

文章编号: 0253-2239(2009)03-0805-06

大功率 AlGaInP 红光 LED 散热基板热分析

陈焕庭^{1,2} 吕毅军^{1,2} 陈 忠^{1,2} 张海兵^{1,2} 高玉琳^{1,2}

(¹ 厦门大学物理系, 福建 厦门 361005; ² 福建省半导体照明工程技术研究中心, 福建 厦门 361005)

摘要 采用有限体积数值模拟、瞬态热阻测试方法以及热沉温度—峰值波长变化的关系,对三种散热基板上大功率 AlGaInP 红光发光二极管(LED)进行热特性分析。三种 LED 采用相同型号、规格,散热基板,区别在于散热通道以及材料。测量样品的瞬态温度响应曲线,基于结构函数理论模型对温度响应曲线进行数学处理,得出包含热阻与热容的结构函数,区分出样品内部热流通道上各个区域的热阻与热容,进而发现散热瓶颈区域。测试样品在不同热沉温度下的电致发光光谱,通过热沉温度—峰值波长系数为区别样品散热性能提供定性判断依据。通过模拟与测试结果比较,为优化陶瓷基板内部散热结构,设计最佳的散热模型提供重要参考依据。

关键词 光学器件; 发光二极管; 陶瓷基板; 瞬态热阻测试法; 结构函数; 有限体积法

中图分类号 TN3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092903.0805

Analysis of Thermal Spreading Boards for High-Power AlGaInP Red LEDs

Chen Huanting^{1,2} Lü Yijun^{1,2} Chen Zhong^{1,2} Zhang Haibing^{1,2} Gao Yulin^{1,2}

¹ Department of Physics, Xiamen University, Xiamen, Fujian, 361005, China

² Fujian Engineering Research Center for Solid-State Lighting, Xiamen University, Xiamen, Fujian, 361005, China

Abstract The thermal characteristics of three kinds of thermal spreading boards with high-power AlGaInP LEDs were analyzed by finite volume thermal simulation method, transient thermal resistance measurement and the relationship of heat sink temperature and peak wavelength. With the same type and configuration of AlGaInP LEDs on the three kinds of thermal spreading boards, the difference lies in thermal spreading channels and materials. Transient temperature response curve is measured from which structure functions are extracted to evaluate the thermal resistance and the thermal capacitance in the heat flow path. Based on the structure function, thermal problem during the heat flow path can be easily located. The electroluminescence spectra of AlGaInP LEDs with different thermal spreading boards under various electrical currents were investigated. In terms of the relationship of heat sink temperature-peak wavelength, the thermal characteristics of samples can be qualitatively estimated. By comparison, thermal simulation and testing offer important evidence for the optimization and design of the most suitable thermal spreading model for ceramic boards.

Key words optical device; light emitting diode (LED); ceramic board; transient thermal resistance measurement; structure function; finite volume method

1 引 言

与普通光源相比,发光二极管(LED)具有省电、寿命长、光效高、无辐射、无污染等特点,已被广泛应

用于照明领域以及其它领域中^[1,2]。大功率 LED 耗散功率高,芯片温升幅度大。芯片温度升高将使其输出光通量减小,峰值波长漂移,荧光粉转换效率降

收稿日期: 2008-08-11; **收到修改稿日期**: 2008-09-01

基金项目: 国家 863 计划重大专项(2006AA03A175)、福建省重大科技项目(2006H0092)和福建省自然科学基金(2008J0030)资助课题。

作者简介: 陈焕庭(1982—),男,博士研究生,主要从事半导体照明检测方面的研究。E-mail: htchen23@yahoo.cn

导师简介: 吕毅军(1973—),男,副教授,硕士生导师,主要从事 III-V 材料的光学性质研究,半导体照明测试研究。

E-mail: yjlu@xmu.edu.cn

低,在金属界面区域形成金属扩散以及金属化合物,隧穿电流增大^[3~5]。因此如何提高大功率LED散热性能,是大功率LED器件封装应用要解决的关键问题^[6,7]。大功率LED所产生热量主要通过散热基板传导到外界环境中。不同的散热基板材料导热性能各不相同。散热基板选取对大功率LED器件热性能有直接影响。常用的散热基板材料包括硅、金属芯印制板(MCPCB)、陶瓷(Al_2O_3 , AlN , SiC)和复合材料等。MCPCB是将印刷电路板贴附在另外一种热传导效果更好的金属上,增强散热性能,可有效解决大功率器件所带来的散热问题。在实用陶瓷基板材料中,氧化铝价格较低,从机械强度、绝缘性、导热性、耐热性、化学稳定性等方面考虑,综合性能好。

对传统铝基板以及氧化铝陶瓷基板进行热特性分析,选用有限体积法对样品内部温度场分布进行数值模拟^[8]。结合物理测试,验证仿真模型准确性,并对陶瓷基板结构进行优化设计,从而大大提高散热性能。在热阻测试中,由于芯片的温度响应时间一般在 $100\ \mu\text{s}$ 以下,如果最初 $1\ \text{ms}$ 瞬态温度变化数据没有被采集到,那么最终测试结果被低估 $10\% \sim 15\%$ 。因此需在 $1\ \mu\text{s}$ 时间分辨率下对LED芯片的瞬态温度响应曲线实时测量,保证测试结果准确性。在不同热沉温度下,测试不同样品的电致发光

谱,定性判别峰值波长偏移幅度与散热性能关系。

2 理 论

2.1 结构函数理论模型

V. Székely等^[9,10]最早提出结构函数理论模型,将待测器件的瞬态温度响应曲线 $a(t)$ 经过(1)式转换,得到对数时间坐标系中的响应变量 $a(z)$:

$$z = \ln t, \quad (1)$$

$$\frac{da(z)}{dz} = R(z) \otimes w(z), \quad (2)$$

$$w(z) = \exp[z - \exp(z)], \quad (3)$$

$$K(R_z) = \frac{dC_z}{dR_z}, \quad (4)$$

$$K(R_z) = \frac{cA dx}{dx/\lambda A} = c\lambda A^2, \quad (5)$$

式中 $R(z)$ 为时间常数谱型, \otimes 为卷积符号, c 为单位体积热容, C, R 分别为热流量路径上节点两端的热容和热阻, C_z 和 R_z 分别为 C 和 R 的叠加值, λ 为热导率, A 为热流通过的横截面积, $w(z)$ 为时间变量,对(2)式去卷积运算,得到待测器件的时间常数谱分布 $R(z)$ 。 $R(z)$ 为图1(a)FOSTER网络模型的表达形式。FOSTER网络模型中热容 C 连接不同区域的两个节点,某节点热容大小和相邻两节点温度相关。但在实际物理模型中,某节点热容是由该

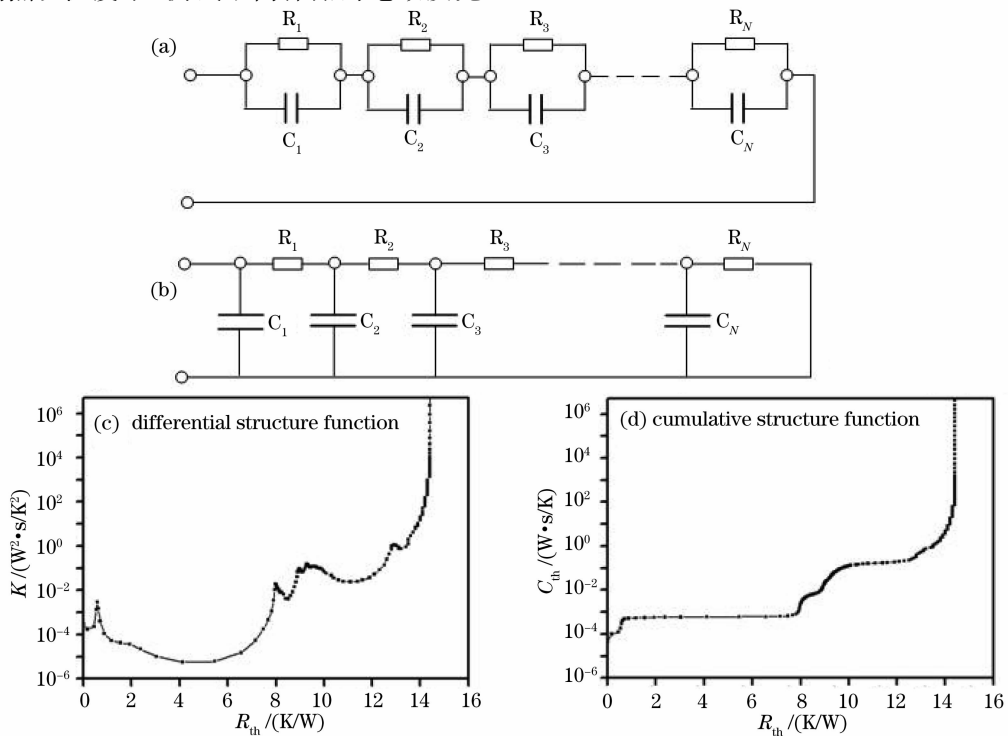


图1 热阻网络模型以及结构函数。(a)FOSTER网络模型;(b)CAUER网络模型;(c)微分结构函数;(d)积分结构函数
Fig.1 Model of thermal resistance network and structure function. (a) Model of FOSTER network; (b) model of CAUER network; (c) differential structure function; (d) cumulative structure function

节点温度所决定的。因此需通过数学转换将 FOSTER 网络模型变换为 CAUSER 网络模型[图 1(b)]。CAUSER 网络模型中各个支点上的热阻、热容信息通过积分结构函数[图 1(d)]体现出来。为了能清楚区分器件内部热流传导路径上不同材料交界面,利用(4)式将积分结构函数转换为微分结构函数[图 1(c)]。结合(5)式,可推断出在微分结构函数图中波峰位置表示热导率高的材料,波谷位置表示热导率低的材料。通过积分或微分结构函数可以鉴别出器件内部热流传导路径上各个区域的热阻与热容。在积分或微分结构函数图中曲线变化区域就表示热流经过不同材料界面或者相交界面横截面尺寸不同,因此利用拐点位置判断出不同材料的位置。

通过结构函数理论分析可知,在时间响应精度足够高的条件下,基于半导体封装设备的瞬态温度响应曲线,就可通过上述理论反馈形成微分或积分

结构函数。因此利用结构函数理论就能检测出芯片结点到环境的热传导路径发生的故障,如芯片粘结空隙、焊接缺陷等,对器件封装内部失效性的分析,具有重要实际意义。

2.2 有限体积理论

目前热分析软件运用的数值算法主要为有限差分法、有限元法、有限体积法。有限差分法只适合于规则的几何形状差分网格;有限元法占用大量计算机资源和处理时间,而有限体积法综合了有限元和有限差分法的优点,并克服它们的缺点。因此本文采用有限体积法数值模拟法,其算法运用 Navier-Stokes 方程在三维结构模型中全面分析电子系统的热辐射、热传导、热对流以及流体温度、流体压力、流体速度和运动矢量等。其遵循的质量、动量、热量方程分别为

$$\left[\frac{\partial \rho}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \rho \right] = -\rho \nabla \cdot \mathbf{v}, \quad (6)$$

$$\rho \left[\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right] = -\nabla p + \rho \mathbf{g} - \frac{2}{3} \nabla (\mu \nabla \cdot \mathbf{v}) + 2 \nabla \cdot (\mu \mathbf{S}), \quad (7)$$

$$\rho c_p \left[\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla T \right] = \nabla \cdot (k \nabla T) - \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot \mathbf{v})^2 + 2(\mu \mathbf{S} : \mathbf{S}) + \beta \mathbf{T} \left[\frac{\partial \rho}{\partial t} + (\nabla \cdot \mathbf{v}) \rho \right], \quad (8)$$

式中 ρ 为密度, \mathbf{v} 为速度矢量, p 为压力, C_p 为定压热容, t 为时间, g 为重力加速度, μ 为粘滞度, k 为热导率, \mathbf{S} 为应变速度张量, T 为温度, β 为膨胀率。

依据器件实际环境、材料参数定义方程并进行求解,就可获得器件在各种情况下温度场的分布。

3 实验与模拟

氧化铝陶瓷的玻璃成分一般有二氧化硅和其他氧化物组成,玻璃含量可降低陶瓷的烧结温度。本文的陶瓷基板材料采用纯度为 99.99% 的 Al_2O_3 和经熔融法制备的低软化点的硅酸盐玻璃;将两种原料按一定比例混合,经湿法球磨后烘干。将烘干后的粉体配制成浆料,进行注浆成型,制备出两个整体尺寸和形状相同的坯体。其区别在于其中一个坯体的中心区域留有 9 个直径为 1 mm 间距为 1 mm 的矩阵型排列的散热通道,并在散热通道中注入银浆;用丝网印刷方式在两个陶瓷基板坯体上布上电路。之后将两个坯体放入电炉慢速升温(3 K/min)到 723 K 保温 1 h 进行排胶,接着以 5 K/min 的速率升至 1073 K 并保温 2 h,然后随电炉自然冷却制备

出两款陶瓷散热基板。

对同一厂家同一批次中众多样品的光、电、热参数综合测试比较,前期筛选出 3 个综合性能参数基本一致的倒装硅衬底结构 AlGaInP 红光 LED 样品,从而确保样品粘结在不同散热基板后,具有可比性。样品 #1 散热底板为内部增加 9 个散热通道的陶瓷基板;样品 #2 散热底板为无散热通道的陶瓷基板;样品 #3 散热底板为通用铝基板。MCPCB 的厚度、面积与两款陶瓷基板相同。T3Ster 是用于测试 IC, LED, 散热器, 热管等电子器件热特性的热测试仪。采用 Micred 公司的 T3Ster 测试仪测试并比较三种样品的散热能力。运用 JEDEC 静态实验方法(JESD51-1),通过改变电子器件的输入功率,使得器件产生温度变化。在变化过程中,T3Ster 测试出芯片的瞬态温度响应曲线。基于升温或降温曲线可分析得到待测器件全面的热特性,利用 R-C 热阻网络和结构函数理论^[11,12],定量提取出待测器件内部的热流路径,从而获得积分结构函数和微分结构函数。热阻计算如下式所示:

$$R_{th} = \frac{T_{\text{Junction}} - T_{\text{case}}}{P_{\text{electrical}} - P_{\text{optical}}}. \quad (9)$$

功率型 LED 器件耗散电功率有约 20% 左右转换为可见光,该部分光对热无贡献,为了准确计算发光器件热阻,必须测试其光功率。因此利用 T3ster 配备的 TERALED 系统测试待测器件的光功率,加热电流为 350 mA,测试电流为 3 mA,热沉温度控制范围 298~328 K,每间隔 10 K 采集待测器件的电压、光功率、温度变化曲线。将待测器件电功率扣除光功率,得到其实际发热功耗,依据电压随温度变化关系,计算温度系数 K 。对样品加载恒定电流 350 mA,热沉温度控制范围 288~348 K,每隔 20 K 采用 HR4000CG-UV-NIR 高分辨率光纤光谱仪测试样品电致发光谱。

依据 LED 实际封装尺寸在有限体积模拟软件 FLOThERM 中建模。建模过程对 LED 结构简化处理,透镜的热导率很低,可认为是绝缘材料。芯片由 p 型、n 型 GaP、多量子阱 AlGaInP、电流扩展层和电极组成。优化电流密度分布的电极对器件热场分布影响很小,在建模过程中将其忽略。由于量子阱和电流扩展层厚度在纳米数量级,也不予考虑。将 GaP 近似当作芯片材料。模型由 GaP 红光芯片,焊料,硅衬底,导电银胶,铜层,导热硅胶,MCPCB 或陶瓷基板组成。在热模拟过程中,换热系数大小将对模拟结果

有直接影响^[13],可利用 FLOThERM 自动求解空气界面换热系数。空气导热系数、粘滞度、密度分别设置为 $2.61 \times 10^{-2} \text{ W/mk}$, $1.84 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$, 1.16 Kg/m^3 。

4 结果分析

利用结构函数理论提取积分结构函数,图 2 为样品 #3 积分结构函数图。积分结构函数表示待测器件一维热传导路径上 R-C 网络结构示意图,横轴为热阻值(R_{th}),纵轴为热容对数坐标。从图中可直观区分出芯片结点-热沉的热阻以及热容。芯片热阻为 2.020 K/W,焊料热阻为 8.381 K/W,硅衬底热阻为 0.814 K/W,导电银胶热阻为 23.948 K/W,铜层热阻为 3.030 K/W,导热硅胶热阻为 6.281 K/W,MCPCB 热阻为 3.380 K/W,MCPCB 至热沉的界面热阻为 4.629 K/W。从积分结构函数图中分析可知,待测器件散热瓶颈位于不同材料之间的粘结层,如待测器件中焊料、银胶、硅胶。受粘结材料以及封装工艺制约,致使该区域热阻较大。样品 #3 的硅衬底与铜层之间采用导电银胶粘结,但银颗粒在空间分布不均使粘结界面产生空隙,严重影响待测器件的热性能,致使该区域热阻增大。

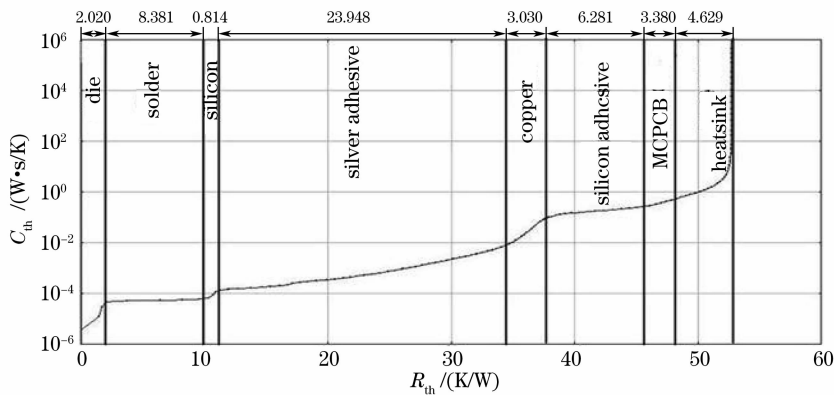


图 2 样品 #3 积分结构函数

Fig. 2 Cumulative structure function of the third sample

图 3(a) 为三种样品的温度响应曲线图,在 $1 \mu\text{s} \sim 1.413 \text{ s}$ 之间三种样品温度响应曲线保持非常高的重复性。这部分温度响应是由 LED 芯片到内部铜层之间结构引起的,说明前期筛选出 3 颗 AlGaInP 红光 LED 散热能力具有较高一致性。图 3(b) 为三种样品的微分结构函数图。三种样品从芯片至散热基板热阻依次为 46.144 K/W, 49.759K/W, 47.857 K/W。热阻区别主要在于散热基板,因为三种散热基板面积较大、厚度薄,且热

流从器件内部传导至散热基板上之后,就形成三维热辐射状扩散到外界,因此三种样品热阻相差较小。采用有限体积法模拟三种样品的内部热场分布,设定恒定 0.617 W 热流加载在芯片表面,可近似认为有源层区域,对流模式为空气自然对流,环境温度为 298 K,依据器件内部各个区域材料以及几何尺寸设定建模参数。其中图 4 为模拟样品 #3 内部温度场,从器件内部温度场分布图,可获取样品结面以及壳面温度值,再依据(10)式就可计算出三种样品热

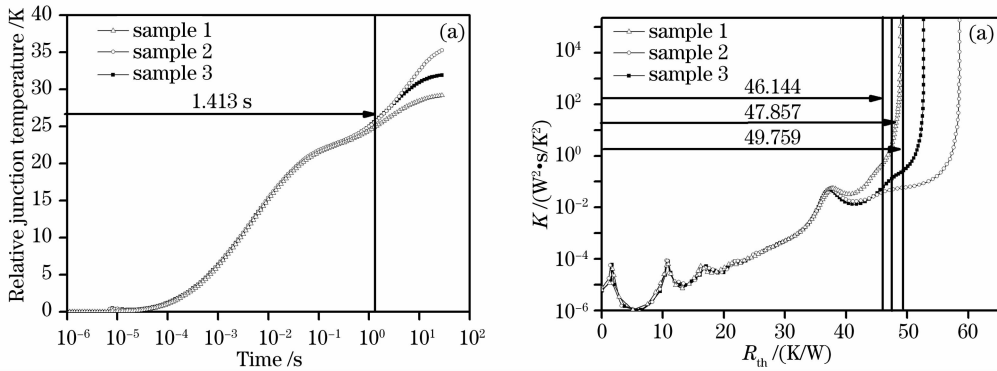


图 3 三种样品的瞬态温度曲线(a), 微分结构函数(b)

Fig. 3 Transient temperature curve (a), differential structure function (b) of three samples

阻模拟值。三种样品的热阻为 45.875 K/W, 47.629 K/W, 46.949 K/W。模拟值与测试结果基本可一一对应, 模拟值比测试结果偏小。因为一方面仿真建模过程对芯片简化处理, 忽略电极、电流扩展层、量子阱结构等; 另一方面忽略待测器件内部的铜柱上表面银层, 该金属层可将芯片向背面发出的光线反射出来, 提高 LED 的出光效率。热模拟方法快速、方便分析不同封装材料对器件热性能的影响, 作为有效评价大功率 LED 封装性能的工具。模拟热瞬态响应曲线可有效判断大功率 LED 的粘结层性能^[14,15]。从实验与模拟结果可知, 三种样品封装设计区别在于散热基板材料以及尺寸。样品 #3 的散热基板为 MCPCB, 热流依次通过铜箔、绝缘层、铝板, 然后再通过铝板扩散到周围环境中。该结构的散热瓶颈在于绝缘层的厚度以及热导率, 绝缘层热导率低, 因此 MCPCB 的大部分热阻取决于绝缘层, 其厚度是影响热阻的关键因素, 设计时需尽量减少绝缘层的厚度, 能大大减少 MCPCB 热阻, 有利于提高散热性能。样品 #2 为普通氧化铝陶瓷基板。从测试结果而知, 氧化铝热导率低, 其热阻高于通用铝基板。芯片产生的热流无法及时传导到外界, 热

量在器件内部堆积, 局部位置过热, 严重影响陶瓷基板上器件性能, 因此大大限制了陶瓷基板的应用。利用有限体积数值模拟对陶瓷基板内部结构优化设计, 在陶瓷基板内部增加 9 个填充银浆矩阵型排列的散热通道。通过模拟和实验结果都可证实经过改良后的陶瓷基板, 大大增强散热能力, 与另外两种散热基板相比, 体现出最佳散热性能, 热阻比一般陶瓷基板低 3.615 K/W, 比通用铝基板低 1.713 K/W。

通过数值模拟以及瞬态测试热阻方法, 直接判断不同样品散热能力。同时可依据 LED 峰值波长与热沉温度的关系, 间接论证经过改良后陶瓷基板的散热性能得到提高。加载不同电流以及脉冲条件下, LEDs 的峰值波长随结温变化发生偏移^[16,17], AlGaInP LED 的峰值波长随温度变化的系数为 0.1562 nm/K^[18]。测试样品在不同热沉温度下的电致发光光谱, 分析不同封装散热能力对芯片性能的影响, 结温与峰值波长的关系以及温度效应影响。芯片产生的热量若无法及时的经过散热通道传导到环境中, 将使峰值波长发生移动。AlGaInP LED 峰值波长发生红移可归因于结温升高引起带隙收缩^[19]。三种样品加载电流 350 mA 下, 热沉温度控制范围为 288~348 K, 每间隔 20 K 测试样品电致发光谱。峰值波长与热沉温度的关系由下式确定:

$$\lambda_p(T_H) = kT_H + \lambda_{p0}, \quad (10)$$

$k = d\lambda_p/dT_H$ 为峰值波长与热沉温度的系数, $\lambda_p(T_H)$ 为热沉温度为 T_H 时待测样品峰值波长, λ_{p0} 为热沉温度为 273 K 时峰值波长。如图 5 所示三种样品热沉温度-峰值波长系数依次 0.1283 nm/K, 0.1461 nm/K, 0.1360 nm/K。随着热沉温度增大, 不同样品散热性能就可通过峰值波长偏移幅度大小体现出来。在热沉温度变化幅度相同条件下, 样品 #1 峰值波长变化最小, 散热速率快, 有源区产生的

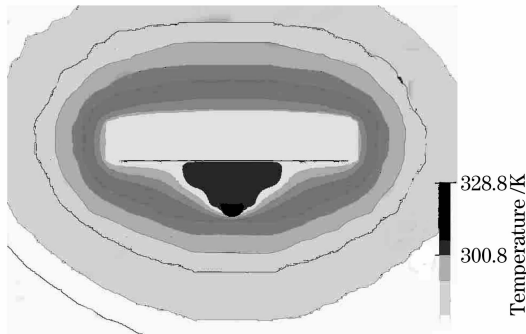


图 4 模拟样品 #3 的内部温度分布

Fig. 4 Simulation result of internal temperature for the third sample

热流能及时经过陶瓷基板中的 9 个散热通道传导至周围环境中。而样品 #2 无散热通道陶瓷基板热导率低,随着热沉温度增大,热量在器件内部堆积,导致其峰值波长红移幅度明显。样品 #3 热沉温度-峰值波长系数介于样品 #1 与样品 #2 之间。利用热沉温度-波长系数定性判断不同样品的热阻高低以及散热能力,与热阻测试和数值模拟结果一致。

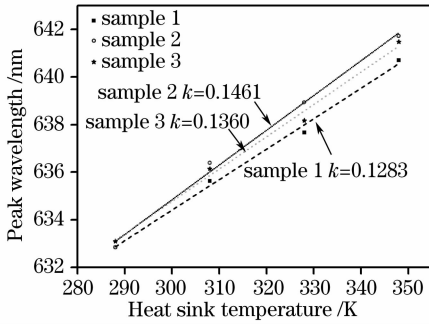


图 5 三种样品热沉温度与峰值波长关系

Fig. 5 Relationship of heat sink temperature and peak wavelength for three samples

5 结 论

结合有限体积数值模拟、瞬态热阻测试方法以及热沉温度-峰值波长变化的关系,分析比较三种散热基板封装 AlGaInP 红光 LED 热特性。基于微分、积分结构函数图,区分器件内部热流通道上各个区域的热阻与热容。发现待测器件散热瓶颈区域,有利论证了结构函数理论可为评价器件散热性能、内部失效提供可靠的依据。采用有限体积数值模拟样品内部热场分布,优化普通陶瓷基板内部结构,并通过实验中论证其散热性能明显提高,对于陶瓷基板广泛应用具有重要的参考作用。不同样品散热性能也可利用峰值波长偏移幅度体现。在加载相同电功率,不同热沉温度下,若峰值波长变化幅度小,则表明样品散热速率快,芯片热流能及时经过散热底板。若样品散热底板热导率低,热量在器件内部堆积,则导致峰值波长偏移明显。通过热沉温度-波长系数为区别样品散热性能提供定性判断依据。

参 考 文 献

1 Zhong Gaoyu, Zhou Suyun, Chen Guanyu *et al.*. An invalidation mechanism in organic light-emitting diodes [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(1): 36~38
钟高余,周素云,陈冠雨等. 有机发光器件的一种失效机制[J]. *中国激光*, 2008, **35**(1): 36~38

2 Guan Baolu, Guo Xia, Gu Xiaoling *et al.*. Characteristic of micro-opto-electro-mechanical system-cantilever of tunable micro-cavity light emitting diodes[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(2): 245~248
关宝璐,郭霞,顾晓玲等. 可调谐微腔发光二极管微光机电系统悬臂梁的特性[J]. *中国激光*, 2008, **35**(2): 245~248
3 T. Taguchi, H. Kudo, Y. Yamada. Effect of high current injection on the blue radiative recombination in InGaN single quantum well light emitting diodes[J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1998, **37**(3B): 1462~1464
4 K. Fujiwara, H. Imai, T. Fujiwara *et al.*. Analysis of deterioration in In solder for GaAlAs DH lasers[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1979, **35**(11): 861~863
5 X. A. Cao, J. M. Teetsov, M. P. Develyn *et al.*. Electrical characteristics of InGaN/GaN light-emitting diode grown on GaN and sapphire substrates[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **85**(1): 7~9
6 Liu Shanpeng, Bai Yu, Liu Xiang *et al.*. Lifetime prolongation by graded junction for blue organic light emitting diodes[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(9): 1687~1690
刘善鹏,白钰,刘向等. 利用缓变结提高蓝色有机发光二极管的寿命[J]. *光学学报*, 2007, **27**(9): 1687~1690
7 Kuang Hai, Liu Junlin, Cheng Haiying *et al.*. Effect of transferred anferred submount materials on properties of GaN-based LED chips grown on Si substrate[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 143~145
邝海,刘军林,程海英等. 转移基板材质对 Si 衬底 GaN 基 LED 芯片性能的影响[J]. *光学学报*, 2008, **28**(1): 143~145
8 L. Kim, J. H. Choi, S. H. Jang *et al.*. Thermal analysis of LED array system with heat pipe[J]. *Thermochim. Acta*, 2007, **455**(1): 21~25
9 V. S ekely. THERMODEL: a tool for compact dynamic thermal model generation[J]. *Microelectron J.*, 1998, **29**(4): 257~267
10 A. Csendes, V. S ekely, M. Rencz. An efficient thermal simulation tool for ICs, microsystem elements and MCMs: the μ S-THERMANAL[J]. *Microelectron J.*, 1998, **29**(4): 241~255
11 M. Rencz, A. Poppe, E. Koll ar *et al.*. Increasing the accuracy of structure function based thermal material parameter measurements [J]. *IEEE T Compon. Pack T.*, 2005, **28**(1): 51~57
12 V. S ekely, T. V. Bien. Fine structure of heat flow path in semiconductor devices: a measurement and identification method [J]. *Solid-State Electron*, 1988, **31**(9): 1363~1368
13 T. H. Lee, L. Kim, W. J. Hwang *et al.*. Thermal analysis of GaN-based LEDs using the finite element method and unit temperature profile approach[J]. *Phys. Stat. Sol. B*, 2004, **241**(12): 2681~2684
14 H. H. Kim, S. H. Choi, S. H. Shin *et al.*. Thermal transient characteristics of die attach in high power LED PKG [J]. *Microelectronics Reliability*, 2008, **48**(3): 445~454
15 V. S ekely. A new evaluation method of thermal transient measurement results[J]. *Microelectron J.*, 1997, **28**(3): 277~292
16 T. Gessmann, E. F. Schubert. High-efficiency AlGaInP light-emitting diodes for solid-state lighting applications[J]. *J. Appl. Phys.*, 2004, **95**(5): 2203~2216
17 N. C. Chen, Y. N. Wang, C. Y. Tseng *et al.*. Determination of junction temperature in AlGaInP/GaAs light emitting diodes by self-excited photoluminescence signal[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **89**(10): 101114-1~101114-3
18 S. Chhajed, Y. Xi, Y. L. Li *et al.*. Influence of junction temperature on chromaticity and color-rendering properties of trichromatic white-light sources based on light-emitting diodes [J]. *J. Appl. Phys.*, 2005, **97**(5): 054506-1~054506-8
19 P. Manninen, P. Orrevel ainen. On spectral and thermal behaviors of AlGaInP light-emitting diodes under pulse-width modulation[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **91**(18): 181121-1~181121-3