

热循环加载条件下焊点形态参数对板级光互连模块对准偏移影响分析

吴 松¹, 黄春跃¹, 梁 颖², 李天明³, 郭广阔¹, 熊国际¹, 唐文亮¹

(1. 桂林电子科技大学机电工程学院, 广西桂林 541004; 2. 成都航空职业技术学院电子工程系, 四川成都 610021; 3. 桂林航天工业学院汽车与动力工程系, 广西桂林 541004)

摘 要: 建立光互连模块有限元分析模型并进行热循环加载有限元分析, 获取了垂直腔面发射激光器 (Vertical Cavity Surface Emitting Laser, VCSEL) 与耦合元件间的位置偏移; 采用正交实验设计法设计了不同焊点结构参数组合并建立有限元模型, 计算相应焊点形态参数组合下的位置偏移数据并进行方差分析. 结果表明: 在一个热循环周期内低温保温结束时刻位置偏移最大; 外端光通道的位置偏移比中间光通道的偏移值大; 在置信度为 95% 时 VCSEL 焊点高度对对准偏移具有显著影响, 因素显著性排序由大到小依次为: VCSEL 焊点高度、陶瓷基板焊点高度、VCSEL 焊点体积和陶瓷基板焊点体积; 单因子变量分析表明, 位置偏移随 VCSEL 焊点高度增加而增大.

关键词: 光互连模块; 位置偏移; 耦合效率; 热循环加载; 有限元分析

中图分类号: TN256; TN406 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2015)06-1179-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2015.06.021

Effects of Solder Shape Parameters on Optical Interconnection Alignment Offset Under Thermal Cycling Load

WU Song¹, HUANG Chun-yue¹, LIANG Ying², LI Tian-ming³, GUO Guang-kuo¹, XIONG Guo-ji¹, TANG Wen-liang¹

(1. School of Electro-Mechanical Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China;

2. Department of Electronic Engineering, Chengdu Aeronautic Vocational and Technical College, Chengdu, Sichuan 61002, China;

3. Department of Automobile and Power Engineering, Guilin University of Aerospace Technology, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract: A finite element model of optical interconnect module was established. The position offset between VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser) and coupling element was obtained after finite elements analysis under thermal cycling load. Different solder shape parameter combinations were designed through orthogonal experimental design and used to establish finite element model. The range analysis was performed based on the alignment offsets of corresponding solder shape parameters. The results show that the maximum alignment offset takes place when the low temperature procedure ends in a thermal cyclic period, the alignment offset in the outer optical channel is greater than that in the middle optical channel; at the confidence of 95%, the height of the VCSEL solder joint has significant effect on the alignment offset, the level of which is sorted descendingly as the height of VCSEL solder joint, the height of ceramic substrate solder joint, the volume of VCSEL solder joint, and the volume of ceramic substrate solder joint, respectively. Single factor analysis results show that the alignment offset increases with the VCSEL solder joint height increasing.

Key words: optical interconnection module; alignment offset; couple efficiency; thermal cycling loading; finite element analysis

1 引言

采用光作为信息载体的光互连技术拥有传输速度快、光波独立传播无干扰、互连数目大、互连密度高、功

耗低等优点,能有效解决传统的电互连网络中,由于互连导线的物理特性限制所遇到的带宽、互连密度、时钟扭歪、能耗、抗干扰等方面的限制瓶颈^[1].将光引入到电路板中,用“光互连”代替“电互连”发展高速光电印制电

路板(Electronic-Optical Printed Circuit Board, EOPCB)波导光互连技术^[2,3],对于促进高速光互连集成电路信息处理和传输具有重要的应用价值.

在板级波导光互连中,耦合效率是业界最关心的主要问题之一.影响耦合效率的主要因素是对准精度,主要受光互连层和光收发器件之间对准偏移等物理耦合及微光镜精度影响^[3].在板级波导光互连中 VCSEL 与耦合元件、耦合元件与光波导、耦合元件与光电接收器这几个关键位置,均会产生垂直、水平和轴向三个方向的偏移,从而影响光在传输中的耦合效率.针对光互连模块的对准损耗,Niewegowski K 等人^[4,5]研究了 VCSEL 与耦合元件、光电接收器与耦合元件分别在 1dB 和 3dB 耦合损耗下的偏移容忍度;Akbari S A 等人^[6]研究了硅基光互连模块上 VCSEL 与耦合元件和光电检测器之间的耦合效率;TAO Qing 等人^[7,8]研究了耦合元件与波导在 45° 镜面反射处波导的轴向与纵向偏移对于耦合效率的影响,并对光电印制电路板涂覆工艺中光波导芯层截面变形对光传输耦合效率的影响展开了研究;Hideyuki Nasu 等人^[9]研究了一种微型光互连模块中 Sn-Ag-Cu 焊点在经历 250℃ 回流焊接后产生的位置偏移对光耦合效率的影响.

上述学者对板级光互连模块中光传输耦合效率的研究仅限于模块处于静态或非工作状态下所展开的,没有考虑温度变化、振动冲击等外界动态因素的影响,而在光互连模块的实际工作过程中必然会经历周期性的开关状态从而导致模块的温度发生升降变化(相当于经历热循环加载过程),此外,光互连模块的使用环境中温度也会产生变化,而光互连模块中互连焊点对温度的变化较为敏感,焊点在外界温度变化情况下会产生热应力进而产生相应的热变形,最终影响光互连的耦合效率.因此对温度、振动冲击等外界动态因素影响光互连模块的耦合效率展开相应研究是十分必要的.由此本文基于焊点形态参数,对热循环加载条件下焊点形态参数对光互连模块中的 VCSEL 与耦合元件之间位置偏移的影响展开研究,通过建立光互连模块有限元分析模型并进行热循环加载条件下的热变形位移分析,获取由于 VCSEL 下焊点及陶瓷基板下焊点的热变形而造成的 VCSEL 与耦合元件间的位置偏移,研究焊点高度和焊点体积等焊点形态参数对位置偏移的影响,研究结果可以为减小 VCSEL 与耦合元件之间位置偏移提供焊点形态设计方面的理论指导,从而丰富光互连模块传输可靠性的相关理论.

2 热循环条件下对准偏移有限元分析

2.1 光互连模块三维有限元模型

板级光互连模块中光发射模块和光接收模块结构

对称,所以选取整体结构的 1/2 建立有限元模型作为研究对象,建立的光互连模块三维有限元分析模型如图 1 所示.模型中 PCB 整体长宽尺寸为 $70 \times 70 \text{mm}^2$,PCB 由三层结构所组成,中间为铜箔层厚度为 0.125mm,最上层和最下层为 FR4 厚度均为 0.2mm,铜箔层中内埋置 12 条截面为 $0.05 \times 0.05 \text{mm}^2$ 的矩形光波导,波导间距为 0.25mm.陶瓷基板长宽厚为 $13 \times 13 \times 0.635 \text{mm}^3$.陶瓷基板通过 96 个直径为 0.76mm,间距为 1mm 的 Sn63Pb37 焊点阵列组装在 PCB 上.VCSEL 通过 24 个高度为 0.1mm,半径为 0.06mm,体积为 $0.8 \times 10^{-3} \text{mm}^3$ 的 SAC305 焊点组装在陶瓷基板上.

为了更精确模拟光互连模块中 VCSEL 基板下的焊点与陶瓷基板下焊点经过焊接后的焊点形态,本文将采用 Surface Evolver 软件基于最小能量原理模拟 VCSEL 焊点和陶瓷基板焊点焊接之后的形态.在 ANSYS 中采用 Surface Evolver 所模拟的 VCSEL 焊点和陶瓷基板焊点焊后焊点形态参数建立焊点有限元分析模型进行后续有限元仿真分析,将使光互连模块中对准偏移的分析结果更加精确合理.

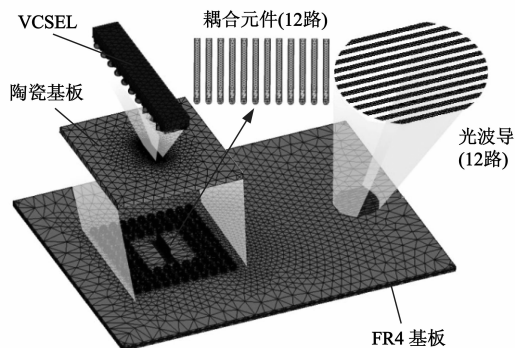


图1 光互连模块有限元分析模型

光互连模块中 VCSEL 焊点和陶瓷基板焊点的材料分别为共晶钎料 Sn63Pb37 与 SAC305^[4,5],其材料模式处理为弹塑性和蠕变性.光互连模块中陶瓷基板、光波导、耦合元件和 VCSEL 等其他组件均认为是线弹性材料,即为各向同性的材料^[9].材料的特性参数如表 1 所示^[4,5,10].

光互连模块所采用的加载方式是温度加载,按照美国军标 MIL-STD-883 选取热循环加载条件^[10],加载曲线如图 2 所示,温度范围为 $180^\circ\text{C} (-55^\circ\text{C} \sim +125^\circ\text{C})$,升降温度速率为 $36^\circ\text{C}/\text{min}$,高、低温各保温 10min,一个周期为 1800s.在周期加载条件下,零应力应参考温度 $T_{ref} = 125^\circ\text{C}$.由于焊点的应力应变在热循环过程中呈周期性变化,一般认为在第四周期趋向稳定,所以本文进行四个热循环周期的温度加载.有限元模型的边界条件为 PCB 底部角点全约束,由于选用的是二分之一对称模型,所以在模型中间切面施加对称约束.

表 1 材料参数

材料名称	弹性模量 E/GPa	泊松比 μ	热膨胀系数 $\alpha/\times 10^{-6}\cdot\text{℃}^{-1}$
FR4	18	0.28	18
Cu	110	0.31	17.8
陶瓷	359	0.21	6.7
波导	3.16	0.32	83
OM4 多模光纤	69	0.18	9
Sn63Pb37	35.3 - 151 × T	0.35	24.5
SAC305	49 - 70T	0.35	21.3 + 0.017T

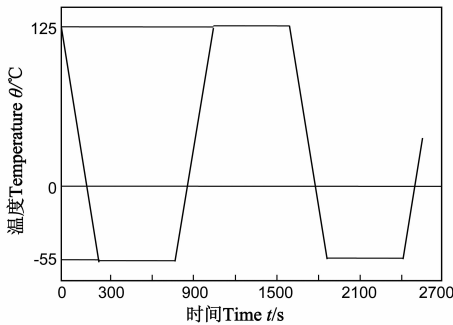


图2 热循环加载温度曲线

2.2 热循环条件下对准偏移有限元分析结果

光互连模块经过四个热循环加载周期的有限元分析后 VCSEL 与耦合元件在第四周期低温保温结束时刻的位移云图如图 3 所示,从图中可见两侧光通道中的 VCSEL 与耦合元件位移比中间通道的位移大.从 ANSYS 中获取图 3 右端所示的每一路光通道中 VCSEL 下端面发光中心点 A 的水平位移值与垂直位移值,耦合元件上端面光耦合中心点 B 处的水平位移值与垂直位移值.通过公式(1)可计算获得各通道中 VCSEL 与耦合元件的对准偏移值 S.

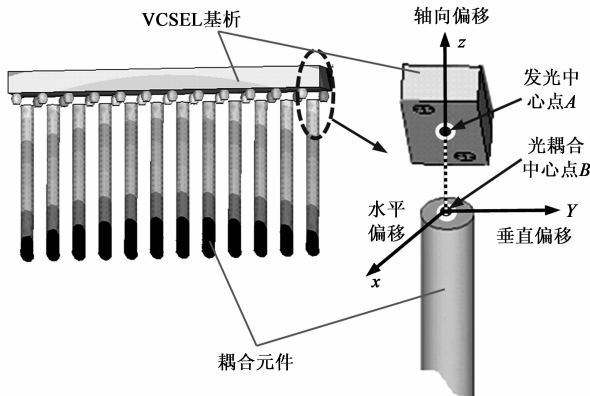


图3 VCSEL与耦合元件的位置偏移

$$S = \sqrt{(x_a - x_b)^2 + (y_a - y_b)^2} \quad (1)$$

式(1)中 x_a 与 y_a 分别为发光中心点 A 在水平和垂直方向的位移值. x_b 与 y_b 分别为耦合元件耦合中心点 B 在水平和垂直方向的位移值.

通过获取光互连模块有限元分析后第四循环周期低温保温结束时刻第 12 路光通道中 A、B 两点的水平与轴向位移值,计算出各光通道的对准偏移值 S,如图 4 中所示.从图可见 12 路通道中两侧通道的 VCSEL 与耦合元件的对准偏移比中间通道的大,达到了 $0.63 \times 10^{-3}\text{mm}$,根据文献[9]可估算出此时该通道的 VCSEL 与耦合元件在工作时的耦合损耗约为 0.9dB.从图 4 中也可看出 12 路光通道的对准偏移值从两侧向中间逐渐减小且成对称分布.

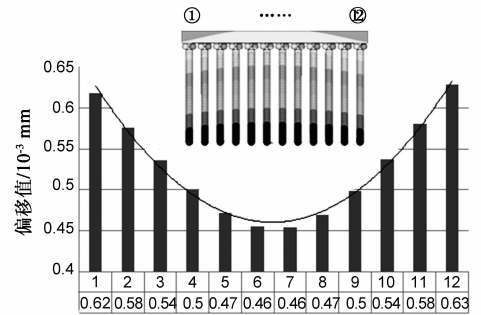


图4 VCSEL与耦合元件的12路通道中的位置偏移

选取热循环第四循环周期研究一个循环周期中各阶段温度变化对对准偏移所产生的影响.通过 ANSYS 获取第四循环周期四个阶段关键时间点(低温保温开始时刻、低温保温结束时刻、高温保温开始时刻和高温保温结束时刻)的位置数据,计算出这四个关键时间点的对准偏移值如表 2 所示.

由表 2 可见,热循环中温度的变化会对对准偏移产生明显影响,在低温保温结束时刻偏移值达到最大,为 $0.63 \times 10^{-3}\text{mm}$,将在 VCSEL 与耦合元件间引起约 0.9dB 的光损耗.

表 2 第四循环周期中各关键时刻对准偏移值

时刻	降温结束 (5700s)	低温保温 结束(6300s)	升温结束 (6600s)	高温保温 结束(7200s)
对准偏移值 ($\times 10^{-3}\text{mm}$)	0.628	0.63	0.043	0.016

3 VCSEL 与耦合元件位置偏移正交分析

3.1 焊点形态参数组合正交设计

正交设计是多因子实验中最重要的一种设计方法.是根据因子设计的分式原理,采用由组合理论推导而成的正交表来安排设计实验,并对结果进行统计分析的多因子实验方法.正交实验设计基于一定的规则设计正交表,确保以最小数目的实验获得全因子实验

中影响性能参数的全部信息.采用正交实验设计安排焊点形态参数,只需在所有可能的焊点形态参数中挑选一小部分因子组合进行实验即可确保以最少数的目的实验获得全部实验中影响性能参数的全部信息^[11].

光互连模块在组装时,有不同体积的焊点可供选择,而焊点高度可通过在器件上增加不同配重的方式进行控制^[11],所以本文选取 VCSEL 焊点高度($H1$)、VCSEL 焊点体积($V1$)、陶瓷基板焊点高度($H2$)和陶瓷基板体积($V2$)作为变量设计 $L_{16}(4^5)$ 正交表,安排表 3 所示的 4 因素 4 水平正交试验,通过 Surface Evolver 软件建立相应焊点形态参数组合的 VCSEL 焊点和陶瓷基板焊点焊后形态预测模型,然后建立光互连模块三维有限元分析模型,进行热循环加载有限元分析,计算分析后的各焊点形态参数组合下的光互连模块 VCSEL 与耦合元件位置偏移值如表 4 最后一列数据所示.

表 3 焊点形态参数因素水平表

因素	水平			
	1	2	3	4
VCSEL 焊点高度 $H1(\text{mm})$	0.09	0.1	0.11	0.12
VCSEL 焊点体积 $V1(\times 10^{-3}\text{mm}^3)$	0.6	0.7	0.8	0.9
陶瓷基板焊点高度 $H2(\text{mm})$	0.45	0.5	0.6	0.7
陶瓷基板焊点体积 $V2(\text{mm}^3)$	0.19	0.21	0.23	0.25

表 4 焊点形态参数组合正交矩阵及位置偏移有限元分析结果

实验号	$V1$	$H1$	$V2$	$H2$	空白列	对准偏移值($\times 10^{-3}\text{mm}$)
1	1	1	1	1	1	0.667
2	1	2	2	2	2	0.705
3	1	3	3	3	3	0.726
4	1	4	4	4	4	0.739
5	2	1	2	3	4	0.63
6	2	2	1	4	3	0.657
7	2	3	4	1	2	0.745
8	2	4	3	2	1	0.783
9	3	1	3	4	2	0.613
10	3	2	4	3	1	0.676
11	3	3	1	2	4	0.731
12	3	4	2	1	3	0.745
13	4	1	4	2	3	0.674
14	4	2	3	1	4	0.756
15	4	3	2	4	1	0.7
16	4	4	1	3	2	0.75

3.2 对准偏移数据方差分析

方差分析作为分析试验数据的一种方法可以解决

的基本问题是通过分析试验数据,研究因素对试验结果的影响是否显著.因此,通过对板级光互连模块中 VCSEL 与耦合元件对准偏移数据进行方差分析,可以考察 VCSEL 焊点高度、VCSEL 焊点体积、陶瓷基板焊点高度和陶瓷基板焊点体积这四个因素对板级光互连模块在热循环条件下的对准偏移所产生影响的显著性,根据显著性结果可以有针对性的控制相应显著因素相关参数的设定,从而达到提高热循环加载条件下光信号在板级光互连模块中高速可靠传输的目的.

对正交分析中的 16 组位移偏移数据进行方差分析,计算出各因素的偏差平方和、自由度、方差估计值和方差比(F 值)如表 5 所示(方差分析的计算过程详见文献[11]).由表 5 可知,在所考察的影响板级光互连模块中 VCSEL 与耦合元件位置偏移的四个因素中,VCSEL 焊点体积对应的 F 值为 0.634,VCSEL 焊点高度对应的 F 值为 9.41,陶瓷基板焊点体积对应的 F 值为 0.367,陶瓷基板焊点高度对应的 F 值为 2.557.考察的四个因素中仅 VCSEL 焊点高度的 F 值 9.41 大于 $F_{0.05}(3,6)$ (即 4.76)而小于 $F_{0.01}(3,6)$ (即 9.78),其他三个参数的 F 值均小于相应的临界值 $F_{0.05}(3,6)$ (即 4.76).所以四个焊点结构参数中,仅 VCSEL 焊点高度对对准偏移显著影响,其他三个焊点形态参数 VCSEL 焊点体积、陶瓷基板焊点高度以及陶瓷基板焊点体积对对准偏移产生影响均不显著.因素显著性排序为: $F_{H1} > F_{H2} > F_{V1} > F_{V2}$,即四个因素对对准偏移产生影响从大到小排序为:VCSEL 焊点高度影响最大,其次是陶瓷基板焊点高度,再次是 VCSEL 焊点体积,最后是陶瓷基板焊点体积.从以上分析可知,在所考察的影响对准偏移的四个因素中,VCSEL 焊点高度对对准偏移的影响最为大,在板级光互连模块设计与制作过程中需严格控制 VCSEL 焊点高度.

3.3 VCSEL 焊点高度对对准偏移影响分析

通过方差分析可知光互连模块焊点形态参数中,VCSEL 焊点高度对光互连模块对准偏移影响显著,因此有必要进一步分析该参数的变化对对准偏移的影响规律.为研究 VCSEL 焊点高度对光互连模块对准偏移影响,固定其他焊点形态参数不变,只改变 VCSEL 焊点高度,将焊点高度值分别取为 0.09mm、0.10mm、0.11mm 以及 0.12mm,建立四种不同焊点高度的光互连模块有限元模型并进行热循环加载分析,在第四个热循环周期的低温保温结束时刻,VCSEL 与耦合元件的位移云图如图 5 所示.

通过计算得到各 VCSEL 焊点高度下 VCSEL 与耦合元件的位置偏移值如表 6 所示.从表 6 可知,在所选取的 VCSEL 焊点高度内,随着 VCSEL 焊点高度的增加,

VCSEL 与耦合元件之间的位置偏移值逐渐增大. 所以在光互连模块实际的设计制作过程中,适当减小 VCSEL

焊点的高度,能有效的提高板级光互连中光传输的耦合效率,从而提高光电互连系统整体的可靠性.

表 5 对准偏移数据方差分析结果

方差来源	偏差平方和	自由度	方差估计值	F 值	$F_{0.01}(3,6)$	$F_{0.05}(3,6)$	显著性
VCSEL 焊点体积 (V_1)	0.0017	3	0.00057	0.634	9.78	4.76	不显著
VCSEL 焊点高度 (H_1)	0.0255	3	0.0085	9.41	9.78	4.76	显著
陶瓷基板焊点体积 (V_2)	0.0013	3	0.00033	0.367	9.78	4.76	不显著
陶瓷基板焊点高度 (H_2)	0.0069	3	0.0023	2.557	9.78	4.76	不显著
误差	0.054	6	0.0009				

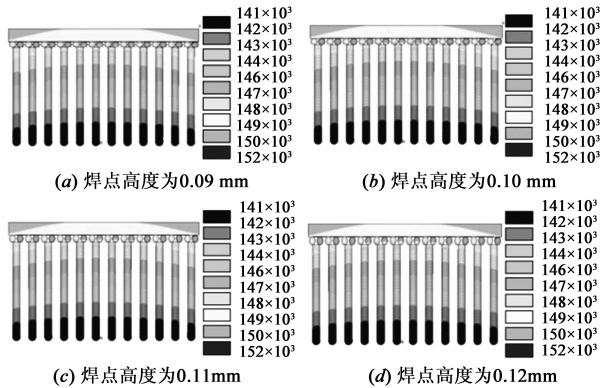


图 5 不同 VCSEL 焊点高度下 VCSEL 与耦合元件的位移云图

表 6 不同 VCSEL 焊点高度下的位置偏移

VCSEL 焊点高度 (mm)	0.009	0.10	0.11	0.12
位置偏移 ($\times 10^{-3}$ mm)	0.628	0.669	0.704	0.744

4 结论

通过对板级光互连模块进行热循环条件下的对准位置偏移分析,可以得到以下结论:

(1)有限元分析表明,在热循环条件下板级光互连模块中 VCSEL 与耦合元件间会产生对准偏移,且 12 通道光互连模块中,位于光通道外侧的 VCSEL 与耦合元件的对准偏移明显比中间通道的偏移值大.

(2)对板级光互连模块 VCSEL 与耦合元件对准偏移的数据进行方差分析表明:置信度为 95% 的情况下,VCSEL 焊点高度有显著性影响,VCSEL 焊点体积、陶瓷基板焊点高度和陶瓷基板焊点体积对对准偏移无显著影响;四个因素的显著性排序由大到小依次为:VCSEL 焊点高度,陶瓷基板焊点高度,VCSEL 焊点体积,最后是陶瓷基板焊点体积.

(3)对影响 VCSEL 与耦合元件对准偏移最显著的因子即 VCSEL 焊点高度做单因子分析表明:在所选择的 VCSEL 焊点高度范围内,随着 VCSEL 焊点高度的增加,VCSEL 与耦合元件的对准偏移越来越大.所以在实际设计与制作工艺中,需尽量控制 VCSEL 焊点的高度,

以提高光互连信号传输的稳定性.

参考文献

- [1] 张金星. 基于光波导互连的 EOPCB 的研究 [D]. 武汉:华中科技大学,2011.
ZHANG Jin-xing. Research of Electro-Optical Printed Circuit Board Based on Optical Waveguide Interconnection [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2011. (in Chinese)
- [2] Nikolaos Bamiedakis, Aeffendi Hashim, et al. Low-cost PCB-integrated 10-Gb/s optical transceiver built with a novel integration method [J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2013, 3(4): 592 - 600.
- [3] 严蓉, 吴丰顺, 刘辉, 等. 波导光互连的研究进展 [J]. 电子工艺技术, 2010, 6(31): 311 - 319.
YAN Rong, WU Feng-shun, LIU Hui, et al. Research progress of waveguide optical interconnection [J]. Electronic Process Technology, 2010, 6(31): 311 - 319. (in Chinese)
- [4] Niewegowski K. Novel optical transmitter and receiver for parallel optical interconnects on PCB-level [A]. 2008 2nd Electronics Systemintegration Technology Conference [C]. Piscataway, NJ, USA: IEEE Press, 2008. 607 - 612.
- [5] Niewegowski K. Assembly requirements for multi-channel coupling micro-optics in board-level optical interconnects [A]. 2010 3rd Electronics System Integration Technology Conference (ESTC 2010) [C]. Piscataway, NJ, USA: IEEE Press, 2010. 1 - 6.
- [6] Akbari S A. An optical subassembly model based on silicon optical bench for VCSEL to MMF and PIN photodiode to MMF coupling [A]. 2012 Sixth International Symposium on Telecommunications (IST) [C]. New York: IEEE Press, 2012. 514 - 519.
- [7] TAO Qing, LUO Feng-guang, CAO Lei, et al. Relative power loss of misalignment based on electro-optical printed circuit board [J]. Optic, 2011, 122(18): 1603 - 1606.
- [8] TAO Qing, LUO Feng-guang, ZHANG Jin-xing, et al. Analysis of fabrication tolerance based on uneven thickness of Su8-photo-resist [J]. Journal of Optical Technology, 2013, 80(5): 329 -

331.

- [9] Hideyuki Nasu, Kazuya Nagashim, Yozo Ishikawa. Sn-Ag-Cu solder reflow-capable 28-Gb/s \times 4-channel high-density parallel-optical modules [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(24):4111 – 4118.
- [10] 韦何耕, 黄春跃, 梁颖, 等. 热循环加载条件下 PBGA 叠层无铅焊点可靠性分析[J]. *焊接学报*, 2013, 34(10):91 – 94.
WEI He-geng, HUANG Chun-yue, LIANG Ying, et al. Reliability analysis of plastic ball grid array double-bump lead-free solder joint under thermal cycle[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2013, 34(10):91-94. (in Chinese)
- [11] 黄春跃, 周德俭, 吴兆华. 基于正交实验设计的塑封球栅阵列器件焊点工艺参数与可靠性关系研究[J]. *电子学报*, 2005, 33(5):788 – 792
HUANG Chun-yue, ZHOU De-jian, WU Zhao-hua. Study on the relationships between solder joint process parameters and reliability of plastic ball grid array component based on the orthogonal experiment design[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2005, 33(5):97 – 100. (in Chinese)

作者简介



吴松男, 1988年11月出生于四川省西昌市. 桂林电子科技大学硕士在读, 主要研究方向为微电子封装与组装可靠性技术研究.
E-mail: 925song@163.com

黄春跃(通信作者) 男, 1971出生于广西龙州, 博士, 现为桂林电子科技大学机电工程学院教授, 主要研究方向微电子封装与组装可靠性技术研究.
E-mail: hcy@gliet.edu.cn