

文章编号: 1001-9014(2009)03-0194-04

HgCdTe 探测器 In 焊凸点的失效及有限元分析

吴礼刚¹, 刘大福², 朱三根², 龚海梅²

(1. 宁波大学 信息科学与工程学院, 浙江 宁波 315211;

2. 中国科学院上海技术物理研究所 传感技术国家重点实验室, 上海 200083)

摘要: 卫星工作时, 由斯特林机致冷的 HgCdTe 中长波红外探测器会经受从 -173°C 以下到常温的成千上万次温度循环。由于不同材料的热膨胀系数 (TEC) 不匹配, 这样就会造成电极封装的疲劳和失效, 进而影响卫星的正常工作。利用中科院上海技术物理研究所研制的温度循环设备 TCE-a, 模拟了真空环境下的斯特林制冷机的开关机模式, 发现了 In 焊凸点的两种失效模式。运用有限元方法, 对 In 焊凸点的失效进行了力学分析。

关键词: 红外探测器; In 焊凸点; 温度循环; 失效; 有限元方法

中图分类号: TN215; TN306 **文献标识码:** A

FAILURE AND FINITE ELEMENT ANALYSIS OF INDIUM SOLDER-BUMPS FOR HgCdTe DETECTORS

WU Li-Gang¹, LIU Da-Fu², ZHU San-Gen², GONG Hai-Mei²

(1. College of Information Science and Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2. State Key Laboratories of Transduce Technology, Shanghai Institute of Technical Physics,
Chinese Academy of Science, Shanghai 200083, China)

Abstract: During satellite's working, HgCdTe mid or long wavelength infrared (IR) detectors cooled by the stirling cooler are subjected to thousands of repeated thermal cycles from below -173°C to room temperature. Due to the mismatch of thermal expansion coefficients (TEC) of different materials, thermal cycles can cause the bonding's fatigue and failure, even cause the disfunction of satellites. By using the thermal cycle equipment (TCE-a) developed by SITP, the vacuum environment and stirling cooler's intermittent working modes were simulated, and two failure modes of indium solder-bump were discovered. And the finite elements method (FEM) was used to analyze the mechanism of bumps' failure.

Key words: IR detector; indium solder-bump; thermal cycle; failure; finite element method (FEM)

引言

HgCdTe 半导体量子效率高, 响应波长随组分可调, 是制备多色探测器的优选材料^[1,2]。在航天遥感成像时, 由于斯特林制冷机采用间歇式工作方式, HgCdTe 探测器在真空环境下会经受从 -173°C 以下到常温的成千上万次温度循环, 而且由于材料热膨胀系数 (TEC) 不匹配, 会造成焊点热疲劳和塑性变形, 从而造成器件失效^[3], 情况严重时, 将使卫星非正常工作。统计数据表明, 电子元器件因设计、制造工艺等原因产生的失效中电极系统及封装失效占总失效的一半^[4]。而且, 国内外大量实践证明, 温度循环是环境应力筛选中最有效的筛选模式, 它所激发

的故障数占环境应力筛选总故障数的一半以上^[5]。

因此, 对温度循环条件下的探测器电极系统及封装失效的研究是非常必要的。目前很少有温度循环设备制冷能够达到 -170°C 以下, 而且难以保证真空环境。为了模拟太空中的真空环境下斯特林制冷机的开关机工作状态, 研究探测器在温度循环作用下的失效机理和失效模式, 中科院上海技术物理研究所研制了专门的温度循环设备^[6,7], 型号为 TCE-a。设备真空度达到 10^{-3}Pa , 一次可以装多个器件进行温度循环。利用这台设备, 发现了 HgCdTe 探测器电极封装中的 In 焊凸点在经历 20°C 到 -173°C 的温度循环时, 会发生 In 焊凸点“坍塌”和“互连”现象, 而且随着循环次数的增加, 这两种现象越来越明显,

收稿日期: 2008-06-21, 修回日期: 2008-12-18

Received date: 2008-06-21, revised date: 2008-12-18

基金项目: 宁波大学王宽诚幸福基金资助

作者简介: 吴礼刚 (1976-), 男, 湖北广水人, 博士, 主要从事光电探测器和光机电一体化设备等方面的研究。

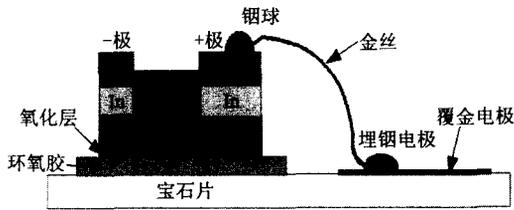


图1 引线电极工艺示意图
Fig.1 Sketch map of IR detector and Indium bumps

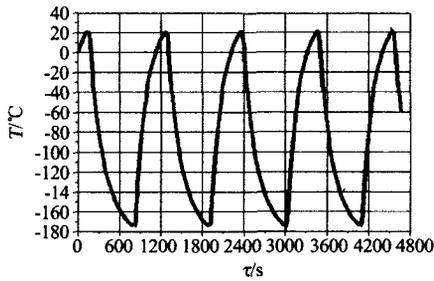


图2 探测器温度循环曲线
Fig.2 Temperature cycles of IR detector

失效凸点数目越来越多. 为了研究其失效机理, 采用了有限元分析的方法, 从力学的角度对两种失效模式进行了理论分析.

1 实验

HgCdTe 红外探测器样品电极封装方法如图 1 所示, 金丝的一端 In 焊于芯片电极上, 另一端 In 焊于覆金电极上. 工艺上是用烙铁将锡融化, 在电极上形成几乎半球形的 In 焊凸点, 焊接的时候将金丝埋入其中. 将 2 只 8 元探测器样品 I 和 II 按照圆对称装到设备 TCE-a 的圆形的铝传热板上, 垫上低温下也很软的 In 片导热层材料保证传热优良, 使得探测器随传热板基本同步升降温. 图 2 为探测器的温度变化曲线, 器件从 -173°C 上升到 20°C 大约需要 7.5min, 降温则大约需要 10min, 在高低温度点各驻留 1min. 然后通过实验观察, 研究温度循环对蓝宝石片覆金电极上的 In 焊凸点的影响.

对于每个探测器, 蓝宝石片上的覆金电极共有 12 个, 其中 8 个用来引出芯片上的 8 个光敏元“+”极, 另 2 个用来引出光敏元公共“-”极, 剩下 2 个是为了引出测温二极管电极.

2 实验结果

经过 1825 次温度循环之后, 发现器件 I 有 2 个光敏元电阻监测值发生异常, 将样品从设备真空室中取出, 在显微镜下观察, 发现蓝宝石片的覆金电极



图3 1825 次温度循环后的覆金电极 In 焊凸点形貌
Fig.3 Shape of Indium bumps after 1825 cycles

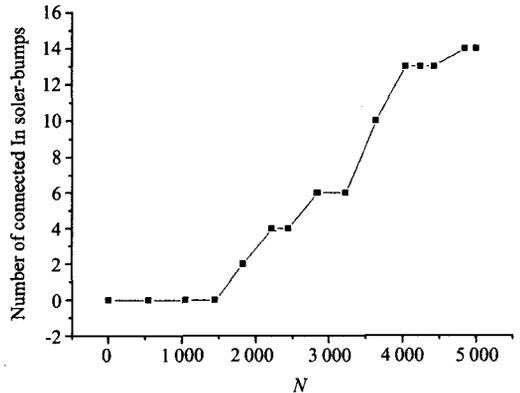


图4 器件 I 和 II 16 个光敏元的 In 焊点互连数随循环次数的变化
Fig.4 Number of connected Indium solder-bumps varied with number of cycles

上, 原先形状较规则的 In 焊凸点, 变成如图 3 所示的形貌. 实验中发现两个现象: 1) In 焊凸点“坍塌”. In 焊凸点已经变得干瘪, 顶部变得粗糙不平, 看起来像有 In 粒从 In 焊凸点表面脱落, 形状不够饱满完整; 2) In 焊凸点“互连”. In 焊凸点 D 和 E 底部金属 In 扩展蔓延至沟道并相互连接, 造成相邻的两个光敏元电气连通.

进一步研究发现所有的覆金电极上的所有 In 焊凸点都发生了坍塌. 而且循环次数增加, In 焊凸点坍塌越厉害, 相邻 In 焊凸点互连数目逐渐增多. 4846 次之后, 探测器 I 和 II 总共 16 个光敏元的 In 焊凸点互连数目已经达到 14 个, 只有器件 II 的第 5 和第 6 元没有互连, 两只探测器的凸点互连数目随温度循环次数变化的关系如图 4 所示.

由于实际情况中剩余几个 In 焊凸点与相邻 In 焊凸点的距离稍大于 8 个光敏元“+”极引线的相邻 In 焊凸点之间的距离, 因此 5000 次循环之后, 这 4 个覆金电极上的 In 焊凸点虽都有坍塌, 但是还没有造成互连. 趋势表明, 随着循环的进行, 这几个凸点也会互连.

3 有限元分析

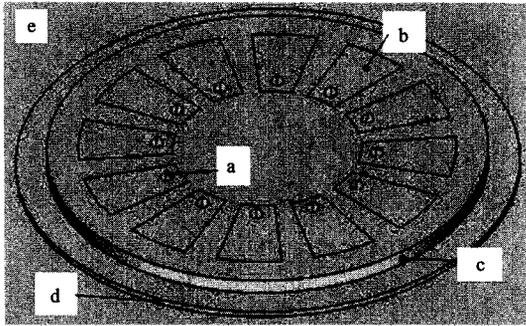


图5 探测器电极系统的三维几何模型
Fig.5 3D geometrical model of detector's electrodes system

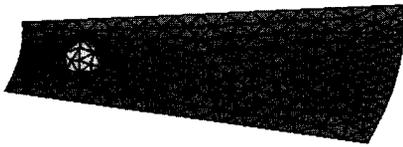


图6 In 焊凸点和覆金电极的网格划分
Fig.6 Grids of In bumps and a gold plated electrode

利用有限元软件从力学角度来分析 In 焊凸点失效的原因. 实际 In 焊凸点接近半球形, 建模时就用跟原凸点等高等底面积的半球来替代. 8 个光敏元“+”极的覆金电极完全按照真实尺寸建模, 另外 4 个覆金电极虽然形状尺寸有所不同, 但面积和分布差别不算很大. 为了建模方便, 根据实际排列的情况, 采取 12 个覆金电极辐射状均布的方式. 这样就建立了一个如图 5 所示的三维几何模型, 其中 a 为 In 焊凸点, b 为覆金电极, c 为宝石片, d 为 In 垫片导热层, e 为承载电极系统的宽大的传热板.

采用四面体单元网格划分的 In 焊凸点和覆金电极因为尺寸小, 而且是研究的重点, 所以网格划分很细(如图 6 所示), 其它部分网格划分较粗. 以宝石片上表面为水平的 XY 平面, 原点在宝石片上表面圆心, 向右的方向为 Y 方向, 垂直向上的方向为 Z 方向.

根据表 1 所列的材料参数, 假设电极系统初始温度为 20℃, 当电极系统达到最低温度 -173℃ 时, 计算出宝石片的温度场分布如图 7 所示. 这时温度从低到高顺序为: In 垫片导热层 < 宝石片边缘 < 覆金电极外边缘 < 覆金电极内侧 < In 焊凸点. 电极组件部分温度在 -170 ~ -178℃ 之间分布, 宝石片的中心圆区域内温度在 -170 ~ -171.5℃ 范围内, 非常接近于该区域内的测温二极管实测温度 -173℃, 因此这个模型可以反映电极系统从常温降到 -173℃ 的情况.

表 1 各材料性能参数^[8,9]

Table 1 Material physical parameters

	钢	宝石	金
质量密度 (kg/m ³)	7286	3980	19320
比热容 (J/kg℃)	233	753	129
热导率 (W/mK)	81.8	34	317.9
线膨胀系数 (10 ⁻⁶ /℃)	32.1	5.6	14.1
泊松比	0.3	0.3	0.3
杨氏模量 (GPa)	10.8	440	78.6

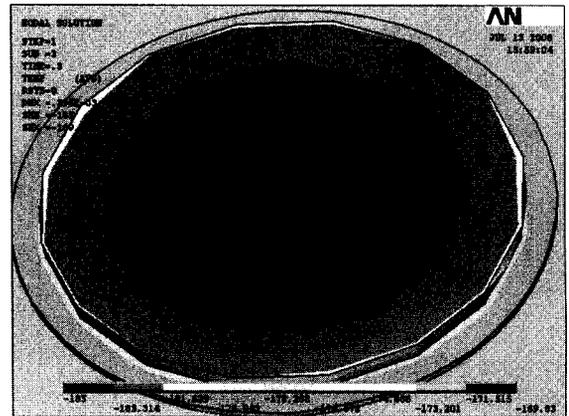


图7 电极系统温度场分布(单位℃)
Fig.7 Temperature distribution of detector's electrode system

根据强度理论, 对于 In 等塑性材料通常以屈服的形式失效, 一般采用第三和第四强度理论. 第三强度理论认为无论什么应力状态, 只要最大剪应力 τ_{max} 达到剪切强度时就会发生屈服. 第四强度理论认为无论什么应力状态, 只要形变比能达到与材料性质有关的某一极限值, 材料就发生屈服. 经过推导, 第四强度理论可以表述为当 Von-mises 应力 σ_{von} 超过屈服极限时, 形变比能超出极限. 其中, Von-mises 应力可以表达为

$$\sigma_{von} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2]} \quad (1)$$

这里, $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 分别为 3 个互相垂直的主应力, 显然 σ_{von} 只是一个标量, 没有方向. 查得常温下“钢球”的剪切强度^[10]为 5.6MPa, 而屈服极限约 24MPa 左右, 在 -173℃ 低温下, 钢会稍稍变硬, 那么剪切强度就会稍大于 5.6MPa, 屈服极限也会稍大于 24MPa.

图 8 为计算出来的低温时的 In 焊凸点的 Von-mises 应力分布, 凸点底部应力的范围为 27.1 ~ 50.9MPa, 凸点顶部应力的范围为 3.4 ~ 27.1MPa. 图 9 为低温时 In 焊凸点在水平方向上的剪切应力分布, In 焊凸点的最大剪切应力达到 6 ~ 8.6MPa.

计算结果表明, 在静态应力的作用下, 当温度达到 -173℃ 时: 1) 凸点底部的 Von-mises 应力最

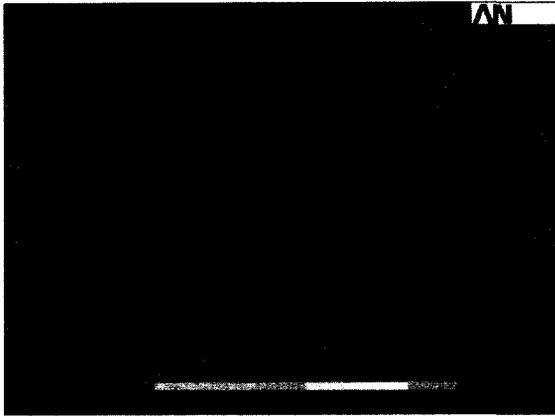


图 8 In 焊凸点在低温下的 Von-mises 应力分布 (Pa)
Fig. 8 Von-mises Stress distribution of In bumps at low temperature

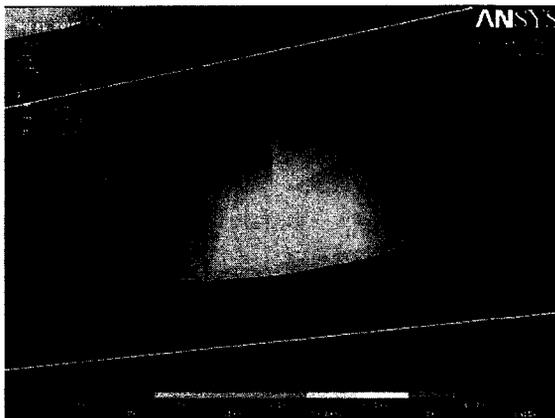


图 9 低温下 In 焊凸点水平方向上的剪切应力分布 (Pa)
Fig. 9 Horizontal shear stress distribution of In bumps at low temperature

大,已经达到或者超出 In 在低温下的屈服极限,而凸点顶部有一部分达到 In 的屈服极限;2)水平方向上的凸点最大剪切应力跟低温下的 In 球剪切强度相当。

因此,受到 Von-mises 应力的影响,塑性变形最容易在钢球底部形成,钢球顶部也可能部分发生塑性变形,但是顶部的塑性变形没有底部厉害;受剪切应力的影响,钢球容易发生水平面上的原子层滑移。而多次温度循环产生的交变应力,使得 In 焊凸点产生热疲劳,从而大大降低了钢球产生塑性变形的极限,加速了钢球的塑性变形。这就是 In 焊凸点产生坍塌的力学原因。当温度循环次数越多时,In 焊凸点产生坍塌越厉害,坍塌到相邻凸点底部 In 层蔓延到相互交接时,就产生了互连失效。当温度循环到达一定次数时,所有 In 焊凸点将发生互连失效。

4 结论

实验表明,经过多次近 200℃ 范围的温度循环 (-173 ~ 20℃) 后,对于 HgCdTe 红外探测器的宝石片覆金电极上的 In 焊凸点,有以下几个规律:

1) In 焊凸点逐渐发生“坍塌”,进而产生“互连”失效。这就是大范围温度循环造成的两个失效模式。

2) 循环次数越多,In 焊凸点坍塌越厉害,相邻凸点互连数目越多;随着循环次数的增加,In 焊凸点的坍塌是一种普遍现象,互连失效是一种必然趋势。

有限元分析则表明,In 焊凸点坍塌失效的力学原因如下:

1) 只考虑静态应力时,当温度降到最低点,In 焊凸点底部的 Von-mises 应力跟屈服强度相当;剪切应力也跟 In 球剪切强度相当,凸点底部已经达到或者接近塑性变形和原子层滑移的强度极限。

2) 当温度循环产生交变应力时,由于 In 球的热疲劳,降低了材料所能忍受的强度极限,使得 In 球更容易产生原子层滑移和塑性变形。这最终导致了 In 焊凸点的“坍塌”和“互连”失效。

REFERENCES

- [1] SHAO Jun, MA Li-Li, LÜ Xiang, *et al.* Recent progress and potential impact of modulation spectroscopy for narrow-gap HgCdTe[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (邵军, 马丽丽, 吕翔, 等. 窄禁带碲镉汞调制光谱的近期进展和前景. *红外与毫米波学报*), 2008, 27(1): 1—6.
- [2] XU Xiang-Yan, YE Zhen-Hua, LI Zhi-Feng, *et al.* Numerical modeling of middle wavelength two-color photovoltaic HgCdTe detectors[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (徐向晏, 叶振华, 李志峰, 等. 中波双色光伏型 HgCdTe 红外探测器模拟研究. *红外与毫米波学报*), 2007, 26(3): 164—169.
- [3] Yan Q, Rex L, Ghorbani H R, *et al.* Temperature profile effects in accelerated thermal cycling of SnPb and Pb-free solder joints[J]. *Microelectronics Reliability*, 2006, 46(2-4): 574—588.
- [4] YAO Li-Zhen. *Reliability Physics* (姚立真. 可靠性物理. 电子工业出版社), 2004: 322.
- [5] LIANG Xue-Yi. Tailor method of thermal cycle screening profile[J]. *Electronic Product Reliability and Environmental Testing* (梁雪仪. 温度循环筛选剖面的裁剪方法. *电子产品可靠性与环境试验*), 2002, 25(5): 35—38.
- [6] WU Li-Gang, LIU Da-Fu, ZHU San-Gen, *et al.* Novel thermal cycle screening equipment for cryogenic semiconductor components[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (吴礼刚, 刘大福, 朱三根, 等. 用于低温半导体器件筛选的新型温度循环设备. *红外与毫米波学报*), 2006, 25(2): 153—156.
- [7] Wu L G, Liu D F, Huang Y M, *et al.* A feasible thermal cycle screening system for cryogenic semiconductor components [J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5640, Beijing, November.
- [8] Manual of Mechanical Engineering Metallography (机械工程手册·物理金相卷).

Published by the press Syndicate of the university of Cambridge, 2002.

- [6] WANG Shao-Qing, REN Zhong-Jing, ZHANG Xi-Ming. Study of calculating method of mie scattering coefficient [J]. *Applied optics* (王少清, 任中京, 张希明等. Mie 散射系数计算方法的研究. *应用光学*), 1997, **18**(2): 4—9.
- [7] SUN Jing-Qun. *Atmosphere Detection by Laser* [M]. Beijing: Science Press, 1986. (孙景群. *激光大气探测*), 北京: 科学出版社, 1986.
- [8] Vul' fson A N. Spectral modification beer's law and relation from humidity attenuation coefficient in the atmospheric maritime mist[J]. *Proceedings of SPIE*, 2000, **4341**: 649—655.
- [9] YAN Feng-Qi, HU Huan-Ling, ZHOU Jun. Measurements of number density distribution and imaginary part of refractive index of aerosol particles[J]. *Acta Optica Sinica* (阎逢旗, 胡欢陵, 周军. 大气气溶胶粒子数密度谱和折射率虚

部的测量. *光学学报*), 2003, **23**(7): 855—859.

- [10] HAN Yong, RAO Rui-Zhong, WANG Ying-Jian. Multi-wavelength aerosol optical characteristics obtained by atmospheric visibility [J]. *Infrared and Laser Engineering* (韩永, 饶瑞中, 王英俭. 利用大气能见度获取多波长气溶胶光学特性. *红外与激光工程*), 2007, **36**(2): 265—269.
- [11] Horvath H. Atmospheric visibility [J]. *Atmospheric Environment*, 1981, **15**: 1785—1796.
- [12] RONG Zhi-Guo, ZHANG Yu-Xiang, JIA Feng-Min, et al. On-orbit radiometric calibration of fengyun geostationary meteorological satellite's infrared channels based on sea-surface measurements in the south china sea [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (戎志国, 张玉香, 贾凤敏, 等. 利用南海水面开展我国静止气象卫星红外通道在轨辐射定标. *红外与毫米波学报*), 2007, **26**(2): 97—101.

(上接 167 页)

受 MBE 设备影响, 材料生长仍然没有最优化; 二、目前的光导探测器在厚度, 载流子浓度钝化等方面没有优化. 因此, 量子效率及噪声随着器件结构改善仍会有较大提高. 但是 InAs/GaSb 超晶格具有上述两种材料不具备的在匹配衬底上从短波到甚长波范围工作的特点.

3 结论

采用 MBE 方法, 在 GaAs 衬底上生长了两种晶体结构完整的短周期 InAs/GaSb 超晶格: 2ML/8ML 和 8ML/8ML, 并相应制备了短波和中波的单元光导探测器. 77K 下, 50% 截止波长分别为 2.1 μm 和 5.0 μm . 响应率及 D^*_{λ} 等实验结果为国内开展 InAs/GaSb II 型超晶格红外探测器的研究提供了依据. 其中, 超短周期 InAs/GaSb (2ML/8ML) 短波红外探测器使该材料体系截止波长范围延伸至 2 μm . 为实现焦平面和双色探测器, 研究方向将在 GaSb 衬底上生长性能更高的 pin 二极管.

REFERENCES

- [1] Sai-Halasz G A, Tsu R, Esaki L. A new semiconductor superlattice [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1977, **30**: 651—653.
- [2] Mohseni H, Wojkowski J, Razeghi M, et al. Uncooled InAs/GaSb type-II infrared detectors grown on GaAs substrates for the 8 ~ 12 μm atmospheric window [J]. *Journal of*

Quantum Electronics, 1999, **35**: 1041—1044.

- [3] XU Xiang-Yan, YE Zhen-Hua, LI Zhi-Feng, et al. Numerical modeling of middle wavelength two-color photovoltaic HgCdTe detectors [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (徐向晏, 叶振华, 李志锋, 等. 中波双色光伏型 HgCdTe 红外探测器模拟研究. *红外与毫米波学报*), 2007, **26**(3): 164—169.
- [4] Dente G C, Tilton M L. Pseudopotential methods for superlattices: Applications to mid-infrared semiconductor lasers [J]. *J. Appl. Phys.*, 1999, **86**: 1420—1423.
- [5] Hao R T, Xu Y Q, Zhou Z Q, et al. MBE growth of very short period InAs/GaSb type-II superlattices on (001) GaAs substrates [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2007, **40**: 6690—6693.
- [6] Walther M, Schmitz J, Rehm R, et al. Growth of InAs/GaSb short period superlattices for high performance resolution mid-infrared focal plane array detectors [J]. *J. Crystal Growth*, 2005, **278**: 156—161.
- [7] Wei Y J, Hood A, Yau H, et al. Uncooled operation of InAs/GaSb type II superlattices photodiodes in the mid-wavelength infrared range [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **86**: 233106-1-3.
- [8] Liu Y X, Xia G Q, Tang S Q, et al. Antireflection coating for GaInAsSb/GaSb PIN infrared photodetectors [J]. *J. Functional Materials and devices* (刘延祥, 夏冠群, 唐绍裘, 等. GaInAsSb/GaSb 红外探测器抗反膜的研究. *功能材料与器件*), 2005, **11**: 327—332.
- [9] TIAN Zhao-Bing, GU Yi, ZHANG Yong-Gang. Quantum efficiency optimization of InP-based In_{0.53}Ga_{0.47}As photodetectors [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (田招兵, 顾溢, 张永刚. InP 基 In_{0.53}Ga_{0.47}As 光电探测器的量子效率优化. *红外与毫米波学报*), 2008, **27**(2): 81—85.
- [10] LIU Yu-Dong, ZHANG Gang, CUI Jian-Guo, et al. Effects of texture on the shear strength of In bump [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (刘豫东, 张钢, 崔建国, 等. 织构对铟凸点剪切强度的影响. *红外与毫米波学报*), 2004, **23**(3): 225—228.

(上接 197 页)

- [9] LI Zhong-Ya, CHENG Lei, LI Cheng-Fu. Study of Laser Damage of Silica and Sapphire Crystal [J]. *Chinese Journal of Lasers* (李仲伢, 程雷, 李成富. 熔石英玻璃和白宝石晶体激光损伤的研究. *中国激光*), 2002, **A29**(10): 920—924.