

半导体薄片激光器窗口散热模式的热效应

朱仁江^{1,2,3}, 潘英俊^{1*}, 张鹏^{2,3}, 戴特力^{2,3}, 范嗣强^{2,3}, 梁一平^{2,3}

- (1. 重庆大学 光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400030;
2. 重庆师范大学 物理与电子工程学院, 重庆 401331;
3. 重庆市高校光学工程重点实验室, 重庆 401331)

摘要: 基于垂直外腔面发射半导体激光器窗口散热模式的传热模型, 用有限元法计算了不同条件下量子阱有源区的温度变化, 建立了量子阱最高温度的等效热阻模型和计算公式, 并通过拟合确定了热阻模型的相关参数. 计算表明量子阱最高温度与抽运功率存在线性关系, 与光斑面积近反比关系, 窗口散热片可显著降低量子阱有源区温度和温度的不均匀度. 等效热阻模型表明由于半导体晶片内热流在径向难以扩散, 热传导中存在较大串联热阻, 使得散热片热扩散能力趋于饱和, 其中碳化硅的散热性能约为金刚石的75%.

关键词: 半导体薄片激光器; 热效应; 热阻; 散热片

中图分类号: TN248.4 文献标识码: A

Numerical analysis of thermal effects in semiconductor disk laser with heatspreader

ZHU Ren-Jiang^{1,2,3}, PAN Ying-Jun^{1*}, ZHANG Peng^{2,3}, DAI Te-Li^{2,3},
FAN Si-Qiang^{2,3}, LIANG Yi-Ping^{2,3}

- (1. Key Laboratory of Opto-Electronic Technology & System, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400030, China;
2. College of Physics and Electronic Engineering, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China;
3. Chongqing Key Laboratory of Optical Engineering, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China)

Abstract: Based on the heat transfer model of vertical external cavity surface emitting semiconductor laser with heatspreader, the change in temperature of the quantum well active region has been calculated under different conditions with the finite element method. The equivalent thermal resistance model has been proposed and calculation formula has been derived for the maximum temperature of quantum well, the parameters of which are determined by fitting curves. The calculation shows that the maximum temperature of the quantum well increases linearly with the pump power, while it is nearly inversely proportional to the light spot area. The heatspreader can significantly reduce temperature and its unevenness in the active region of the quantum well. The equivalent thermal resistance model shows that a larger thermal resistance forms due to the difficulty of heat flux to spread in the radial direction, thus thermal diffusion capacity of the heatspreader tends to saturation. As a result the thermal performance of silicon carbide is approximately 75% of that of the diamond.

Key words: semiconductor disk laser, thermal effects, thermal resistance, heatspreader

PACS: 42.55.Px

引言

光抽运垂直外腔面发射半导体激光器 (vertical-external-cavity surface-emitting lasers, VECSELs) 具

有薄片激光器近衍射极限光束质量的优点, 同时基于半导体增益材料特性, 可获得高的量子效率和吸收截面, 并通过能带工程可实现发射波长从可见光到近红外的广泛区域, 并且其外腔结构能方便地进

收稿日期: 2013-04-16, 修回日期: 2014-03-06

Received date: 2013-04-16, revised date: 2014-03-06

基金项目: 国家自然科学基金(61008059); 重庆市教委科技项目(kj110618)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China(61008059), Scientific Research Foundation of Chongqing Municipal Education Commission (kj110618)

作者简介 (Biography): 朱仁江 (1975-), 男, 四川双流人, 重庆师范大学物理与电子工程学院副教授, 重庆大学博士研究生, 主要从事半导体激光器及其封装技术研究. E-mail: hhzrj@163.com.

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: pyj@cqu.edu.cn.

行腔内倍频^[1]、调谐^[2]和锁模运行^[3],在光通讯、激光显示、激光医学和生物分析等许多领域中有着广泛的应用前景。

图 1 所示的 VECSELs 外延片由衬底、分布式布拉格反射镜(distributed Bragg reflector, DBR)、应变多量子阱(quantum Wells, QWs)和窗口层组成。由于 VECSELs 的量子阱有源区只有数微米导致其阈值功率密度达到万瓦每平方厘米的水平,同时半导体增益材料对温度敏感,这对热管理工艺提出苛刻要求。当 VECSELs 温度升高时会使材料折射率发生变化,引起激活区微腔以及布拉格中心反射波长变化。此外量子阱的材料增益下降^[4],波长红移^[5],阈值功率增加,非辐射复合会逐渐上升占据主导地位^[6]。上述诸因素的综合作用加剧激光器热沉积,形成恶性循环,使激光器功率下降直至热熄灭。VECSELs 散热主要有两种途径:将倒置结构芯片的 DBR 层焊接在热沉上,由于热传导方向没有衬底层,减小了传导热阻,并通过腐蚀工艺除去衬底露出发射窗口;或将金刚石、碳化硅、蓝宝石等高热导率的透明散热片直接键合在发射窗口面来降低热流密度,并通过热沉散热。窗口散热模式工艺简单,而且对其热效应的数值分析可深入了解耗散热的产生与传导过程,分析材料热导率等诸多参数对量子阱有源区温度的具体影响。目前 VECSELs 热效应的数值

分析主要以定性为主,^[7-9]因而本文通过计算窗口散热模式中各参数对量子阱温度的影响,建立半导体激光器的热传导模型,为散热系统设计与实验改进提供参考。

1 VECSELs 热模拟模型

为突出窗口散热模式下 VECSELs 热管理效应,模型做如下处理:(1)由于目前采用光纤耦合半导体激光器极大地改善了半导体激光器阵列光束对称性差、光斑不均匀等问题,本文拟定抽运光源为基模高斯光束;(2)抽运源具有轴对称形式,将 VECSELs 热分析做三维轴对称处理,只分析其轴向和径向温度变化;(3)半导体晶片衬底与热沉引起的附加热阻和冷却方式相关,本文不考虑其引起的温度平移,将 DBR 面设置为恒温 300 K,模型和空气接触面作绝热处理。计算中抽运光和激光波长分别是 808 nm 和 1040 nm,模拟中所用材料的相关参数如表 1 所示,对于三元化合物,其热导率可利用插值公式计算:

$$\frac{1}{k_x} = \frac{x}{k_{AC}} + \frac{1-x}{k_{AB}} + x(1-x)C_{ABC}, \quad (1)$$

其中 k_{AB} 和 k_{AC} 分别是二元化合物热导率, C_{ABC} 是 bowing 参数,对于 InGaAs 和 AlGaAs 分别是 $788 \text{ K} \cdot \text{m/W}$ 和 $300 \text{ K} \cdot \text{m/W}$ 。

VECSELs 三个功能区是由多层外延结构组成的复合层,其等效热导率在轴向和径向分布可表示为:

$$k_z = \frac{\sum d_i}{\sum \frac{d_i}{k_i}}, \quad (2) \quad k_r = \frac{\sum k_i d_i}{\sum d_i}, \quad (3)$$

其中, k_i 和 d_i 是第 i 层外延材料的热导率和厚度。计算表明 k_r 和 k_z 差异很小,且热流主要沿径向传输,同时文献[10]研究表明不考虑热导率的各向异性所带来的误差不超过 2%,因而本文在数值模拟中采用 k_z 作为复合层热导率。

表 1 数值模拟中所用材料参数

Table 1 Parameters used in the numerical simulation

Material	Thermal conductivity (W/(m·K))	Absorption coefficient (μm^{-1})
GaAs	44	0.457
AlAs	91	0
InAs	27	0
$\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$	7	1
$\text{Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{As}$	11	0
$\text{Al}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{As}$	27	1
Diamond	2000	0
SiC	490	0

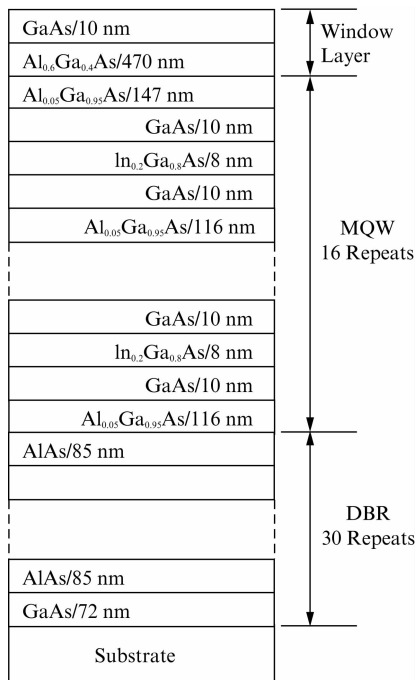


图 1 半导体晶片的外延结构

Fig. 1 Epitaxial structure of the semiconductor wafer

复合层对抽运光的吸收系数为:

$$a = \frac{\sum a_i d_i}{d_i} \quad (4)$$

轴对称柱坐标系下, 稳态的导热微分方程形式为:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial u}{\partial z} \right) + q_v = 0 \quad (5)$$

其中 u 和 q_v 分别是温度和热密度. 考虑抽运源为高斯基模光束, 则各层热密度可以表示为:

$$q_v(r, z) = \eta \frac{dI}{dz} \quad (6)$$

$$= \frac{2\eta P_0 a}{\pi \omega^2} \cdot \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega^2}\right) \cdot \exp[-a(z_0 - z)] \cdot \beta(z)$$

其中 η 是指将吸收的抽运能量转换为热的系数, 对于 QWs 有源层, $\eta = 1 - \frac{\lambda_{pump}}{\lambda_{laser}}$, 对其余各层, η 均取 1; 由于 VECSELs 厚度只有数微米, 可忽略轴向光斑半径变化, 取 ω 为入射光斑大小. I 是抽运光光强, P_0 为抽运光功率. z_0 是特定复合层的起始坐标, 在计算时, 以 DBR 最下方为起始坐标, 标定为零, 往上延伸的坐标取正值. $\beta(z)$ 为分段衰减系数, 当忽略窗口层的吸收时, 窗口层和 QWs 层的 β 为 1, DBR 层 β 为光在 QWs 中的衰减系数.

将式(5)做变化后有:

$$-\nabla \cdot (kr \nabla u) = -rq_v \quad (7)$$

而 Matlab 的偏微分方程(PDE)工具箱中椭圆型方程具有如下形式:

$$-\nabla \cdot (c \nabla u) + au = f \quad (8)$$

当 $a=0$ 时, 式(8)和(7)一致, 即可以使用 Matlab 的 PDE 工具箱数值分析具有轴对称的 VECSELs 热效应问题.

2 结果与讨论

在本文模拟分析中除非特别说明, 抽运功率和光斑半径分别设定为 10 W 和 50 μm , 所有窗口层散热器厚度设定为 300 μm , QWs 中各量子阱从 DBR 侧从 1 开始依次编号. 由于抽运光入射到 VECSELs 各层后, 其强度依次衰减为入射光强的 99.5%、10.3% 和 3.86%, 可见抽运光主要被 QWs 吸收, 因而本文忽略窗口层吸收同时只考虑抽运光的单程衰减.

2.1 散热窗口片对 QWs 温度的影响

如图 2 所示为 VECSELs 窗口层上方绝热和键合金刚石窗口散热片时热流分布图(为保持坐标一致性, 金刚石只截取了 0.36 μm 厚度). 当没有窗口

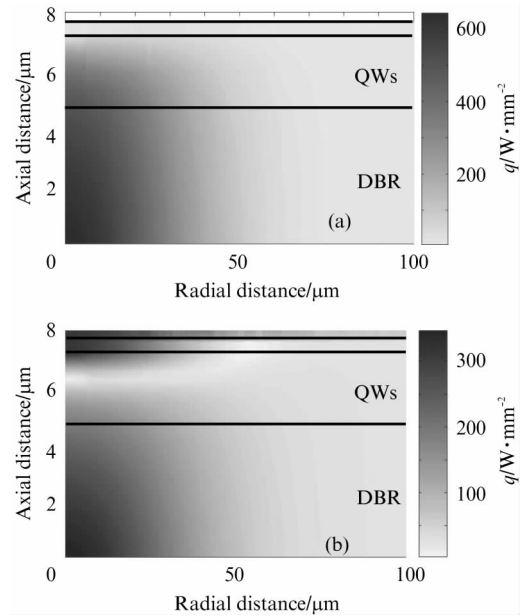


图 2 半导体薄片激光器热流分布图 (a) 没有窗口散热片, (b) 金刚石窗口散热片

Fig. 2 Heat flux distribution of VECSELs (a) without heatspreader, (b) with diamond heatspreader

散热片时, QWs 主要沿轴向通过 DBR 层和热沉进行热交换, 同时沿轴向增加的热源使得热流密度不断增大. 添加金刚石窗口散热片后, 其高热导率引起的热扩散效应使得窗口层侧的热阻明显减小, 部分靠近窗口层侧量子阱的热量完全通过窗口层传导, 分流的结果使得外延片中热流密度减小了近一倍, VECSELs 片整体温度明显下降. 同时 QWs 中热流密度处于低值区间, 量子阱间的温差显著减小, VECSELs 对温度的敏感性下降.

通过在数值解中抽取各量子阱中心温度变化, 研究了窗口散热片不同热导率的散热效果. 如图 3 所示, 没有窗口散热片时, 靠近窗口层侧量子阱温度最高, 随着量子阱编号减小, 温度单调下降, 斜率却逐渐增大. 根据傅里叶定律, 温度梯度反应了热流量的变化, 这与图 2 的结论一致. 由于抽运光功率在量子阱中按指数衰减, 耗散热主要集中在窗口层侧, 使得靠近 DBR 侧斜率变化不大. 随着窗口散热片热导率增加, 热流分流效果不断提高, 从 QWs 层轴向传递至 DBR 的热流强度下降, 因而反映热流强度在 DBR 层引起的温度升高状况的曲线起始温度也不断下移, 同时系统整体热阻下降, 使得量子阱温度分布曲线不断下移. 增加窗口散热片后, 高编号量子阱温度下降明显, 表明窗口散热片对半导体薄片激光器控温有着重要作用. 当散热片热导率大于

200 W · m⁻¹ · K⁻¹ 时, 曲线出现拐点, 量子阱最高温度点左移, 部分靠近窗口层的量子阱完全通过窗口散热片散热. 图中下方三条曲线近似等距变化显示窗口散热片热导率增加引起的改变趋于饱和, 对比无窗口散热片的 QWs 温度变化, 碳化硅片的散热性能已接近金刚石片.

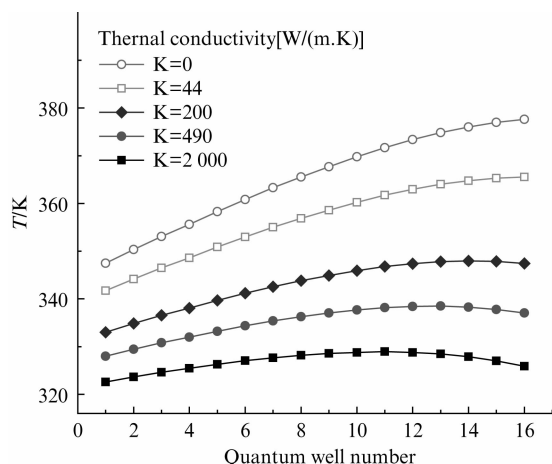


图3 散热片热导率对量子阱温度的影响
Fig. 3 The temperature of QWs versus thermal conductivity of the heatspreader

2.2 抽运功率对 QWs 温度的影响

图4 考察了抽运光斑半径不变时, 具有金刚石窗口散热片的外延片各量子阱最高温度随抽运功率的响应情况, 从图中可以看出这是典型的线性关系. 为简化处理可将每个量子阱热源视作点热源, 各个量子阱的温度响应是由所有点热源作用之和, 在稳态时量子阱温度变化服从标量叠加定理, 结合式(6)可表示为:

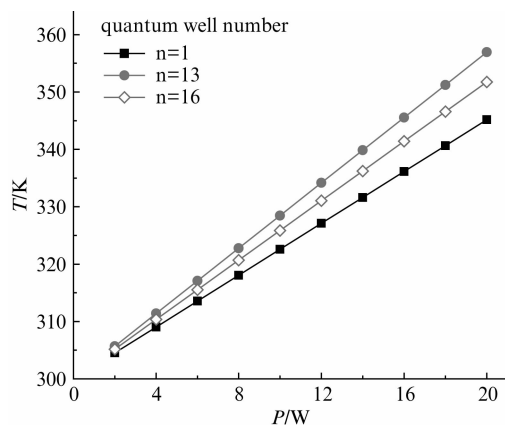


图4 抽运功率对量子阱最高温度的影响
Fig. 4 The maximum temperature of QWs versus pump power

$$\Delta t_i = \sum_{j=1}^N (R_{ij} \eta P_j) \quad , \quad (9)$$

其中下标 i, j 为量子阱编号, N 是量子阱总数, Δt_i 是第 i 个量子阱温度变化, ηP_j 是量子阱 j 单位时间内产生的热量. R_{ij} 为热阻矩阵, 衡量了量子阱 j 处的点热源在 i 处引起的温度变化, 是空间位置 i, j 以及边界条件的函数, 其表达式复杂. 若考虑传热模型不变, 即 VECSELs 热导率与温度无关以及散热器与抽运光半径不变的时, R_{ij} 反映了系统导热特性且是与 P_j 无关的常数, 同时 P_j 具有如下形式:

$$P_j = A^{N+1-j} P_0 = A_j P_0 \quad , \quad (10)$$

其中 A 是抽运光经过单层量子阱的光强衰减系数, P_0 是抽运功率. 结合上述两式, 量子阱升温可以表示为:

$$\Delta t_i = \sum_{j=1}^N (R_{ij} A_j P_0) = \left(\sum_{j=1}^N R_{ij} A_j \right) P_0 = R_i P_0 \quad , \quad (11)$$

这里 R_i 是量子阱 i 的等效热阻, 上式表明, 量子阱传热的等效热阻由系统自身参数决定, 其温度变化和抽运功率成线性关系, 进一步分析可以得到 QWs 中量子阱最大温差变化随抽运功率也存在线性关系.

2.3 VECSELs 的量子阱最高温升的热阻模型

由式(11)可知, 当散热系统不变时, 系统的热流通路即等效热阻就固定不变了. 为了定量衡量不同热导率的窗口散热片控温能力, 如图5所示, 我们根据半导体激光器的热流分布特点, 建立了激光器热阻拓扑模型. 由图2可知, 系统存在两条并联热流通路, DBR 侧量子阱热量沿轴向通过 DBR 层与热沉进行热交换; 而窗口层侧则通过窗口层后经散热片扩散再沿轴向传递至热沉. 根据式(11), 量子阱最大温升和抽运功率成线性关系, 可将模型视作点热源, 利用热阻模型可建立量子阱最高温升和热源的表达式如下:

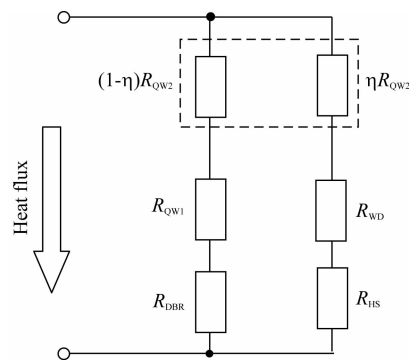


图5 半导体激光器的热阻拓扑
Fig. 5 Thermal resistance network of VECSELs

$$\Delta t = P_D \cdot \left[\frac{(R_{DBR} + R_{QW1} + (1 - \eta)R_{QW2})}{(\eta R_{QW2} + R_{WD} + R_{HS})} \right], (12)$$

其中 P_D 是激光器的耗散热功率,当抽运功率 10 W 时, P_D 为 2.65 W. R_{DBR} 、 R_{WD} 分别是 DBRs 层和窗口层热阻. 由于热流方向在 QWs 层中发生改变,部分靠近窗口层的量子阱热流方向和散热片热导率相关,因而将热阻分成 R_{QW1} 和 R_{QW2} 两部分,参数 η 表示 R_{QW2} 部分与热导率 k 相关,近似取指数形式 $\eta = \exp(-B/k)$, $R_{HS} = \frac{A}{k}$ 表示窗口散热片与热沉之间的热阻,其与散热片热导率成倒数关系.

为了确定热阻模型中各参数,如图 6 中圆点所示,我们模拟了散热片不同热导率对量子阱最高温升的影响. 然后根据式 (12) 进行数据拟合,如图中虚线所示,二者较好的重合,显示模型具有较高的精度. 拟合的各参数值如表 2 所示:

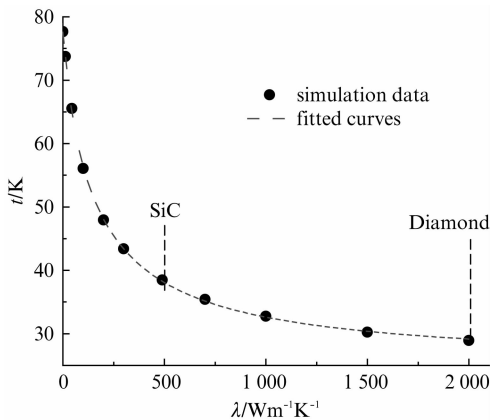


图 6 散热片热导率对量子阱最高温度的影响及热阻拟合曲线

Fig. 6 The maximum temperature of QWs versus thermal conductivity of heatspreader and thermal resistance fitted curves

表 2 热阻模型的参数拟合值

Table 2 The fitted values for parameters in the model

Parameters	$R_{DBR} + R_{QW1}$ ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)	R_{WD} ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)	R_{QW2} ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)	A	B
Value	26.327	11.804	2.935	8.403	35.42
Standard Error	0.999	0.922	0.975	721	8.09

从表 2 可以看出,VECSELs 窗口层上方绝热时,虽然 DBR 层热导率较高,且厚度只有数微米,但其等效热阻高达 29.3 $^{\circ}\text{C}/\text{W}$,计算其等效热流通道半径约 30 μm ,这和图 2 的结论一致,这表明由于轴向传输路径只有数微米,半导体芯片在其径向基本没有热扩散能力,考虑到 DBR 层热导率并不低,其下方的衬底和热沉的等效热阻必然会使芯片温度产

生更大的平移,使得 VECSELs 较快出现热熄灭,甚至不出光. 采用金刚石窗口散热片时,由于其热导率高,热流径向扩散作用明显,系统等效热阻下降为 11 $^{\circ}\text{C}/\text{W}$,量子阱最高温升约为原来的 1/3. 但由于外延片窗口层同样存在较大的串联热阻,这使得通过提高窗口散热片热导率进行控温趋于饱和. 当采用热导率只有金刚石四分之一的 SiC 薄片时,等效热阻为 14.4 $^{\circ}\text{C}/\text{W}$,控温能力约为金刚石片的 76.2%,因而在对功率密度要求不是太苛刻的情况下,可替代金刚石散热片.

2.4 抽运光斑半径对 QWs 温度的影响

尽管已确定量子阱温度变化和抽运功率密度成线性关系,但热源的径向分布函数和抽运光斑半径相关. 基于此图 7 考察了量子阱最高温度随光斑面积倒数的响应关系,可以看出二者基本成线性关系,显示高斯光束径向衰减项对量子阱最大温差影响很小,其原因在于热流主要是沿轴向传递,温度变化和径向关联不大. 尽管绝热模型的斜率远大于 SiC 和金刚石散热器,水平虚线表明绝热模型下光斑半径增大一倍其散热效果大于散热片对 VECSELs 温度改善,因而适当扩大抽运光半径对减小热效应是不错的选择,但受制于激光器阈值和效率,需要综合考虑热管理的最优化问题.

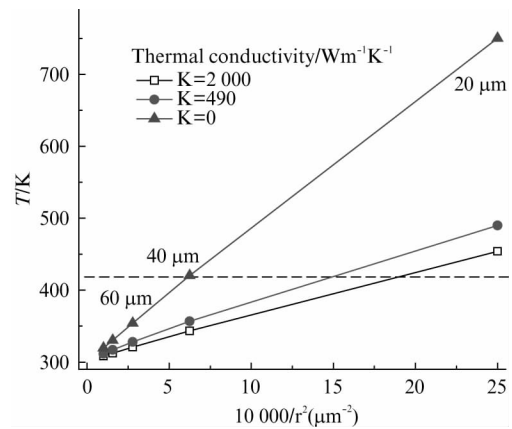


图 7 光斑半径对量子阱最高温度的影响

Fig. 7 Radius dependence of the maximum temperature of QWs

3 结论

VECSELs 的热管理对其输出效率乃至是否出光都至关重要,本文通过数值模拟分析了窗口散热模式下激光器的热效应问题,计算表明通过窗口散热片的热扩散可明显降低量子阱有源区的热流密

度,使其最高温度和不均匀度显著下降. QWs 中各量子阱的温度响应与抽运功率存在线性关系,与光斑面积近反比关系. 并建立了激光器量子阱有源区的等效热阻模型和最高温度的表达式,通过拟合确定了模型中各参数值. 半导体激光器耗散热功率并不高,但其主要集中在靠近窗口层侧抽运光斑半径内的微米厚度,其热功率密度极高,这需要高热导率的窗口散热片来增加热流通路和扩散以减小热流密度. 而半导体薄片内热流径向难以扩散,导致 DBR 和窗口层的等效串联热阻很大,使得窗口散热片热扩散能力易趋于饱和,其中 SiC 薄片的散热性能约为金刚石的 75%,是较为理想的散热材料. 适当扩大抽运光半径可有效降低热流密度,对减小热效应最为明显. 当抽运光斑不均匀时,在激光器相应区域存在与光斑形状一致的热源强度分布,可将非均匀热源视作多个热源的叠加,虽然温度场会产生一定变化,但对本文结论不会产生影响. 激光器的热管理有降低热流密度和减小传递热阻两种手段,对于不同热沉及其冷却方式所引起的串联热阻变化,我们将作进一步更深入研究.

References

- [1] Song Y, Zhang P, Zhang X, *et al.* Intracavity frequency-doubled green vertical external cavity surface emitting laser [J]. *Chinese Optics Letters*, 2008, **6**(4): 271–273.
- [2] Abram R, Gardner K, Riis E, *et al.* Narrow linewidth operation of a tunable optically pumped semiconductor laser [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(22): 5434–5439.
- [3] Hoogland S, Dhanjal S, Tropper A C, *et al.* Passively mode-locked diode-pumped surface-emitting semiconductor laser. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2000, **12**(9): 1135–1137.
- [4] Zhang P, Song Y, Tian J, *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.
- [5] Hastie J E, Hopkins J M, Calvez S, *et al.* 0.5-W single transverse-mode operation of an 850-nm diode-pumped surface-emitting semiconductor laser [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2003, **15**(7): 894–896.
- [6] Fan L, Fallahi M, Murray J T, *et al.* Tunable high-power high-brightness linearly polarized vertical-external-cavity surface-emitting lasers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **88**(2): 021105–021105–3.
- [7] Zhang P, Song Y R, Zhang X P, *et al.* Numerical analysis of thermal effects in InGaAs system vertical-external-cavity surface-emitting laser[J]. *Opt. Rev.*, 2011, **18**(4): 317–323.
- [8] WANG Fei, WANG Xiao-hua, WANG Jin-yan, *et al.* Analysis on Thermal Effect of Optically Pumped Semiconductor Lasers with DBM by Finite Element Method[J]. *Chinese J. Lumin.*, (王菲, 王晓华, 王金艳, 等. 光泵浦双反射带半导体激光器的热效应有限元分析, *发光学报*) 2012, **33**(3): 309–313.
- [9] 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]. (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散热性能 [J]. *中国激光*) *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(10): 2745–2750.
- [10] Kemp A J, Valentine G J, Hopkins J M, *et al.* Thermal management in vertical-external-cavity surface-emitting lasers: Finite-element analysis of a heatspreader approach [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2005, **41**(2): 148–155.