文章编号：1002-2082(2008)06-0900-05

# 用于线路板检测的高分辨率X射线像增强器的研制

曹希斌[1,2]，赵宝升[1]，赛小锋[1]，韦永林[1]，李 伟[2]，赵菲菲[2]
(1. 中国科学院西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室，陕西 西安 710119；2. 中国科学院研究生院，北京 100049)

**摘 要**：鉴于传统的检测方法无法看到封装后芯片内部的线路虚焊和桥接等问题，而且随着封装的小型化和组装的高密度化以及各种新型封装技术的不断涌现，对于检测装置的分辨率要求越来越高，而高分辨率的X射线检测装置是解决这一问题的关键。提出一种新型高分辨率X射线像增强器，它是线路板检测和芯片封装检测装置中的核心器件之一，其极限分辨率制约着X射线检测装置的发展。通过对其制作工艺的改进和采用新型窗口材料进行真空封接，使其分辨率达到了20 lp/mm。

**关键词**：X射线像增强器；反射式光电阴极；MCP
**中图分类号**：TN144.1 **文献标志码**：A

## Development of high-resolution X-ray image intensifier for inspection of circuit boards

CAO Xi-bin[1,2], ZHAO Bao-sheng[1], SAI Xiao-feng[1], WEI Yong-lin[1], LI Wei[2], ZHAO Fei-fei[2]
(1. State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, CAS, Xi'an 710119, China; 2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract**: Because of the traditional inspection system not being able to detect the defects at solder joints and solder bridges in ball grid array (BGA) as well as the emergence of miniaturized packaging, high-density assembly and various new packaging technologies, a high resolution inspection system is proposed to solve this problem. A new type of high-resolution X-ray image intensifier is introduced. As one of the key devices for circuit board testing and chip packaging detection, its resolution performance has become a bottleneck for the development of X-ray detection system. Its resolution reached 20 lp/mm after the improvement of the fabrication process and the use of new window material for vacuum sealing.

**Key words**: X-ray image intensifier; reflective photocathode; MCP

## 引言

X射线检测作为传统无损检测的方法之一，在工业无损探伤领域的作用越来越重要。特别是随着电子技术的飞速发展、封装的小型化和组装的高密度化以及各种新型封装技术的不断涌现，对电子组装质量尤其是对电子线路板中的BGA(球栅阵列封装)[1]的要求越来越高。为满足这一要求，新的检测技术不断出现，自动X射线检测技术(AXI)就是这其中的典型代表。它不仅可对不可见焊点进行检测，如BGA(球栅阵列封装)等，还能对检测结果进

收稿日期：2008-03-18； 修回日期：2008-05-10
作者简介：曹希斌(1978－)，男，陕西西安人，西安光机所在职硕士研究生，主要从事X射线、紫外探测器的研究工作。
E-mail：caocao208@163.com

行定性和定量分析,可以及早发现故障。同时,由于电子产品的小型化,多层结构印刷线路板的应用变得越来越广泛,在多层印制电路板的制造中,各个板面的排列将被连续地适时监控。X射线无损检测能精确测量处于内层位置的结构及焊环宽度,是制造过程优化的基础,所有这一切都需要用高分辨率、低噪声、高对比度的X射线像增强器作为技术支撑。而影响X射线像增强器的分辨率和对比度的原因有多种,输入窗口的材料是其中一个重要的原因。目前,工业无损检测技术的X射线像增强器的输入窗普遍采用的是钛窗,其主要原因是钛窗真空封接比较容易,但钛窗对X射线的透过率低、散射严重、噪声大,严重限制了其在工业无损检测领域的应用。铝窗对X射线的透过率高、散射小、噪声低,但铝与可伐合金的封接属于非匹配封接,膨胀系数差异大,其封接技术难度大成为限制其使用的技术瓶颈。本文采用特殊的焊料和真空封接技术解决这一难题。

## 1 高分辨率X射线像增强器的结构

高分辨率X射线像增强器主要由铝窗、CsI反射式光阴极、微通道板(MCP)和P20材料荧光屏组成,如图1所示。X射线透过铝窗后将芯片中焊点和金属导线的图像投影携带到紫外像增强器的阴极面上,由光阴极产生相应的电子图像。该电子图像经过高压加速和微通道板放大电子束流能量后,增强的电子激发荧光屏发光,荧光屏将电子图像转换成可见光图像,经光学纤维面板输出窗输出,整个像增强器就完成了"输入X光图像→相应电子图像→高能量束流电子图像→可见光图像输出"的转换。

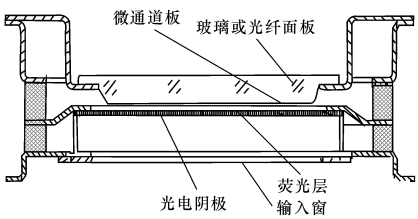



图1 高分辨率X射线像增强器的结构图

Fig. 1 Structure of high-resolution X-ray image intensifier

## 2 X射线光阴极量子效率的理论分析

X射线光阴极的量子效率为 $\eta_R(E,\theta)=n(E,\theta)/N_x \propto P_B(E,\theta)\cdot P_E(E,\theta)$,其中 $\eta_R(E,\theta)$ 是X射线光电子能量 $E$ 和MCP斜切角 $\theta$ 的函数;$n(E,\theta)$ 是产生的二次电子数,即入射 $X$ 射线光子数;$P_B(E,\theta)$ 和 $P_E(E,\theta)$ 分别为X光子吸收几率和电子逸出几率。经理论推导,CsI/MCP反射式X射线光阴极量子效率表达式为

$$\eta_R(E,\theta')=\delta(E,\theta')\cdot P_S(0)\mu\cos\theta'\cdot L_S\cdot\{1+\exp[-(\mu\cos\theta'+1/L_S)Z]\}/(\mu\cos\theta'\cdot L_S+1) \quad (1)$$

式中:$\theta'$ 为X射线的掠射角,它与MCP斜切角 $\theta$ 有关;$Z$ 为 $X$ 射线光子进入阴极膜层的斜距离;$L_S$ 为电子的逸出深度;$\mu$ 为阴极材料的吸收系数;$\delta(E,\theta')$ 为X射线光子能量 $E$ 中用来产生二次电子的那部分能量所占的比例;$P_S(0)$ 为光电阴极/真空界面处($Z=0$)电子逸出几率,与表面位置和表面态有关。(1)式是CsI/MCP反射式X射线薄膜光阴极制作工艺的依据。通常 $\theta$(或 $\theta'$)小时,X光子在膜层中行程长,吸收几率 $P_B$ 大,但 $\theta'$ 小到一定程度,MCP中二次电子倍增级数变小,总电子增益下降,所以有一个最佳 $\theta'$。考虑X光子穿透能力强,能量 $E$ 越大,穿透越深,但深层的二次电子更难逸出,$P_E$ 会下降。由此可见,对一定能量的X光子存在一个最佳阴极层厚,能同时兼顾 $P_B$ 和 $P_E$ 因子的最佳取值,使综合效果 $\eta_R$ 达到最大。通常膜层不能过厚,在(10~100)μm范围内选择[2-6]。

X射线与CsI光阴极的相互作表现为:1)激发,即X射线从发射体内激发出电子;2)输运和逃逸,即激发出的电子输运至发射体表面并最终逃逸出发射体的过程。CsI光阴极的量子产额 $Y$ 可表示为

$$Y=KE_0\mu_{CsI}(E_0)\rho_{CsI}\exp[-(\lambda_{CsI}/\lambda_x)]\lambda_s\cdot\tanh(t_{CsI}/2\lambda_S)$$

式中:$K$ 为常数;$E_0$ 为X射线光子能量;$\lambda_x=(\mu\rho)^{-1}$ 是X射线的衰减长度;$\lambda_S$ 为二次电子的衰减长度。于是可得到像增强器的能谱响应,即每个X射线引起的像增强器荧光屏在2π立体角内的总辐射能的表达式:

$$\eta(E_0)\exp[-\mu_m(E_0)\rho_m t_m]KE_0\mu_{CsI}(E_0)\rho_{CsI}/\lambda_m)]\lambda_s\tanh(t_{CsI}/2\lambda_s)G\eta_p$$

式中:$t_m$ 为窗口的厚度;$\mu_m$ 为窗口的总质量衰减系数;$\rho_m$ 和 $\rho_{CsI}$ 分别为窗口材料和CsI的密度;$\mu_{CsI}(E_0)$ 为CsI的质量衰减系数;$G$ 为微通道板的电子

增益;$\eta_p$ 为荧光屏的转换效率;$t_{CsI}$ 为 CsI 的厚度[7]。

经过理论分析可以得出像增强器X射线阴极的量子效率与阴极材料的种类、膜层结构及其分布、膜层厚度与逸出深度、内部能量分布和表面态以及入射光子能量有关。而且窗口材料的厚度和密度也对X射线的衰减和像增强器的能谱响应有影响,尤其对能量较低的X射线影响更甚。

半导体集成电路工艺技术的发展是由不断缩减结构尺寸驱动的。伴随着芯片尺寸不断减小,I/O数不断增加,周边焊盘间距减小到 70 μm 及 50 μm。如果用于线路板检测或封装,芯片内部线路检测的低能量X射线被输入窗遮挡或散射,会使像增强器的图像对比度降低而丢掉大量的细节信息。金属钛的密度大于金属铍和铝,所以铍窗和铝窗对X射线的散射要小于钛窗,这样其图像的对比度优于用钛窗的X射线像增强器。国外同种高分辨率X射线像增强器的输入窗一般采用铍窗或者铝窗。

## 3 工艺过程

### 3.1 铝窗真空封接

用厚度为 0.5 mm 的纯铝作为封接窗口,与可伐合金通过封接焊料真空封接。将纯铝片按设计尺寸加工好并清洗干净后,用封接焊料将纯铝片与可伐合金 4J33 均匀涂好,用专门设计的封接胎具把纯铝片与可伐合金 4J33 按照设计要求固定好后,将高精度温控真空封接炉抽真空,当真空度达到 $10^{-3}$ Pa 后升温,达到封接温度后保温 2 h,最后自然降温。这时纯铝片就与可伐合金环焊接在一起形成了良好的真空气密结构。

### 3.2 MCP 的选用

微通道板(MCP)是一种二维列阵微通道电子倍增器,它由高二次电子发射系数的含铅玻璃制成。每一个微通道空心管(内壁直径 6 μm~50 μm)相当于一个微型连续打拿极光电倍增管,两端加有一定工作电压。以一定角度入射的电子打到这种微通道内壁上时,经多次二次电子倍增,可获得很高的电子数倍增输出。高分辨率X射线像增强器中选用$\Phi$ 33 mm 微通道板,丝径$d=10$ μm,电流增益$G=12\ 100$,通道中心距$S=12$ μm。MCP 是大面积阵列电子倍增元件,其极限分辨率必然受到 MCP 本身的结构参数限制[8]。由公式 $N_{f(\mathrm{MCP})}=1\ 000/1.72\,S$($S$ 为通道中心距)可得 $N_{f(\mathrm{MCP})}=48$ lp/mm。采用单近贴式聚焦和合适的阴阳极电位差使光电子在径向偏离尽量小,以减小弥散,提高分辨率。

### 3.3 荧光屏的制备

选用光纤面板作为荧光屏是由于玻璃表面对荧光质发光亮度的反射、折射及相应能量损耗等因素,使传光效率低,图像质量不甚理想。用光纤面板输出窗可以提高传光效率和改善像质,甚至还可以作成锥形光学纤维面板,能方便地获取放大的输出图像[9],更适于同CCD 摄像系统耦合。在光纤面板上用离心沉淀法制作出牌号为P20 的荧光屏,制屏时注意荧光屏上无针孔和黑点,而且要耐高场强。

### 3.4 CsI 反射式光电阴极的制作

把对X射线敏感的CsI 材料蒸镀到MCP 的输入端,如图 2 所示,就构成了 CsI/MCP 反射式X射线光阴极。假定MCP 偏置角(斜切角)为$\theta$,则X光子以与表面成$\theta$角的方向进入CsI 材料层内,在其进程中不断与CsI 碰撞交换能量(被吸收)。从Cs 原子内壳激发出一次光电子,这些一次光电子或直接逸出体外(透射出的数量可忽略),或将其能量交给原子壳层中处于更高能级的电子(二次电子),使它们获得能量,以克服表面位垒逸出体外,形成有用的二次电子发射。这些电子一经逸出体外,即会在MCP 两端电场作用下轰击(二次电子发射系数大于 1)通道对面的CsI 层或通道壁。经多级电子倍增,在MCP 输出端形成电子数放大数千甚至上万倍的电子云,进而在板屏高压电场作用下轰击荧光屏,最终为人眼提供一幅被检物体X射线透射强度二维空间分布的可见光再现图像。

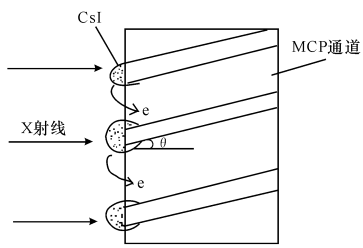



图 2 CsI/MCP 反射式X射线光阴极

Fig. 2 CsI/MCP reflective X-ray photocathode

根据理论分析和实验得出最佳的CsI 蒸镀厚度,将CsI 蒸镀到MCP 上,然后在百级超净实验室

中将其装架在陶瓷管壳中,随后迅速将装架好的试验管放置于真空光具中,接好各电极,将真空度抽到$10^{-3}$ Pa后给各电极加以合适的电压使其正常工作。开启X射线光源,观察增强器是否正常工作,工作正常后,用激光密封焊接,然后再放到超高真空排气台进行烘烤去气、老练,最后用冷钳封的方法从超高真空排气台上取下。

## 4　极限分辨率的测试

极限分辨率的测试装置如图3所示。

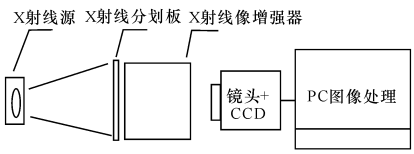


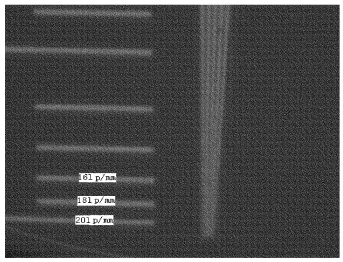

图3　高分辨率X射线像增强器的分辨率测试原理图

Fig. 3　Test principle of high-resolution X-ray image intensifier

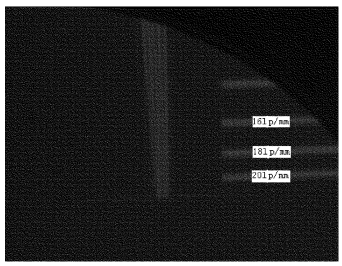
在40 kV下,用美国牛津公司微焦斑(0.05 mm)X射线源作光源,在X射线像增强器输入窗前紧贴一个X射线专用分划板(美国牛津公司X射线专用分划板,最高分辨率为20 lp/mm),X射线可以直接穿过输入窗,使分划板的图像近似1∶1地投影到X射线像增强器的阴极面上。CsI阴极响应X射线而产生光电子,在荧光屏上成分划板的像,荧光屏上的图像经过镜头成像在CCD相机上,CCD相机再把图像传入计算机,专用软件对其图像进行降噪处理。如图4 X射线像增强器的分辨率图所示,其中(a)图是钛输入窗的X射线像增强器的分辨率图,分辨率最高可以达到16 lp/mm,(b)图是铝输入窗的X射线像增强器的分辨率图,分辨率最高可以达到20 lp/mm,说明使用铝窗后分辨率有明显的提高。

为了说明铝窗比钛窗的X射线像增强器图像对比度更高,做一简单对比实验,用美国牛津公司微焦斑(0.05 mm)X射线源作光源,分别用2个X射线像增强器(MCP为同一批次,各项指标相近),一个为铝输入窗,另一个为钛窗,对同一个封装后的芯片(实物如图5)进行透视成像,在输入情况完全相同的条件下进行对比测试。

如图6所示,在图像处理软件的亮度调节和去噪声的帧数迭加设置完全相同的情况下,为了使图像更加直观,把2张图片放在一起对比,可以看出2




(a) 钛输入窗的X射线像增强器的分辨率图




(b) 铝输入窗的X射线像增强器的分辨率图

图4　X射线像增强器的分辨率图

Fig. 4　Resolution picture obtained by X-ray image intensifier

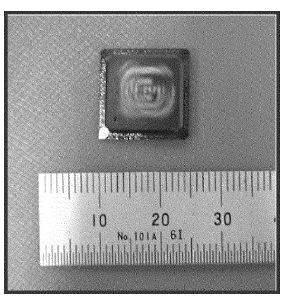



图5　封装后的芯片

Fig. 5　Packaged chip

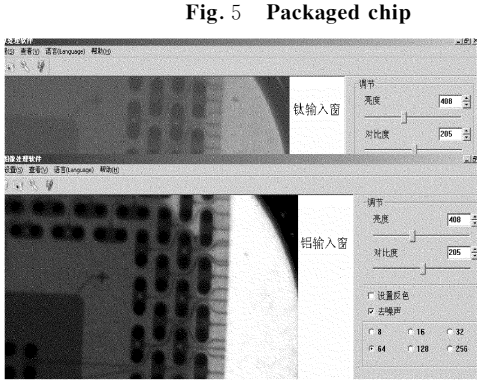



图6　铝窗和钛窗的对比实验

Fig. 6　Contrast experiment of Al window and Ti window

张图像的对比度差异很大,这说明用铝作为输入窗的X射线像增强器在分辨率和对比度上都优于用钛窗的X射线像增强器。

## 5 结论

影响X射线像增强器分辨率的因素是多方面的,例如:输入窗口材料和厚度、MCP的丝径、阴极CsI的厚度、荧光屏的质量、测试中X射线源的焦斑大小、像增强器电源纹波、图像处理软件的算法,这些因素都直接或间接地影响着最后使用中的X射线像增强器的分辨率。虽然在部分工艺上作了些改进,使X射线像增强器的分辨率提高到20 lp/mm,但需进一步抑制噪声,提高分辨率。

**参考文献:**


[1] YOUNG J R, KUK W K. Inspection of ball grid array (BGA) solder joints using X-ray cross-sectional images process[J]. SPIE,1999, 3836:168-171.

[2] 田景全,姜德龙,孙秀平. 新型变密度卤化物/MCP反射式X射线敏感薄膜的研究[J]. 发光学报,2002,23(5):513-516.
TIAN Jing-quan, JIANG De-long, SUN Xiu-ping. Study on new MCP reflection X-ray sensitive film of variable density halide [J]. Chinese Journal of Luminescence, 2002,23(5):513-516. (in Chinese)

[3] FRASER G W. Characteristics of X-ray photo cathodes in the wavelength band (0.1～30)nm, cesium iodide and other insulators of high photoelectric yield [J]. Nucl. Instru. and Meth.,1983,206:265-279.

[4] CHAPPD J H. The measurement of surface characteristics and quantum efficiency on MCP coated with CsI[J]. Instru. and Meth. in Phys. Res.,1987,A260:483-490.

[5] XIANG Shi-ming. The hard X-ray quantum detection efficiency of CsI coated MCP[J]. Nucl. Instru. and Meth.,1982,195:523-532.

[6] FU Li-chen, TIAN Jing-quan. New structure X-ray cathode for X-ray intensifier of single proximity focus[J]. SPIE,1994,2321:396-398.

[7] 邱孟通,王奎禄,王文生,等. 一种X射线像增强器能谱响应特性研究[J]. 核电子学与探测技术,2002,22(3):240-243.
QIU Meng-tong, WANG Kui-lu, WANG Wen-sheng, et al. Detection technology the energy spectral response of a kind of X-ray converter[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology. 2002, 22(3):240-243. (in Chinese)

[8] 向世明,倪国强. 光电子成像器件原理[M]. 北京:国防工业出版社,1999.
XIANG Shi-ming, NI Guo-qiang. Photoelectron imaging device principle [M]. Beijing: Defense Industry Press, 1999.

[9] 李野,姜德龙,卢耀华,等. 低强度X射线影像仪的新发展[J]. 应用光学, 1999,20(5):12-14.
LI Ye, JIANG De-long, LU Yao-hua, et al. New advancement of low intensify X-ray imager [J]. Journal of Applied Optics. 1999, 20(5): 12-14. (in Chinese)