

垂直外腔面发射激光器抽运脉冲的优化设计

张 鹏^{1,2} 戴特力^{1,2} 梁一平^{1,2} 范嗣强^{1,2} 蒋茂华^{1,2} 张 玉^{1,2}

(¹重庆师范大学物理与电子工程学院, 重庆 400047)
(²重庆市高校光学工程重点实验室, 重庆 400047)

摘要 采用脉冲抽运方式可显著改善光抽运垂直外腔面发射半导体激光器的热效应,大幅度提升激光器的输出功率。用有限元方法数值求解瞬态传热方程,得到激光器中温度升高的最大值随抽运脉冲的变化规律。讨论了抽运光脉冲宽度范围的选择,分析了抽运脉冲重复频率对激光器中温度升高最大值的影响作用,对抽运脉冲的时间宽度进行了优化设计。结果表明,对于基质去除型的 InGaAs 量子阱垂直外腔面发射激光器,抽运光脉冲的宽度介于 1~10 μs 时,激光器中最大温升值即明显下降;同时,抽运脉冲的重复频率应限制在 50 kHz 以内,以满足脉冲间隔大于激光器热弛豫时间的要求,否则激光器中会产生热量的积聚,增加最大温升值。

关键词 激光器;面发射激光器;垂直外腔;抽运脉冲;热效应

中图分类号 TN245 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0402001

Optimization of Pump Pulses in a Vertical-External-Cavity Surface-Emitting Laser

Zhang Peng^{1,2} Dai Teli^{1,2} Liang Yiping^{1,2} Fan Siqiang^{1,2} Jiang Maohua^{1,2} Zhang Yu^{1,2}

(¹College of Physics and Electronic Engineering, Chongqing Normal University, Chongqing 400047, China)
(²Chongqing High Education Key Laboratory of Optical Engineering, Chongqing 400047, China)

Abstract It has been demonstrated experimentally that pulsed pumping can significantly improve the thermal management in an optically-pumped vertical-external-cavity surface-emitting laser and upgrade the output power. In this paper, the transient heat conduction equation is solved by use of finite element method, and the maximum temperature rise in the multiple quantum wells active region of laser is focused. Based on the influences of repetition rate and pulse width of pump pulses on the maximum temperature rise, the repetition rate and pulse width of pump pulses are optimized. It can be concluded from the numerical results that, for a substrate-removed InGaAs quantum well vertical-external-cavity surface-emitting laser, the optimized pulse width is between 1 μs and 10 μs , and the optimized pulse repetition rate is no more than 50 kHz.

Key words lasers; surface-emitting laser; vertical external cavity; pump pulse; thermal effect

OCIS codes 140.5560; 140.5960; 140.6810

1 引 言

光抽运(OP)垂直外腔面发射激光器(VECSEL)结合了光抽运固体薄片激光器和半导体面发射激光器的优点,能同时获得高的输出功率和好的光束质量^[1,2]。VECSEL 波长覆盖了从可见光到近红外的宽广波段^[3,4],还可方便地进行倍频^[5]、锁模^[6]、单频^[7]

及调谐^[8]运转,具有良好的应用前景^[9,10],从而成为近年来国际上新型激光器领域的研究热点。

提高 VECSEL 的输出功率,使其从实验室走向应用,是 VECSEL 研究发展的主要方向之一。与其他任何一种激光器一样,VECSEL 的功率限制也来源于热效应。随着抽运强度的增大,有源区量子阱

收稿日期: 2012-11-09; **收到修改稿日期**: 2012-11-29

基金项目: 重庆市自然科学基金(cstcjjA40029),重庆市高校创新团队项目(201013)和重庆师范大学博士启动基金(11XLB014)资助课题。

作者简介: 张 鹏(1969—),男,博士,副教授,主要从事外腔面发射激光器、高功率光纤激光器及微纳光子器件模拟与设计等方面的研究。E-mail: gchzh2003@yahoo.com.cn

(QW)的温度会升高,导致量子阱的材料增益急剧下降^[11],同时也使得 Auger 复合这样的非辐射复合过程逐渐占据主导地位,从而加剧有源区的热沉积,形成恶性循环^[12]。此外,GaAs 基 VECSEL 激光波长会随温度上升以约 0.3 nm/K 的速度红移,使 VECSEL 有源区量子阱的周期谐振增益结构失谐。上述诸因素综合作用的结果是使激光器的模增益随温度上升而迅速减小,输出功率急剧下降直至激光器最终熄灭。

在 VECSEL 中被普遍采用的热管理措施是基质刻蚀和使用散热窗口。此外,增大抽运光斑面积、使用多增益介质、采用量子阱内抽运以及利用脉冲抽运技术,也是行之有效的降低 VECSEL 热效应的办法。其中,利用脉冲抽运方式可以显著改善 VECSEL 的热效应,大幅度提高 VECSEL 的输出功率。文献[13~15]研究了连续抽运下 VECSEL 的热效应,文献[16~18]报道了脉冲抽运 VECSEL 的实验结果,对脉冲抽运与连续抽运做了对比讨论,但没有涉及脉冲抽运方式下 VECSEL 内部具体的热过程分析。为了合理使用抽运脉冲,得到好的抽运效果,本文用有限元方法数值求解瞬态传热方程,得到 VECSEL 中温度升高的最大值随抽运脉冲的变化规律,并据此规律讨论了抽运光脉冲宽度范围的选择,分析了抽运脉冲重复频率对 VECSEL 中温度升高最大值的影响作用,对抽运脉冲的时间宽度进行了优化设计。

2 理论模型

2.1 VECSEL 中的热传导

在不考虑微尺度效应的条件下,VECSEL 中的热传导服从 Fourier 定律。当抽运源是周期性脉冲列时,描述瞬态过程的热传导方程为

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) - \nabla \cdot (\kappa \nabla T) = Q, \quad (1)$$

式中 ρ 是材料的密度, C_p 是定压比热容, T 是温度, t 是时间, κ 是热导率, Q 是热载荷密度。在柱坐标下,考虑到旋转对称性,上述热传导方程变为

$$\rho C_p r \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial r} \left(\kappa r \frac{\partial T}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\kappa r \frac{\partial T}{\partial z} \right) = rQ, \quad (2)$$

式中 r 和 z 分别为径向坐标和轴向坐标。在周期性脉冲抽运情况下,热载密度 Q 通过下式计算:

$$Q = \frac{2\eta P\alpha}{\pi\omega^2} \cdot \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega^2}\right) \cdot \exp[-\alpha(z_0 + z)]F(t), \quad (3)$$

式中 η 是吸收的抽运功率中转化成热的比例,在量子阱有源区 $\eta=1-\lambda_{\text{pump}}/\lambda_{\text{laser}}$,在其他部分 $\eta=1$; P 是抽运功率, α 和 z_0 是各部分的吸收系数和起始位置, ω 是抽运光斑半径, $F(t)$ 是周期性的时间包络函数。

2.2 VECSEL 的外延结构

本文计算的 VECSEL 有源区是 InGaAs/AlGaAs 量子阱,设计波长为 1040 nm。半导体芯片的外延结构如图 1 所示。

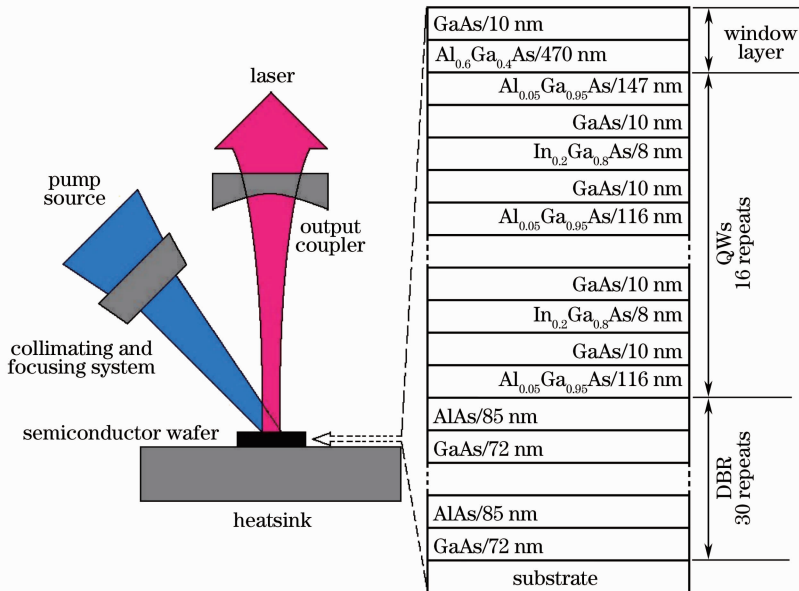


图 1 VECSEL 结构简图(左)及本文计算的半导体芯片的外延结构(右)

Fig. 1 Schematic of a VECSEL (left) and the epitaxial structure of the simulated semiconductor wafer (right)

为了简化计算过程,把半导体外延片分为四个部分(见图 1):窗口层、多量子阱有源区、分布布拉格反射镜(DBR)以及基质层。前三个部分又分别由很多层构成,每一部分总的轴向和径向热导率可由下式得到^[19~21]:

$$\kappa_z = \frac{\sum t_i}{\sum t_i / \kappa_i}, \quad \kappa_r = \frac{\sum \kappa_i t_i}{\sum t_i}. \quad (4)$$

总的吸收系数、密度和定压比热容分别为

$$\alpha = \frac{\sum \alpha_i t_i}{\sum t_i}, \quad \rho = \frac{\sum \rho_i t_i}{\sum t_i}, \quad C_p = \frac{\sum C_{pi} t_i}{\sum t_i}, \quad (5)$$

式中 κ_i 、 α_i 、 ρ_i 和 C_{pi} 分别是第 i 层的热导率、吸收系数、

密度和定压比热容, t_i 是该层厚度。在计算过程中,抽运光和激光波长分别取 808 nm 和 1040 nm, GaAs 层的吸收系数取 $0.475 \mu\text{m}^{-1}$, $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{Al}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{As}$ 量子阱层的吸收系数取 $1 \mu\text{m}^{-1}$ 。

对于 $\text{A}_x\text{B}_{1-x}\text{C}$ 类半导体三元合金,其热导率用插值公式表示^[22]:

$$\frac{1}{\kappa} = \frac{x}{\kappa_{AC}} + \frac{1-x}{\kappa_{BC}} + x(1-x)C_{ABC}, \quad (6)$$

式中 κ_{AC} 和 κ_{BC} 是二元合金 AC 和 BC 的热导率, C_{ABC} 是所谓的弯曲因子,对于 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 其值为 $0.788 \text{K} \cdot \text{m} \cdot \text{W}^{-1}$, 对于 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 其值为 $0.3 \text{K} \cdot \text{m} \cdot \text{W}^{-1}$ 。计算所用到的相关材料参数列于表 1, 半导体外延片中每个部分的相关参数列于表 2。

表 1 相关材料参数

Table 1 Related material parameters

Material	Thermal conductivity $\kappa / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	Density $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	Specific heat $C_p / (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$
GaAs	44	5317	327
AlAs	91	3730	424
InAs	27	5668	352
$\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$	7	5387	332
$\text{Al}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{As}$	27	5238	332
$\text{Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{As}$	11	4365	385

表 2 半导体外延片中各部分的计算参数

Table 2 Parameters used in the simulation for each part of semiconductor wafer

Layer	Thickness / μm	Thermal conductivity $\kappa / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$		Density $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	Specific heat $C_p / (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$
		κ_r	κ_z		
Window	0.48	12	11	4385	384
QWs	2.291	27	24	5253	332
DBR	4.71	69	61	458	380
Substrate	350	44	44	5317	327

3 抽运脉冲的优化设计

用有限元方法在柱坐标下数值求解(2)式得到 VECSEL 中温度的分布情况。在计算中除了与热沉相连的下表面温度设为恒定值 300 K, 其余边界均设为绝热条件。瞬态求解的初始值也设定为均匀的 300 K 外, 求解范围是 $0 \leq r \leq 500 \mu\text{m}$ 。抽运光脉冲的时间包络函数用方波, 功率 $P = 10 \text{W}$, 抽运光斑半径 $\omega = 100 \mu\text{m}$ 。

3.1 抽运光脉冲宽度的选择

与仅有几微米的有源层厚度相比, VECSEL 的基质层往往有几百微米的厚度, 其热导率又较低, 因此基质层的存在严重阻碍了热量从有源区向热沉的传导, 使 VECSEL 有源区温度的上升很容易超出激光器能够承受的范围, 极大地限制了 VECSEL 的输出功率。图 2(a) 和 (b) 分别是基质存在和基质去除

了的 VECSEL 中温度最大值的分布情况, 抽运脉冲宽度为 $300 \mu\text{s}$, 重复频率是 2 kHz。一般来讲, VECSEL 中的最大温升应控制在 100 K 以内, 而图 2(a) 中的温度上升远远超过了这个限度, 所以, 实验中 VECSEL 的基质一般都是去除了的。本文以下的所有模拟分析都不再考虑基质部分。

脉冲抽运光可从多种途径获得, 包括采用机械的方法, 使用斩波器把连续抽运光变为脉冲光, 以及采用电子的方法对连续半导体抽运光的激励源进行调制产生脉冲光, 或者直接利用脉冲工作的半导体抽运光源。第一种方法由于受电机转速的限制, 获得的光脉冲宽度在毫秒至数百微秒之间, 重复频率最高可至千赫兹量级; 第二种方法能产生宽度在微秒至纳秒量级的脉冲, 重复频率可达百千赫兹; 第三种已有商品化出售的脉冲激光二极管的脉冲宽度可

在数百至十几纳秒之间,重复频率数千赫兹。皮秒及飞秒量级的脉冲需要锁模才能得到,且在此时间

尺度上的热传导不再适合用 Fourier 定律分析,超出了本文讨论的范围。

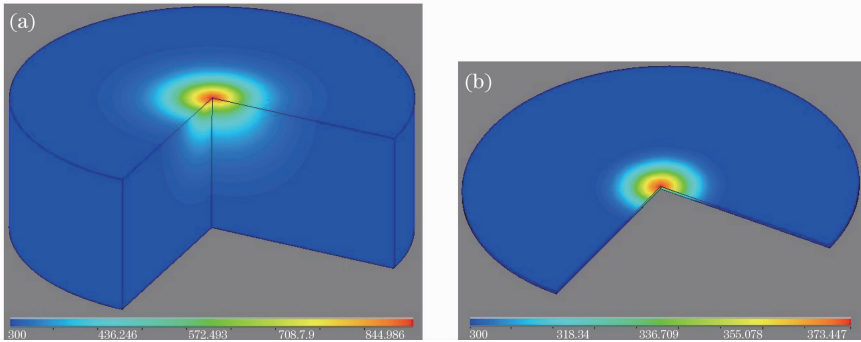


图 2 (a)有基质及(b)无基质时 VECSEL 内最大温度分布(抽运光脉冲宽度为 $300\ \mu\text{s}$, 重复频率为 $2\ \text{kHz}$)
 Fig. 2 Maximum temperature in a VECSEL (a) with and (b) without substrate (the pulse width and repetition rate are $300\ \mu\text{s}$ and $2\ \text{kHz}$, respectively)

要优化 VECSEL 的抽运脉冲,首先必须确定抽运光脉冲的宽度处于什么量级时,既能充分发挥脉冲抽运的优势,又能在较低的成本上较为方便地从技术上实现。图 3 给出了处于不同量级脉冲宽度的抽运下 VECSEL 内最大温升随抽运时间的变化关系,图中标出了温度上升的最大值,抽运脉冲的重复频率都没有超过 $50\ \text{kHz}$,其原因会在后文涉及。由图 3 明显可见,当抽运脉冲宽度处于数百微秒和数十微秒的量级时,温升的最大值都一样,与连续抽运时产生的最大温升相同,此时脉冲抽运与连续抽运

相比并无明显优势。当抽运脉冲宽度降到几微秒的量级时,VECSEL 内的最大温升出现了明显的下降,此时若采用脉冲抽运,VECSEL 便能承受更高的峰值抽运功率,从而获得更高的平均输出功率。当抽运脉冲的宽度继续下降到几分之一微秒量级时,VECSEL 内最大温升继续下降,但从另一方面来看,一是技术上将脉冲宽度再降低一个数量级会更难,二是在 VECSEL 内控制如此小的温升并不十分必要,所以,综合考虑,抽运光脉冲的宽度处于数微秒的量级比较合适。

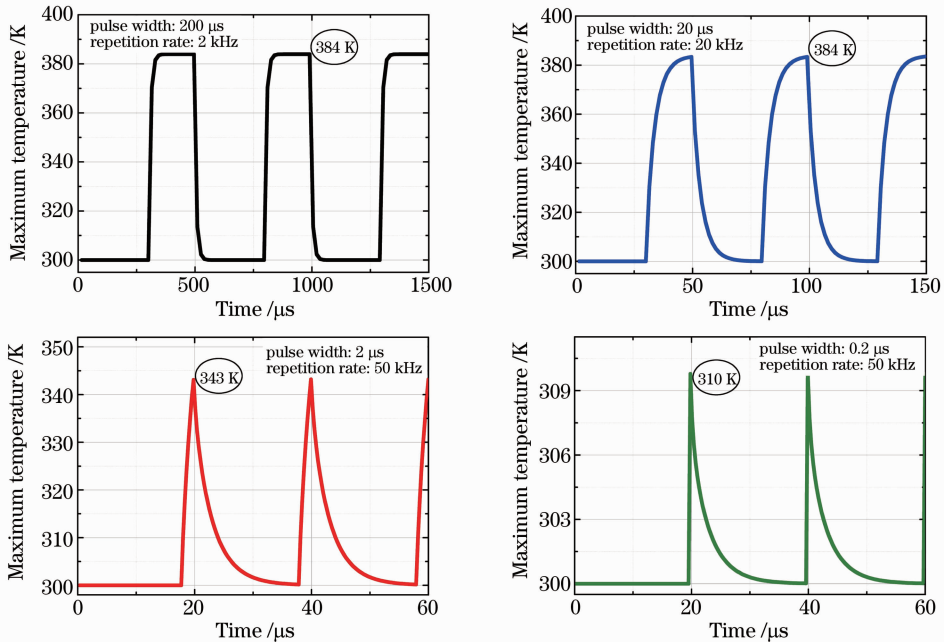


图 3 不同量级的抽运脉冲宽度下,VECSEL 内温度随抽运时间的变化关系
 Fig. 3 Temperature versus pumping time under different pump pulse widths

图 4 给出了不同脉冲宽度时 VECSEL 内的最大温升值,由于横轴所代表的脉冲宽度在数值上跨

度较大,所以采用了对数坐标。该图更清楚地显示,当抽运脉冲宽度介于 $1\sim 10\ \mu\text{s}$ 的区间时,VECSEL

内最大温升与连续抽运相比较,有明显的下降。而当脉冲宽度大于 $10 \mu\text{s}$ 时,脉冲抽运的优势并不明显,当脉冲宽度小于 $1 \mu\text{s}$ 时,如前所述,会增加实现技术上的难度。所以,对于 InGaAs 量子阱 VECSEL,抽运光脉冲的宽度介于 $1 \sim 10 \mu\text{s}$ 是优化后的选择,从实验上讲,可采用电子的方法对连续工作半导体抽运光的激励源进行调制,来获得脉冲抽运需要的光脉冲。

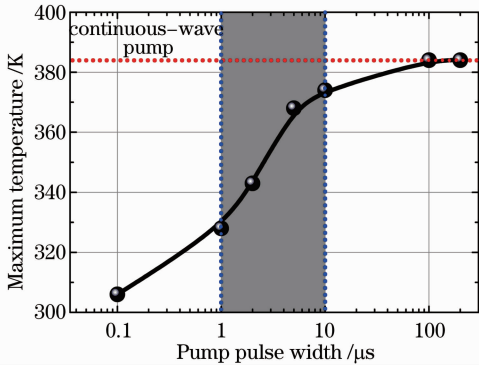


图 4 不同抽运脉冲宽度下 VECSEL 内的最大温升
Fig. 4 Maximum temperature rise in a VECSEL with different pump pulse widths

3.2 抽运光脉冲重复频率的限制

在脉冲抽运方式下,为了获得高的平均输出功率,往往使用较高重复频率的抽运脉冲。但如果脉冲的重复频率过高,以至于抽运脉冲之间的时间间隔小于激光器的热弛豫时间,就会导致上一个抽运脉冲所产生的热量尚未完全传导出时,下一个脉冲又已经到来,形成热量在激光器中的聚集,出现较大的温度升高。图 5 展示了抽运脉宽为 $1 \mu\text{s}$,重复频率分别为 200 kHz 和 50 kHz 时,VECSEL 内最大温度随抽运时间的变化关系。为了便于对比观察,图中还给出了强度归一化的抽运脉冲曲线。图 5(a)表明,因为抽运脉冲的重复频率过高,第一个脉冲产生热量引发的温度上升还未弛豫到初始温度 (300 K) 时,第二个脉冲产生的热量又叠加其上,使得激光器最终在一个较高的温度水平上达到热平衡。而在图 5(b)中,重复频率减小,抽运脉冲之间间隔增大,每一个抽运脉冲所产生的热都能完全传导出,激光器有足够的时间弛豫到最初的温度状态 (300 K),所以激光器的最大温度值相对较低。

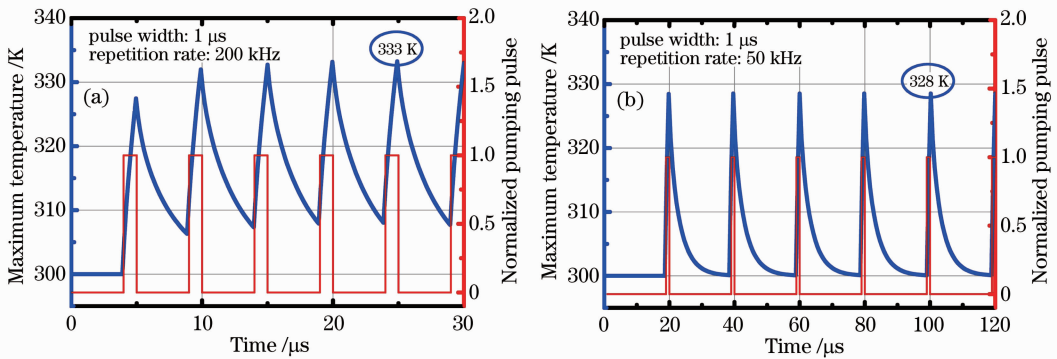


图 5 抽运脉冲宽度为 $1 \mu\text{s}$,重复频率分别为(a) 200 kHz 和(b) 50 kHz 时 VECSEL 内最大温度随抽运时间的变化关系
Fig. 5 Maximum temperature in VECSEL versus pumping time at (a) 200 kHz and (b) 50 kHz repetition rates (the pump pulse width is $1 \mu\text{s}$)

图 6 是脉冲宽度为 $2 \mu\text{s}$ 时,VECSEL 内最大温升与抽运脉冲重复频率的关系曲线。很明显,当抽运脉冲的重复频率高于 50 kHz 时,VECSEL 内的最大温度上升值会明显增大,因而在设计脉冲抽运 VECSEL 时,必须注意到抽运脉冲重复频率的这一限制。根据 50 kHz 脉冲重复频率这一数据,可以估计本文所讨论的 InGaAs 量子阱 VECSEL 的热弛豫时间大约为 $20 \mu\text{s}$,这个数值与文献[23,24]的实验结果数量级相同,而其具体数值显然是与具体的材料组分及结构有关的。

4 结 论

通过数值分析脉冲抽运方式下 VECSEL 内的最大温度升高,对 VECSEL 的抽运脉冲进行了优化设计。对于基质去除型 InGaAs 量子阱 VECSEL,可对连续抽运光的激励源进行调制得到脉冲抽运光,光脉冲的优化宽度是 $1 \sim 10 \mu\text{s}$;同时,抽运脉冲的重复频率应限制在 50 kHz 以内,以使脉冲间隔大于激光器的热弛豫时间,把激光器中的温度上升控制在最低值。

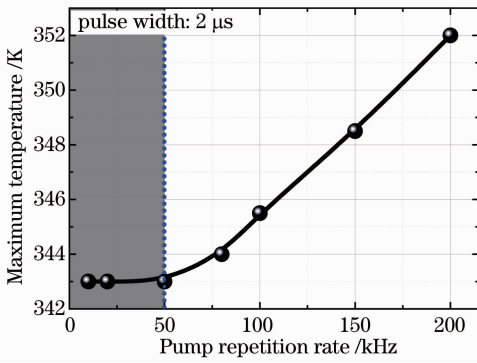


图 6 脉冲宽度为 2 μs 时 VECSEL 内最大温升与抽运脉冲重复频率的关系

Fig. 6 Maximum temperature rise of VECSEL versus pump pulse repetition rates (the pulse width is 2 μs)

参 考 文 献

1 M. Kuznetsov, F. Hakimi, R. Sprague *et al.*. High-power (>0.5 W CW) diode-pumped vertical external-cavity surface-emitting semiconductor lasers with circular TEM₀₀ beams[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1997, **9**(8): 1063~1065

2 A. C. Tropper, S. Hoogland. Extended cavity surface-emitting semiconductor lasers[J]. *Prog. Quant. Electron.*, 2006, **30**(1): 1~43

3 B. Rudin, A. Rutz, M. Hoffmann *et al.*. Highly efficient optically pumped vertical-emitting semiconductor laser with more than 20 W average output power in a fundamental transverse mode[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(22): 2719~2721

4 M. Rahim, A. Khair, M. Fill *et al.*. Continuously tunable single mode VECSEL at 3.3 μm wavelength for spectroscopy[J]. *Electron. Lett.*, 2011, **47**(18): 1037~1039

5 Yanrong Song, Peng Zhang, Xinping Zhang *et al.*. Intracavity frequency-doubled green vertical external cavity surface emitting laser[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(4): 271~273

6 U. Keller, A. C. Tropper. Passively modelocked surface-emitting semiconductor lasers[J]. *Phys. Rep.*, 2006, **429**(2): 67~120

7 A. Laurain, M. Myara, G. Beaudoin *et al.*. High power single-frequency continuously-tunable compact extended-cavity semiconductor laser [J]. *Opt. Express*, 2009, **17** (12): 9503~9508

8 Peng Zhang, Yanrong Song, Xinping Zhang *et al.*. Tunable high beam quality and narrow linewidth semiconductor disk laser[J]. *Opt. Engng.*, 2010, **49**(10): 104201

9 R. A. Espinosa, G. Filippidis, C. Hamilton *et al.*. Compact ultrafast semiconductor disk laser targeting GFP based nonlinear applications in living organisms[J]. *Opt. Express*, 2011, **2**(4): 739~747

10 R. G. Bedford, T. Dang, D. Tomich. Recent VECSEL developments for sensors applications [C]. *SPIE*, 2012, **8242**: 82420W

11 Peng Zhang, Yanrong Song, Jinrong Tian *et al.*. Gain characteristics of the InGaAs strained quantum wells with GaAs, AlGaAs, and GaAsP barriers in vertical-external-cavity surface-emitting lasers[J]. *J. Appl. Phys.*, 2009, **105**(5): 053103

12 J. Hader, J. V. Moloney, S. W. Koch. Microscopic evaluation of spontaneous emission and Auger processes in semiconductor lasers[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2005, **41**(10): 1217~1226

13 A. J. Kemp, J. M. Hopkins, A. J. Maclean *et al.*. Thermal management in 2.3 μm semiconductor disk lasers: a finite element analysis[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2008, **44**(2): 125~135

14 Chen Baizhong, Dai Teli, Liang Yiping *et al.*. Finite element analysis of thermal management in optical pumping semiconductor vertical external cavity surface emitting laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(10): 2745~2750

陈柏众, 戴特力, 梁一平等. 用有限元法讨论光抽运垂直外腔面发射半导体激光器的热特性[J]. *中国激光*, 2009, **36**(10): 2745~2750

15 Liu Xiangnan, Wang Xiaohua, Wang Fei *et al.*. Analysis of thermal characteristics in optically pumped semiconductor vertical external cavity surface emitting laser with double heatspreader [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(9): 091404

刘向南, 王晓华, 王菲等. 双散热片结构光抽运垂直外腔面发射激光器的热特性分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, **48**(9): 091404

16 N. Hempler, J. M. Hopkins, A. J. Kemp *et al.*. Pulsed pumping of semiconductor disk lasers[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(6): 3247~3256

17 K. W. Su, S. C. Huang, A. Li *et al.*. High-peak-power AlGaInAs quantum-well 1.3-μm laser pumped by a diode-pumped actively Q-switched solid-state laser [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(13): 2009~2011

18 W. J. Alford, T. D. Raymond, A. A. Allerman. High power and good beam quality at 980 nm from a vertical external cavity surface emitting laser[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2002, **19**(4): 663~666

19 H. Lindberg, M. Strassner, E. Gerster *et al.*. Thermal management of optically pumped long-wavelength InP-based semiconductor disk lasers[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2005, **11**(5): 1126~1134

20 S. L. Vetter, S. Calvez. Thermal management of near-infrared semiconductor disk lasers with AlGaAs mirrors and lattice (mis) matched active regions[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2012, **48**(3): 345~352

21 Peng Zhang, Yanrong Song, Xinping Zhang *et al.*. Numerical analysis of thermal effects in InGaAs system vertical-external-cavity surface-emitting laser [J]. *Opt. Rev.*, 2011, **18** (4): 317~323

22 S. Adachi. Lattice thermal resistivity of III-V compound alloys [J]. *J. Appl. Phys.*, 1983, **54**(4): 1844~1848

23 Cheng Can, Xin Guofeng, Pi Haoyang *et al.*. Measurement of thermal relaxation time of high power semiconductor lasers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(12): 1671~1674

程 灿, 辛国锋, 皮浩洋等. 大功率半导体激光器热弛豫时间的测量[J]. *中国激光*, 2006, **33**(12): 1671~1674

24 P. K. L. Chan, K. P. Pipe, Z. Mi *et al.*. Thermal relaxation time and heat distribution in pulsed InGaAs quantum dot lasers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **89**(1): 011110

栏目编辑:张 腾