Rantamäki A, Härkönen A 2017 *J. Phys. D Appl. Phys.* **50** 383001
- [4] Keller U, Weingarten K J, Kartner F X, Kopf D, Braun B, Jung I D, Fluck R, Honninger C, Matuschek N, Der Au J A 1996 *IEEE J. Sel. Top. Quant.* **2** 435
- [5] Hoogland S, Dhanjal S, Tropper A C, Roberts S J, Häring R,

- Paschotta R, Keller U 2000 *IEEE Photonic. Tech. L.* **12** 1135
- [6] Garnache A, Hoogland S, Tropper A C, Sagnes I, Saint-Girons G, Roberts J S 2002 *Appl. Phys. Lett.* **80** 3892
- [7] Klopp P, Griebner U, Zorn M, Weyers M 2011 *Appl. Phys. Lett.* **98** 071103
- [8] Quarterman A H, Wilcox K G, Apostolopoulos V, Mihoubi Z, Elsmere S P, Farrer I, Ritchie D A, Tropper A C 2009 *Nat. Photonics* **3** 729
- [9] Scheller M, Wang T L, Kunert B, Stolz W, Koch S W, Moloney J V 2012 *Electron. Lett.* **48** 588
- [10] Wilcox K G, Tropper A C, Beere H E, Ritchie D A, Kunert B, Heinen B, Stolz W 2013 *Opt. Express* **21** 1599
- [11] Baker C W, Scheller M, Laurain A, Ruiz-Perez A, Stolz W, Addamane S, Balakrishnan G, Koch S W, Jones R J, Moloney J V 2017 *IEEE Photonic. Tech. L.* **29** 326
- [12] Kornaszewski L, Maker G, Malcolm G P A, Butkus M, Rafailov E U, Hamilton C J 2012 *Laser Photon. Rev.* **6** L20
- [13] Lorensen D, Maas D J H C, Unold H J, Bellancourt A R, Rudin B, Gini E, Ebling D, Keller U 2006 *IEEE J. Quantum Elect.* **42** 838
- [14] Saarinen E J, Rantamaki A, Chamorovskiy A, Okhotnikov O G 2012 *Electron. Lett.* **48** 1355
- [15] Butkus M, Viktorov E A, Erneux T, Hamilton C J, Maker G, Malcolm G P A, Rafailov E U 2013 *Opt. Express* **21** 25526
- [16] Wilcox K G, Quarterman A H, Beere H E, Ritchie D A, Tropper A C 2011 *Opt. Express* **19** 23453
- [17] Chen Y C, Wang P, Coleman J J, Bour D P, Lee K K, Waters R G 1991 *IEEE J. Quantum Elect.* **27** 1451
- [18] Ehrlich J E, Neilson D T, Walker A C, Kennedy G T, Grant R S, Sibbett W, Hopkinson M 1993 *Semicond. Sci. Technol.* **8** 307
- [19] Alfieri C G E, Waldburger D, Link S M, Gini E, Golling M, Eisenstein G, Keller U 2017 *Opt. Express* **25** 6402
- [20] Keller U 1994 *Appl. Phys. B* **58** 347
- [21] Antal P G, Szipöcs R 2012 *Appl. Phys. B* **107** 17
- [22] Seres E, Seres J, Spielmann C 2012 *Opt. Express* **20** 6185
- [23] Carlin C Z, Bradshaw G K, Samberg J P, Colter P C, Bedair S M 2013 *IEEE T. Electron Dev.* **60** 2532
- [24] Ongstad A P, Gallant D J, Dente G C 1995 *Appl. Phys. Lett.* **66** 2730
- [25] Ongstad A P, Tilton M L, Bochove E J, Dente G C 1996 *J. Appl. Phys.* **80** 2866

Low repetition rate passive mode-locked semiconductor disk laser^{*}

He Liang¹⁾ Peng Xue-Fang¹⁾ Shen Xiao-Yu¹⁾ Zhu Ren-Jiang¹⁾ 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 28 March 2024; revised manuscript received 22 April 2024)

Abstract

Semiconductor disk lasers (SDLs) have advantages of high output power and good beam quality. Their flexible external cavity provides convenience for inserting additional optical element to start mode locking and produce ultra-short pulse train with duration from picosecond to femtosecond. However, the very short lifetime in a range from about a few nanoseconds to tens of nanoseconds of the carrier in semiconductor gain medium limits the decrease of pulse repetition rate, thus restricting the increase of peak power of the mode-locked laser pulse to some extent. In this work, by using the relatively shallow In_{0.2}GaAs quantum wells, which have a relatively long carrier lifetime in the active region of gain chip, as well as the particularly designed semiconductor saturable absorption mirror (SESAM) that has a relatively small saturation flux, a passively mode-locked SDL with low repetition rate and high peak power is demonstrated. The used six-mirror cavity has a spot radius of about 200 μm on the chip and a 40 μm spot on the SESAM, and the total cavity length is about 1.92 m. The SESAM passively mode-locked SDL produces a stable pulse train with a lowest repetition rate of 78 MHz. When the temperature is 12 $^{\circ}\text{C}$ and the transmittance of the output coupler is $T = 3\%$, an average output power value of 2.1 W and a pulse duration of 2.08 ps are achieved. The corresponding pulse peak power reaches 12.8 kW, which is about twice the reported highest peak power in an SESAM mode-locked SDL. When $T = 2\%$ and $T = 5\%$, the obtained average output power values are 1.34 W and 1.62 W respectively, and the corresponding pulse peak power values are 8.17 kW and 9.88 kW. Based on the values reported in the literature and the results of pulse repetition rate in our experiments, the estimated lifetime of the carriers of the In_{0.2}GaAs quantum wells in the active region of the gain used chip is 16.4 ns. This high peak power mode-locked semiconductor disk laser has important potential applications in biomedical photonics, chemistry, and nonlinear microscopy.

Keywords: semiconductor disk laser, semiconductor saturable absorption mirror, mode-locked, peak power

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

DOI: 10.7498/aps.73.20240441

^{*} Project supported by the Cooperation Project between Chongqing Local Universities and Institutions of Chinese Academy of Sciences, Chongqing Municipal Education Commission, China (Grant No. HZ2021007), the Science and Technology Research Program of Chongqing Municipal Education Commission, China (Grant Nos. KJQN202200557, KJQN202300525), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61975003, 61790584, 62025506), and the Chongqing Normal University Fund Project (Grant No. 23XLB003).

[†] Corresponding author. E-mail: zhangpeng2010@cqu.edu.cn