

采用 Si 薄膜的光子计数成像系统性能的研究*

赵菲菲^{1)2)†} 刘永安¹⁾ 胡慧君¹⁾²⁾ 赵宝升¹⁾

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, 西安 710119)

2)(中国科学院研究生院, 北京 100039)

(2009 年 12 月 13 日收到; 2010 年 1 月 13 日收到修改稿)

在陶瓷基底上利用电子束蒸镀方法制备了 Si 薄膜, 用作感应读出方式光子计数成像系统的电荷感应层, 并研究了薄膜的结构特征和表面形态. X 射线衍射(XRD)测试和场发射扫描电子显微镜(FESEM)图像表明, 沉积的 Si 薄膜为无定形态, 由于陶瓷晶界的存在, 薄膜较粗糙. 搭建了相应的实验系统, 对比了采用不同厚度 Si 薄膜时系统的空间分辨率、计数率、脉冲高度分布曲线等, 发现薄膜的厚度对探测器的计数率影响较大. 此外, 实验还对比了采用相同电阻值的 Si 薄膜和常用的 Ge 薄膜时系统的性能. 研究表明, 采用 Si 薄膜时系统的畸变较小、计数率高、暗计数小.

关键词: 探测器, 光子计数成像, 电荷感应, 微通道板

PACC: 4280Q, 8160C, 2940T

1. 引 言

在采用电荷感应读出方式的光子计数成像系统^[1-5]中, 微通道板(MCP)输出的电荷先轰击呈高阻抗特性的薄膜, 经电荷感应, 由薄膜背面的位敏阳极收集. 位敏阳极各路输出信号通过各级放大器实现信号转换、放大和整形, 最后由数据采集卡采集和计算机图像处理软件处理, 经一定时间积分后形成灰度图像. 相对于 MCP 输出的电荷直接由位敏阳极收集的方法, 电荷感应读出方式有效地避免了位敏阳极次级电子的重新分布所引起的分布噪声, 简化了阳极探测器的真空封装工艺, 保证了真空器件内的高压和外部电子读出电路的完全隔绝. 因此, 采用电荷感应读出方式的光子计数成像系统在量子密钥^[6]、生物发光、放射探测、高能物理和空间探测^[7]等领域有着特殊的作用.

国内外文献报道的感应读出方式探测器皆采用 Ge 膜作为电荷感应层, 本文首次采用 Si 薄膜作为电荷感应层, 并探讨了薄膜参数对成像性能的影响. 利用电子束镀膜法在陶瓷衬底上制备了不同厚度的 Si 薄膜, 并搭建了感应读出方式光子计数成像系统, 实验对比了在不同厚度 Si 薄膜下系统的空间

分辨率、计数率、脉冲高度分布曲线等性能, 此外, 还与传统的采用 Ge 薄膜作电荷感应层的系统进行了分析对比.

2. 实验方法

2.1. 薄膜制备

实验中选用厚度为 1.5 mm 的 99 氧化铝陶瓷做衬底. 99 氧化铝陶瓷的介质损耗小, 且具有高电阻率、低介质损耗和高击穿电压的特点. 陶瓷衬底经清洗后放入真空炉中 700 °C 退火 4 h. 采用电子束镀膜设备制备厚度为 200, 500 和 1000 nm 的 Si 薄膜以及 200 nm 的 Ge 薄膜. 薄膜制备过程中, 膜厚和沉积速率由 FCM-II 型晶控仪实时监控. 薄膜电阻用 PC68 型数字高阻仪测量, 微观结构用 XRD-7000 型 X 射线衍射仪(XRD)确定, 表面形态用 JSM-6700F 型场致发射扫描电子显微镜(FESEM)观测.

2.2. 光子计数成像实验装置

图 1 是感应读出方式光子计数成像系统的结构示意图, 分辨率掩膜板、MCP、镀有高阻薄膜的陶瓷

* 国家自然科学基金(批准号:10878005)资助的课题.

† E-mail: free. ff@163.com

片以及楔条形(WSA)阳极^[8-10]密封在真空室中. 低压汞灯发出的光,经多片减光片和 253.7 nm 的滤光片后,形成微弱的单色光并入射到分辨率掩膜板上.分辨率掩膜板通过光刻工艺刻蚀出一系列条纹

组^[11],紧贴于 MCP 输入面. WSA 阳极的引出信号通过电荷灵敏前置放大电路将电荷信号转换为电压信号,再通过放大整形电路放大整形,最后由计算机采集、处理并成像.

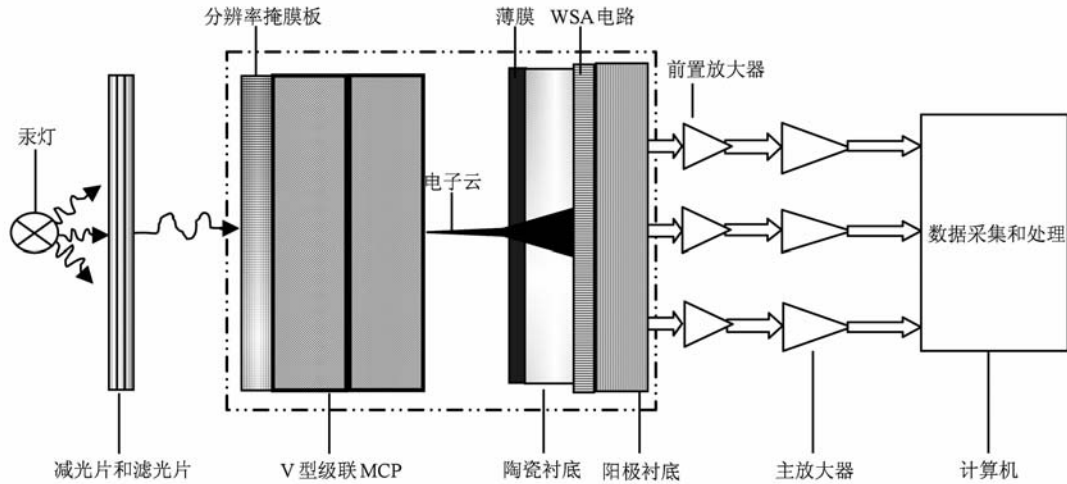


图1 感应读出方式光子计数成像系统结构示意图

3. 实验结果及分析

3.1. 薄膜形貌及性能分析

陶瓷衬底上 Si 薄膜的 SEM 图片和 XRD 图谱如

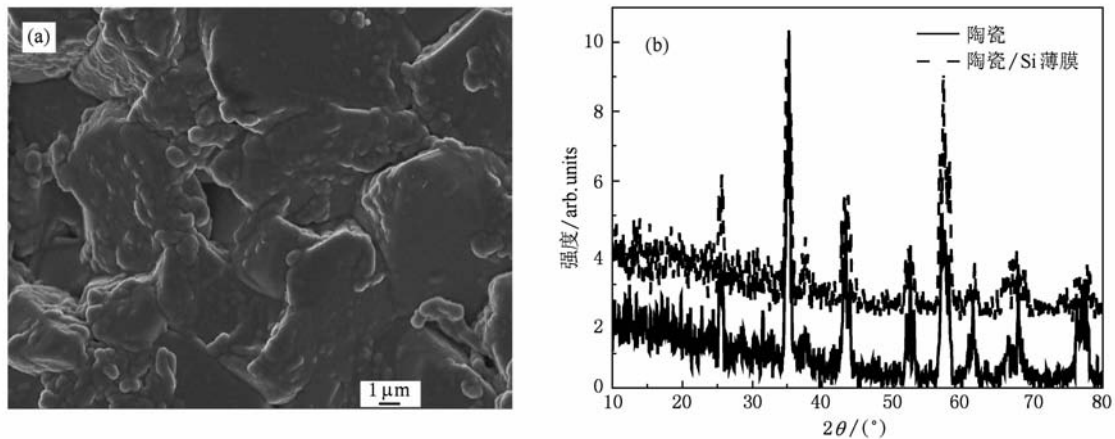


图2 陶瓷衬底上 Si 薄膜的 SEM 图片和 XRD 图谱 (a)SEM 图片, (b)XRD 图谱

3.2. Si 薄膜厚度对成像性能影响

在系统真空度优于 1×10^{-4} Pa, MCP 出射面与 Si 膜之间电压为 -300 V, Si 膜和 WSA 阳极分别接地的条件下,测量了该感应读出方式系统的性能. 其中 Si 薄膜厚度分别为 200, 500 和 1000 nm, 陶瓷

衬底上的 Si 薄膜平整度较粗糙,与文献[12]薄膜的 SEM 图片相似. 图 2(b)中已镀制 Si 薄膜的陶瓷衬底和未镀制薄膜的陶瓷片的 XRD 曲线没有区别,表明曲线的尖峰为陶瓷的衍射峰,制备的 Si 薄膜为无定形态.

衬底与 WSA 阳极紧贴,与 MCP 输出面距离为 1 mm.

3.2.1 相同光强不同 MCP 电压时薄膜厚度对成像性能的影响

图 3 分别为不同 Si 薄膜厚度分辨率板的光子计数图像, MCP 两端电压为 -1800 V, 减光片数目

为 11 片, 采样频率为 5 MHz, 采集时间为 20 min. 当薄膜厚度为 200 nm 时, 从图 3(a) 可见, 图像轮廓为扭曲的圆形, 像点绝大部分都分布在图像的边缘, 且分辨不出任何条纹. 而当薄膜厚度较大时, 由图 3(b) 和 (c) 对比可得, 二者分辨率均优于 150 μm , 没有明显的差别. 图像在边缘部分的扭曲是因为 WSA 阳极 S 电极的公共部分收集电子, 从而导致电子云质心坐标计算偏差引起. 表 1 和图 4 分别为减光片数目同为 11 片时, 不同 MCP 电压下不同 Si 薄膜厚度系统的计数率和脉冲高度分布曲线. 因为采集脉

冲幅度的阈值电压取 0.2 V, 所以高度分布曲线的低脉冲部分没有显示. 当薄膜厚度为 500 和 1000 nm 时, 从表 1 和图 4 可以看出, 计数率随 MCP 电压升高而增大, 脉冲高度分布曲线的峰值随 MCP 电压升高逐渐增大, 同时, 半高宽也随之增大. 这是由于 MCP 增益随电压的提高而增大且更均匀引起的. 另外, 从表 1 还可以看出, 当采用 1000 nm 厚度 Si 薄膜时, 系统的计数率更高. 这是因为当薄膜厚度较大时, 薄膜的电阻较小, Si 薄膜接收的电荷泄放时间从而更短, 脉冲堆积时间较少. 当薄膜厚度为

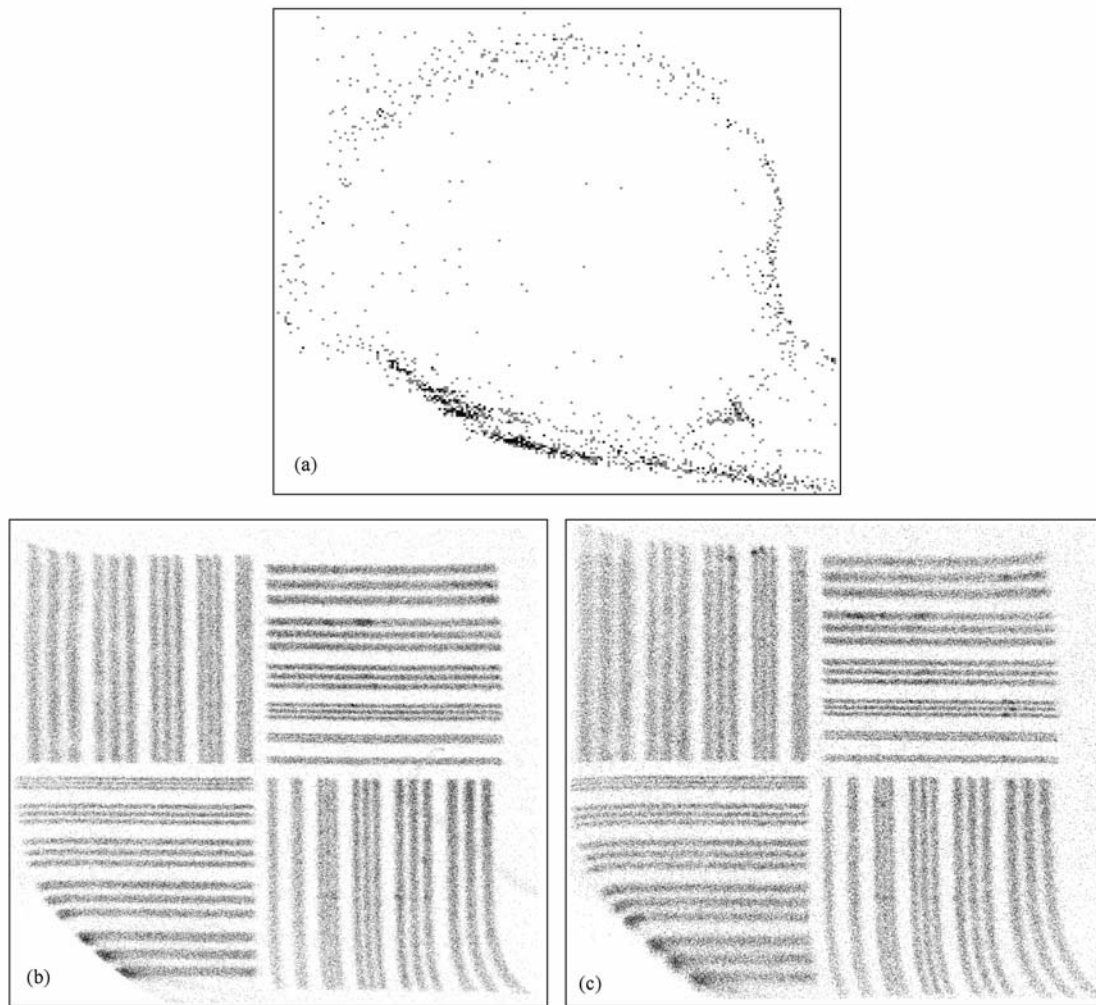


图 3 不同厚度 Si 薄膜下, 分辨率板的光子计数图像 (a) 200 nm, (b) 500 nm, (c) 1000 nm

表 1 不同 MCP 电压下, 不同厚度 Si 薄膜时, 光子计数成像系统的计数率

编号	薄膜厚度/ nm	不同电压下成像系统的计数率/ $\text{counts} \cdot \text{s}^{-1}$		
		1600 V	1700 V	1800 V
1	200	396	141	332
2	500	368	646	855
3	1000	436	662	885

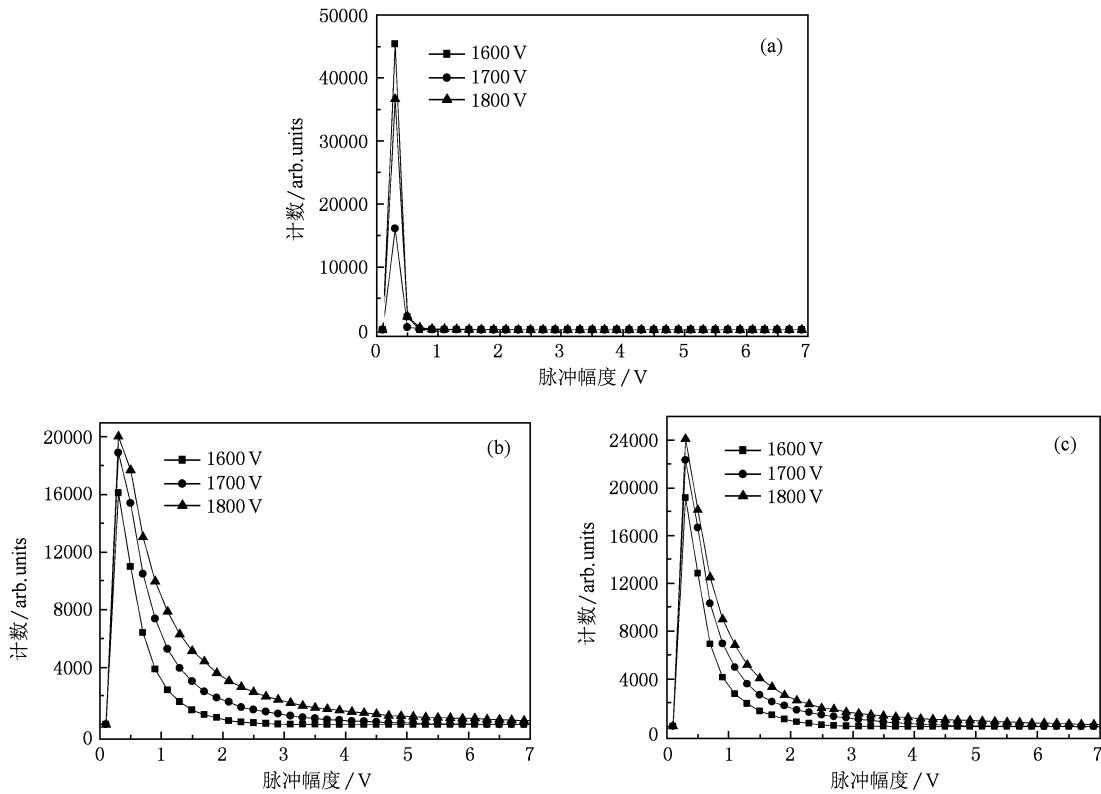


图 4 不同厚度 Si 薄膜和不同电压下,光子计数成像系统的脉冲高度分布曲线 (a) 200 nm, (b)500 nm, (c)1000 nm

200 nm 时,从表 1 可见,计数率随 MCP 增大无规律变化,而且从图 4(a)可见,脉冲信号都集中在小幅度范围内,大脉冲事件的数目不随 MCP 电压的变化而改变.这说明当薄膜厚度较薄时,系统的感应读出性能会严重恶化.当 Si 薄膜接收从 MCP 出射的电荷云后,仅有靠近 Si 薄膜圆形接地电极的电荷才

能快速泄放,从而被陶瓷背后的 WSA 阳极感应.

3. 2. 2 相同 MCP 电压不同光强时薄膜厚度对成像性能的影响

用 TekDPO4104 型示波器测量不同减光片数目下系统各处引出的信号,如图 5 所示.曲线 A 为 Si 薄膜边缘输出的脉冲信号,该信号是一个电子脉冲

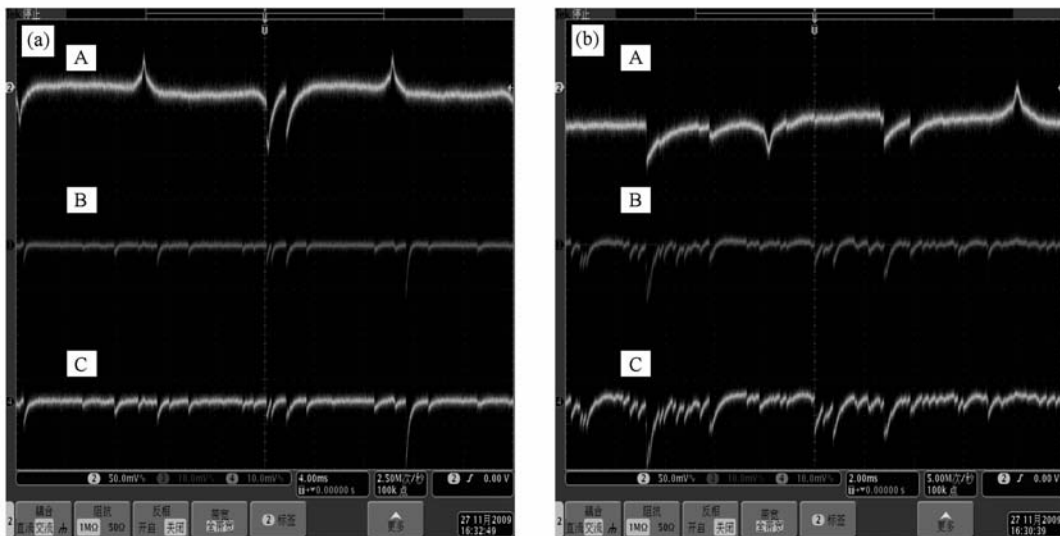


图 5 不同减光片数目下系统各处引出的信号 (a)11 片, (b)7 片

信号,曲线 B 和 C 分别为 WSA 阳极的 S 和 Z 电极引出的感应信号.从图 5 可以看出,随减光片个数减少,透过减光片的光子数越多,系统各处引出的电子信号频率越大,脉冲堆积现象越明显,而且信号的平均值也越大.根据采集的数据计算不同减光片个数下系统的计数率,并将采用不同厚度 Si 薄膜的

脉冲计数率进行对比,如表 2 所示.由表 2 看出,计数率均随减光片个数减少而增加;当减光片个数相同时,采用 1000 nm 厚度 Si 薄膜,计数率均高于小厚度时的计数率,并且在减光片个数较少时的计数率差别较大.图 6 是减光片个数不同时的分辨率板图像,可以看出:当采用 200 nm 厚度 Si 薄膜时,不

表 2 不同厚度 Si 薄膜和不同减光片个数时,光子计数成像系统的计数率

编号	薄膜厚度/ nm	不同数目减光片下系统的计数率/ $\text{counts} \cdot \text{s}^{-1}$		
		11 片	9 片	7 片
1	200	332	402	609
2	500	855	3471	7369
3	1000	885	3546	10682

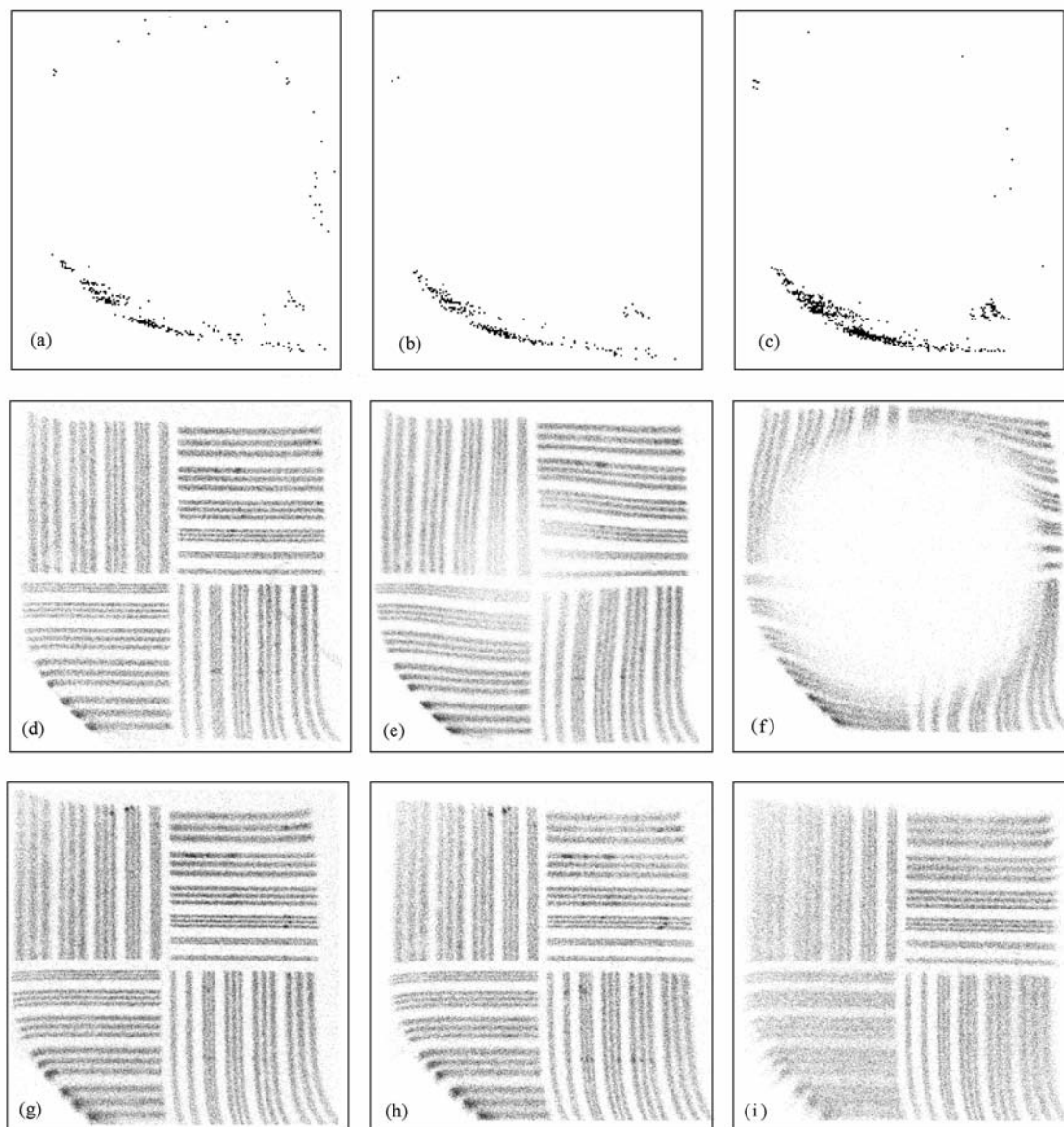


图 6 不同厚度 Si 薄膜和不同减光片个数时,分辨率板的光子计数图像 (a) 200 nm, 11 片; (b) 200 nm, 9 片; (c) 200 nm, 7 片; (d) 500 nm, 11 片; (e) 500 nm, 9 片; (f) 500 nm, 7 片; (g) 1000 nm, 11 片; (k) 1000 nm, 9 片; (h) 1000 nm, 7 片

同减光片下图像基本不变;当采用 1000 nm 厚度 Si 薄膜时,分辨率图像在减光片个数较少时依然比较清晰,说明系统在较强的入射光照下仍然具有较高的分辨率;当采用 500 nm 厚度 Si 薄膜时,随减光片数目减少,分辨率图像中心未成像圆形区域的半径越大,这是因为随入射光通量增大,到达薄膜的电子脉冲积累现象逐渐加剧,而且由于越靠近衬底中心区域电荷的泄放电阻越大,堆积的现象会越显著. Si 薄膜上电荷的泄放时间常数越长,信号频率越低,当低于由 Si 薄膜的二维电阻链和衬底电容组成的 RC 电路的截止频率时,WSA 阳极将无法感应出相应的电荷.

3.2.3 无光照时不同 MCP 电压下薄膜厚度对成像性能影响

图 7 是 MCP 电压为 1700 V 时,采样 10 min 得到的暗计数图像.从图 7 可以看出,当采用 1000 nm 厚度 Si 薄膜时,暗计数图像更近似为圆形,反应了 MCP 的形状,图像整体比较均匀,有个别较亮点,可能是缺陷或 MCP 发射点造成的. MCP 产生暗计数的可能因素主要为 MCP 玻璃中⁴⁰K的 β 衰减、离子衰减、通道壁吸附气体和场发射等因素引起的.在不同 MCP 电压下,不同厚度 Si 薄膜时暗计数图像形状都相似,但暗计数率并不相同.如表 3 所示,当厚度为 200 nm 时,薄膜的暗计数率较大,在内部出

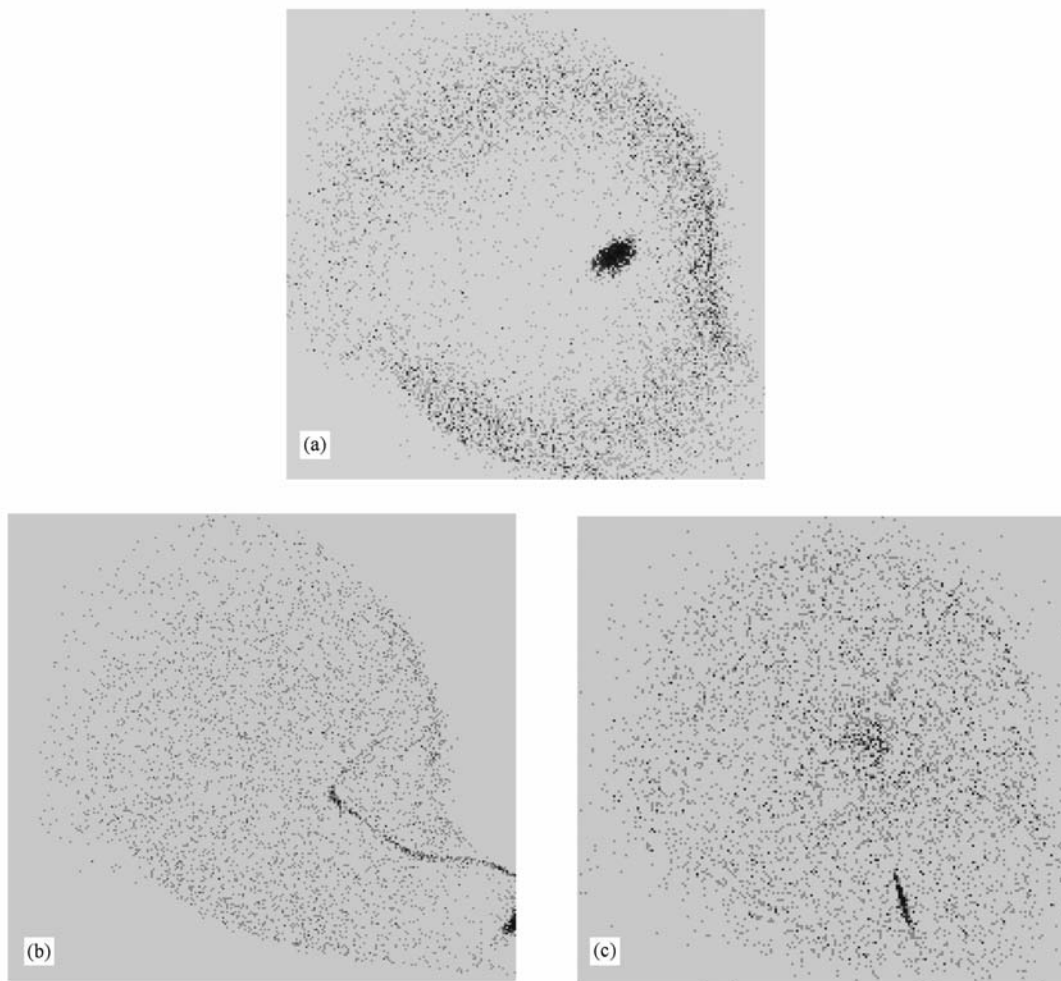


图 7 不同厚度 Si 薄膜下,分辨率板的暗计数图像 (a)200 nm, (b)500 nm, (c)1000 nm

表 3 不同 MCP 电压和不同厚度 Si 薄膜时,光子计数成像系统的暗计数率

编号	薄膜厚度/(nm)	不同电压下成像系统的暗计数率/ $\text{counts} \cdot \text{s}^{-1}$		
		1500 V	1600 V	1700 V
1	200	110	74	44
2	500	8	14	21
3	1000	11	18	26

现打火点;当厚度为 500 和 1000 nm 时,暗计数率随 MCP 电压升高而增大,随薄膜厚度增大而增大.

3.3. 与采用 Ge 薄膜作电荷感应层的成像性能对比分析

厚度为 1000 nm 的 Si 薄膜和 200 nm 的 Ge 薄膜,面电阻同为 150 M Ω /片,分辨率板的光子计数图像如图 8 所示. MCP 两端电压为 -1800 V,减光片数目为 11 片,采样频率为 5 MHz,采集时间为 20 min. 由图 8 (a) 和 (b) 对比可知,图像的分辨率相

似,但采用 Si 薄膜时图像的畸变较小,这是因为 Si 薄膜的厚度更大,在制备时蒸镀速率较快,从而薄膜更致密均匀. 表 4 和 5 分别为不同 MCP 电压下,采用不同材料薄膜时系统的计数率和暗计数率. 从表 4 和 5 可以看出,采用两种材料薄膜时,系统的计数率和暗计数率随 MCP 电压增大的趋势是相同的,但在相同电压下,采用 Si 薄膜的系统计数率较高,而暗计数率更低,且随电压的增大,二者的差距也增大.

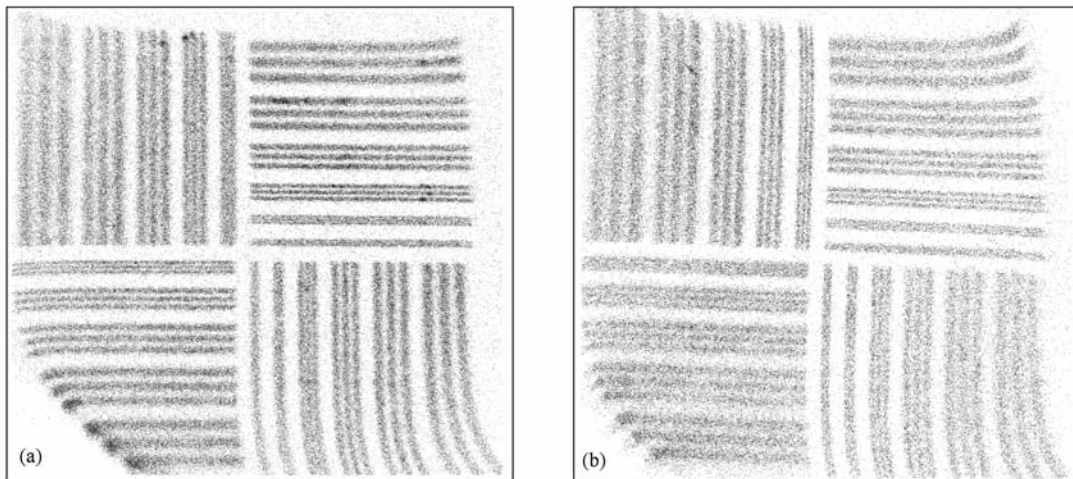


图 8 不同材料薄膜下,分辨率板的光子计数图像 (a)Si, (b)Ge

表 4 不同电压和不同材料薄膜下,光子计数成像系统的计数率

编号	薄膜种类	不同电压下成像系统的暗计数率/ $\text{counts} \cdot \text{s}^{-1}$		
		1600 V	1700 V	1800 V
1	Ge	432	593	760
2	Si	436	662	885

表 5 不同电压和不同材料薄膜下,光子计数成像系统的暗计数率

编号	薄膜种类	不同电压下成像系统的暗计数率/ $\text{counts} \cdot \text{s}^{-1}$		
		1500 V	1600 V	1700 V
1	Ge	16	31	46
2	Si	11	18	26

4. 结 论

利用电子束真空蒸镀方法制作了不同厚度的 Si 薄膜,用作感应读出方式光子计数成像系统的电荷感应层. XRD 测试和 FESEM 图像表明,陶瓷衬底上沉积的 Si 薄膜为无定形态,并由于陶瓷晶界的存在,薄膜比较粗糙. 在相同的入射光强下,采用 500

和 1000 nm 的 Si 薄膜,系统的分辨率图像相似,分辨率都优于 150 μm ;系统的计数率、脉冲高度分布曲线的峰值和半高宽随着电压升高而增大,而且当 Si 薄膜厚度较大时,面电阻减小,系统的计数率较高. 在相同的 MCP 电压下,系统的计数率随减光片个数减少而增加;当 Si 薄膜厚度较大时,系统的计数率较高,并且在减光片个数较少时计数率差别较大;当采用 1000 nm 厚度 Si 薄膜时,分辨率图像在

减光片个数较少时依然比较清晰,但当采用 500 nm 厚度 Si 薄膜时,随减光片数目减少,分辨率图像中心未成像圆形区域的半径增大. 无光照时,当 Si 薄膜厚度较大时系统的暗计数图像更近似圆形,计数率随 MCP 电压升高而增大,随薄膜厚度增大而增大. 当系统采用相同电阻的 Si 薄膜和 Ge 薄膜时,前

者的分辨率图像畸变较小,计数率较高,而且暗计数率较低,因此,系统的性能更优. 故而适用感应方式光子计数成像探测器电荷感应层的薄膜不仅仅局限于一种,无论是 Ge 膜或 Si 膜,若薄膜方块电阻更合适和薄膜更均匀致密,系统感应成像性能都能进一步优化.

-
- [1] Jagutzki O, Lapington J S, Worth L B C, Spillmann U, Mergel V, Schmidt-Böcking H 2002 *Nucl. Instrum. Meth. A* **477** 256
- [2] Barnstedt J, Grewing M 2002 *Nucl. Instrum. Meth. A* **477** 268
- [3] Lapington J S, Chakrabarti S, Cook T, Gsell J C, Gsell V T 2003 *Nucl. Instrum. Meth. A* **513** 159
- [4] Maia J M, Mörmann D, Breskin A, Chechik R, Veloso J F C A, dos Santos J M F 2007 *Nucl. Instrum. Meth. A* **580** 373
- [5] Zhang X H, Zhao B S, Zhao F F, Liu Y A, Miao Z H 2009 *Rev. Sci. Instrum.* **80** 033101
- [6] Jiao R Z, Feng C X, Ma H Q 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 1352 (in Chinese) [焦荣珍、冯晨旭、马海强 2008 物理学报 **57** 1352]
- [7] Zhang X H, Zhao B S, Liu Y A, Miao Z H, Zhu X P, Zhao F F 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1779 (in Chinese) [张兴华、赵宝升、刘永安、缪震华、朱香平、赵菲菲 2008 物理学报 **58** 1779]
- [8] Miao Z H, Zhao B S, Liu Y A, Zhu X P, Zhang X H 2008 *Acta Photon. Sin.* **37** 11 (in Chinese) [缪震华、赵宝升、刘永安、朱香平、张兴华 2008 光子学报 **37** 11]
- [9] Zhu X P, Zhao B S, Liu Y A, Miao Z H, Zhang X H, Zou W 2008 *Acta Opt. Sin.* **28** 1925 (in Chinese) [朱香平、赵宝升、刘永安、缪震华、张兴华、邹玮 2008 光学学报 **28** 1925]
- [10] Liu Y A, Zhao B S, Zhu X P, Miao Z H, Zhang X H, Zou W 2009 *Acta Photon. Sin.* **38** 750 (in Chinese) [刘永安、赵宝升、朱香平、缪震华、张兴华、邹玮 2009 光子学报 **38** 750]
- [11] Zhang X H, Zhao B S, Miao Z H, Zhu X P, Liu Y A, Zou W 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 4238 (in Chinese) [张兴华、赵宝升、缪震华、朱香平、刘永安、邹玮 2008 物理学报 **57** 4238]
- [12] Zhao F F, Zhao B S, Zhang X H, Li W, Zou W, Sai X F, Wei Y L 2009 *Acta Opt. Sin.* **29** 3236 (in Chinese) [赵菲菲、赵宝升、张兴华、李伟、邹玮、赛小锋、韦永林 2009 光学学报 **29** 3236]

Properties of photon counting imaging system with Si thin films^{*}

Zhao Fei-Fei^{(1)2)†} Liu Yong-An⁽¹⁾ Hu Hui-Jun⁽¹⁾²⁾ Zhao Bao-Sheng⁽¹⁾

1) (*State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China*)

2) (*Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

(Received 13 December 2009; revised manuscript received 13 January 2010)

Abstract

The Si thin films on ceramic substrates, which were fabricated by electron beam evaporation, were applied as charge induction layers in photon counting imaging system with induction readout. The structures and micrograph of Si thin films were studied. The X-ray diffraction (XRD) analysis and field emission scanning electron microscopy (FESEM) images indicate that the thin film has amorphous structure and is coarse due to the lattice boundary of ceramic substrate. The experimental setup was established and the detector resolution, counting rate, pulse height distribution curves etc., with different Si film thickness were compared. The results suggest that the film thickness influences on spatial resolution less than on the counting rate. Moreover, the properties of the system with Si and Ge thin films of the same resistance were compared, which shows that the properties such as distortion, counting rate and dark count rate are better with the Si films.

Keywords: detectors, photon counting imaging, charge induction, microchannel plate

PACC: 4280Q, 8160C, 2940T

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10878005).

[†] E-mail: free.ff@163.com