

半导体激光器散热技术研究及进展

程东明, 杜艳丽, 马凤英, 段智勇, 郭茂田

(郑州大学物理工程学院电子科学与技术系, 郑州 450052)

摘要: 在半导体大功率激光器的各种关键技术中, 散热问题的解决是一个极其关键的技术。因为半导体激光器能产生很高的峰值功率, 这些器件的电光转换效率为40%~50%, 即所输入的电能50%~60%都转换为热能。在管芯焊接的地方产生的热流量大约为 $1\text{KW}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。这种热负载是限制激光器正常工作的关键因素。半导体激光器列阵与叠阵散热问题解决会直接关系到激光器的使用寿命, 导致激光器有源区温度的迅速提高, 从而引起激光器的光学灾变, 甚至烧毁半导体激光器。大功率激光器列阵及叠阵在高功率的二极管泵浦固态激光器 (DPSSL) 系统中有很大的应用, 市场发展潜力很大。因此, 有必要发展大功率激光器列阵及叠阵。随着大功率激光器列阵及叠阵的迅速发展, 与其有关的关键技术也应该加以研究。

关键词: 半导体激光器列阵; 半导体激光器叠阵; 热沉; 散热技术

中图分类号: TN365 **文献标识码:** A **文章编号:** 1681-1070 (2007) 03-0028-06

The Study and Prospects of Heat Sink Technology about Semiconductor Lasers

CHENG Dong-ming, DU Yan-li, MA Feng-ying, DUAN Zhi-yong, GUO Mao-tian

(Department of Electronic Science and Technology, School of Physics and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: Heat dissipation is the crux of all key technologies in high-power semiconductor lasers. Semiconductor lasers are inherently efficient devices capable of generating very high peak powers, which have an electrical-to-optical conversion efficiency of 40% to 50%, i.e., 50% to 60% of electric energy converts into thermal energy. The peak heat flux generated by these devices at the interface where the diode material soldered to the chip carrier is on the order of $1\text{KW}\cdot\text{cm}^{-2}$. The thermal load there is a limitation in the average power operation of laser diodes. The solution to heat dissipation of semiconductor laser arrays and stacks will be directly related to lifetime of lasers, resulting in rapid temperature increase in active parts of lasers, thus leading to catastrophic optical damage, and sometimes burning out of semiconductor lasers. High-power laser arrays and stacks are widely used in high-power DPSSL systems and have prospects of development. Therefore, it is necessary to develop high-power laser arrays and stacks. With the fast development of high-power laser arrays and stacks, some related key techniques are worth researching.

Key words: semiconductor laser arrays; semiconductor laser stacks; heat sinks; heat dissipation technique

1 引言

近年来, 大功率半导体激光器得到迅速发展。半

导体激光器在各种占空比下, 峰值功率越来越高, 连续工作时功率越来越大。为了得到更大的功率, 人们逐渐发展和研究列阵和有更高功率的叠阵。但是, 随着半导体激光器列阵及叠阵功率的增加, 器件的散热也变得更

加困难起来^[1]。实验结果表明, 半导体激光器的阈值电流密度、输出光功率、微分量子效率、激光器光谱与温度有密切的关系^[2]。所以, 研究半导体激光器的散热问题是一项非常有意义的工作。

2 研究半导体激光器散热的重要性

2.1 温度与阈值电流密度的关系

量子阱激光器与温度的关系主要是由于增益系数和漏电流与温度的关系引起的。(折射率阶跃、端面反射率、自由载流子吸收损耗、散射损耗和耦合损耗随温度变化的影响忽略不计。)各种温度下的阈值电流与温度变化的关系如图1。

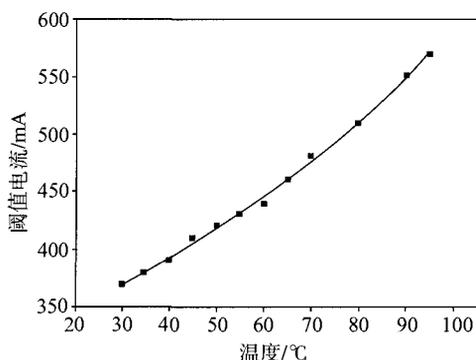


图1 温度与阈值电流的关系

拟合后的关系曲线满足的关系式为:

$$I_{th}(T) = 171.55 + 143.87 \exp(T/93.20)$$

半导体激光器的阈值电流密度与温度的关系表达式:

$$J_{th} = J_{th}(T_r) \exp\left(\frac{T - T_r}{T_0}\right)$$

其中, $J_{th}(T_r)$ 表示室温下的阈值电流密度, 是一个常数, 不同的激光器具有不同的值。 T_0 是特征温度, 表示阈值电流对温度敏感程度。由上式可以看出, T_0 越大, 表明激光器对温度的敏感性越小。若能使 $T_0 \rightarrow \infty$, 则半导体激光器的 J_{th} 不随温度变化。与双异质结激光器相比, 量子阱激光器具有较高的 T_0 值, 这是因为此二维系统中的准费米能量对温度的依赖性弱于体材料, 态密度的台阶状分布及量子阱区的电子和声子分布的微扰作用。

一般的量子阱激光器的特征温度典型值在 170K~250K 之间, 有时可高达 400K 以上。当温度升高时, 由于增益系数、漏电流、自由载流子吸收损耗、散射损耗及耦合损耗等均会发生变化, 进而影响阈值电

流密度。

2.2 温度与输出光功率的关系

从图2可以看出, 温度与半导体激光器的输出功率有较大的关系。随着温度的增加, 载流子的非辐射复合加剧, 由于注入的载流子转化为热量, 同时会导致结温的升高, 热阻也随着增加, 结果, 其间的输出功率呈抛物线关系。

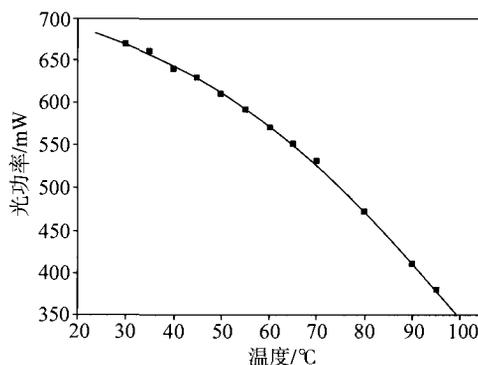


图2 温度与输出光功率的关系

拟合曲线为 $P = 706.67 - 0.209T - 0.03409T^2$, 由图2可以看出, 激光器在温度超过 100°C 时的输出功率已不到初始值的一半, 已基本失效。

2.3 温度对微分量子效率的影响

外微分量子效率 η_d 定义为:

$$\eta_d = \frac{(P_{ex} - P_l)/h\nu}{(I - I_{th})/e} \quad (1)$$

式中 P_l 对应阈值电流的功率输出, P_{ex} 为激光器所发射的光功率, 因为 $P_l \ll P_{ex}$, 故可将式(1)改写为:

$$\eta_d = \frac{P_{ex}/h\nu}{(I - I_{th})/e} = \frac{P_{ex}}{(I - i_{th})V} \quad (2)$$

这实际上对应曲线在阈值以上部分的斜率, 可以用它很直观地比较激光器之间斜率上的差别。考虑到激光器所发射的光率 P_{ex} 正比于 $(1/L) \ln(1/R)$, 而有源区内所产生的光功率正比于 $[(1/L) \ln(1/R) + \alpha]$, 则有:

$$\eta_d = \eta_i \frac{\frac{1}{2L} \frac{1}{R_1 R_2}}{\frac{1}{2L} \ln \frac{1}{R_1 R_2} + \alpha} \quad (3)$$

式中分母的第一项是输出的光子损耗, 第二项是总的内部损耗 α ; 它包括在有源区内主要由自由载流子吸收损耗 α_{fc} 和光子溢出有源层所产生的损耗 α_{lc} ,

则可将式(3)表示为:

$$\eta_d = \eta_1 \frac{\frac{1}{2LR_1R_2}}{\frac{1}{2L} \ln \frac{1}{R_1R_2} + \Gamma \left[\alpha_{fc} + \frac{1-\Gamma}{\Gamma} \alpha_{out} \right]} \quad (4)$$

从图3可以看出随着温度的升高,外微量子效率将减少,原因是随着温度的升高,自由载流子的吸收损耗增加,从有源层溢出的载流子数目也将增加。 η_d 和温度的拟合曲线为 $\eta_d = 46.89 + 46.84 \exp(-T/14315.46)$,但两者并不是成简单的线性关系, η_d 随温度呈指数减少。

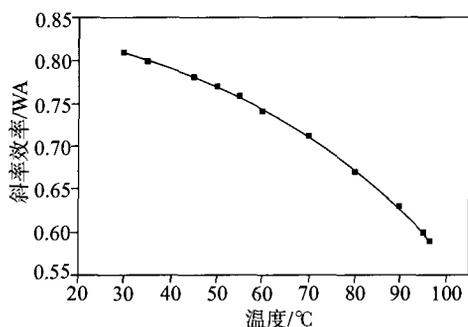


图3 温度与斜率效率的关系

2.4 温度与激光器光谱的关系

从图4可以看出,随着温度的增加,波长随温度的漂移率约为 0.24°C^{-1} ,一方面是由于器件的谐振腔的折射率发生变化,另一方面是由于热膨胀使谐振腔尺寸变大的影响,而且,我们也可以看出, $40^\circ\text{C} \sim 80^\circ\text{C}$,激光器的模式变坏,这主要是由于在温度升高时,器件开始出现模式竞争,同时,光谱的谱宽变大。由于自发辐射的影响以及自发辐射后的弛豫振荡期间折射率的变化所引起的相位扰动的影响,使得激光器谱线具有一定的宽度,由于量子阱激光器的谱宽较窄,所以在半导体激光器出现的初期,光谱宽度曾用来作为测定激光器阈值的一种手段,而半导体激光器的输出功率 P 与线宽的关系式为 $\Delta \nu \propto 1/P$,也就是说,谱宽和输出光功率成反比。

从以上结果可以看出,研究半导体激光器的散热是非常重要的,这关系到制作半导体激光器性能的好坏和成败。目前,常用的散热方法主要有^[3]: 平板热沉散热、大通道散热、针孔通道散热和微通道散热。

用作制作热沉的材料一般为无氧铜、氧化铍、氧化铝、石英、银、金刚石。无氧铜价格便宜,容易加工,是最常用的材料。氧化铍用作绝缘材料,但此物有毒,应小心使用。银有非常好的导电、导

热能力,常用作热沉的某些应用。金刚石虽然有很好的导热能力,但是由于价格比较昂贵,所以只有在特殊情况下才被加以利用。

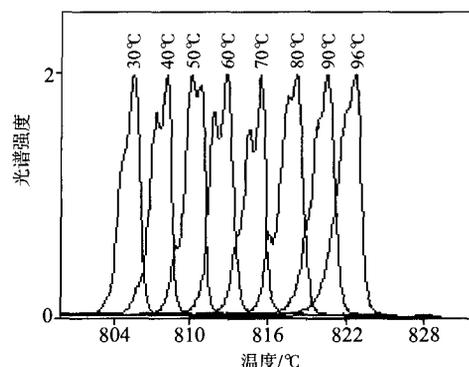


图4 温度与激光器光谱的关系

3 常用的热沉类型

3.1 平板热沉

用无氧铜加工的平板热沉是一种简单的散热方法,价格便宜,易加工。但散热效果不是很好,可用于脉冲激光阵列及占空比不很高的激光器叠阵。它的热阻大约为 $0.5^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1} \text{cm}^2 \sim 2^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1} \text{cm}^2$ 。例如,如果一个列阵的热功率为 50W ,则热沉的温度升高为 25°C 。如果按 50% 的电光转换效率,即有 50% 的电转换为热能,那么激光器的功率最大为 100W 。否则,热沉的温度将升高很大,会严重影响激光器的寿命。图5是简单的平板热沉。左边为较大的平板热沉,在使用时,无氧铜表面还要镀上 $3\ \mu\text{m}$ 的镍, $10\ \mu\text{m} \sim 15\ \mu\text{m}$ 的金。右边为用于功率不大的叠阵的薄片热沉,用两个这样的热沉分别作为半导体激光器的两个电极,焊接好之后形成一个的单个的半导体激光器阵列,然后把把这些阵列再叠加起来形成叠阵。图6即为用这种薄片热沉制作的半导体激光器叠阵。



图5 简单的平板热沉

3.2 大通道热沉

用无氧铜加工的大通道热沉一般也较常用。它与

平板热沉的区别主要是平板中有直径比较大的水通道。这些通道和一定压力的水源相连,使平板内保持有速度很大的水流。这样,激光器产生的热量能及时地被水流带走。从而降低热沉的温度,确保激光器的正常工作。大通道热沉的热阻一般为 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{W}^{-1}\text{cm}^2\sim 0.25\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{W}^{-1}\text{cm}^2$,如果使激光器的温度不升高 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$,则这种热沉能散去 $100\text{W}\sim 150\text{W}$ 的热能,0.16为0.1和0.25的近似平均值。如果按50%的电光转换效率,即有50%的电能转换为热能。那么激光器的功率最大为 300W 。否则,热沉的温度将升高很大,会严重影响激光器的寿命。按此计算,如果每条列阵的发射功率为 50W ,那么这种热沉可满足有6条列阵的叠阵的散热。图7的左边为大通道热沉的实物图。其中下电极有通水的孔,水流以很快的速度在其中流动,从而带走激光器产生的热量。图7的右边为组装好的半导体激光器列阵。



图6 用图5右边热沉所示的热沉制作的半导体激光器叠阵



图7 大通道热沉的实物图

3.3 微通道热沉

微通道热沉具有很高的换热效率,所以在半导体激光器叠阵中有很好的应用。微通道热沉有以下优点^[5]:

(1) 微通道热沉有非常小的热阻。为了增加微通道的导热性,在微通道金属化之前,可以先沉积一层多晶金刚石,这样的金刚石的导热性为 $13\text{ W}\cdot\text{cm}^{-1}\text{K}^{-1}$;增加了微通道热沉的导热性。

(2) 微通道热沉一般用硅制作。硅的导热性非

常好(室温下为 $1.5\text{ W}\cdot\text{cm}^{-1}\text{K}^{-1}$),现在对硅有比较成熟的腐蚀加工方法,并且硅和GaAs之间有较小的热失配,所以很容易实现。

(3) 在微通道中水是分层流动,大通道中水流的很急,所以微通道比大通道有更大的热交换效率;微通道热阻为 $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{W}^{-1}\text{cm}^2\sim 0.05\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{W}^{-1}\text{cm}^2$ 。设激光器的温度不升高 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$,则这种热沉能散去 $500\text{W}\sim 2500\text{W}$ 的热能^[6]。那么这种热沉可满足 $1000\text{W}\sim 5000\text{W}$ 的激光器的散热。制作微通道热沉的一般方法是^[7]:

(1) 选取 $750\text{ }\mu\text{m}$ 厚的(110)Si。上面沉积 80nm 的SiN,用光刻法刻出所要的图形;

(2) 在 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时利用44%的KOH对Si的各向异性腐蚀,Si的(111)晶面将会暴露出来,而形成V形槽。V形槽的间隔为 $26\text{ }\mu\text{m}$,槽口宽为 $26\text{ }\mu\text{m}$ 。槽深 $200\text{ }\mu\text{m}$;

(3) 槽口向下焊接到硼硅玻璃上;

(4) 按合适的大小锯开;

(5) 芯片焊接到热沉上后,按顺序依次焊接到微通道热沉上。

图8是芯片不直接焊到微通道上,而是通过金刚石热沉和微通道相连。

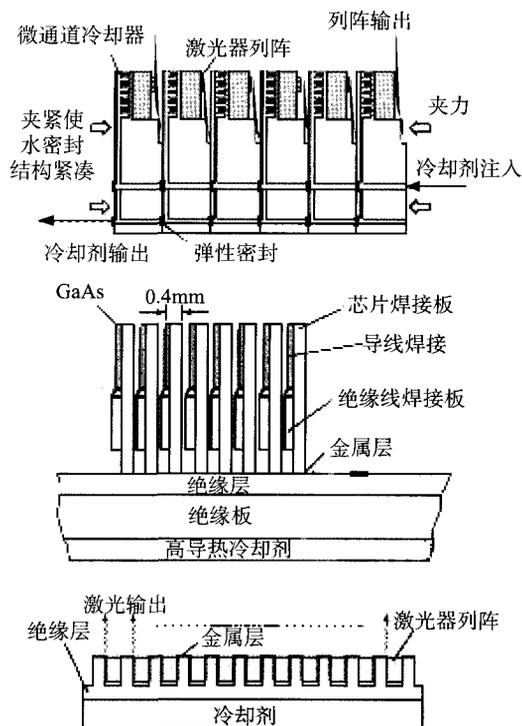


图8 芯片焊接到微通道热沉上的效果图

对于功率更大的半导体激光器和连续波输出激光

器,所使用的方法是把芯片直接焊到微通道上。这样,每个芯片焊接到一个微通道上,最后又把这些微通道组合在一起,形成非常大的激光功率输出^[8]。这样作的好处是能使每条工作时都能充分冷却,确保整台激光器的顺利工作^[9]。从图9右下角的图可以看出,芯片不是直接放在微通道的边缘,而是有一点距离,并且微通道的边缘有一个倾角。这样作的目的不但可以防止光照射到热沉上(如果光照射到热沉上,热沉温度会很快上升,从而影响激光器寿命,甚至会引起光学灾变。),而且能防止外界因素损伤芯片。还能使芯片的前后都能充分散热。在焊接芯片之前,硅上依次镀100nm Ti、100nm Pt、200 μ m Au、100nm Pt、100nm Au。厚的金层确保小的电阻,从而可以使很大的电流通过^[10]。

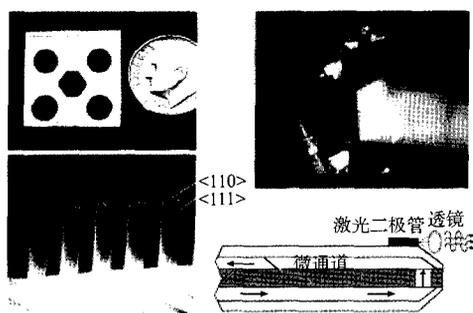


图9 微通道组装到一起的综合效果图

美国能源部劳伦斯利弗莫尔国家实验室的科学家作出了一种新型的硅微通道热沉^[11],这种微通道的结构如图10。

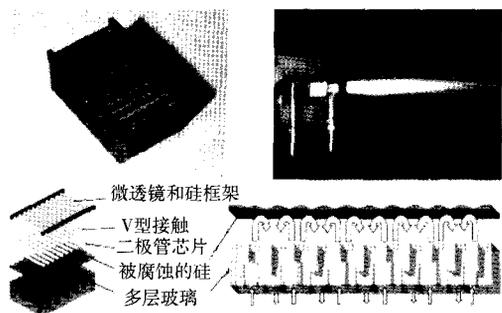


图10 新型的微通道热沉

这种微通道和以前的不同之处是减少了水在微通道中的流动距离,加快了热交换,提高了散热效率。利用这种热沉,可以很容易地制作出10KW~100KW的激光器叠阵。图11为利用这种微通道制作的40KW的激光器叠阵。它包括28个子模块。

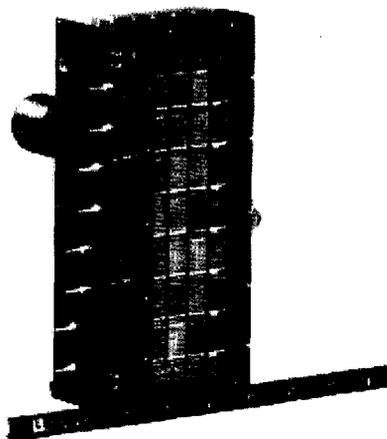


图11 40KW的激光器叠阵

4 结论

半导体激光器阵列及叠阵各种热沉技术已经取得了很快的发展。激光器的发展方向是提高功率,降低成本,达到最高的性价比。平板热沉可用于脉冲激光阵列、占空比不很高的激光器叠阵。大通道热沉可用于较高占空比和线阵。微通道热沉可以用于高占空比的激光器叠阵。在连续波输出时可以达到很大的封装密度,实现激光器的高密度集成。由于硅的价格低和对硅有成熟的加工技术,所以硅被选作制作微通道的材料。微通道热沉的工艺的巨大进步,使集成提供更大能量的半导体激光器成为可能。半导体激光器作为大功率的光源,应用会越来越普遍,在不久的将来,半导体激光器的应用会走进千家万户。

参考文献:

- [1] H.Kan, H.Miyajima. Two-dimensional high-power laser diode arrays cooled by Funryu heat sink[J]. SPIE, 2000, 3889: 66-70.
- [2] 曹玉莲. 半导体激光器的工艺及退化的研究[A]. 中国科学院硕士学位论文, 2003.
- [3] Yuji Nishikawa. High optical intensity 2-D AlGaAs laser arrays[J]. SPIE, 2000, 3628:71-79.
- [4] J. A. Skidmore, B. L. Freitas. Silicon monolithic microchannel-cooled laser diode array[J]. Applied physics letters, 2000,77 (1):10-12.
- [5] Rushikesh M.Patel. Use of microchannel cooling for high-power two-dimensional laser diode arrays[J]. SPIE, 1992, 1634:466-474.

- [6] R.Beach, D.Mundinger. High-reliability silicon microchannel submount for high average power laser diode arrays [J] Appl. Phys. Lett., 1990,56 (21): 2065-2067.
- [7] Ray Beach, William J. Bennett. Modular microchannel cooled heat sinks for high average power laser diode arrays [J]. IEEE Journal of quantum electronics, 1992,28 (4): 966-975.
- [8] Eric J. Lerner Diode arrays boost efficiency of solid-state lasers[J]. Laser Focus World, 1998,(11).
- [9] Raymond, J.Bench Mark, A.Emanuel. Improved performance of high average power semiconductor arrays for applications in diode pumped solid state lasers[J]. SPIE, 1995, 2148:13-29.
- [10] W.Benett, B.Freitas. Microchannal heat sinks for high average power laser diode arrays[J]. SPIE, 1992,1 634:453-465.
- [11] Raymond J. Beach and Barry Practical 100-kW-class diode arrays emerge L[J]. Freitas Laser Focus World, 2001, 12.



作者简介:

程东明 (1976-), 男, 河南周口人, 2003 年在中国科学院长春光学精密机械与物理研究所取得博士学位, 现为郑州大学物理工程学院电子科学与技术系副教授, 主要从事光电子技术研究与微电子技术的研究。

(上接第6页)

循环次数; 最后是试验验证。

在多数情况下试验法和数值模拟法是同时使用的。这样二者相辅相成, 能更好地研究焊点的可靠性。

5 展望

电子封装件无铅化已经是大势所趋。Sn-Ag-Cu 焊料以其独特的优越性逐渐成为 SnPb 焊料替代品的首选。随着对 Sn-Ag-Cu 可靠性研究的不断深入, 这种焊料将会得到更广泛的应用, 发挥更大的潜能。

参考文献:

- [1] Masazumi Amagai. Mechanical reliability in electronic packaging[J]. Microelectronics Reliability, 2002 (42): 607-627.
- [2] Gilileo K, Blumel D. The ultimate flip chip-integrated flux/underfill[A]. Proceedings-Nepcon West 99, Anaheim, USA, 1999:1477-1488.
- [3] 李晓延, 严永长. 电子封装焊点可靠性及寿命预测方法[J]. 机械强度, 2005, 27 (4): 470-479.
- [4] 肖克来提. 无铅焊料表面贴装焊点的高温可靠性研究 [D]. 上海: 中国科学院上海冶金所博士学位论文, 2001.
- [5] IPC roadmap. A guide for assembly of lead-free electronics 4th draft [R]. Sanders road:northbrook, 2000; 2215.
- [6] 梁凯, 姚高尚, 简虎, 等. 微电子封装无铅钎焊的可靠性研究[J]. 电子质量, 2006 (4): 28-31.
- [7] Ahmed S, Islam M N, Chan Y C. Interfacial reactions of BGA Sn-3.5%Ag-0.5%Cu and Sn-3.5%Ag solders during high-temperature aging with Ni/Au metallization [J]. Mater Sci Eng, 2004,(113):184-189.
- [8] Janne J.Sundelin, Sami T.Nurmi. Mechanical and microstructural properties of SnAgCu solder joints [J]. Mat Sci Eng A, 2006,(420):55-62.
- [9] 田玉波. 电子封装工程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003; 410-411.
- [10] W.Engelmaier. Solder Attachment Reliability, Accelerated Testing and Result Evaluation Solder Joint Reliability-Theory and Application[M]. New York: Von Nostrand Reinhold, 1993:572.
- [11] Rao R.Tummala. 微系统封装基础[M]. 黄庆安, 唐杰影, 译. 南京: 东南大学出版社, 2004; 808.
- [12] 郭福, 等. 无铅钎焊技术与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006; 257-258.



作者简介:

韩永典 (1983-), 男, 江苏徐州人, 硕士研究生, 主要研究方向为电子封装无铅焊点的可靠性。