

电荷云尺寸对紫外光子计数成像探测器性能的影响*

刘永安^{1)†} 鄢秋荣¹⁾ 盛立志¹⁾ 赵菲菲^{1) 2)} 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 100049)

(2009年12月22日收到; 2010年6月2日收到修改稿)

微通道板出射电荷云尺寸与微通道板增益、微通道板输出面和楔条形阳极间距离以及阳极加速电压等因素有关. 到达阳极的电荷云尺寸对紫外光子计数探测器的成像性能有重要影响. 本文研究了电荷云尺寸对紫外光子计数成像系统成像性能的影响, 论述了调制畸变和“S”畸变两种图像畸变及其产生的原因, 采用蒙特卡洛方法模拟了不同尺寸的电荷云对阳极解码的影响. 实验测试了微通道板和阳极间距离、微通道板增益以及阳极加速电压对紫外光子计数成像系统成像性能的影响, 并给出了实际解决调制畸变和“S”畸变的有效方法.

关键词: 光子计数成像, 楔条形阳极, 微通道板, 阳极探测器

PACS: 85.60. Bt, 85.60. Ha, 29.40. Gx

1. 引言

近年来, 基于微通道板(micro-channel plate, MCP)的位置灵敏探测器发展较为迅速, 由于具有探测灵敏度高、背景噪声低、信噪比高等优点, 特别适用于一些特定微弱光的成像探测. 这类探测器采用的位敏阳极主要有电阻阳极(resistive anode)、楔条形阳极(wedge and strip anode, WSA), 游标阳极(vernier anode), 延时线(delay-line)以及交叉条纹阳极(cross strip anode)等^[1]. 其中, WSA具有制作简单、分辨率和线性性能好等优点, 已被广泛应用于深空探测、生物微弱发光、环境辐射检测等领域^[2-4].

WSA为基于电荷分割原理的器件, 要求阳极收集到的电荷云覆盖多个阳极周期以保证位置解码的精确度, 若电荷云尺寸过小或过大均会对系统的成像性能产生不利影响. 文中论述了电荷云尺寸对紫外光子计数系统成像性能的影响, 着重研究了WSA的调制畸变和“S”畸变两种成像畸变机理, 对不同尺寸的电荷云解码进行了蒙特卡洛方法模拟. 测试了阳极和MCP间距离、MCP增益和加速电压对成像性能的影响, 这些对于优化探测器设计和提高探测器的性能提供了理论依据和实践参考.

2. 紫外光子计数成像系统的组成和工作原理

紫外单光子成像系统的组成如图1所示, 该系统主要包括: 紫外光源, 减光和滤光系统, MCP, WSA, 电荷灵敏前置放大器, 整形放大器以及数据采集卡和相应的图像处理软件. 由紫外光源出射的光经过衰减、滤光后通过掩模板入射到MCP表面, 在MCP表面经光电效应激发出光电子, 然后光电子进入MCP通道倍增. 从MCP出射的倍增电子在空间电荷效应作用下扩散形成电荷云团, 经阳极加速电场被WSA收集. WSA(如图2所示)各电极收集到的电荷经电荷灵敏前置放大器转换为电压信号, 再经过整形放大器整形为高斯型脉冲信号并被采集卡采集, 最后由图像处理软件实现图像的可视化. 该系统的具体工作原理和性能参数指标请参考文献[5-7].

3. 电荷云尺寸对紫外光子计数成像探测器的影响

WSA的工作原理是基于楔形(W), 条纹(S)和

* 国家自然科学基金(批准号:10878005)资助的课题.

† E-mail: liuan86@126.com

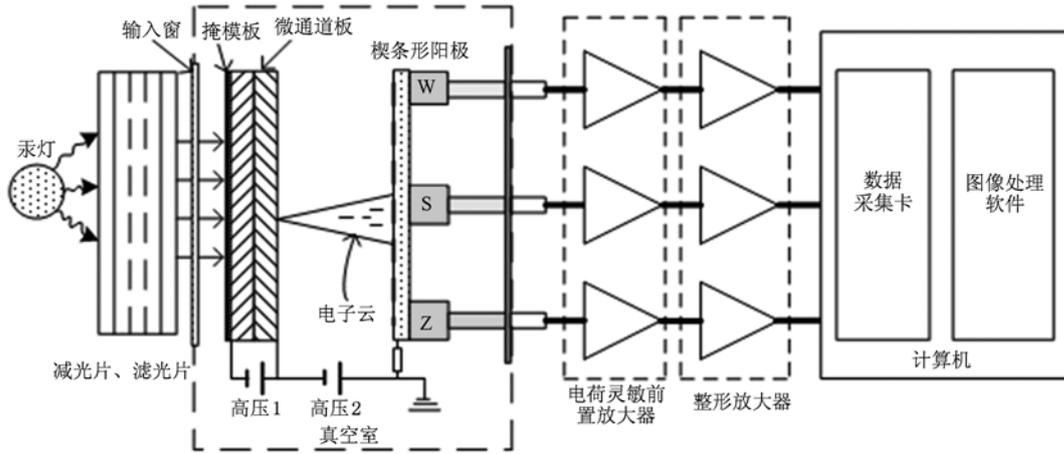


图1 紫外光子计数成像系统的组成框图

“之”字形电极(Z)间分割得到的电荷量与电荷云中心在阳极上的相应位置成线性关系. 但由于阳极在水平方向呈周期性结构, 每一电荷云团不可能正好覆盖整数倍的阳极周期, 多余部分的电荷量在各电极间的分布是随机的, 它就会产生一个误差. 电荷云尺寸越大, 由多余部分的电荷量引起的解码误差越小. 一般情况下, 电荷云要覆盖多个阳极周期以保证精确的解码. 若电荷云尺寸不合适, 会对光子计数成像系统的成像性能造成影响. 电荷云越过 WSA 的有效收集区域会造成图像的“S”畸变, 并且“S”畸变随电荷云尺寸增加变得更严重, 电荷云尺寸过小会引起图像的调制畸变.

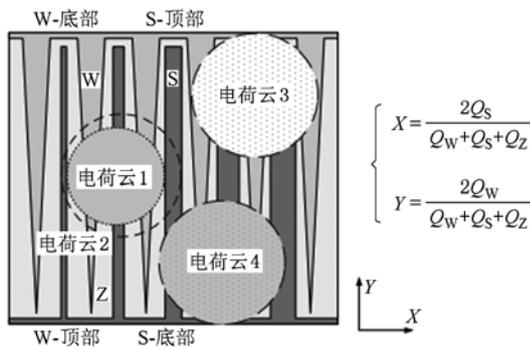


图2 WSA 原理以及调制畸变和“S”畸变成因示意图

3.1. 调制畸变和“S”畸变

调制畸变和“S”畸变均是由于 WSA 各个电极上收集到的电荷量与该电荷云中心在阳极上的位置成非线性关系, 进而对光子计数成像系统的成像性能造成影响.

若电荷云尺寸过小, 会导致某一个电极过多的

收集到电荷量, 由解码公式解码出的电荷云质心位置与电荷云的实际中心位置会有一个偏差. 当电子束团大小可以与阳极周期尺寸相比拟时(如图2中电荷云1和2), 将电子束团从左向右移动, WSA 读出的束团中心位置会偏向于邻近的 S 电极位置, 在图像上就会表现为周期性的条纹, 即调制畸变. Smith 等^[8]采用分别服从均匀分布和高斯分布的电荷云模拟研究了 WSA 的调制作用, 并得到结论: MCP 增益、MCP 和 WSA 间距等均会对调制作用产生影响; 随着电荷云团尺寸的增加, 调制效应逐渐减小.

若到达 WSA 的电荷云越过 WSA 的有效收集区域, 用于连接 W 电极和 S 电极的公共电极部分将会收集到电荷, 同样会造成某一个电极过多的收集到电荷量. 如图2中所示, 在条形电极的底部, 电荷云团4超出了电极的有效收集区域, S 电极的公共电极部分收集到了电荷, 从而 S 电极过多收集了电荷云团的电荷量, 解码出的电荷云的中心位置将向右(S 电极增加的方向)偏移; 在楔形电极的底部, 电荷云团3覆盖到了 W 电极的公共电极部分, 解码出的电荷云的中心位置将会向上(W 电极增加的方向)偏移, 这就是发生了“S”畸变.

3.2. 不同电荷云尺寸对 WSA 解码精确度的影响

电荷云尺寸过小会引起调制畸变, 电荷云越过阳极的有效收集区域会引起“S”畸变. 采用类似 Smith 的方法, 利用蒙特卡洛投点法来模拟不同尺寸的电荷云对阳极解码精确度的影响. 模拟中采用的阳极为图2所示的矩形 WSA, 阳极周期 P 为 1.5 mm, 收集面积为 40 mm × 40 mm, 公共电极宽度为 1 mm. 为简化模

型,设定阳极绝缘沟道为一直线,分别采用均匀分布和高斯分布模拟 MCP 出射电荷云团的电子分布,不

过研究认为 MCP 出射电子云服从高斯分布^[9]. 模拟采用的高斯分布电荷云分布函数为

$$N(r) = \begin{cases} \left(\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}e^{-r^2/(2\sigma^2)}\right) - \left(\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}e^{-1/(2\times 2.75^2)}\right) & r \leq 2.75\sigma, \\ 0, & r > 2.75\sigma, \end{cases} \quad (1)$$

它为截去了 2.75 倍标准差以外的二维高斯分布函数. 模拟方法为:首先给定一事件的位置 (x, y) , 以该位置为中心产生一系列不同尺寸的电荷云团,使该电荷云团覆盖到 WSA 上. 在电荷云团内通过分布函数依一定概率产生一个事件中的电子分布,然后对每个电子所在的电极进行判断,并统计落在各个电极上的最终电子数. 其中每一个电子代表 1 个单位电荷量,而每一电极收集到的电荷量可以用落到该电极上的总的电子个数来表示,然后根据 WSA 的

解码公式得到解码出的事件位置坐标 (x', y') . 图 3 为分别由服从均匀分布和高斯分布的不同尺寸电荷云解码出的各坐标位置,模拟中采用的电荷云质心坐标为 $(20, 12)$. 随着电荷云尺寸的增加,首先超出有效收集区域的电荷云会被 S 公共电极收集. 模拟中假定以 $(20, 12)$ 为中心的电荷云超出 S 电极有效收集区域部分全部被 S 公共电极收集,超出 W 电极有效收集区域部分全部被 W 公共电极收集.

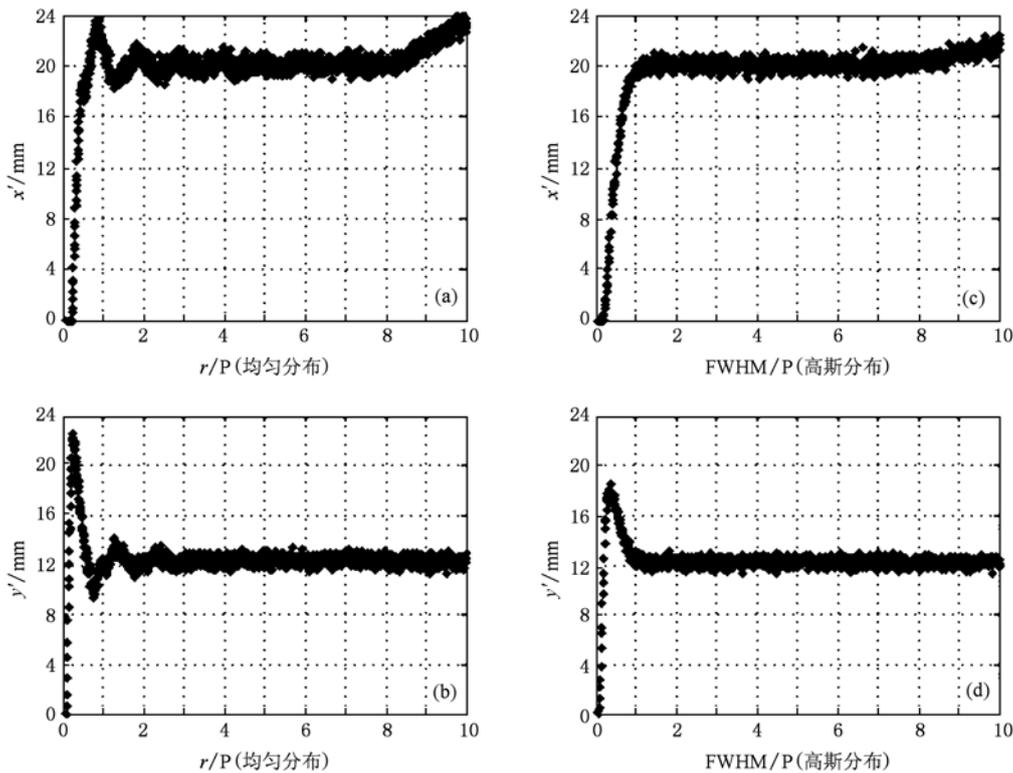


图 3 固定电荷云中心,不同尺寸和服从不同分布的电荷云经 WSA 解码的模拟结果 (a)均匀分布,解码出的 x' 坐标位置随电荷云尺寸变化;(b)均匀分布,解码出的 y' 坐标位置随电荷云尺寸变化;(c)高斯分布,解码出的 x' 坐标位置随电荷云尺寸变化;(d)高斯分布,解码出的 y' 坐标位置随电荷云尺寸变化

由图可见,对于服从均匀分布的电荷云,位置解码偏差较大. 电荷云尺寸较小(即 r/P 小, r 为电荷云半径, p 为阳极周期)时,解码出的位置坐标偏差比较严重,随着电荷云半径的扩大,偏差不断减

小并逐渐趋于真实值. 但随着电荷云进一步增加以致超出阳极的有效收集区域,S 电极过多的收集了电荷,解码出的 x' 坐标偏大,也就是出现了“S”畸变. 对于服从高斯分布的电荷云,电荷云尺寸较小

时同样偏差较大,当电荷云的峰值半高宽(full width at half maximum, FWHM)大于 $2P$ (P 为阳极的周期)时基本稳定在一固定的偏差范围内,解码出的坐标值比较接近真实值,当电荷云超出了阳极有效收集区域时同样出现了“S”畸变.

采用紫外光子计数成像系统实际测试了调制图像和“S”畸变图像,测试时均未加掩模板,紫外光源入射到整个 MCP 输入面,成像结果如图 4 所示.

图 4(a)为测试得到的调制图像,可以看到,解码出的图像沿 S 电极增加方向发生了周期性的调制畸变,该震荡周期与 S 电极的变化周期相同.图 4(c)为实际测试得到的“S”畸变图像,图像右下角向 S 增加的方向偏移,这是由于该处部分电荷云超出了阳极的有效收集区域,S 电极的公共电极部分收集到电荷造成的,这与理论分析和模拟结果也比较符合.

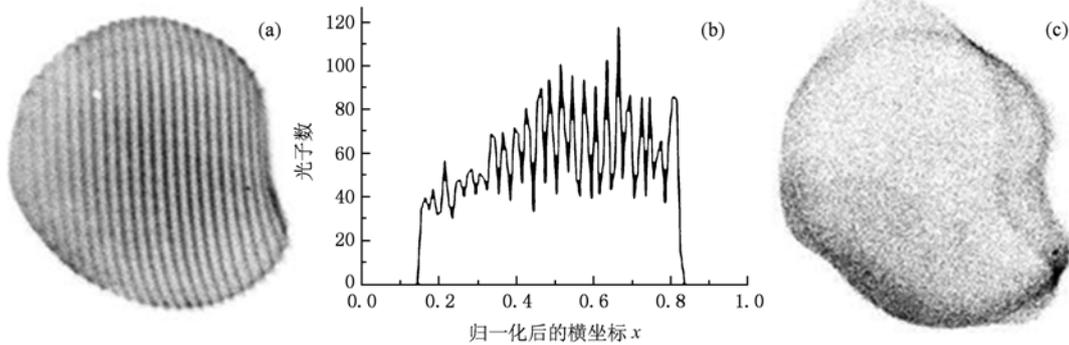


图 4 调制畸变和“S”畸变图像 (a)调制图像;(b)(a)图归一化后 $y=0.49$ 处在 x 轴上的柱状密度图;(c)发生“S”畸变的暗计数图像

4. 实验结果与分析

4.1. 电荷云尺寸的影响因素及其对探测器成像性能的影响

MCP 出射后被 WSA 收集的电荷云尺寸主要与 MCP 同阳极间距离、MCP 与阳极间加速电压、MCP 增益以及 MCP 间的间距等因素有关^[9]. MCP 出射电荷云的分布及其尺寸是一个极其复杂的问题, Saito^[9], Price^[10]和 Tremsin^[11]等对 MCP 的出射电荷云都做了较多的研究. 实验中,主要测试了 MCP 与阳极间距离、MCP 与阳极间加速电压以及 MCP 工作电压对电荷云尺寸的影响,进而会造成解码图像的调制扭曲和“S”畸变.

MCP 出射电荷云尺寸的经验公式为^[12]

$$D = 4d \sqrt{\frac{V_0}{eV_a}}, \quad (2)$$

式中 D 为电荷云直径, d 为 MCP 和阳极间距离, V_0 为横向电子能量, $e = 2.718$, V_a 为阳极加速电压. 由该公式可以看出, MCP 与阳极间距离 d 和加速电压 V_a 的改变对到达 WSA 的电荷云尺寸影响较为明显.

4.1.1. MCP 与 WSA 间距 d 的影响

实验采用两块 MCP“V”形级联并且 MCP 输入面前放有分辨率测试板,两 MCP 间加一厚 $50 \mu\text{m}$ 的 Al 电极环,该电极环主要用来增加 MCP 的出射电荷云半径并提高增益. MCP 直径为 50 mm ,长径比为 40:1,孔径为 $25 \mu\text{m}$,有效输出面积为 42 mm . WSA 的收集面积为 48 mm ,周期为 1.2 mm . MCP 工作电压大小为 1800 V ,MCP 和阳极间加速电压为 300 V 且均保持不变,测试了 MCP 与 WSA 间距离分别为 $10, 18$ 和 21 mm 时的成像性能,结果如图 5 所示.

由图 5 可见,当 MCP 与阳极间距为 18 mm 时,成像结果正常,图像没有出现调制和“S”扭曲变形.随着 MCP 与阳极间距的减小,电荷云半径相应减小,间距为 10 mm 出现了较严重的调制畸变,图像中沿 S 电极增加方向的直线以 S 电极的周期为周期发生了振荡,垂直方向的直线发生了偏移和扭曲. MCP 和阳极间距为 21 mm 时,到达 WSA 的电荷云尺寸过大,导致边缘部分的电荷云超出了阳极有效收集区域,图像出现了“S”扭曲变形.

4.1.2. 加速电压 V_a 的影响

由经验公式(2)可知到达阳极的电荷云直径大小 $D \propto 1/\sqrt{V_a}$,为测试加速电压 V_a 的影响,实验中仍采用两块 MCP“V”形级联且两 MCP 间有一厚为

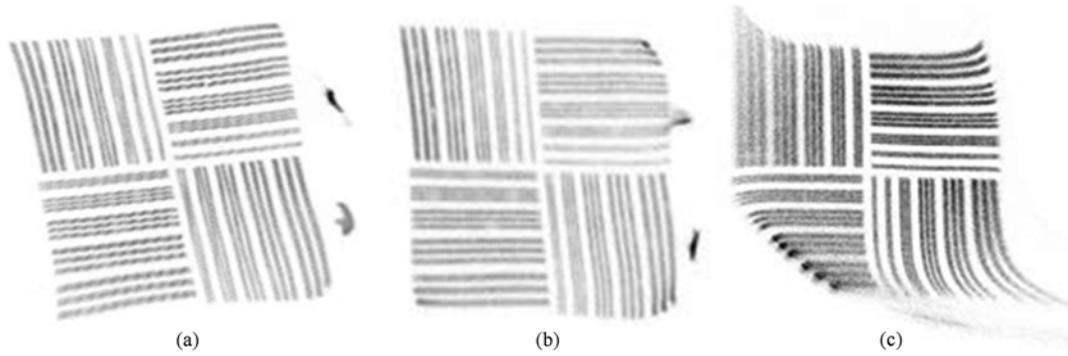


图5 不同 MCP 和 WSA 间距的成像结果 (a) $d = 10 \text{ mm}$; (b) $d = 18 \text{ mm}$; (c) $d = 21 \text{ mm}$

50 μm 的电极环,但 MCP 输入面前无掩模板. 采用的 WSA 是收集面积为 45 mm,周期为 1.5 mm 的阳极, MCP 和 WSA 间距固定为 12 mm. 实验中采用两个独立的高压电源分别为加速电压和 MCP 工作电压供电,这样更便于研究加速电压对系统成像性能

的影响,实验采用紫外光直接照射 MCP 输入面进行全场成像. 测试结果如图 6 所示, MCP 工作电压保持 1800 V 不变,随着 MCP 和阳极间加速电压的提高,电荷云半径逐渐减小,图像的“S”畸变得得到一些抑制,而调制扭曲逐渐严重.

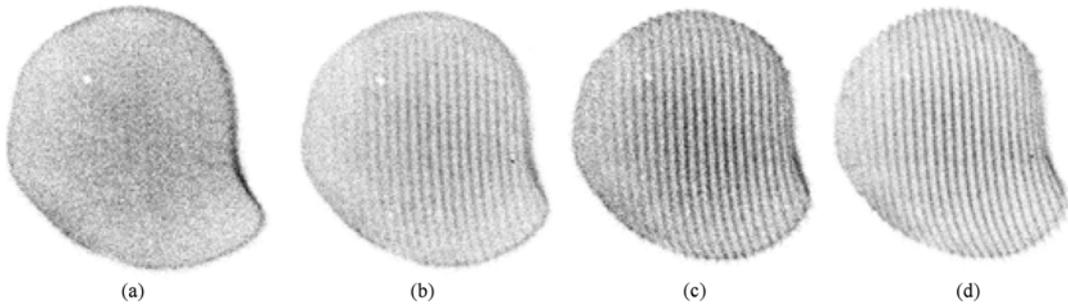


图6 MCP 工作电压 1800 V,不同阳极加速电压时的成像结果 (a) $V_a = 300 \text{ V}$; (b) $V_a = 500 \text{ V}$; (c) $V_a = 700 \text{ V}$; (d) $V_a = 900 \text{ V}$

4.1.3. MCP 工作电压 V_{mcp} 的影响

MCP 工作电压大小直接决定了 MCP 的增益,受空间电荷效应的作用, MCP 增益越高,空间电荷效应的作用越明显,电荷云的分布半径就越大,成像电荷能覆盖的周期数就越多,相应的事件质心位置的计算精度也就越高. 对于通过光子计数方式成

像的探测器,为提高空间分辨率并减小图像畸变, MCP 必须工作于饱和增益模式,这样才能有效的减小事件质心位置的计算误差. 关于 MCP 的增益特性对探测器性能的影响,文献[13]有较详细的介绍. 实验测试了 MCP 和阳极间距离为 12 mm,加速电压为 700 V 且保持不变时两块 MCP 不同工作电压下

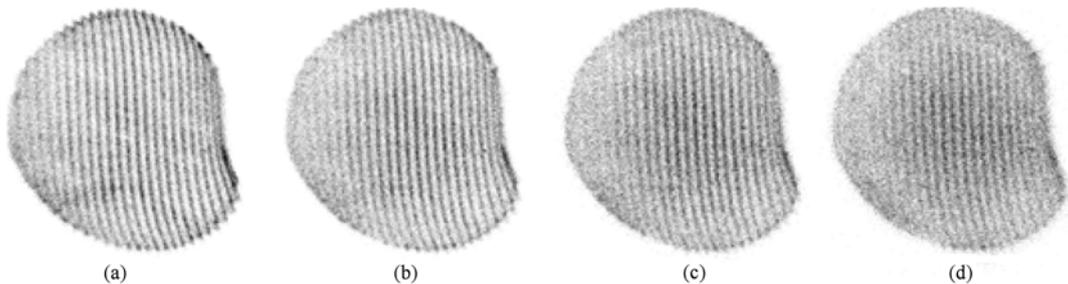


图7 加速电压为 700 V,不同 MCP 工作电压时的成像结果 (a) $V_{\text{mcp}} = 1600 \text{ V}$; (b) $V_{\text{mcp}} = 1700 \text{ V}$; (c) $V_{\text{mcp}} = 1800 \text{ V}$; (d) $V_{\text{mcp}} = 1900 \text{ V}$

的成像性能. 图 7 为实验结果, 由图可见, 随着 MCP 工作电压的提高, MCP 增益越来越大, 由于空间电荷效应的作用, 电荷云尺寸逐步增大, 结果使相同加速电压时的调制效应变得越来越弱.

4.2. 解决调制畸变和“S”畸变的方法

调制畸变和“S”畸变产生的原因都比较复杂, 它们与电荷云尺寸及阳极的设计参数均有关. 调制产生的主要原因是由于 WSA 收集到的电荷云尺寸过小, 因此需要增大电荷云尺寸来消除调制的出现. 一般可通过增加 MCP 和阳极间距、适当减小加速电压以及提高 MCP 增益等措施来解决, 较有效的方法为增加 MCP 和阳极间距离.

“S”畸变产生的原因是由于到达 WSA 的电荷云超出了 WSA 的有效收集区域, 用于连接楔形和条纹电极的公共电极部分收集到了电荷, 导致其中一个电极过多的收集到了电荷量. 解决“S”畸变的方法主要有: 1) 用绝缘材料(如聚四氟乙烯)将 WSA 的公共电极部分遮挡到可收集电荷云的区域之外; 2) 减小 MCP 的有效探测面积; 3) 适当减小到达 WSA 的电荷云尺寸, 主要通过减小 MCP 和 WSA 间距离来实现; 4) 在 MCP 探测面积不变的情况下增加 WSA 的有效收集面积, 一般来说, WSA 的有效收集

区域要大于 MCP 的探测面积. 不过 WSA 的收集面积也不能过大, 过大的话会导致三个电极间极间电容的增加, 从而会导致探测器性能的下降, 所以这是一个在设计时需要综合考虑的问题.

5. 结 论

实验和蒙特卡洛模拟结果表明, 电荷云尺寸过小会引起图像的调制畸变, 电荷云越过 WSA 阳极的有效收集区域会引起“S”畸变, 并且“S”畸变随电荷云尺寸增加变得更严重. 在不引起“S”畸变的情况下, 到达 WSA 上的电荷云要覆盖尽量多的阳极周期以保证位置解码的精确度. MCP 和 WSA 间距、加速电压以及 MCP 工作电压等都会对电荷云尺寸造成影响, 进而影响探测器的性能. 影响电荷云尺寸的几个因素是相互制约的, 根据大量实验总结得出: 对于两块 MCP 和周期为 1.2 与 1.5 mm 的 WSA, MCP 和 WSA 间距为 18 mm 左右, 加速电压为 300 V 左右即可, 并且两块 MCP 应加足够的工作电压(一般至少应为 1800 V)以保证 MCP 工作在饱和状态. 另外, WSA 的有效收集面积要比 MCP 的探测面积稍大以有效抑制“S”畸变.

- [1] Jagutzki O, Barnstedt J, Spillmann U, Spielberger L, Mergel V, Ullmann-Pfleger K, Grewing M, Schmidt-Bocking H 2000 *Proc. SPIE* **3764** 61
- [2] Lapington J S, Chakrabarti S, Cook T, Gsell J C, Gsell V T 2003 *Nucl. Instr. and Meth. A* **513** 159
- [3] Barnstedt J, Grewing M 2002 *Nucl. Instr. and Meth. A* **477** 268
- [4] Lapington J S 2003 *Proc. SPIE* **4854** 191
- [5] Liu Y A, Zhao B S, Zhu X P, Miao Z H, Zhang X H, Zou W 2009 *Acta Phot. 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]
- [6] 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]
- [7] Miao Z H, Zhao B S, Liu Y A, Zhu X P, Zhang X H 2007 *Acta Phot. Sin.* **36** 2215 (in Chinese) [缪震华、赵宝升、刘永安、朱香平、张兴华 2007 光子学报 **36** 2215]
- [8] Smith A, Kessel R, Lapington J S, Walton D M 1989 *Rev. Sci. Instrum.* **60** 3509
- [9] Saito M, Saito Y, Asamura K, Mukai T 2007 *Rev. Sci. Instrum.* **78** 023302
- [10] Price G J, Fraser G W 2001 *Nucl. Instr. and Meth. A* **474** 188
- [11] Tremsin A S, Siegmund O H W 1999 *Rev. Sci. Instrum.* **70** 3282
- [12] Grantham S E, Miesak E J, Reese P C T, Richardson M C 1994 *Proc. SPIE* **2273** 108
- [13] 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 2009 物理学报 **58** 1779]

Influence of charge cloud size on performance of UV photon-counting imaging detector^{*}

Liu Yong-An^{1)†} Yan Qiu-Rong¹⁾ Sheng Li-Zhi¹⁾ Zhao Fei-Fei¹⁾²⁾ Hu Hui-Jun¹⁾²⁾ Zhao Bao-Sheng¹⁾

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 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(Received 22 December 2009; revised manuscript received 2 June 2010)

Abstract

The size of charge cloud is examined as a function of acceleration voltage, distance between MCP and anode, and MCP gain. The performance of photon counting imaging detector is significantly affected by charge cloud size. In this paper, the influence of charge cloud size on the performance of UV photon-counting imaging systems is investigated. Modulation distortion, "S" distortion and their cause are discussed. Then, Monte Carlo simulations for anode decode with different charge cloud sizes are carried out. And finally, the effects of acceleration voltage, distance between MCP and WSA, and MCP gain on the system performance are tested and some practical solutions of modulation and "S" distortion are suggested.

Keywords: photon-counting imaging, wedge-and-strip anode, micro-channel plate, anode detector

PACS: 85.60. Bt, 85.60. Ha, 29.40. Gx

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

[†] E-mail: liuan86@126.com