第 48 卷 第 7 期/2021 年 4 月/中国激光 研究论文

中国激光

# 调 $Q$ 运转外腔面发射激光器

张晓健[1]，潘丽[1]，曾颖[1]，张洲[1]，杨红伟[2]，王彦照[2]，王涛[1,3]，朱仁江[1]，范嗣强[1**]，张鹏[1*]

[1]重庆师范大学物理与电子工程学院，重庆 401331；

[2]中国电子科技集团公司第十三研究所，河北 石家庄 050051；

[3]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，吉林 长春 130033

**摘要** 在光泵浦外腔面发射激光器中，分别用 $Cr^{4+}$：YAG 晶体和半导体可饱和吸收镜 SESAM 作为可饱和吸收介质，获得了稳定的调 $Q$ 脉冲输出。使用 $Cr^{4+}$：YAG 晶体时，调 $Q$ 脉冲的宽度为 10 μs，脉冲重复频率为26.3 kHz。在相同的脉冲重复频率下，用半导体可饱和吸收镜所获得的调 $Q$ 脉冲宽度为 8 μs。基于外腔面发射激光器中增益芯片的量子结构，以及 $Cr^{4+}$：YAG 晶体和半导体可饱和吸收镜各自的时间特性，分析讨论了两种不同的可饱和吸收介质作用下，外腔面发射激光器中调 $Q$ 脉冲的形成过程，初步清晰了外腔面发射激光器这一特殊种类的激光器中与调 $Q$ 过程相关的物理图像。

**关键词** 激光器；调 $Q$；外腔面发射激光器；可饱和吸收；$Cr^{4+}$：YAG 晶体；半导体可饱和吸收镜

**中图分类号** TN245 **文献标识码** A **doi**：10.3788/CJL202148.0701003

## 1 引 言

调 $Q$ 技术常用在固体激光器中，获得时间宽度在纳秒量级、重复频率在千赫兹量级、峰值功率在兆瓦量级的高能量脉冲，以满足科研及工业加工等领域的需要[1-2]。半导体激光器中，载流子的寿命在纳秒量级，远低于固体激光介质微秒至毫秒量级的上能级寿命，因而不能直接获得高能量的脉冲。但从另一方面看，正因为载流子的寿命很短，故在半导体激光器中，调 $Q$ 脉冲可以实现高达吉赫兹的重复频率，在高速通信、高速光电采样检测等方面有着重要的应用。

不同于固体激光器中常用的电光调 $Q$、声光调 $Q$ 等主动调 $Q$ 方法，以及插入可饱和吸收体等被动调 $Q$ 手段，半导体激光器中的调 $Q$ 一般是采用所谓的双节结构，即激光器中包含了功能不同的两节，其中一节是增益区，另一节是吸收区，或者说调制区，中间的波导部分将两节相互连接。这种调 $Q$ 运转的半导体激光器可以产生时间宽度在亚纳秒量级、重复频率达吉赫兹的稳定脉冲[3-6]。如果要进一步在半导体激光器中获得皮秒及飞秒量级的超短脉冲，则需要用到另外两种在半导体激光器中产生超短脉冲的技术：增益开关技术[7]和激光锁模技术[8]。半导体激光器本身具备结构简单紧凑、性能可靠、波长设计灵活、调谐方便等诸多优点，如果再与主振荡功率放大器(MOPA)结合，调 $Q$ 半导体激光器功率不足的缺点便可得到补偿，其应用范围会更加广泛。

光泵浦垂直外腔面发射激光器(OP-VECSELs)结合了垂直腔面发射激光器(VCSELs)的增益结构和固体薄片激光器的几何结构，能够同时获得高功率和高光束质量[9-12]，已被广泛用于非线性频率变换[13,14]、超短脉冲产生[15,16]、太赫兹时域光谱仪[17]、生命科学[18]和医疗[19]等领域。

关于 VECSEL 中的调 $Q$ 现象，曾有报道[20]，但还没有相关工作对其进行比较全面深入的实验研究和分析讨论。本文分别用 $Cr^{4+}$：YAG 晶体和半导

**收稿日期**：2020-08-11；**修回日期**：2020-09-16；**录用日期**：2020-10-14

**基金项目**：重庆市教委科学技术研究重大项目(KJZD-M201900502)、国家自然科学基金(61904024)、重庆市基础研究与前沿探索项目(cstc2018jcyjAX0319)、教育部“蓝火计划”(惠州)产学研联合创新资金项目(CXZJHZ201728)、发光学及应用国家重点实验室开放项目(SKLA-2019-04)、重庆市教委科学技术研究项目(KJQN201800528)

*E-mail：zhangpeng2010@cqnu.edu.cn；**E-mail：maikfan111@163.com



(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

体可饱和吸收镜(SESAM)作为可饱和吸收介质,在 VECSEL 中实现稳定的被动调 $Q$,并根据实验结果,结合所用增益芯片的量子结构,以及 $Cr^{4+}$:YAG 晶体和 SESAM 各自的时间特性,对 VECSEL 中被动调 $Q$ 脉冲的形成过程进行分析讨论,试图获得 VECSEL 这一特定种类的半导体激光器中与被动调 $Q$ 过程相关的较为清晰的物理图像。

## 2 实验装置

所用 VECSEL 增益芯片采用逆向生长的结构,在 GaAs 基质上首先生长高 Al 组分的 AlGaAs 刻蚀阻挡层,然后是芯片的保护层 GaAs 层,接下来是用于阻挡载流子的 AlGaAs 高势垒层,之后是多量子阱有源区。有源区包括 12 个 InGaAs/GaAsP 量子阱,InGaAs 中 In 的含量满足设计发光波长 980 nm。GaAsP 既作为应变补偿层,也作为量子阱的势垒层和泵浦光的吸收层,因此,其中 P 的含量必须能够胜任对应变的补偿,且不会影响对泵浦光的吸收。有源区之上是 30 对高 Al 组分和低 Al 组分 AlGaAs 交替构成的分布式布拉格反射镜(DBR),中心波长 980 nm,反射带宽100 nm。外延结构的最后用抗氧化的 GaAs 层来结束。在激光器运行过程中,增益芯片的前端界面与底部 DBR 之间会构成一个微腔,激光在此微腔中将形成驻波场。为了提升芯片的增益,芯片中所有外延层的厚度,以及多量子阱有源区,都必须精细地设计与生长,确保每个量子阱都置于激光驻波场的波峰处,形成所谓的谐振周期增益结构[21]。

生长好的外延片被划分为 4 mm×4 mm 的小块芯片,在外延结束端面分别用钛、铂、金对其进行金属化,然后键合到铜热沉上,再用化学腐蚀方法把芯片的基质层刻蚀掉。

实验所用被动调 $Q$ 晶体 $Cr^{4+}$:YAG 的厚度为 1.6 mm,该晶体在 1000 nm 附近存在明显的吸收,在工作波长 $\lambda=980$ nm 处的吸收率约为 4.5%。晶体的两个通光面均对 980 nm 波长镀增透膜,其在 980 nm 处的反射率小于 0.185%。

SESAM 的主要技术参数如下:量子阱的吸收波长为 980 nm,DBR 的高反射率($R>96\%$)带介于 910~990 nm 之间。吸收镜的调制深度 $\Delta R=1.2\%$,饱和吸收系数 $A_0=2.0\%$,非饱和损耗 $A_{ns}=0.8\%$,饱和通量 $\Phi_{sat}=120\ \mu J/cm^2$,弛豫时间 $\tau=500$ fs。

$Cr^{4+}$:YAG 晶体被动调 $Q$ 的 VECSEL 实验采用简单的直腔结构,如图 1(a)所示。泵浦源是 808 nm光纤耦合输出半导体激光器,泵浦光以约 30°的角度斜入射在增益芯片表面。因为芯片表面没有镀增透膜,所以大约 30%的泵浦光能量被反射掉。余下的泵浦光透过芯片前端的 AlGaAs 高势垒层,到达量子阱有源区,被量子阱的势垒层吸收,产生光生载流子。势垒层的光生载流子扩散,被量子阱俘获,在阱中形成受激辐射跃迁,为激光波长提供增益。InGaAs/GaAsP 量子阱势垒层对 808 nm 泵浦光吸收系数的典型值为 0.8 $\mu m^{-1}$[22],而 12 个 InGaAs/GaAsP 量子阱构成的有源区总厚度为 1.68 μm,因而泵浦光单程通过有源区,即可被全部吸收掉。外部的耦合输出镜(OC)曲率半径为 100 mm,对激光波长镀有高反膜,在 980 nm 波长处的反射率为 99.9%。实验中,被动调 $Q$ 晶体尽量靠近增益芯片放置,以获得更高的入射光功率密度,形成更好的吸收并达到饱和。

SESAM 被动调 $Q$ 的 VECSEL 实验采用如图 1(b)所示的折叠腔,折叠镜的曲率半径为 50 mm,对激光波长 980 nm 镀高反膜。为了让激光在 SESAM 上更好地聚焦,以达到饱和通量条件,启动非线性饱和过程,谐振腔中需要让 VECSEL 芯片所在的一臂长于 SESAM 所在的一臂。本实验中对上述两臂长度的选择,设置 VECSEL 芯片上的激光光斑与 SESAM 上的光斑面积比约为 20∶1。

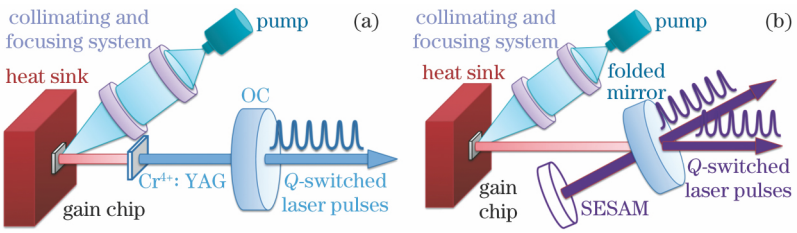


图 1 被动调 $Q$ 的 VECSELs 实验示意图。(a)$Cr^{4+}$:YAG 晶体被动调 $Q$ 的 VECSEL;(b)SESAM 被动调 $Q$ 的 VECSEL

Fig. 1 Schematic of passively $Q$-switched VECSELs. (a) $Cr^{4+}$:YAG passively $Q$-switched VECSEL; (b) SESAM passively $Q$-switched VECSEL



(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

## 3 结果与分析

### 3.1 连续运转 VECSEL

在如图 1(a)所示的直腔中，先不插入 $Cr^{4+}$：YAG 晶体，使 VECSEL 处于连续运转的状态。图 2 是在泵浦功率为 1.2 W 时，测得的芯片荧光谱，以及在泵浦功率为 5.6 W 时，测得的激光光谱。考虑到在高功率运转时，增益芯片有源区温度上升，InGaAs 量子阱的发光波长会以约 0.3 nm/℃ 的速率红移，因而在芯片的设计中，弱泵浦下量子阱的发射波长为 965 nm，预计高功率运转时芯片内部温度上升 50 ℃，从而使量子阱的发射波长达到 980 nm 的设计要求。图 2 中，弱泵浦下荧光谱的峰值波长在 963.5 nm，与设计指标基本吻合。

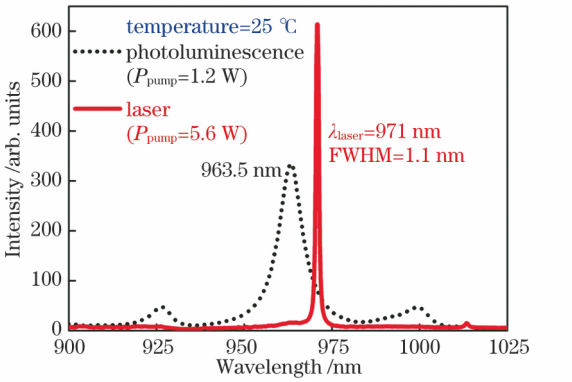


图 2 室温下，1.2 W 泵浦功率时增益芯片的荧光谱，以及 5.6 W 泵浦功率时 VECSEL 的激光光谱

Fig. 2 Photoluminescence of the gain chip under 1.2 W pump power and laser spectrum of VECSEL under 5.6 W pump power at room temperature

泵浦功率增加到 5.6 W 时，测得的激光波长为 971 nm，光谱线宽 1.1 nm。量子阱发光波长的红移效果非常明显，说明芯片有源区内温度上升较快，也就是芯片的热效应问题较为严重，这部分与我们使用高反镜作为输出镜有关。

室温下，使用曲率半径为 100 mm 的 980 nm 镀膜高反镜(激光波长的透过率约为 0.1%)，所得的连续运转 VECSEL 的输出功率与泵浦功率的关系曲线如图 3 所示。激光器的斜效率(SE)为 9.4%。在泵浦功率为 11.9 W 时，最大输出功率 924 mW。在此之后，继续增加泵浦功率，激光器的输出功率出现下降。连续运转 VECSEL 输出功率不够高的主要原因是我们使用了透过率仅有 0.1%的高反镜作为输出镜。过低的耦合输出率，意味着很高的腔内循环功率，这会加剧增益芯片有源区的热效应，使量子阱的增益迅速减小，最终激光器出现热熄灭。换用更大透过率的输出镜，能得到更大的斜效率，以及更高的最大输出功率。

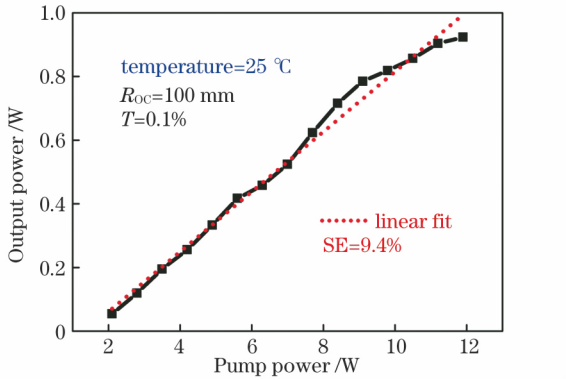


图 3 室温下，连续运转 VECSEL 的输出功率随泵浦功率的变化关系

Fig. 3 Relationship between output power of continuously running VECSEL and pump power at room temperature

图 4 是在最大输出功率 924 mW 时，测量所得的光束质量 $M^2$ 因子，其在 $x$ 方向为 1.05，在 $y$ 方向为 1.00，表明激光器输出的是近衍射极限的高斯光束。右下方的插图为光强分布的三维图。

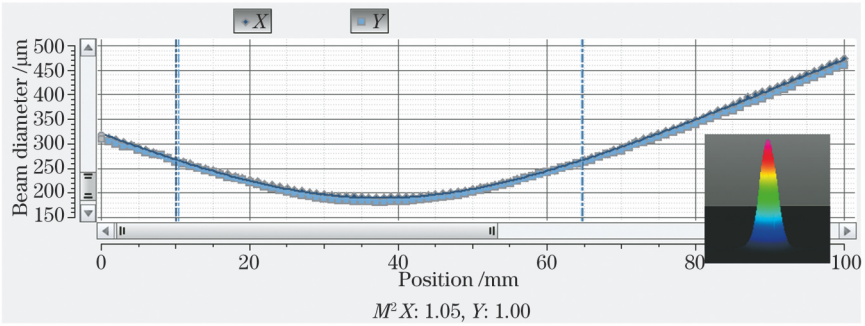


图 4 输出功率为 924 mW 时，激光束的 $M^2$ 因子(插图为光强分布的三维图)

Fig.4 $M^2$ factor of laser beam when output power is 924 mW (inset is three-dimensional diagram of light intensity distribution)



(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

### 3.2 $Cr^{4+}$:YAG 被动调 $Q$ 的 VECSEL

搭建如图1(a)所示激光谐振腔,$Cr^{4+}$:YAG 晶体尽量放置在靠近增益芯片的位置,以减小晶体上光斑的面积,获得更高的入射光功率密度,形成更好的吸收,使晶体达到饱和。图 5 是室温下,泵浦功率为 4.5 W 时,$Cr^{4+}$:YAG 被动调 $Q$ 的 VECSEL 输出的脉冲波形。调 $Q$ 脉冲的时间宽度为 10 μs,周期为 38 μs,对应脉冲的重复频率为 26.3 kHz。

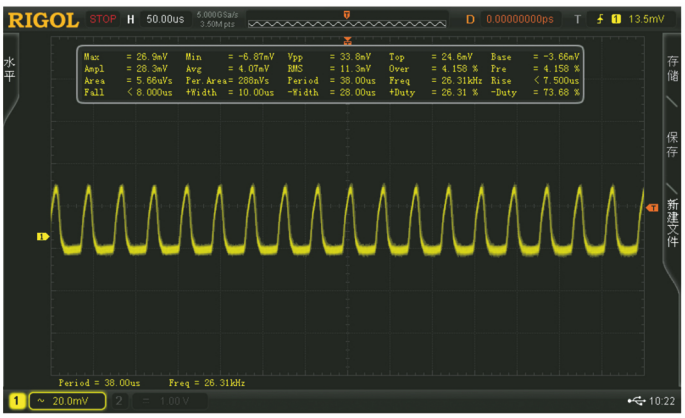


图 5 室温下,泵浦功率为 4.5 W 时,$Cr^{4+}$:YAG 被动调 $Q$ 的 VECSEL 输出的脉冲波形

Fig. 5 Pulse waveform of $Cr^{4+}$:YAG passively $Q$-switched VECSEL with 4.5 W pump power at room temperature

虽然脉冲宽度在 μs 量级的被动调 $Q$ 固体激光器[23]和光纤激光器[24]都曾有过报道,但图 5 中的调 $Q$ 脉冲与典型的被动调 $Q$ 固体激光器的输出相比,还是存在极大的区别:典型固体激光器被动调 $Q$ 脉冲宽度在数 ns 至十几 ns 量级,脉冲周期在数十至数百 μs 量级,而 VECSEL 被动调 $Q$ 的脉冲宽度和脉冲周期都在 μs 量级。这种区别主要是由固体激光介质、可饱和吸收晶体$Cr^{4+}$:YAG以及 VECSEL 增益介质的时间特性决定的。

在典型固体激光器中,吸收晶体 $Cr^{4+}$:YAG 的弛豫时间为3~4 μs[25-26],而激光介质的上能级寿命在数百 μs 乃至 ms 量级,比吸收体的弛豫时间高出 2~3 个数量级。激光介质中反转粒子数的积累较为容易,并获得较大的初态与终态反转粒子数比值。在上能级反转粒子数超过振荡阈值,脉冲开始建立之后,吸收体被迅速漂泊,从而产生 ns 量级的短脉冲输出。根据相关动力学分析,固体激光器中形成稳定调 $Q$ 脉冲的重复频率在 kHz 量级[27],调 $Q$ 脉冲的周期在数十至数百 μs 量级。

而 VECSEL 中的情况则大不一样。InGaAs 量子阱中载流子的寿命在 ns 量级[28],导带中载流子的积累过程非常缓慢,且所获得的初态载流子与终态载流子数目的比值也不高,因而载流子的释放过程同样缓慢,与之对应的则是吸收体缓慢的被漂泊的过程,综合起来使得调 $Q$ 脉冲的上升及下降沿都被延长到 μs 的尺度,从而形成如图 5 所示的调 $Q$ 脉冲。因为晶体中弛豫相关的情况是没有变化的,所以脉冲的周期与典型被动调 $Q$ 固体激光器中的情况类似。

### 3.3 SESAM 被动调 $Q$ 的 VECSEL

使用 SESAM 作为可饱和吸收体,搭建如图 1(b)所示的激光谐振腔。室温下,当泵浦功率为 4.5 W 时,获得稳定的调 $Q$ 脉冲波形如图 6 所示,激光脉冲的宽度为 8 μs,周期为 38 μs,对应脉冲的重复频率为 26.3 kHz。与图 5 对比可知,采用恢复时间为 500 fs 的 SESAM 这种快速可饱和吸收体,并不会对 VECSEL 被动调 $Q$ 输出的脉冲特性产生多大影响,这也再次说明,VECSEL 调 $Q$ 脉冲的特征主要取决于增益芯片中有源区多量子阱的时间特性,也就是 InGaAs 量子阱的载流子寿命。但是,图 6 中的 SESAM 被动调 $Q$ 脉冲与图 5 中的 $Cr^{4+}$:YAG 被动调 $Q$ 脉冲比较起来,还是存在一些明显区别的,比如 SESAM 调 $Q$ 脉冲的轮廓没有 $Cr^{4+}$:YAG 调 $Q$ 脉冲的轮廓光滑,并在峰值部分出现了一些毛刺,我们认为其原因可能是:$Cr^{4+}$:YAG 晶体的弛豫时间为3~4 μs,与脉冲宽度在同一数量级;在脉冲的形成过程中,晶体透过率的变化、增益介质中载流子数目的变化以及谐振腔内光子数的变化,都是一个平滑的过程;而 SESAM 弛豫时间($\tau=500$ fs)远小于脉冲宽度,因而在脉冲的形成过程中,SESAM 的反射率在总体饱和的基础上,仍然存在起伏,导致了 SESAM 反射率的变化、增益介质中载流子数目的变化以及谐振腔内光子数的变化都不够平滑,结果反映在如图6所示的脉冲形状上,并在脉冲的



(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

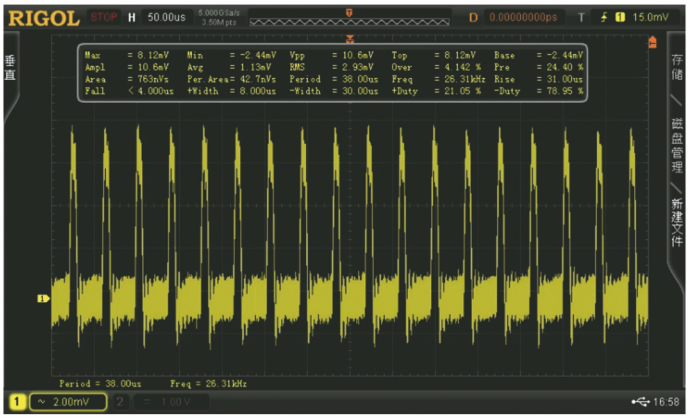


图 6 室温下，泵浦功率为 4.5 W 时，SESAM 被动调 $Q$ 的 VECSEL 输出的脉冲波形

Fig. 6 Pulse waveform of the SESAM passively $Q$-switched VECSEL with 4.5 W pump power and room temperature

峰值附近出现一系列毛刺。

SESAM 被动调 $Q$ 的 VECSEL 输出脉冲的周期随泵浦功率的变化关系如图 7 所示。在固体激光器中，被动调 $Q$ 脉冲的重复频率随泵浦功率的增大几乎呈线性上升[29-30]，但图 7 所示的 VECSEL 的情况明显地偏离了线性关系，而是趋近于指数关系，这显然也是由于各增益介质的时间特性决定。固体激光增益介质的上能级寿命长，调 $Q$ 脉冲宽度小（ns 量级），脉冲间隔大（μs 量级，比脉冲宽度高 3 个数量级），因此随泵浦功率的增大，原来相邻的两个脉冲之间可以容纳出现更多的脉冲，使得脉冲的重复频率能够随泵浦功率的增大而线性上升。在 VECSEL 中，如前所述，量子阱载流子的寿命短，载流子的积累和释放过程都非常缓慢，调 $Q$ 脉冲宽度大（μs 量级），脉冲间隔与脉冲宽度在同一数量级，原来相邻的两个脉冲之间容纳更多脉冲的能力非常有限，因此随泵浦功率的增大，脉冲重复频率上升的趋势很快就趋于饱和，反映在脉冲的周期随泵浦功率的增大近乎指数衰减，如图 7 所示。

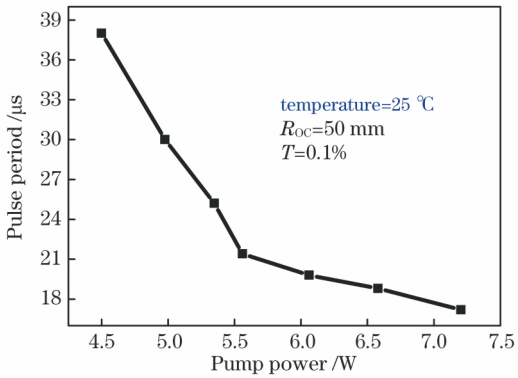


图 7 SESAM 被动调 $Q$ 的 VECSEL 输出脉冲的周期随泵浦功率的变化关系曲线

Fig. 7 Relationship between pulse periods of the SESAM passively $Q$-switched VECSEL and pump power

图 8 为 SESAM 被动调 $Q$ 的 VECSEL 在不同泵浦功率下的输出功率。在泵浦功率为 7.2 W 时，调 $Q$ 输出的最大功率为 33 mW，此时脉冲的重复频率为 58.1 kHz，单脉冲能量为 0.57 μJ。实验所用 SESAM 的饱和吸收率为 2.0%，所搭建的折叠腔有两路激光输出，因此我们估计谐振腔的总体损耗偏大，是激光器输出功率不高的主要原因。如果采用非饱和损耗更小、调制深度更优化的 SESAM，估计可以获得更高的调 $Q$ 输出功率。

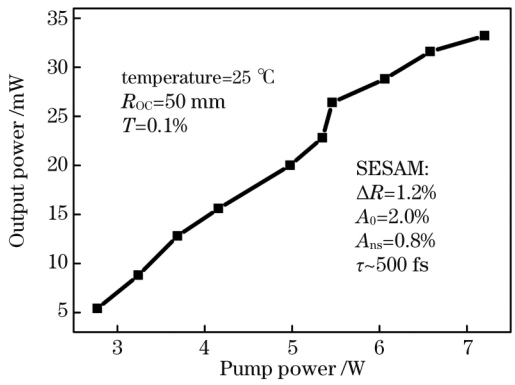


图 8 室温下，SESAM 被动调 $Q$ 的 VECSEL 输出功率随泵浦功率的变化关系

Fig. 8 Output power varies with pump power of the SESAM passively $Q$-switched VECSEL at room temperature

## 4 结 论

分别用 $Cr^{4+}$：YAG 晶体和 SESAM 作为吸收介质，在 VECSEL 中获得了稳定的调 $Q$ 脉冲输出，脉冲的宽度和脉冲间隔都在 μs 量级。$Cr^{4+}$：YAG 晶体被动调 $Q$ 脉冲的宽度为10 μs，脉冲重复频率为 26.3 kHz。在相同脉冲重复频率下，SESAM 调 $Q$



(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

脉冲的宽度为 8 μs。泵浦功率为 7.2 W 时，获得 SESAM 被动调 $Q$ 的最大输出功率为 33 mW，重复频率为 58.1 kHz，激光单脉冲能量为 0.57 μJ。VECSEL 被动调 $Q$ 的输出脉冲特性主要取决于增益介质中 InGaAs 量子阱的载流子寿命，而受可饱和吸收体弛豫时间的影响很小。随泵浦功率的增大，调 $Q$ 脉冲的重复频率近乎以指数规律趋于饱和。鉴于 VECSEL 能同时获得较高的输出功率和良好的光束质量，若能提高调 $Q$ 运转 VECSEL 的输出功率，增大脉冲的能量和峰值功率，则这种结构简单紧凑、发射波长覆盖范围广、调谐方便的 VECSEL 脉冲激光，在非线性频率变换、荧光激发、生命科学及激光医疗等领域将存在广泛的应用。

## 参 考 文 献


[1] Li L P, Li Y J, Song Y J, et al. High-power and high-efficiency widely tunable Ti∶sapphire nanosecond pulsed laser pumped by $Q$-switched green laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(5): 0508018.
李隆普, 李玉娇, 宋艳洁, 等. 高功率、高效率调 $Q$ 绿光抽运的钛宝石宽调谐纳秒脉冲激光[J]. 中国激光, 2019, 46(5): 0508018.

[2] Zhou Y, Jiao M X, Lian T H, et al. Design and experimental investigation of passively $Q$-switched two-cavity dual-frequency Nd∶YAG laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(12): 1201008.
周叶, 焦明星, 连天虹, 等. 被动调 $Q$ 双腔双频 Nd∶YAG激光器设计及实验[J]. 中国激光, 2018, 45(12): 1201008.

[3] Drozhbin Y A, Zakharov Y P, Nikitin V V, et al. Generation of ultrashort light pulses with a GaAs semiconductor laser[J]. JETP Letters, 1967, 5: 143-145.

[4] Lee T P, Roldan R. Repetitively $Q$-switched light pulses from GaAs injection lasers with tandem double-section stripe geometry[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1970, 6(6): 339-352.

[5] Tsang D, Walpole J. $Q$-switched semiconductor diode lasers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1983, 19(2): 145-156.

[6] Cakmak B. Modelling of experimentally measured $Q$-switched pulsations in InGaAs/GaAs diode lasers[J]. Optics Communications, 2006, 266(2): 614-619.

[7] Chen H, Chen S P, Hou J, et al. Research progress on ultrafast gain-switching laser diode system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(11): 110001.
陈河, 陈胜平, 侯静, 等. 超短脉冲增益开关半导体激光系统研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(11): 110001.

[8] Vasilev P P, White I H, Gowar J. Fast phenomena in semiconductor lasers[J]. Reports on Progress in Physics, 2000, 63(12): 1997-2042.

[9] Kuznetsov M, Hakimi F, Sprague R, et al. Design and characteristics of high-power (>0.5 W CW) diode-pumped vertical-external-cavity surface-emitting semiconductor lasers with circular $TEM_{00}$ beams[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 1999, 5(3): 561-573.

[10] Tropper A C, Hoogland S. Extended cavity surface-emitting semiconductor lasers [J]. Progress in Quantum Electronics, 2006, 30(1): 1-43.

[11] Rahimi-Iman A. Recent advances in VECSELs[J]. Journal of Optics, 2016, 18(9): 093003.

[12] 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.

[13] Calvez S, Hastie J E, Guina M, et al. Semiconductor disk lasers for the generation of visible and ultraviolet radiation[J]. Laser & Photonics Reviews, 2009, 3(5): 407-434.

[14] Hastie J E, Morton L G, Kemp A J, et al. Tunable ultraviolet output from anintracavity frequency-doubled red vertical-external-cavity surface-emitting laser[J]. Applied Physics Letters, 2006, 89(6): 061114.

[15] Keller U, Tropper A C. Passively modelocked surface-emitting semiconductor lasers[J]. Physics Reports, 2006, 429(2): 67-120.

[16] Alfieri C G E, Waldburger D, Nürnberg J, et al. Sub-150-fs pulses from an optically pumped broadband modelocked integrated external-cavity surface emitting laser[J]. Optics Letters, 2019, 44(1): 25-28.

[17] Mihoubi Z, Wilcox K G, Elsmere S, et al. All-semiconductor room-temperature terahertz time domain spectrometer[J]. Optics Letters, 2008, 33(18): 2125-2127.

[18] Esposito E, Keatings S, Gardner K, et al. Confocal laser scanning microscopy using a frequency doubled vertical external cavity surface emitting laser[J]. The Review of Scientific Instruments, 2008, 79(8): 083702.

[19] Kantola E, Rantamäki A, Leino I, et al. VECSEL-based 590-nm laser system with 8 W of output power for the treatment of vascular lesions[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2019, 25(1): 1-8.




(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[20] Yu W M, Song Y R, Hu J H, et al. *Q*-switched output in vertical external cavity surface emitting lasers[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6344: 63441Z.

[21] Corzine S W, Geels R S, Scott J W, et al. Design of Fabry-Perot surface-emitting lasers with a periodic gain structure[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1989, 25(6): 1513-1524.

[22] Tropper A C, Foreman H D, Garnache A, et al. Vertical-external-cavity semiconductor lasers[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2004, 37(9): R75-R85.

[23] Tang R, Gao Z Y, Wu Z M, et al. Output characteristics of diode-pumped passively *Q*-switched Yb:$CaYAlO_4$ pulsed laser based on a SESAM[J]. Chinese Optics, 2019, 12(1): 167-178.
**唐睿, 高子叶, 吴正茂, 等. 基于 SESAM 被动调 *Q* 的激光二极管泵浦 Yb:$CaYAlO_4$脉冲激光器[J]. 中国光学, 2019, 12(1): 167-178.**

[24] Wang Z T, Zou Y H, Chen Y, et al. Graphene sheet stacksfor *Q*-switching operation of an erbium-doped fiber laser[J]. Laser Physics Letters, 2013, 10(7): 075102.

[25] Zhang X Y, Zhao S Z, Wang Q P, et al. Measurement of absorption cross section and ground state recovery time of $Cr^{4+}$ doped saturable absorber[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 1998, 9(6): 3-5.
**张行愚, 赵圣之, 王青圃, 等. 掺 $Cr^{4+}$ 饱和吸收体吸收截面和基态恢复时间的测量[J]. 光电子·激光, 1998, 9(6): 3-5.**

[26] Gong M L, Zhai G, Shi S S, et al. Measurement of $Cr^{4+}$:YAG saturable absorption[J]. Acta Optica Sinica, 1998, 18(1): 124-127.
**巩马理, 翟刚, 时顺森, 等. $Cr^{4+}$:YAG 可饱和吸收特性测量[J]. 光学学报, 1998, 18(1): 124-127.**

[27] Zhu C H, Li Z J, Chen S S, et al. Study on periodicity of giant pulses with passive *Q* switched laser[J]. Laser Technology, 2000, 24(2): 85-89.
**朱长虹, 李正佳, 陈殊殊, 等. 被动调 *Q* 激光脉冲周期的研究[J]. 激光技术, 2000, 24(2): 85-89.**

[28] Ehrlich J E, Neilson D T, Walker A C, et al. Carrier lifetimes in MBE and MOCVD InGaAs quantum wells[J]. Semiconductor Science and Technology, 1993, 8(2): 307-309.

[29] Zhang X Y, Zhao S Z, Wang Q P, et al. Optimization of $Cr^{4+}$-doped saturable-absorber *Q*-switched lasers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1997, 33(12): 2286-2294.

[30] Degnan J J. Optimization of passively *Q*-switched lasers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1995, 31(11): 1890-1901.

# *Q*-Switched External-Cavity Surface-Emitting Lasers

Zhang Xiaojian[1], Pan Li[1], Zeng Ying[1], Zhang Zhou[1], Yang Hongwei[2], Wang Yanzhao[2], Wang Tao[1,3], Zhu Renjiang[1], Fan Siqiang[1**], Zhang Peng[1*]

[1] *College of Physics and Electronic Engineering, Chongqing Normal University, Chongqing* 401331, *China*;
[2] *The* 13*th Research Institute of CETC, Shijiazhuang, Hebei* 050051, *China*;
[3] *State Key Laboratory of Luminescence and Applications, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin* 130033, *China*

## Abstract

**Objective** Optically-pumped vertical-external-cavity surface-emitting lasers (OP-VECSELs) combine advantages of vertical-cavity surface-emitting lasers (VCSELs) and solid-state disk lasers. In addition, OP-VECSELs can produce high output power and good beam quality simultaneously. VECSELs are of interest in many fields due to the tailorability and tunability of emitting wavelengths. In addition, pulsed VECSELs with high-energy and high peak power are of considerable demand in applications such as frequency conversion, fluorescence excitation, and laser medicine. *Q*-switched VECSEL has been reported once, but it has not been investigated specifically and extensively, and there is no published experimental or theoretical work on a *Q*-switched VECSEL so far. This study introduced passively *Q*-switched VECSELs with a $Cr^{4+}$:YAG crystal and a semiconductor saturable absorb mirror (SESAM), respectively. Based on the time characteristics of the quantum wells in the active region of the VECSELs and the time behaviors of the saturable absorbers (the $Cr^{4+}$:YAG crystal and the SESAM), the experimental results were analyzed, and the formation mechanisms of the microsecond pulses were proposed.

**Methods** The gain chip used in the VECSELs is epitaxially grown on a GaAs substrate in reverse sequences as



(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

following: an etch stop layer of AlGaAs with high Al composition, a protective layer of GaAs, an AlGaAs layer with a high barrier, an active region comprising 12 InGaAs/GaAsP quantum wells (designed to meet a target laser wavelength of 980 nm), and a distributed Bragg reflector (DBR, which is composed of 30 pairs alternate AlGaAs layers with high and low Al composition). When the grown wafer is split into small chips with 4 mm×4 mm dimension, the epitaxial end face of the chips are sequentially metalized with titanium-platinum-aurum; then, the chips are bonded to a copper heatsink, and the substrate is removed using a chemical etching. The passively *Q*-switched VECSEL with $Cr^{4+}$:YAG crystal uses a linear cavity, and the *Q*-switching crystal is placed to the gain chip as near as possible during the experiment, while the passively *Q*-switched VECSEL with SESAM uses a folded cavity, and the length of the arm containing the gain chip is longer than that of the arm with SESAM to produce a tighter focusing of the light on SESAM, to satisfy the need of SESAM saturation and start the *Q*-switching process.

**Results and Discussions** When a $Cr^{4+}$:YAG crystal is placed into the resonant cavity, a stable pulse train is obtained. Under room temperature and 4.5 W pump power, the pulse width and period are 10 and 38 μs, respectively, corresponding to a repetition rate of 26.3 kHz (Fig. 5). As SESAM is inserted into the folded cavity, a steady pulse train is produced, and the pulse width and period are 8 and 38 μs, respectibvely (Fig. 6), corresponding to a repetition rate of 26.3 kHz (the same as that in the $Cr^{4+}$:YAG *Q*-switched VECSEL) under room temperature and 4.5 W pump power. The maximum average output power of the SESAM *Q*-switched VECSEL is 33 mW, the repetition rate is 58.1 kHz, and the single-pulse energy is 0.57 μJ when the pump power is 7.2 W (Fig. 8). The relationship between pulse periods and pump powers of the *Q*-switched VECSELs is different from a typical *Q*-switched solid-state laser. In a passively *Q*-switched solid-state laser, the pulse period decreases reciprocally with the increase in pumping power; however, for the passively *Q*-switched VECSELs, the pulse period decreases approximately exponentially (Fig. 7), and we believe this is due to the short life of the nanosecond magnitude of carriers in the active region of the VECSELs.

**Conclusions** We have demonstrated passively *Q*-switched VECSELs with $Cr^{4+}$:YAG crystal and SESAM, respectively. The pulse widths of the $Cr^{4+}$:YAG and SESAM *Q*-switched VECSEL are 10 and 8 μs, respectively, with the same repetition rate of 26.3 kHz when the pump power is 4.5 W. A maximum average output power of 33 mW is obtained from the SESAM *Q*-switched VECSEL with 7.2 W pump power, and the pulse repetition rate is 58.1 kHz, corresponding to a single-pulse energy of 0.57 μJ. With the increase in pump power, the pulse period decreases approximately exponentially in the *Q*-switched VECSELs instead of reciprocally in a typical *Q*-switched solid-state laser. The time characteristic of quantum wells in active region, i.e., the short life time of nanosecond magnitude of carriers, is the reason the pulse duration is of microsecond magnitude. Since the VECSELs can produce high output power and good beam quality simultaneously, these compact and wavelength tailorable passively *Q*-switched VECSELs have potential application in many fields when the average output power is improved and the pulse peak power is upgraded.

**Key words** lasers; *Q*-switched; external-cavity surface-emitting laser; saturable absorb; $Cr^{4+}$:YAG crystal; semiconductor saturable absorb mirror

**OCIS codes** 140.3540; 140.6810



(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net