

文章编号: 1001-3806(2024)06-0777-13

## 垂直腔面发射激光器阵列的热设计研究进展

金冬月, 洪福临, 张万荣, 张洪源, 王毅华, 王焕哲, 王楷尧, 关宝璐\*  
(北京工业大学 信息科学技术学院, 北京 100124, 中国)

**摘要:** 垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 通常采用由小尺寸发光单元并联的 2 维阵列结构来提高输出光功率、改善激光光束质量, 然而随着芯片尺寸不断缩小以及阵列集成度不断提高, 由 VCSEL 单元自身功耗引起的自加热效应及各单元之间的热耦合效应将导致 VCSEL 阵列结温急剧上升, 在热-光-电反馈作用下, 将严重制约 VCSEL 阵列的光学性能及热可靠性, 对 VCSEL 阵列热设计提出了迫切要求。在阐明 VCSEL 阵列产热机理的基础上, 从热-光-电模型建立、热设计方法两方面归纳总结了 VCSEL 阵列热设计最新进展, 并对热设计发展趋势进行了展望。

**关键词:** 激光器; 2 维阵列; 热-光-电模型; 热设计

**中图分类号:** TN248.4 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2024.06.002

### Advances in thermal design of vertical cavity surface emitting laser array

JIN Dongyue, HONG Fulin, ZHANG Wanrong, ZHANG Hongyuan,  
WANG Yihua, WANG Huanzhe, WANG Kaiyao, GUAN Baolu\*

(School of Information Science and Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** Vertical-cavity surface-emitting laser (VCSEL) usually adopt a 2-D array structure with small-sized light-emitting cells in parallel to increase the output optical power and to improve the laser beam quality. However, with the down scaling of the chip size and the increasing of the array integration, the self-heating effect caused by the power dissipation of the VCSEL cell and the thermal coupling effect among VCSEL cells will lead to a sharp increase in the junction temperature of the VCSEL array. Due to the effect of thermal-opto-electro feedback, the optical performance and thermal reliability of the VCSEL array will be limited seriously, which propose urgent requirements for the thermal design of the VCSEL array. Based on the heat generation mechanism of VCSEL array, latest development of VCSEL array thermal design was reviewed in detail from the aspects of thermal-opto-electro modeling and thermal design methodology. The development trend of thermal design in VCSEL array was also prospected.

**Key words:** lasers; 2-D array; thermal-opto-electro modeling; thermal design

## 0 引言

自 1979 年世界上第 1 台垂直腔面发射激光器 (vertical-cavity surface-emitting laser, VCSEL) 问世以来<sup>[1-2]</sup>, 因其具有激光光束对称分布、频谱带宽窄、直接调制速度快、功率转换效率优异、制造成本低、可在片测试、且易于 2 维阵列集成等优势, 受到国内外学者的密切关注, 现已在“绿色”光互联、传感和功率传输等领域得到广泛应用<sup>[3-5]</sup>。特别地, 随着人-激光交互时代以及大数据时代的来临, 高速、高密度

VCSEL 还可有效提高数据传输速率, 改善光通信和激光雷达系统的图像分辨率, 将在高速并行数据传输、光互连网络以及高功率光抽运等领域扮演越来越重要的角色<sup>[6-8]</sup>, 将进入有史以来飞速发展和应用的黄金时代<sup>[9]</sup>。

众所周知, VCSEL 阵列通常由多个结构相同的小尺寸发光单元并联而成, 用以提高输出光功率、改善激光光束质量, 然而由各单元自身功耗引起的自加热效应<sup>[10]</sup>以及各单元间的热耦合效应<sup>[11-12]</sup>将导致位于阵列中心区域、散热能力较差的中心单元结温较高。又由于注入电流与温度呈正相关, 在恒电流源驱动下, 中心单元将获得更多的注入电流, 产生更多的热, 形成热-电反馈。同时考虑到内量子效率与温度呈负相关, 中心单元的结温将率先达到热翻转临界温度, 进而发生热翻转<sup>[13]</sup>。此时其输出光功率将迅速减小, 在恒定输入功率驱动下, 上述光功率的减小量会以功耗形式

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60908012; 61006059; 61575008; 61774012; 61775007; 61901010); 北京市自然科学基金资助项目 (4172011); 激光器件技术重点实验室开放基金资助项目 (KLLDT202306)

\* 通信作者: gbl@bjut.edu.cn

收稿日期: 2024-01-04; 修回日期: 2024-03-12

全部转化为热能,进一步增大自身结温,形成热-光反馈。同时横向热串扰引起的热耦合效应还将迅速提升与中心单元相邻的各单元的结温。持续升高的阵列结温分布还会对激光器阵列的光束质量和调制速度产生影响,例如增大阈值电流,引起热透镜效应,影响波长稳定性(谐振腔和峰值增益波长失谐),也会引起激光横模变化,限制有源区光学增益,因有源区光子密度饱和而限制调制速度等。

特别是随着光学集成芯片尺寸的不断缩小以及 VCSEL 阵列集成度的不断提高,将会进一步加剧上述热效应的影响,阵列各个发光单元将相继触发热翻转以及电流分歧效应<sup>[14]</sup>,从而严重限制激光器阵列光学、电学性能,退化寿命,降低激光器工作的热可靠性。因此,面向未来高速并行数据传输、光互连网络以及高功率光抽运等领域挑战的应用需求,VCSEL 阵列热设计也将迎来严峻挑战。本文中首先介绍 VCSEL 阵列的产热机理,在分析热源构成的基础上,给出热-光-电反馈关系,用以阐述热致 VCSEL 阵列光学性能退化的理论原因;然后从模型和进展出发,分别介绍 VCSEL 器件及阵列的热-光-电模型和热设计方法的发展现状;最后对 VCSEL 阵列热设计未来的发展方向及其潜在应用领域做了简要分析。

## 1 VCSEL 阵列的产热机理

由于半导体材料的增益特性具有一定的温度敏感性,使得温度成为影响半导体激光器性能的关键参数之一。对于 VCSEL 激光器而言,主要包括由周期性半导体材料对组成的 P 型掺杂分布式布拉格反射镜(distributed Bragg reflector, DBR)、由多量子阱或量子点等增益材料组成的位于中心的发光有源区结构和 N 型掺杂 DBR 三部分组成<sup>[15]</sup>,其中 P 型 DBR 和发光有源区是热源的主体。对于 VCSEL 阵列而言,热源数量更多,热源之间的热传导更加复杂,亟需阐明 VCSEL 阵列的详细产热机理。

以具有  $4 \times 4$  个单元的 VCSEL 阵列为例,结构示意图如图 1 所示。器件生长在 N 型砷化镓(GaAs)衬底上,由 P 型掺杂 DBR (P-DBR)、N 型掺杂 DBR (N-DBR)、有源区、氧化限制层、P 型电极和 N 型电极

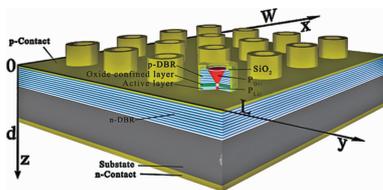


图 1 具有  $4 \times 4$  个单元的 VCSEL 阵列结构示意图<sup>[15]</sup>

Fig. 1 Schematic device structure of a  $4 \times 4$  VCSEL array<sup>[15]</sup>

组成,DBR 之间的有源区光学厚度为激光半波长的整数倍,光输出方向垂直于衬底。对于每个阵列单元而言,根据产热功耗与注入电流关系的不同,又可分为两类热源,其中发光有源区内以线性功耗为主,P-DBR 内以 2 次功耗为主。

图 2 中给出了具有  $M \times N$  个单元的 VCSEL 阵列 2 维热网络。其中采用峰值温度来表征相应单元上的温度特性,环境温度  $T_0$  表征为对地的参考温度。以 2 维热网络中的单元  $(i, j)$  为例,线性功耗  $P_{l,ij}$  和 2 次功耗  $P_{q,ij}$  均与热阻  $R_{ij}$  并联连接。单元  $(i, j)$  的温升为  $T_{r,ij} = R_{ij}(P_{l,ij} + P_{q,ij})$ 。因此,单元  $(i, j)$  的峰值温度  $T_{ij}$  可表示为  $T_{ij} = T_{r,ij} + T_0 = R_{ij}(P_{l,ij} + P_{q,ij}) + T_0$ 。可见,VCSEL 阵列的产热机理与各阵列单元上的线性功耗和 2 次功耗分布密切相关<sup>[15]</sup>。

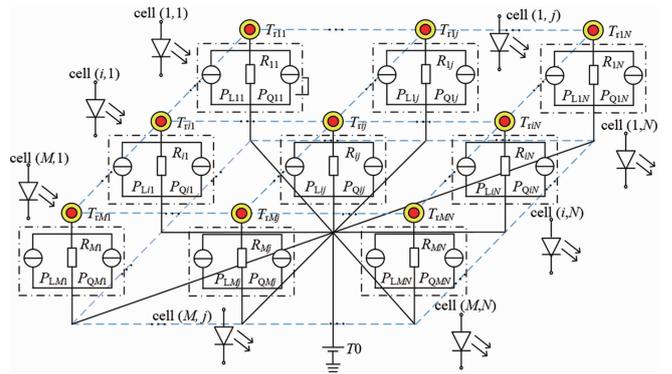


图 2 具有  $M \times N$  个单元的 VCSEL 阵列 2 维热网络<sup>[15]</sup>

Fig. 2 2-D thermal network of VCSEL array with  $M \times N$  cells<sup>[15]</sup>

下面将通过分析 VCSEL 阵列各单元上的光学特性和电学特性随温度的依赖关系,阐明热-光反馈和热-电反馈成因,以加深对于 VCSEL 阵列产热机理的理解。

### 1.1 VCSEL 阵列各单元上的热-光反馈

考虑到内量子效率  $\eta_i(T_{ij})$  的温度依赖关系,可进一步表示为<sup>[16]</sup>:

$$\eta_i(T_{ij}) = \frac{q[\alpha_i(T_{ij}) + \alpha_m^T(T_{ij}) + \alpha_m^B(T_{ij})]E_{SE}(T_{ij})}{\alpha_m^T(T_{ij})E_1(T_{ij})} \quad (1)$$

式中: $q$  是电子电荷; $E_1(T_{ij})$  是有源区量子阱势阱材料的禁带宽度; $\alpha_i(T_{ij})$  是内部光损耗率; $\alpha_m^T(T_{ij})$  和  $\alpha_m^B(T_{ij})$  分别是通过 P-DBR 和 N-DBR 的传输损耗率; $E_{SE}(T_{ij})$  是从不同环境温度下的光-电流 ( $L-I$ ) 曲线中提取的斜率效率 (slope efficiency, SE)。

单元  $(i, j)$  上的光输出功率  $P_{o,ij}$  可表示为<sup>[17]</sup>:

$$P_{o,ij} = \frac{(I_{b,ij} - I_{th,ij})E_1(T_{ij})\eta_i(T_{ij})\alpha_m^T(T_{ij})}{q[\alpha_i(T_{ij}) + \alpha_m^T(T_{ij}) + \alpha_m^B(T_{ij})]} \quad (2)$$

$(I_{b,ij} > I_{th,ij})$

式中: $I_{b,ij}$  为注入电流; $I_{th,ij}$  为激射阈值电流。此时,

VCSEL阵列的总输出光功率 $P_{o,s}$ 即为各阵列单元上的 $P_{o,ij}$ 之和。

## 1.2 VCSEL 阵列各单元上的热-电反馈

考虑到 $I_{b,ij}$ 的温度依赖关系,可具体表示为<sup>[18]</sup>:

$$I_{b,ij} = I_s \exp[q(V_b - V_{r,ij}) - 1]/(kT_{ij}) \quad (3)$$

式中: $I_s$ 为反向饱和电流; $V_b$ 为偏置电压; $V_{r,ij} = I_{b,ij} \times R_{s,ij}$ 为串联电阻 $R_{s,ij}$ 引起的电压降; $k$ 为玻尔兹曼常数。同时, $I_s$ 和 $I_{b,ij}$ 都随温度升高而增加<sup>[19]</sup>。此时,VCSEL阵列的总偏置电流 $I_{b,s}$ 为各阵列单元上的 $I_{b,ij}$ 之和。

在单元 $(i, j)$ 上,由 $I_{b,ij}$ 流经 $R_{s,ij}$ 而产生的2次功耗 $P_{q,ij}$ 可表示为<sup>[20]</sup>:

$$P_{q,ij} = I_{b,ij}^2 R_{s,ij} \quad (4)$$

此时,VCSEL阵列总的2次功耗 $P_q$ 为各阵列单元上 $P_{q,ij}$ 之和。

考虑到包括载流子泄漏功耗 $P_{leak,ij}$ 、载流子热化功耗 $P_{therm,ij}$ 、内部光学损耗 $P_{abs,ij}$ 和自发载流子复合功耗 $P_{rec,ij}$ 在内的多种功耗机制的联合作用,单元 $(i, j)$ 上的线性功耗 $P_{1,ij}$ 可表示为<sup>[16]</sup>:

$$P_{1,ij} = P_{leak,ij} + P_{therm,ij} + P_{abs,ij} + P_{rec,ij} \quad (5)$$

与此同时,上述4种功耗还均与注入电流相关:

$$P_{leak,ij} = E_b(T_{ij})I_{b,ij}[1 - \eta_i(T_{ij})]/q \quad (6)$$

$$P_{therm,ij} = [E_b(T_{ij}) - E_l(T_{ij})]I_{b,ij}\eta_i(T_{ij})/q \quad (7)$$

$$P_{abs,ij} =$$

$$\begin{cases} \frac{E_l(T_{ij})\eta_i(T_{ij})(I_{b,ij} - I_{th,ij})[\alpha_i(T_{ij}) + \alpha_m^B(T_{ij})]}{q[\alpha_i(T_{ij}) + \alpha_m^T(T_{ij}) + \alpha_m^B(T_{ij})]}, & (I_{b,ij} > I_{th,ij}) \\ 0, & (I_{b,ij} < I_{th,ij}) \end{cases} \quad (8)$$

$$P_{rec,ij} = \begin{cases} E_l(T_{ij})\eta_i(T_{ij})I_{th,ij}/q, & (I_{b,ij} > I_{th,ij}) \\ E_l(T_{ij})\eta_i(T_{ij})I_{b,ij}/q, & (I_{b,ij} < I_{th,ij}) \end{cases} \quad (9)$$

式中: $E_b(T_{ij})$ 是有源区量子阱势垒材料的禁带宽度。

此时,VCSEL阵列的总线性功耗 $P_{1,s}$ 、总载流子泄漏功耗 $P_{leak,s}$ 、总载流子热化功耗 $P_{therm,s}$ 、总内部光学损耗 $P_{abs,s}$ 和总自发载流子复合功耗 $P_{rec,s}$ 分别为 $P_{1,ij}$ 、 $P_{leak,ij}$ 、 $P_{therm,ij}$ 、 $P_{abs,ij}$ 和 $P_{rec,ij}$ 之和。

由上述分析可知,VCSEL阵列中每个单元均包含线性功耗、2次功耗两类热源,在自加热效应和各单元间热耦合效应的影响下将导致中心单元结温偏高,进而在热-电反馈作用下,中心单元将获得更多的注入电流,产生更多的热;同时在热-光反馈作用下,中心单元内量子效率将迅速下降,使得输出光功率随之迅速减小,而光功率的减小量又会以功耗形式全部转化为热能,进一步增大器件结温。因此,如何在充分考虑VCSEL阵列内部各单元上热-电反馈、热-光反馈影响的基础上建立VCSEL阵列精确热-光-电模型,对于系

统掌握VCSEL阵列产热机理,进而精准开展热设计研究具有重要意义。

## 2 热-光-电模型研究进展

目前,国内外关于VCSEL热-光-电模型建模的研究,根据建模方法的不同分为电路级热-光-电模型、热-光-电解析模型、热-光-电有限元模型。

### 2.1 基于速率方程的VCSEL电路级热-光-电模型

1999—2015年期间,国际上有关学者先后在考虑自加热效应、VCSEL内部有源区增益、载流子密度、电流-电压( $I$ - $V$ )特性随温度变化以及空间烧孔效应等的影响下,基于速率方程采用不同的高级语言,建立了一系列的电路级VCSEL热-光-电模型。

美国伊利诺伊大学厄巴纳-香槟分校贝克曼高等科学研究所是最早开展VCSEL电路级热-光-电模型研究的单位之一。1999年,贝克曼高等科学研究所和摩托罗拉公司光互连实验室受光电系统中电学器件仿真设计的启发,针对VCSEL激光器缺乏电路级仿真模型的现实问题,基于激光速率方程,并考虑到注入电流随温度的依赖关系,联合报道了VCSEL激光器的初级热-光-电模型<sup>[21]</sup>,等效电路如图3所示。该模型既可模拟VCSEL在一定环境温度范围内的 $L$ - $I$ 曲线,观察输出光功率的热翻转现象,也可模拟脉冲激励下的调制响应曲线。然而,该模型的模拟结果与实验结果尚存在一些差异,这主要归因于模型中忽略了空间烧孔效应的影响,也未考虑斜率效率随注入电流的变化。

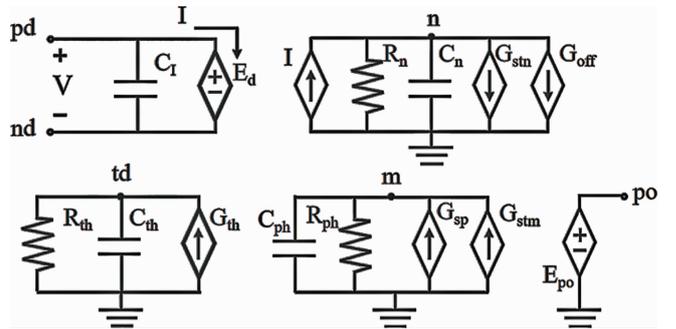


图3 VCSEL激光器初级热-光-电模型等效电路<sup>[21]</sup>

Fig.3 Equivalent-circuit of simple thermal-opto-electro model of VCSEL<sup>[21]</sup>

为此贝克曼高等科学研究所进一步改进上述初级热-光-电模型,于同年提出了VCSEL激光器的电路级综合热-光-电模型<sup>[22]</sup>。具体地,在考虑VCSEL的热行为和空间依赖关系的前提下,基于多模速率方程以及光增益、载流子泄漏随温度变化的经验公式建立得到综合热-光-电模型,可以仿真包括与温度相关的 $L$ - $I$ 曲线和调制响应、多模行为和瞬态关断特性,模拟与实验结果一致性较好。

2006年,伊朗德黑兰塔比阿特莫达勒斯大学电气工程实验室在电气与电子工程师协会半导体电子学国际会议(Institute of Electrical and Electronics Engineers International Conference on Software Engineering, IEEE ICSE)上提出了基于载流子、光子和热速率方程,并将载流子泄漏电流作为引起输出光功率热翻转的主要来源,建立得到 VCSEL 激光器电路级热-光-电模型,同时使用给定的载流子和光子分布,将具有空间依赖关系的速率方程转换为空间独立的速率方程<sup>[23]</sup>。该模型可用于观察瞬态热效应,研究表明,选择小于(10%)占空比的输入电流脉冲信号,可有效抑制热效应对稳态平均输出光功率影响。

2015年,伊朗西拉大学通信与电子学实验室首次针对耦合腔 VCSEL (coupled cavity-VCSEL, CC-VCSEL)建立了电路级热-光-电模型<sup>[24]</sup>。该模型较详细地考虑了激光器内部固有的物理过程,修改了 CC-VCSEL 中载流子-光子动力学标准耦合速率方程,并采用类二极管方程来模拟激光器的  $I$ - $V$  特性,仿真结果与已报道的实验数据吻合较好。不足之处在于这种热-光-电模型尚未考虑纵向光学模式效应的影响。

同时,上述电路级热-光-电模型均是针对单个 VCSEL 激光器建立的热-光-电模型,并不适用研究由多个结构相同的小尺寸发光单元并联而成的 VCSEL 阵列。实际上,早在 2002 年,法国国立高等电信学院在 IEEE 国际行为建模与仿真研讨会上首次采用超高速集成电路硬件描述语言(very-high-speed integrated circuit hardware description language for analog and mixed signals, VHDL-AMS)建立了 VCSEL 阵列的电路级热-光-电模型<sup>[25]</sup>,等效电路如图 4 所示。该模型同时考虑了由热耦合效应引起的 VCSEL 阵列中各单元上的温度差异,并借助简单公式计算来模拟注入电流、偏置电压、功耗、结温、光输出功率和波长等物理量,可以仿真 VCSEL 阵列的静态、动态以及温度特性。

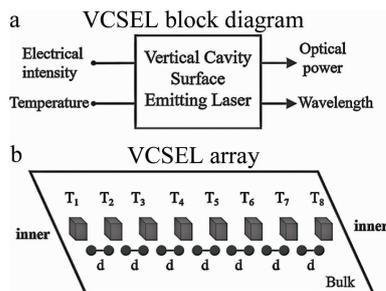


图 4 VCSEL 阵列的电路级热-光-电模型等效电路<sup>[25]</sup>

Fig. 4 Equivalent-circuit of VCSEL array thermal-opto-electro model<sup>[25]</sup>

我国在 VCSEL 电路级热-光-电模型建立方面研究起步较晚。2009 年,武汉大学微电子与信息技术研

究所联合软件工程国家重点实验室在智能计算技术与自动化国际会议上,提出了一种基于速率方程的 VCSEL 高阶电路级热-光-电模型,并可应用在 PSPICE 仿真器中<sup>[26]</sup>,等效电路如图 5 所示。该模型充分考虑了温度对增益、漏电流以及反向饱和电流和寄生电阻的影响,进一步引入空间烧孔效应,实现在较大温度范围内对 VCSEL 热效应的准确模拟,并取得了与国际水平相当的研究进展。

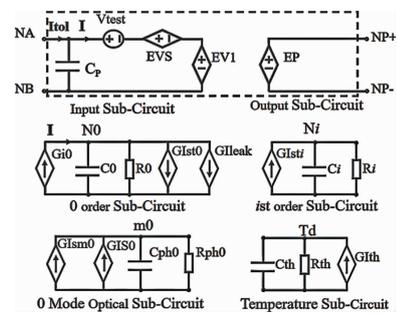


图 5 VCSEL 的电路级热-光-电模型等效电路<sup>[26]</sup>

Fig. 5 Equivalent-circuit of VCSEL thermal-opto-electro model<sup>[26]</sup>

上述对于 VCSEL 内部的物理机制的考量均是通过修改速率方程实现的。但是求解一组包括温度影响在内的复杂耦合速率方程,将会引入大量的密集型数学计算问题。同时,上述基于速率方程的电路级热-光-电模型大都仅考虑了自加热效应的影响,也仅适用于对单个 VCSEL 的建模研究。对于通常包含 1000 个以上 VCSEL 单元的大阵列结构而言,上述电路级热-光-电模型还需增加考虑各个 VCSEL 单元等效电路模型之间的热交换问题,这将进一步增大计算难度和时间成本。

## 2.2 基于自洽算法的 VCSEL 热-光-电解析模型

不同于 VCSEL 电路级热-光-电模型,基于自洽算法的 VCSEL 热-光-电解析模型具有物理过程清晰,迭代运算快捷、直观,无需借助仿真器等优点,早期成为 VCSEL 建模的首选方法。1991—2006 年期间,国际上有关学者先后在考虑电流集聚效应、自热和热耦合效应及其对激光器内部平均产热中心位置以及电流和热流 3 维分布的影响;增益、波长变化、俄歇复合和阈值电流等随温度变化的物理效应以及光吸收、载流子热化、载流子泄漏、载流子自发复合和焦耳热等对功耗影响的情况下,基于热-光-电反馈机制自洽算法,建立了一系列自洽 VCSEL 热-光-电解析模型。

1991 年,美国新墨西哥大学高技术材料研究所首次建立了基于自洽算法的 VCSEL 热-电解析模型<sup>[27]</sup>,流程图如图 6 所示。通过分析注入电流在激光器内部的传播路径,引入电流集聚效应,明确了 2 次功耗是 VCSEL 的主要热源所在。虽然上述模型是针对单个

VCSEL 激光器建立的,作者也在文中明确指出,在设计大规模密集排布列的 2 维 VCSEL 阵列时,必须考虑热问题的影响,其中各个 VCSEL 单元之间的热耦合效应将成为限制 VCSEL 阵列性能的主要因素。

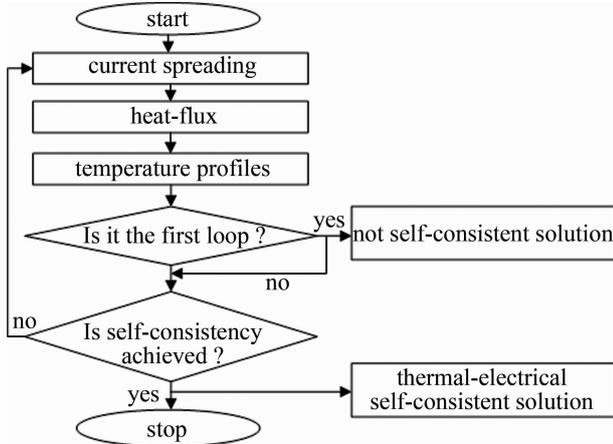


图 6 VCSEL 热-电解析模型流程图<sup>[27]</sup>

Fig. 6 Flow chart of VCSEL thermal-electro analytical model<sup>[27]</sup>

1997 年,波兰罗兹工业大学物理研究所基于自洽算法首次建立了 VCSEL 的 3 维热-电解析模型<sup>[28]</sup>,并指出激光器内部平均产热中心位置对分析 VCSEL 的热特性具有重要意义。

2001 年,法国国家科学研究中心建立了行为级的 VCSEL 热-光-电解析模型<sup>[29]</sup>,流程图如图 7 所示。该解析模型不仅包含了 VCSEL 激光器内部热-光-电反馈,还考虑了增益、波长变化、俄歇复合和阈值电流随温度变化的物理效应。

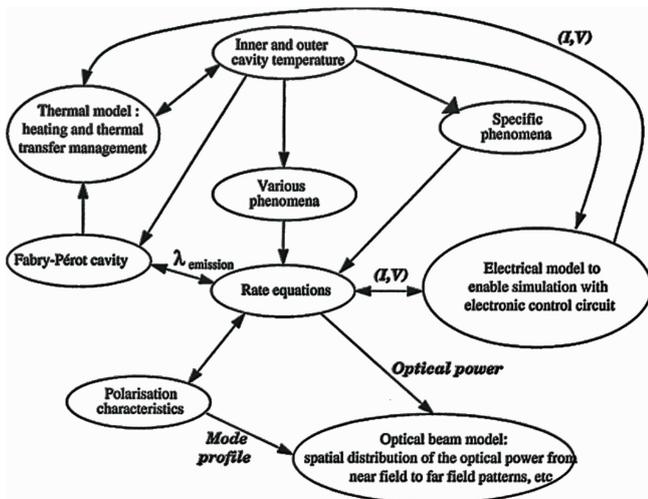


图 7 行为级的 VCSEL 热-光-电解析模型流程图<sup>[29]</sup>

Fig. 7 Flow chart of a behavioral VCSEL thermal-opto-electro analytical model<sup>[29]</sup>

2012 年,美国罗切斯特大学光学研究所进一步在考虑由光吸收、载流子热化、载流子泄漏、载流子自发复合和焦耳热等功耗影响的情况下,建立了较为精确的 VCSEL 热-光-电解析模型<sup>[30]</sup>。

此外,在 VCSEL 阵列建模方面,1995 年,美国新墨西哥大学高技术材料研究中心建立了适用于 2-D VCSEL 阵列的热-电解析模型<sup>[31]</sup>,其中重点考虑了 VCSEL 单元间横向热串扰对 VCSEL 阵列电学和热学性能的影响。

2006 年,瑞士洛桑联邦理工学院从激光器的热阻和  $I-V$  方程出发,在考虑热效应对偏置电压影响以及电流和热流在底部 DBR 和衬底中的呈 3 维分布的情况下,建立了一个简约的 VCSEL 阵列热-电解析模型<sup>[32]</sup>,模型预测结果与 VCSEL 阵列的实测特性具有较好的一致性。

虽然上述热-光-电解析模型可用于分析高密度大规模 VCSEL 阵列的热学、光学和电学性能,但是由于解析模型自身的局限性,上述热-光-电解析模型均无法根据 VCSEL 的具体结构设定材料属性、细化热源分布,同时也无法充分考虑 VCSEL 内部不同材料热导率、热导率各项异性以及不同边界条件对激光器热-光-电模型的影响。因此采用自洽算法的 VCSEL 热-光-电解析模型的精确度有待进一步提高。

### 2.3 基于热传导方程的 VCSEL 热-光-电有限元模型

随着有限元软件技术的不断开发和完善,国际上有关学者从热传导方程出发,不断尝试将其应用到 VCSEL 建模工作中。从 2006 年至今,基于热传导方程的 VCSEL 热-光-电有限元模型已成为 VCSEL 激光器级 VCSEL 阵列建模的主流方法。

2006 年,美国德克萨斯大学奥斯汀分校微电子研究中心采用有限元软件 ANSYS 建立了 VCSEL 激光器的 2 维热-电模型<sup>[33]</sup>,如图 8 所示。在考虑焦耳热效应和非辐射复合效应的情况下,计算得到 VCSEL 内部有源区附近的热源和温升 2 维分布,并对具有衬底减薄结构和开放式背孔结构 VCSEL 的热阻进行了预测评估。

2009 年,韩国庆熙大学电子工程系采用有限元软件 COMSOL 建立了 VCSEL 激光器 3 维圆柱热模型<sup>[34]</sup>。该模型重点考虑了材料属性、氧化孔直径、衬底厚度、P 型 DBR 上的 Au 层厚度等对 VCSEL 热性能如热流密度、热阻和温度分布的影响。

2013 年,美国伊利诺伊大学电气与计算机工程系采用有限元软件 COMSOL 建立了 VCSEL 激光器热-电模型<sup>[35]</sup>,用于研究不同氧化孔径和台面尺寸的激光器性能与温度之间的关系,分析热翻转现象以及不同衬底结构对 VCSEL 激光器极峰值光功率水平的影响。

2016 年,日本古河电气工业株式会社产品事业部在 IEEE 光纤通信会议及展览会上报道了采用有限元软件 SolidWorks 建立的 VCSEL 激光器 2 维热-光模型<sup>[36]</sup>,如图 9 所示。该模型用于研究基于时钟数据恢

复集成 VCSEL 发光模块的温度分布,将外壳温度与 VCSEL 器件温度之间最大温差抑制在  $8\text{ }^{\circ}\text{C}$  以内。

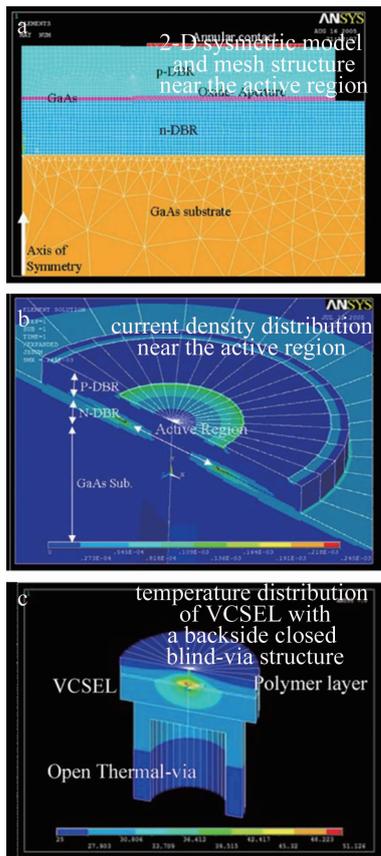


图8 VCSEL 激光器 2 维热-电有限元模型<sup>[33]</sup>

Fig. 8 2-D thermal-electro finite element model of VCSEL<sup>[33]</sup>

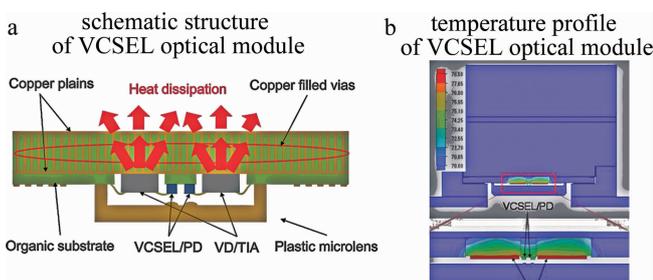


图9 VCSEL 激光器 2 维热光有限元模型<sup>[36]</sup>

Fig. 9 2-D thermal-opto finite element model of VCSEL<sup>[36]</sup>

2018 年,美国加州大学圣巴巴拉分校材料实验室采用有限元软件 COMSOL 建立了 VCSEL 激光器 2 维热模型<sup>[37]</sup>,利用该模型研究了 VCSEL 激光器腔长和金-铟(Au-In)键合对热性能的改善,同时根据发射光谱的温度依赖关系性,并对 VCSEL 热阻进行了估算。

我国在 VCSEL 热-光-电有限元模型建立方面的研究相比美国晚了大约 5 ~ 10 年左右,随着国内 VCSEL 研制及应用工作的不断展开,目前已取得了与国际水平相当的研究进展。2014 年,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所发光与应用国家重点实验室 WANG 院士团队采用有限元软件 COMSOL 建立了

VCSEL 激光器 2 维热模型<sup>[38]</sup>,温度、热流密度和电流分布如图 10 所示。建模中充分考虑了电流集聚效应的影响,研究表明,增强横向散热有助于降低 VCSEL 的有源区内部温度,内量子效率降低趋势变缓下降率;电流在 N 型 DBR 和衬底中沿较大维度扩散,减小串联电阻有助于降低器件产热。

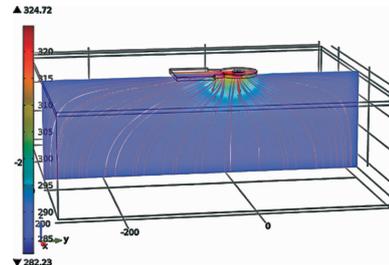


图 10 基于有限元热模型的 VCSEL 截面温度、热流密度分布<sup>[38]</sup>

Fig. 10 Temperature and heat flux distribution in cross-section of VCSEL with finite element thermal model<sup>[38]</sup>

2017 年,厦门大学光电工程研究中心电子工程系联合华东师范大学、中国科学院苏州纳米科技与纳米仿生研究所、德国柏林工业大学固体物理学院、中国台湾中澳光电工程学院以及东京大学首次实现了 InGaN 量子点 (quantum dot, QD) VCSEL 的室温、连续和低阈值绿光激光,激光波长覆盖大部分“绿色带隙”。指出提高散热能力对于实现室温连续激光具有重要作用,为了理解器件内部的热行为,采用有限元软件 COMSOL 建立了 VCSEL 激光器 2 维热模型<sup>[39]</sup>,从理论上系统研究了 VCSEL 的热特性。

2018 年,北京工业大学光电子技术实验室首次采用 Crosslight 建立了 VCSEL 的 3-D 热模型<sup>[40]</sup>,重点研究了室温下不同台面半径对晶格温度、输出光功率及偏置电压对台面参数的影响,用以优化台面工艺参数。

在 VCSEL 阵列建模方面,2011 年,北京工业大学光电子技术实验室与美国罗切斯特大学电气与计算机工程系合作,采用有限元软件 COMSOL 首次建立了氧化型 VCSEL 阵列的 3-D 热-电模型<sup>[41]</sup>,温度分布如图 11 所示。重点考虑了氧化孔径、衬底厚度、电流密度、阵列尺寸、热流密度对 VCSEL 阵列温度分布的影响,旨在分析 VCSEL 阵列热-电行为,描述热通量和温度分布。

2015 年,北京工业大学光电子技术实验室进一步与中国科学院半导体研究所合作,建立了考虑 DBR 和量子阱区域材料热导率各项异性的 VCSEL 阵列 3-D 热-电模型<sup>[42]</sup>,如图 12 所示。重点考虑了热注入和载流子注入的影响,计算了 VCSEL 阵列在工作状态下的有源区折射率分布。

2020 年,中国科学院微电子所 WU 院士团队采用有限元软件 COMSOL 建立了具有 20 个单元的 VCSEL

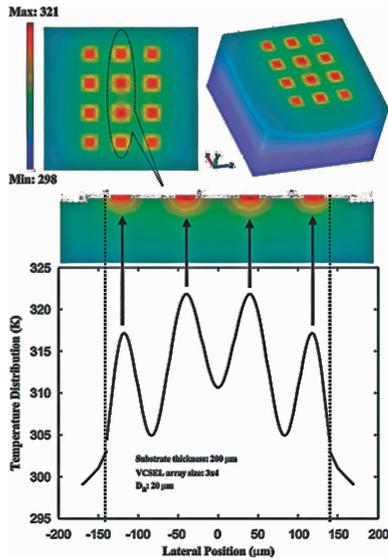


图 11 基于有限元热-电模型的 VCSEL 阵列横向热流和温度分布<sup>[41]</sup>  
 Fig. 11 Heat flux and temperature distribution in lateral direction for VCSEL array with finite element thermal-electro model<sup>[41]</sup>

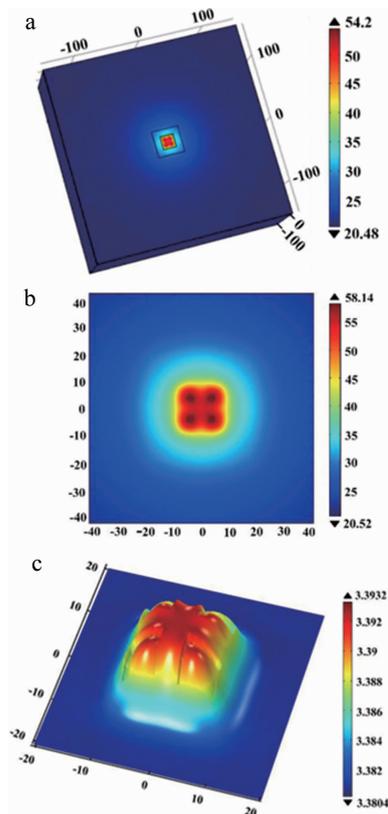


图 12 VCSEL 阵列 3-D 有限元热-电模型<sup>[42]</sup>  
 a—表面温度分布 b—2 维有源层温度分布 c—2 维有源层折射率分布  
 Fig. 12 3-D finite element model thermal-electro model of VCSEL array<sup>[42]</sup>  
 a—temperature distribution in device surface b—2-D temperature distribution in active layer c—2-D refractive index in active layer  
 阵列 3-D 热-电模型<sup>[43]</sup>,从理论和实验两方面系统地研究了 20 个单元氧化型 VCSEL 阵列的热学性质,也对热耦合效应进行了可视化展示。

可以看出,有限元方法非常适用于建立具有复杂

结构特征的高密度大规模 VCSEL 阵列 3-D 热-光-电模型,然而上述基于热传导方程的 VCSEL 阵列热-光-电有限元模型大都没有充分考虑热-电反馈、热-光反馈的迭代作用,从而削弱了自加热和热耦合效应的真实影响,使得模拟结果往往与实验偏差较大。为此,2022 年,北京工业大学光电子技术实验室首次将自洽算法引入到 VCSEL 阵列热-光-电有限元模型中,充分考虑每个阵列单元的偏置电流、内量子效率、内光学损耗和热阻的温度依赖性,建立了紧凑的 VCSEL 阵列热-光-电模型<sup>[15]</sup>。在有效提升模型精确度的同时,还可用于分析导致热翻转的功耗散机理,研究阵列单元间距和布局等 VCSEL 阵列热设计对热-光-电性能的影响。

### 3 VCSEL 阵列热设计研究进展

目前,为降低峰值结温、改善温度分布,从而实现 VCSEL 阵列输出光功率水平的提升,国内外通常采用包括注入电流优化设计、氧化孔径优化设计和单元排布优化设计在内的 3 种 VCSEL 阵列热设计方法,下面依次展开详细介绍。

#### 3.1 注入电流优化设计

由于 VCSEL 阵列的注入电流具有正温度系数,从削弱 VCSEL 阵列各单元上热-电反馈的角度出发,相关学者开展了一系列注入电流优化技术研究来削弱热效应的影响,提升 VCSEL 阵列器件性能。

2012 年,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所发光与应用国家重点实验室提出了一种非闭合型 VCSEL 阵列结构<sup>[44]</sup>,如图 13 所示。通过腐蚀非闭合环形凹槽形成器件台面,简化工艺步骤,减少器件损伤的同时,重点解决了 VCSEL 阵列中由电流注入不均匀引起的热问题,VCSEL 阵列室温连续输出光功率提高到 480 mW,从而证明上述非闭合型 VCSEL 阵列结构能够有效降低器件内部发热对器件性能影响。

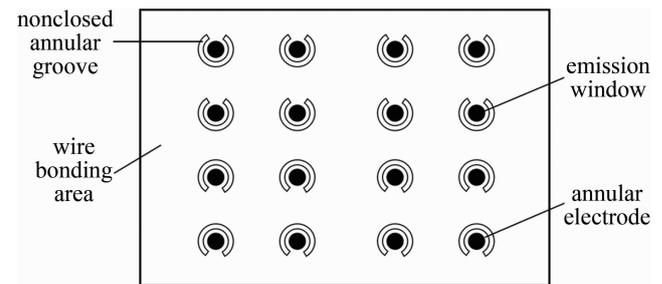


图 13 具有非闭合型电极结构的 VCSEL 阵列表面示意图<sup>[44]</sup>  
 Fig. 13 Surface schematic of VCSEL array with non-closed electrode structure<sup>[44]</sup>

2020 年,中国科学院半导体所光电器件国家工程研究中心报道了一种具有环形紧密堆积结构 (ring closing packing, RCP) 的 VCSEL 阵列<sup>[45]</sup>,如图 14 所

示。在直径为  $100\ \mu\text{m}$  的 RCP-VCSEL 阵列内部包含 7 个共用超腔的小台面 VCSEL 单元, 每个小台面 VCSEL 单元的氧化孔径为  $20\ \mu\text{m}$ 。该结构有效改善了 VCSEL 阵列注入电流分布及其温度特性, 进而在直径为  $100\ \mu\text{m}$  的大区域内制备出最大光功率密度为  $3.73\ \text{kW}/\text{cm}^2$ 、斜率效率为  $1.1\ \text{W}/\text{A}$ 、发散角为  $3.3^\circ$  且整体功率转换效率为 35% VCSEL 阵列。

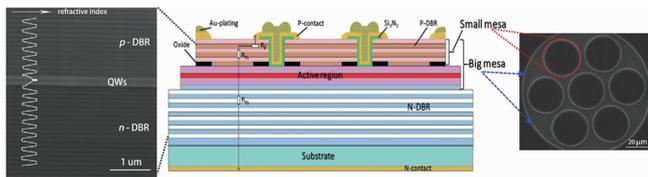


图 14 环形紧密堆积结构 VCSEL 阵列的原理图<sup>[45]</sup>

Fig. 14 Schematic diagram of the ring close packing structure VCSEL array.<sup>[45]</sup>

2021 年, 德国柏林工业大学固体物理研究所联合 JENOPTIK 光学系统有限公司报道了氧化孔径直径为  $10.5\ \mu\text{m}$  的 2 维准蜂巢结构的 VCSEL 阵列<sup>[46]</sup>, 如图 15 所示。台面上方的正电极经由内部的 VCSEL 脊将 19 个小单元相连, 同时采用马蹄形负电极形成欧姆接触, 进而实现 19 个小单元的并联连接。通过优化 19 个单元上的注入电流, 探索热-电-光设计的折衷方案, 室温下实现最大输出光功率为 200 mW、最大 3 dB 带宽为 18 GHz, 且最大功率转换效率达 35%。

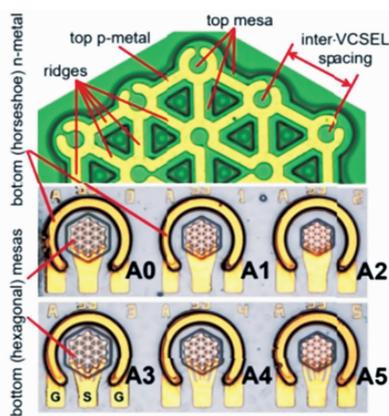


图 15 具有 19 个单元的准蜂巢结构 VCSEL 阵列显微图<sup>[46]</sup>

Fig. 15 Microscope images of honeycomb geometry structure VCSEL arrays with 19 cells.<sup>[46]</sup>

此外, 2020 年, 德国柏林理工大学报道了一款应用在下一代高效光子神经网络和超快光子神经元的  $5 \times 5$  单元 VCSEL 阵列<sup>[47]</sup>, 如图 16 所示。该 VCSEL 阵列通过独立寻址技术来单独控制阵列内部每个 VCSEL 单元的注入电流, 利用激光器的产热温度诱导共振位移来满足光学注入锁定和耦合的光谱要求。如能将上述独立寻址技术应用到高密度大规模 VCSEL 阵列的热设计中, 对于改善温度分布, 提升激光器性能具有重要意义。

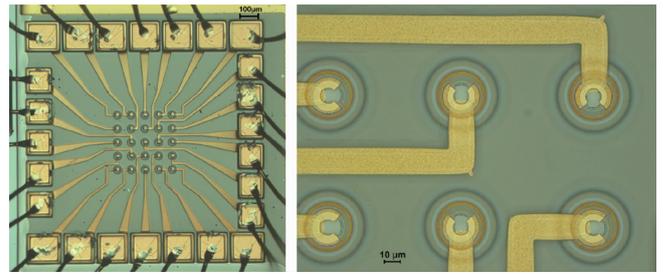


图 16 采用独立寻址技术的  $5 \times 5$  单元 VCSEL 阵列显微图<sup>[47]</sup>

Fig. 16 Microscope images of  $5 \times 5$  VCSEL arrays with independent addressing technology.<sup>[47]</sup>

### 3.2 氧化孔径优化设计

目前, VCSEL 器件大都采用氧化限制结构, 即在量子阱和上下 DBR 层之间分别插入一层一定厚度的铝镓砷 (AlGaAs) 或铝砷 (AlAs) 层。利用侧向氧化产生氧化铝, 形成绝缘性好的低折射率限制区域, 用来作为电限制和光限制, 可以使 VCSEL 实现低阈值连续激励<sup>[48]</sup>。对于氧化限制型 VCSEL 器件来说, 氧化孔径的大小直接决定了有源区的有效发光面积, 也决定了有源区内的注入电流分布情况<sup>[49]</sup>。注入电流密度越大, 器件的自热效应越严重, 此时更多的电能将转换成热量, 导致电光转换效率降低, 引起热翻转现象, 从而限制了器件获得更高功率输出的能力。为此, 氧化孔径作为直接影响 VCSEL 出光功率的关键参数之一, 在 VCSEL 热设计中受到相关学者的广泛关注。

2005 年, 中国科学院半导体所重点研究了氧化孔径对 VCSEL 横向串联电阻的影响<sup>[50]</sup>, 在激光器台面电极直径一定的情况下, 氧化孔径越小横串联电阻越大, 此时大的电阻值将会严重影响 VCSEL 的激励。进一步地, 在减小台面电极直径的同时, 缩小出光孔径, 而不使台面电极面积减小, 可以达到降低横向串联电阻的目的。

2008 年, 新加坡南洋理工大学电气与电子工程学院研究了氧化孔径对 QD VCSEL 热特性和输出功率的影响<sup>[51]</sup>。在台面电极直径一定的情况下, 氧化孔径过小会显著加剧自热效应, 引起激光器温度升高, 从而降低内量子效率, 通过优化氧化孔径可以有效提升激光器的输出光功率。

2011 年, 北京工业大学光电子技术实验室也研究了氧化孔径对 VCSEL 阵列热性能的影响<sup>[41]</sup>。对于 VCSEL 阵列而言, 内部最高温度强烈依赖于氧化孔径, 且在注入电流密度和台面电极直径一定的情况下, VCSEL 阵列内部最高温度将随氧化孔径是减小而迅速升高。

2012 年, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所发光与应用国家重点实验室也相继研究了氧化孔径对高功率 VCSEL 温升的影响<sup>[52]</sup>。经由实验测量证明, 氧化孔径越小, 器件的热阻越大。当注入电流为 1 A 时, 氧化孔径为  $415\ \mu\text{m}$  的器件温度为  $32.4\ ^\circ\text{C}$ , 而氧化孔径减小为  $316\ \mu\text{m}$  时, 器件温度则高达  $76.4\ ^\circ\text{C}$ 。

2020 年,中国科学院光电与光电子学研究所联合中国台湾大学电子工程学院以及美国伊利诺伊大学厄巴纳-香槟分校显微与纳米技术实验室共同研究了氧化孔径及电流对 VCSEL 近场和远场光束模式的影响<sup>[53]</sup>。研究表明,随着氧化孔径的缩小,激光器差分电阻显著增大;在相同的注入电流下,小氧化孔径 VCSEL 的输出光功率更低,功耗更大;当注入电流较高时,氧化孔径尺寸的减小将加剧热透镜效应。

同年,中国科学院半导体所集成光电国家重点实验室联合材料科学与光电技术学院及纳米光电实验室也相继研究了氧化孔径对 VCSEL 输出特性的影响<sup>[54]</sup>,如图 17 所示。结果表明,当氧化孔径从 5.9  $\mu\text{m}$

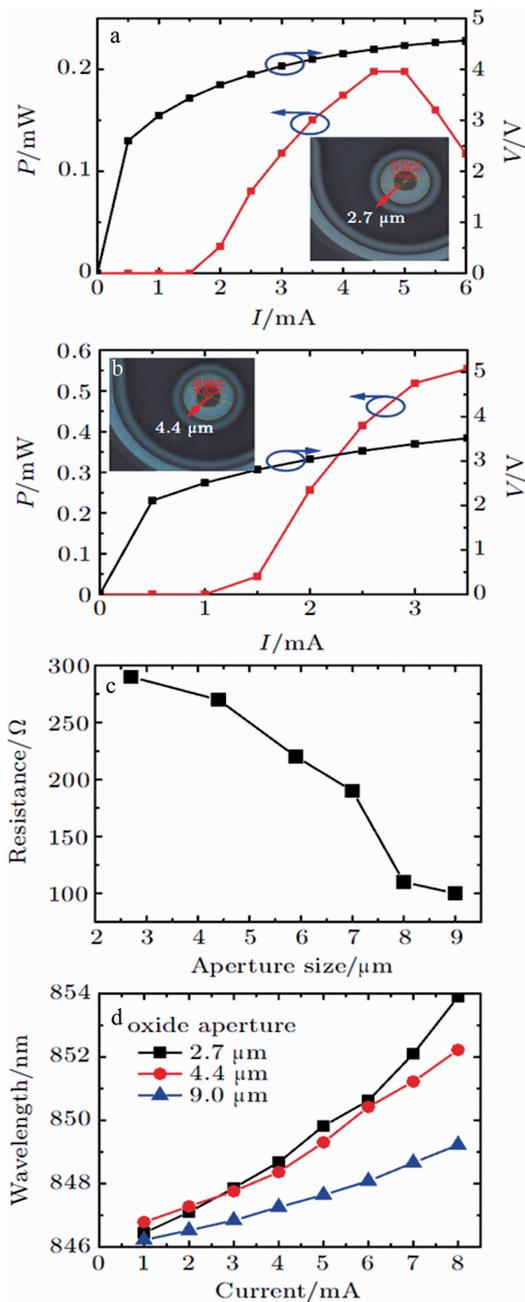


图 17 氧化孔径对 VCSEL 输出特性的影响<sup>[54]</sup>

Fig. 17 Influence of oxide aperture on the output characteristics of VCSEL<sup>[54]</sup>

增加到 9  $\mu\text{m}$  时,最大输出光功率将从 2.4 mW 增加到 5.7 mW;当氧化孔径从 4.4  $\mu\text{m}$  增加到 18.7  $\mu\text{m}$  时,热阻将从 2.815  $^{\circ}\text{C}/\text{mW}$  减小到 1.015  $^{\circ}\text{C}/\text{mW}$ ;同时,相邻模式间的波长间隔会随着氧化孔径的增大而减小。减小氧化孔径虽可有效改善模式叠加,却使输出光功率下降,同时也增大了热阻和波长调谐率。

在 VCSEL 阵列热设计方面,2022 年,美国卢曼顿运作有限公司提出采用非均匀氧化孔径设计来改善 VCSEL 阵列的热特性和输出光功率水平并成功申请美国专利<sup>[55]</sup>,如图 18 所示。

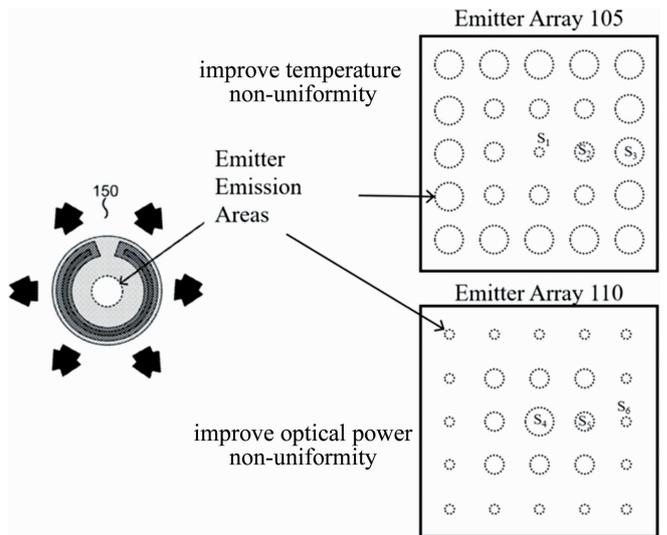


图 18 VCSEL 阵列非均匀氧化孔径设计<sup>[55]</sup>

Fig. 18 Non-uniform oxidation aperture design of VCSEL array<sup>[55]</sup>

### 3.3 单元排布优化设计

自热和热耦合效应的存在严重限制了高密度大规模 VCSEL 阵列的热-光-电性能。为了有效削弱热效应的影响,实现 VCSEL 阵列热-光-电性能的全面提升,最为直观、有效的方法就是对 VCSEL 阵列单元排布进行优化设计。为此相关学者开展了一系列单元排布优化设计研究。

2013 年,波兰罗兹理工大学物理研究所就以  $1 \times 3$  单元的 VCSEL 阵列为例,研究了单元间距对 VCSEL 阵列温度分布的影响<sup>[56]</sup>,如图 19 所示。研究表明,单元间距主要影响 VCSEL 内部的温度分布,从而控制折射率分布。当单元间距较小时,VCSEL 阵列温度分布与在单个 VCSEL 激光器的温度分布非常相似。随着单元间距的增加,相邻单元温度分布的重叠程度会随之减弱,单元之间的热耦合也随之减小,因此增大单元间距有助于降低 VCSEL 阵列的峰值温度。同时,温度分布均匀性是影响 VCSEL 阵列模式特性的主导因素。

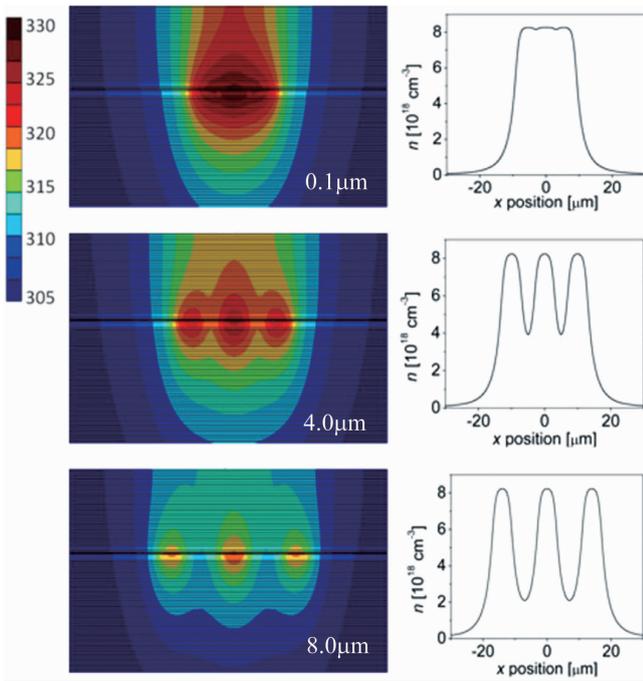


图 19 单元间距对 VCSEL 阵列温度分布的影响<sup>[56]</sup>

Fig. 19 Effect of cell spacing on the temperature distribution of the VCSEL array<sup>[56]</sup>

2019年,北京工业大学激光工程研究院基于第一性原理采用有限元方法研究了单元排布方式和单元间距对 VCSEL 阵列温度分布的影响<sup>[4]</sup>,如图 20 所示。研究表明,与具有 16 个单元的正方形排布方式和菱形排布方式相比,具有 18 个单元的 VCSEL 阵列具有最好的热稳定性。同时,当具有 18 个单元的 VCSEL 阵列的单元间距从 100 μm 增大为 250 μm 时,峰值温度将从 371 K 下降到 349 K。

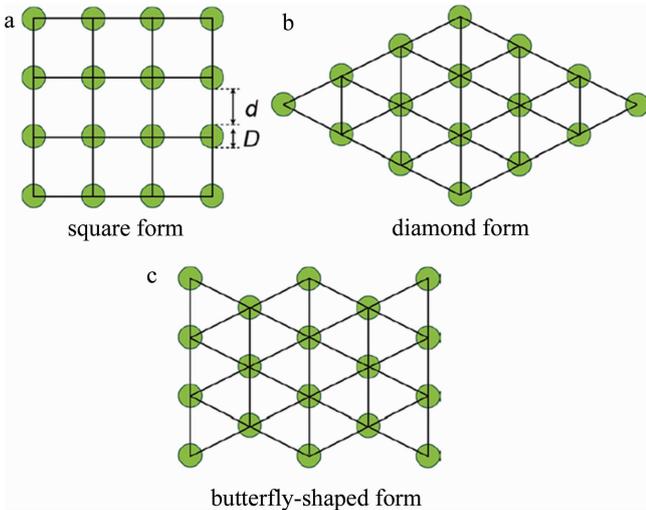


图 20 3 种 VCSEL 阵列单元排布方式<sup>[4]</sup>

Fig. 20 Three-types of cell arrangement in VCSEL array<sup>[4]</sup>

2022年,北京工业大学光电子技术实验室基于课

题组前期已建立的 2 维 VCSEL 阵列紧凑型电光热模型,系统研究了单元间距及六边形单元排布方式对 VCSEL 阵列功耗的影响以及对热-光-电性能的改善<sup>[15]</sup>,如图 21 所示。研究表明,随着单元间距的增加,峰值温度呈指数式下降,主要归因于热阻的减小。同时,总线性功耗也随着峰值温度的降低而降低,其中载流子泄漏对降低功耗起到了关键作用。此外,VCSEL 阵列的六边形单元排布设计有效降低了总串联电阻,从而降低了总的 2 次功耗。总线性功耗和总的 2 次功耗的降低将有助于推迟“热翻转”,从而提高输出光功率。

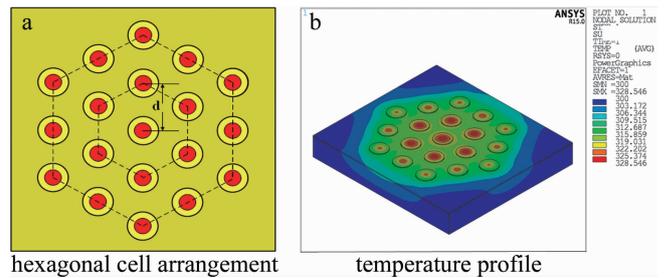


图 21 六边形单元排布设计对 VCSEL 阵列温度分布的影响<sup>[15]</sup>

Fig. 21 Influence of hexagonal cell arrangement design on the temperature profile of VCSEL array<sup>[15]</sup>

随着人工智能技术的不断发展成熟,如能将智能算法引入到高密度大规模 VCSEL 阵列的台面排布优化设计中,不仅会大幅缩短设计时间成本,还将有效改善 VCSEL 阵列热-光-电性能,为此本领域学者先后展开了相关研究。

2017年,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所发光与应用国家重点实验室 WANG 院士团队首次提出采用耦合线智能算法来优化 VCSEL 阵列台面排布,提高 VCSEL 阵列的热稳定性<sup>[57]</sup>,如图 22 所示。通过测量光谱和计算热阻,表明采用耦合线智能算法优化后的器件具有更好的性能和稳定性。2018—2019年,该团队相继提出一种同时考虑单元间距和总单元

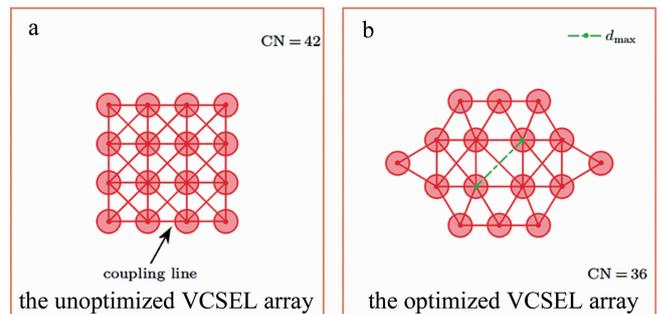


图 22 耦合线示意图<sup>[57]</sup>

Fig. 22 Schematic coupling line<sup>[57]</sup>

面积的遍历设计算法,寻找热耦合因子最小的单元排布形式即为最优的 VCSEL 阵列台面排布<sup>[58-59]</sup>,如图 23 所示。实验结果证明,优化后的 VCSEL 阵列在不同热应力下的  $L-I$  特性和不同电流下的波长漂移热稳定性均表现出明显的优势;优化后 VCSEL 阵列的工作性能与算法和仿真结果非常吻合。

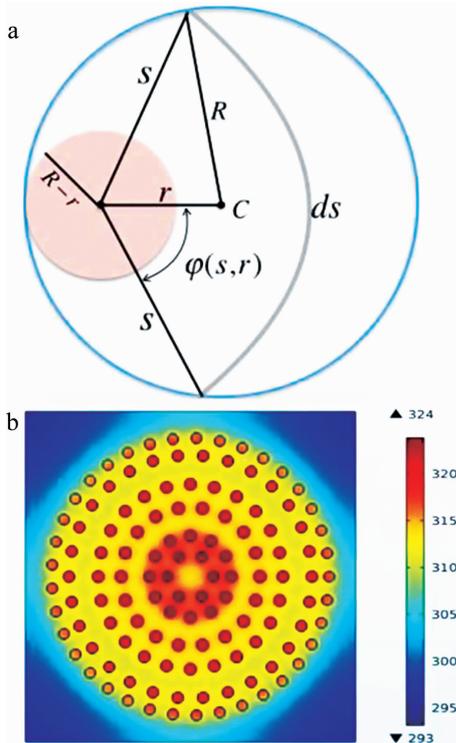


图 23 a—遍历设计算法示意图<sup>[59]</sup> b—优化的 VCSEL 阵列温度分布<sup>[59]</sup>  
Fig. 23 a—schematic of the traversal algorithm<sup>[59]</sup> b—the temperature profile of the optimized VCSEL array<sup>[59]</sup>

2019 年,中国科学院半导体所国家光电器件工程技术研究中心 MA 教授团队基于最小势能原理,引入功耗斥力,提出了一种自组织优化 VCSEL 阵列排布以改善热特性的方法<sup>[60]</sup>,如图 24 所示。优化后的阵列具有更均匀的温度分布,有源区最大温升改善达 6.41%。与遍历算法结果对比证实,该优化结果更接近最优单元排布设计。

随着新兴智能计算技术的不断发展,如能将神经网络与传统的 VCSEL 阵列热-光-电解析模型相结合,利用由热-光-电模型生成的热-光-电特性数据集来训练神经网络,从而实现激光器热-光-电特性的快速重构,并进一步将基于竞争学习的自组织算法、基于群体智能演化的粒子群算法<sup>[61]</sup>、基于生物体进化的遗传算法<sup>[62]</sup>等在内的智能算法应用到 VCSEL 阵列单元排布优化设计乃至注入电流优化设计、氧化孔径优化设计中,将为高密度大规模 VCSEL 阵列热设计提供有效指导。

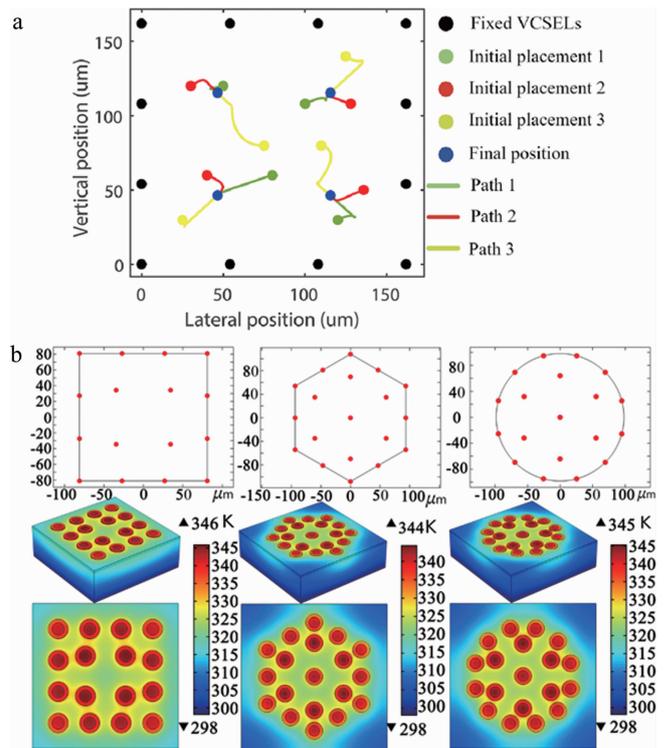


图 24 自组织算法示意图<sup>[60]</sup>  
Fig. 24 Schematic diagram of self-organizing algorithm<sup>[60]</sup>

#### 4 结束语

从 2 维 VCSEL 阵列产热机理、热-光-电模建立、VCSEL 阵列热设计 3 个方面探讨了当今 VCSEL 阵列热学特性研究的热点及发展现状。基于 VCSEL 阵列热源构成,从热-光-电反馈关系出发,在厘清热致 VCSEL 阵列光学性能退化的前提下,深入把握 VCSEL 阵列详细产热机理;比较了涵盖基于速率方程的 VCSEL 电路级热-光-电模型、基于自洽算法的 VCSEL 热-光-电解析模型、基于热传导方程的 VCSEL 热-光-电有限元模型的 3 种典型热-光-电模型的优缺点;最终分类归纳出 VCSEL 阵列热设计的主要方法,即注入电流优化设计、氧化孔径优化设计、单元台面排布优化设计。特别地,单元排布优化设计作为实现 VCSEL 阵列热-光-电性能全面提升最为直观、有效的方法之一,伴随着与人工智能技术及智能算法的不断交叉融合,将对未来开展面向高密度大规模 VCSEL 阵列热设计提供有益支撑,具有迫切的现实意义。

#### 参考文献

[1] SODA H, IGA K I, KITAHARA C, *et al.* GaInAsP/InP surface emitting injection lasers [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1979, 18(12): 2329-2330.  
[2] IGA K. Forty years of vertical-cavity surface-emitting laser: Invention and innovation [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2018, 57(8S2): 08PA01.

- [3] KASUKAWA A, TAKAKI K, IMAI S, *et al.* Enabling VCSEL technology for “Green” optical interconnect in HPC and data centers [C]//IEEE Photonic Society 24th Annual Meeting. New York, USA: IEEE Press, 2011: 393-394.
- [4] WANG C C, LI Ch, DAI J J, *et al.* Thermal analysis of VCSEL arrays based on first principle theory and finite element method[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2019, 51: 196.
- [5] HONG K B, HUANG W T, CHUNG H Ch, *et al.* High-speed and high-power 940 nm flip-chip VCSEL array for LiDAR application[J]. *Crystals*, 2021, 11(10): 1237.
- [6] CHENG Ch S, SHEN Ch Ch, KAO H Y, *et al.* 850/940 nm VCSEL for optical communication and 3D sensing[J]. *Opto-Electronic Advances*, 2018, 1(3): 180005.
- [7] XU Y F, SHI Y J, SHAO J Zh, *et al.* Design of high-precision pulse power supply for high-power semiconductor laser[J]. *Laser Technology*, 2023, 47(1): 108-114 (in Chinese).  
徐一帆, 施阳杰, 邵景珍, 等. 大功率半导体激光器的高精度脉冲电源设计[J]. *激光技术*, 2023, 47(1): 108-114.
- [8] HU X Y, ZHENG H X, ZHENG Y, *et al.* Research on modularization of 500 W blue semiconductor laser based on beam combination [J]. *Laser Technology*, 2024, 48(4): 470-476 (in Chinese).  
胡烜瑜, 郑焱翮, 郑毅, 等. 基于合束的 500 W 蓝光半导体激光模块化研究[J]. *激光技术*, 2024, 48(4): 470-476.
- [9] TIBALDI A, BERTAZZI F, GOANO M, *et al.* VENUS: A vertical-cavity surface-emitting laser electro-opto-thermal numerical simulator [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2019, 25(6): 1500212.
- [10] GREENBERG K, SUMMERS J, FARZANEH M, *et al.* Spatially-resolved thermal coupling in VCSEL arrays using thermoreflectance microscopy[C]//2008 Conference on Lasers and Electro-Optics and 2008 Conference on Quantum Electronics and Laser Science. San Jose, UAS: Optica Publishing Group, 2008: 1-2.
- [11] WIPIEJEWSKI T, YOUNG D B, THIBEAULT B J, *et al.* Thermal crosstalk in  $4 \times 4$  vertical-cavity surface-emitting laser arrays[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1996, 8(8): 980-982.
- [12] GREENBERG K, SUMMERS J, HUDGINGS J. Thermal coupling in vertical-cavity surface-emitting laser arrays[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, 22(9): 655-657.
- [13] PAN G Zh, XUN M, ZHAO Zh Zh, *et al.* High slope efficiency bipolar cascade 905 nm vertical cavity surface emitting laser [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2021, 42(9): 1342-1345.
- [14] JIN D Y, ZHOU Y X, GUAN B L, *et al.* Thermally induced current bifurcation and drastically collapse of output optical power in VCSEL arrays[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2023, 70(12): 6415-6420.
- [15] JIN D Y, YANG Sh M, ZHANG F, *et al.* Thermal design of VCSEL arrays for optical output power improvement[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2022, 69(7): 3761-3767.
- [16] BAVEJA P, KOGEL B, WESTBERGH P, *et al.* Assessment of VCSEL thermal rollover mechanisms from measurements and empirical modeling[J]. *Optics Express*, 2011, 19(16): 15490-15505.
- [17] COLDREN L, CORZINE S, MASHANOVITCH M. Diode lasers and photonic integrated circuits[M]. New York, USA: John Wiley & Sons Press, 2012: 60-64.
- [18] SIMONM S. Semiconductor devices: Physics and technology[M]. 3rd ed. New York, USA: John Wiley & Sons Press, 2008: 82-120.
- [19] BOER K W. The physics of solar cells[J]. *Journal of Applied Physics*, 1979, 50(8): 5356-5370.
- [20] WILMSEN C, TEMKIN H, COLDREN L. Vertical-cavity surface-emitting lasers: Design, fabrication, characterization, and applications[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2001: 55-60.
- [21] MENA P V, MORIKUNI J J, KANG S M, *et al.* A simple rate-equation-based thermal VCSEL model[J]. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 1999, 17(5): 865-872.
- [22] MENA P V, MORIKUNI J J, KANG S M, *et al.* A comprehensive circuit-level model of vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1999, 17(12): 2612-2632.
- [23] SOOUDI E, AHMADI V, SOROOSH M. A versatile HSPICE electro-opto-thermal circuit model for vertical-cavity surface-emitting lasers[C]//2006 IEEE International Conference on Semiconductor Electronics. New York, USA: IEEE Press, 2006: 866-870.
- [24] ENTEZAM S, ZARIFKAR A, SHEIKHI M H. Thermal equivalent circuit model for coupled-cavity surface-emitting lasers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2015, 51(4): 2400108.
- [25] DESGREYS P, KARRAY M, CHARLOT J, *et al.* Opto-electro-thermal model of a VCSEL array using VHDL-AMS[C]//Proceedings of the 2002 IEEE International Workshop on Behavioral Modeling and Simulation. New York, USA: IEEE Press, 2002: 123-126.
- [26] CHANG Q, SHI X Zh, WANG G F, *et al.* A new circuit-level thermal model of vertical-cavity surface-emitting lasers[C]//2009 Second International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation. New York, USA: IEEE Press, 2009: 937-940.
- [27] NAKWASKI W, OSINSKI M. Thermal properties of etched-well surface-emitting semiconductor lasers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1991, 27(6): 1391-1401.
- [28] NAKWASI W, OSINSKI M. On the thermal resistance of vertical-cavity surface emitting lasers[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 1997, 29(9): 883-892.
- [29] MIEYEVILLE F, JACQUEMOD G, GAFFIOT F, *et al.* A behavioural opto-electro-thermal VCSEL model for simulation of optical links[J]. *Sensors and Actuators*, 2001, A88(3): 209-219.
- [30] BAVEJA P P, KOGEL B, WESTBERGH P, *et al.* Impact of device parameters on thermal performance of high-speed oxide-confined 850 nm VCSELs[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2012, 48(1): 17-26.
- [31] OSINSKI M, NAKWASKI W. Thermal analysis of closely-packed two-dimensional etched-well surface-emitting laser arrays[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 1995, 1(2): 681-696.
- [32] BOIKO D L, GUERRERO G, KAPON E. Thermoelectrical model for vertical cavity surface emitting lasers and arrays[J]. *Journal of Applied Physics*, 2006, 100(10): 103102.
- [33] CHOI J H, WANG L, BI H, *et al.* Effects of thermal-via structures on thin-film VCSELs for fully embedded board-level optical interconnection system[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2006, 12(5): 1060-1065.
- [34] LEE H K, SONG Y M, LEE Y T, *et al.* Thermal analysis of asymmetric intracavity-contacted oxide-aperture VCSELs for efficient heat dissipation [J]. *Solid-State Electronics*, 2009, 53(10): 1086-1091.
- [35] JEONG H J, CHOQUETTE K. Thermal modeling of transferred VCSELs[C]//2013 IEEE Photonics Conference. New York, USA: IEEE Press, 2013: 248-249.
- [36] UEMURA T, NAGASHIMA K, NISHIMURA N, *et al.* Thermal design of 28 Gb/s  $\times$  24-channel CDR-integrated VCSEL-based transceiver module [C]//2016 IEEE CPMT Symposium Japan. New York, USA: IEEE Press, 2016: 79-82.

- [37] FORMAN C, LEE S, YOUNG E, *et al.* Continuous-wave operation of m-plane GaN-based vertical-cavity surface-emitting lasers with a tunnel junction intracavity contact [J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 112(11):111106.
- [38] ZHANG J W, NING Y Q, ZHANG X, *et al.* Improved performances of 850 nm vertical cavity surface emitting lasers utilizing the self-planar mesa structure[J]. *Optics & Laser Technology*, 2014, 56(5): 343-347.
- [39] MEI Y, WENG G E, ZHANG B P, *et al.* Quantum dot vertical-cavity surface-emitting lasers covering the green gap[J]. *Light: Science & Applications*, 2017, 6(1): e16199.
- [40] FANG T X, CUI B F, HAO Sh, *et al.* The simulation of thermal characteristics of 980 nm vertical cavity surface emitting lasers[J]. *Journal of Semiconductors*, 2018, 39(2): 024001.
- [41] WANG J H, SAVIDIS L, FRIEDMAN E. Thermal analysis of oxide-confined VCSEL arrays [J]. *Microelectronics Journal*, 2011, 42(5): 820-825.
- [42] XUN M, XU Ch, XIE Y Y, *et al.* Modal properties of 2-D implant-defined coherently coupled vertical-cavity surface-emitting laser array [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2015, 51(1): 2600106.
- [43] XUN M, PAN G Zh, ZHAO Zh Zh, *et al.* Analysis of thermal properties of 940 nm vertical cavity surface emitting laser arrays [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2020, 68(1): 158-163.
- [44] SHI J J, QIN L, NING Y Q, *et al.* 850 nm vertical cavity surface-emitting laser arrays [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(1):17-23 (in Chinese).  
史晶晶, 秦莉, 宁永强, 等. 850 nm 垂直腔面发射激光器阵列 [J]. *光学精密工程*, 2012, 20(1): 17-23.
- [45] LI W, QI Y X, LIU S P, MA X Y. High power density and temperature stable vertical-cavity surface-emitting laser with a ring close packing structure [J]. *Optics and Laser Technology*, 2020, 132(3):106510.
- [46] HAGHIGHI N, MOSER P, ZORN M, *et al.* 19-element 2D top-emitting VCSEL arrays [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(1): 186-192.
- [47] HEUSER T, PFLUGER M, FISCHER I, *et al.* Developing a photonic hardware platform for brain-inspired computing based on  $5 \times 5$  VCSEL arrays [J]. *Journal of Physics: Photonics*, 2020, 2(4): 044002.
- [48] CHOQUETTE K D, SCHNEIDER R P, LEAR K L, *et al.* Low threshold voltage vertical-cavity lasers fabricated by selective oxidation [J]. *Electronics Letters*, 1994, 30(24): 2043-2044.
- [49] ANGELOS C, HINCKLEY S, MICHALZIK R, *et al.* Simulation of current spreading in bottom-emitting vertical cavity surface emitting lasers for high-power operation [J]. *Proceedings of the SPIE*, 2004, 5277: 261-272.
- [50] TONG C Zh, HAN Q, PENG H L, *et al.* Annlysis of series sesis-tance of sxide-aperture confined vertical-cavity surface-emitting laser [J]. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2005, 15(7):1459-1463 (in Chinese).  
佟存柱, 韩勤, 彭红玲, 等. 氧化限制型垂直腔面发射激光器串联电阻分析 [J]. *半导体学报*, 2005, 15(7): 1459-1463.
- [51] XU D W, YOON S F, TONG C Z, *et al.* Influence of oxide aperture on the properties of 1.3  $\mu\text{m}$  InAs-GaAs quantum-dot VCSELs [C]//2008 IEEE Photonics Global@ Singapore. New York, USA: IEEE Press, 2008: 1-3.
- [52] LIU D, NING Y Q, QIN L, *et al.* Effect of oxide aperture on temperature rise in high power vertical-cavity surface-emitting laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(5): 0502005 (in Chinese).  
刘迪, 宁永强, 秦莉, 等. 氧化孔径对高功率垂直腔面发射激光器温升的影响 [J]. *中国激光*, 2012, 39(5): 0502005.
- [53] PENG Ch Y, TSAO K, CHENG H T, *et al.* Investigation of the current influence on near-field and far-field beam patterns for an oxide-confined vertical-cavity surface-emitting laser [J]. *Optics Express*, 2020, 28(21): 30748-30759.
- [54] LIAO W Y, LI J, LI Ch Ch, *et al.* Oxide-aperture-dependent output characteristics of circularly symmetric VCSEL structure [J]. *Chinese Physics*, 2020, B29(2): 024201.
- [55] BRAVE A, HEGBLUM E. Variable emission area design for a vertical-cavity surface-emitting laser array: US11482839B2 [P]. 2022-12-25.
- [56] CZYSZANOWSKI T, SARZALA R, DEMS M, *et al.* Spatial-mode discrimination in guided and antiguided arrays of long-wavelength VCSELs [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2013, 19(5): 1702010.
- [57] ZHONG Ch Y, ZHANG X, LIU D, *et al.* Enhanced thermal stability of VCSEL array by thermoelectric analysis-based optimization of mesas distribution [J]. *Chinese Physics*, 2017, B26(6): 064204.
- [58] ZHONG Ch Y, ZHANG X, HOFMANN W, *et al.* Low thermal crosstalk 808 nm VCSEL arrays with nonlinear mesa configuration [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(6): 1504608.
- [59] LIU Y Y, HUANG Y W, ZHONG Ch Y, *et al.* VCSEL array thermal-distribution optimized by mesas rearrangement [J]. *Optik*, 2019, 186(6): 443-448.
- [60] QI Y X, LI W, LIU S P, *et al.* Optimized arrangement of vertical cavity surface emitting laser arrays to improve thermal characteristics [J]. *Journal of Applied Physics*, 2019, 126(19): 191101.
- [61] NING Y, JIE Y, YE T. Thermal chips layout method in MCM based on an improved particle swarm algorithm [C]//2019 Chinese Control and Decision Conference (CCDC). New York, USA: IEEE Press, 2019: 537-541.
- [62] PU G Q, YI L L, ZHANG L, *et al.* Genetic algorithm-based fast real-time automatic mode-locked fiber laser [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, 32(1): 7-10.