

doi:10.3788/gzxb20164506.0604002

基于 Vernier 阳极微通道板光子计数探测器 分割噪声

邢妍^{1,2}, 陈波¹, 金方圆^{1,2}, 王海峰¹, 张宏吉¹, 何玲平¹

(1 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 空间一部, 长春 130033)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要:为消除微通道板光子计数探测器系统中电子噪声的干扰,研究了探测器分割噪声的来源,并提出利用 COMSOL 软件仿真计算分割噪声的方法.利用有限元方法对基于 Vernier 阳极探测器的成像过程进行三维建模,实现了一组 5×5 针孔阵列的模拟成像,计算出 Vernier 阳极分割噪声所产生的电子云质心位置的偏移量,验证了 Vernier 阳极探测器成像编码的正确性与仿真研究分割噪声的可行性.通过分析不同参量的阳极面板,利用数值拟合方法,得到电子云质心偏移量与阳极面板设计参量之间的关系.在固定面板参量的前提下,可以通过提高微通道板增益来有效降低分割噪声对质心位置偏移影响.

关键词:微通道板光子计数探测器;分割噪声;仿真计算;Vernier 阳极;质心位置

中图分类号:TN29

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2016)06-0604002-7

The Partition Noise Research of MCP Photon Counting Imager Detector Based on Vernier Anode

XING Yan^{1,2}, CHEN Bo¹, JIN Fang-yuan^{1,2}, WANG Hai-feng¹, ZHANG Hong-ji¹, HE Ling-ping¹

(1 Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun 130033, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: To get rid of the interference of electronic noise in the micro channel plate photon counting imager detector, the theory of partition noise was studied and the finite element method of calculating partition noise by COMSOL software was proposed. The three dimensional model of imaging principle based on the Vernier anode detector was built, the image of a set of pinhole array was simulated, and the centroid position offsets caused by the partition noise were calculated, which certifies the correctness of the position decoding algorithm and proves the feasibility of calculating partition noise. By adjusting the designed parameters of the Vernier anode, the influences of the partition noise on the centroid position offset of charge cloud were investigated. It is an effective way to reduce the partition noise by increasing the gains of micro-channel plates.

Key words: Micro channel plate; Photon counting detector; Partition noise; Simulation; Vernier anode; Centroid position

OCIS Codes: 040.5160, 080.1753, 110.2970, 040.7480, 110.4280

0 引言

基于位敏阳极微通道板(Micro Channel Plate, MCP)光子计数成像探测器可以对极其微弱的紫外光

和远紫外光辐射信号进行成像,因此被广泛应用于空间环境探测.例如:1990年X射线天文卫星 ROSAT (Roentgensatellit)搭载的是基于交叉线阳极的 MCP 探测器^[1];1995年 SOHO(Solar Orbiting Heliospheric

基金项目:国家自然科学基金(No. 10878004/A03)和中国科学院长春光学精密机械与物理研究所创新基金(No. Y3CX1SS145)资助

第一作者:邢妍(1988—),女,博士研究生,主要研究方向为电荷分割型阳极光子计数探测器. Email: xingy2013@163.com

导师(通讯作者):陈波(1961—),男,研究员,博士,主要研究方向为极紫外探测器和空间光学. Email: chenb@ciomp.ac.cn

收稿日期:2015-00-18; **录用日期:**2015-01-28

<http://www.photon.ac.cn>

Observatory)任务中使用的是基于延迟线阳极的 MCP 探测器^[2]; 2012 年日本的 EXCEED (Extreme Ultraviolet Spectroscope for Exospheric Dynamics) 卫星利用基于电阻型阳极的 MCP 探测器进行空间观测^[3]. 国内对 MCP 光子计数成像探测器的研究起步较晚, 但近年来也取得了飞速进展^[4]. 例如: 其中, 基于楔条形阳极 MCP 中子事件探测器的分辨率达到 $73 \mu\text{m}$ ^[5]; 基于延迟线阳极的大面积 MCP 中子事件探测器的分辨率达到了 $70 \mu\text{m}$ 以下^[6]; 2014 年 12 月 15 日, 中科院长春光机所研制的极紫外相机被搭载于“嫦娥三号”着陆器上^[7], 成功实现了对地球等离子体层的观测, 其中成像探测器采用的是基于楔条形阳极的 MCP 探测器, 其空间分辨率达到 $200 \mu\text{m}$ 以下. 在这些探测器中, 基于 MCP 电荷分割型阳极探测器, 以其制作工艺简单, 电子系统容易实现等优点成为我国目前单光子探测器的主要研究方向之一.

空间分辨率是 MCP 光子计数探测器成像性能的重要指标之一, 电子噪声和分割噪声是限制空间分辨率的两个主要因素^[8]. 前者主要来源于后续处理电路, 选择低噪声的电子系统、降低阳极之间的极间电容值可以有效减少电子噪声^[9]. 鉴于分割噪声来源于从 MCP 出射的电子云团在阳极面板上的再分布过程, 实验中很难具体测量到分割噪声对探测器空间分辨率的影响; 并且在探测器系统中, 分割噪声常常湮没在电子噪声中, 所以对于分割噪声的研究受到很大限制. 1988 年 John Thornton 提及到基于 MCP 探测器楔条型阳极的分割噪声^[10], 然而并没有具体系统的计算方法. 对基于 Vernier 阳极 MCP 探测器分割噪声和 MCP 光子计数探测器阳极分割噪声的研究都很少.

目前, 基于楔条形阳极探测器的使用较为普遍, 技术日益趋于成熟. 为了提高深空探测能力, 亟需开展新型探测器研究. 与楔条形阳极相比, Vernier 阳极能达到更高的空间分辨率, 基于 Vernier 阳极的 MCP 探测器的空间分辨率理论上接近于 MCP 的孔径大小(十几个微米)^[11]. 故研究 Vernier 型探测器分割噪声对电子云团质心位置偏移的影响具有重要意义. 本文提出一种模拟计算分割噪声的方法, 并基于 Vernier 型阳极探测器解码算法和分割噪声理论模型, 计算出分割噪声对 Vernier 型阳极探测器电子云质心位置的偏移量.

1 基于 Vernier 阳极 MCP 光子计数成像探测器

图 1 是基于 Vernier 阳极 MCP 光子计数探测器的系统简图. 一个光子经过 V 型级联的 MCP 倍增形成电子云团, 并在阳极面板与 MCP 的加速电场下渡越到 Ge 膜上. 此时, Ge 膜背面的 Vernier 阳极面板各电极出现感应电荷, 电信号被输入到信号处理系统中进行

放大整形的处理, 最后生成图像.

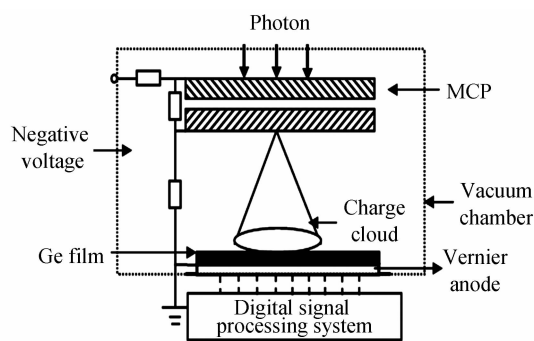


图 1 基于 Vernier 阳极 MCP 光子计数探测器简图

Fig. 1 Framework plot of MCP photon counting detector based on Vernier anode

图 2 是两个周期 Vernier 阳极示意图. 每个周期 P 分别由 3 组 9 个电极构成. 其中, 每组 (1A、1B、1C) 阳极由两条绝缘沟道宽度为 d 的正弦曲线进行分割. 故 Vernier 阳极光子计数探测器有 9 路输出信号 (Q_{A1} 、 Q_{A2} 、 Q_{A3} 、 Q_{B1} 、 Q_{B2} 、 Q_{B3} 、 Q_{C1} 、 Q_{C2} 、 Q_{C3}).

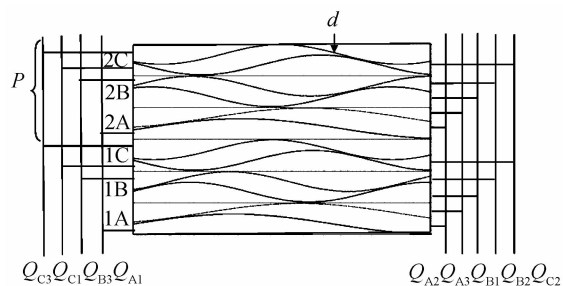


图 2 Vernier 阳极示意图

Fig. 2 Schematic of the Vernier anode

基于 Vernier 阳极光子计数探测器位置编码公式^[12]为

$$\begin{cases} x = \lambda_x \frac{\theta_x}{2\pi} + m_x \lambda \\ y = \lambda_y \frac{\theta_y}{2\pi} + m_y \lambda \\ z = \theta_A + \theta_C - \frac{\theta_x}{n} - \frac{\theta_y}{n} \end{cases} \quad (1)$$

式中, $\theta_x = \theta_A + \theta_B$, $\theta_y = \theta_B + \theta_C$, λ_x , λ_y 分别为 x 和 y 方向上的波长, n 为波数, m_x 和 m_y 均为整数. 其中,

$$\theta_A = \arctan \left(\frac{2Q_{A1} - Q_{A2} - Q_{A3}}{\sqrt{3}(Q_{A3} - Q_{A2})} \right) \quad (2)$$

$$\theta_B = \arctan \left(\frac{2Q_{B1} - Q_{B2} - Q_{B3}}{\sqrt{3}(Q_{B3} - Q_{B2})} \right) \quad (3)$$

$$\theta_C = \arctan \left(\frac{2Q_{C1} - Q_{C2} - Q_{C3}}{\sqrt{3}(Q_{C3} - Q_{C2})} \right) \quad (4)$$

2 分割噪声的理论模型

图 1 中, 经 MCP 出射的电子云团被 Vernier 阳极收集. 根据电荷分割型阳极的定义, 电极输出信号的幅值与收集的电荷量和电子云覆盖下的阳极面积成正

比.以 A1 阳极为例,电子云团电量 Q 被 A1 电极收集的电子数 N_{A1} 可以表示为

$$N_{A1} = f_{A1} Q/e \quad (5)$$

式中, f_{A1} 是电子云覆盖在 A1 阳极上的比值, e 为一个电子的电量.

电子云团降落在 A1 阳极区域前,有两个选择,即降落在 A1 区域或者其他阳极区域.因此电子云团满足伯努利分布^[13],故 A1 阳极区域的电荷量 Q_{A1} 分布的标准差为

$$\sigma_{Q_{A1}} = [f_{A1}(1-f_{A1})Q/e]^{0.5} \quad (6)$$

同理可得其他阳极区域的电荷分布.

为研究分割噪声对电子云团质心位置的影响,分别对式(2)~(4)进行求导,即

$$d\theta_A = \beta_A \cdot [2\sqrt{3}(Q_{A3} - Q_{A2})\sigma_{Q_{A1}} + (2Q_{A1} - (1+\sqrt{3}) \cdot Q_{A3} + (\sqrt{3}-1)Q_{A2})\sigma_{Q_{A2}} + ((1+\sqrt{3})Q_{A2} - 2Q_{A1} + (\sqrt{3}-1)Q_{A3})\sigma_{Q_{A3}}] \quad (7)$$

$$d\theta_B = \beta_B [2\sqrt{3}(Q_{A6} - Q_{A5})\sigma_{Q_{A1}} + (2Q_{A4} - (1+\sqrt{3}) \cdot Q_{A6} + (\sqrt{3}-1)Q_{A5})\sigma_{Q_{A5}} + ((1+\sqrt{3})Q_{A5} - 2Q_{A4} + (\sqrt{3}-1)Q_{A6})\sigma_{Q_{A6}}] \quad (8)$$

$$d\theta_C = \beta_C [2\sqrt{3}(Q_{A9} - Q_{A8})\sigma_{Q_{A1}} + (2Q_{A7} - (1+\sqrt{3}) \cdot Q_{A9} + (\sqrt{3}-1)Q_{A8})\sigma_{Q_{A8}} + ((1+\sqrt{3})Q_{A8} - 2Q_{A7} + (\sqrt{3}-1)Q_{A9})\sigma_{Q_{A9}}] \quad (9)$$

式中, $\beta_A = 1/[3(Q_{A3} - Q_{A2})^2 + (2Q_{A1} - Q_{A2} - Q_{A3})^2]$, $\beta_B = 1/[3(Q_{B3} - Q_{B2})^2 + (2Q_{B1} - Q_{B2} - Q_{B3})^2]$, $\beta_C = 1/[3(Q_{C3} - Q_{C2})^2 + (2Q_{C1} - Q_{C2} - Q_{C3})^2]$.

根据式(1),可知质心位置坐标偏移量为

$$dx = \frac{\lambda_x}{2\pi} (d\theta_A + d\theta_B) \quad (10)$$

$$dy = \frac{\lambda_y}{2\pi} (d\theta_B + d\theta_C) \quad (11)$$

当式(6)~(9)已知时,便可知分割噪声对质心位置偏移的影响.

3 仿真方法

3.1 基于 Vernier 阳极 MCP 光子计数成像探测器的仿真实论

如图 1, Vernier 阳极面板处于一个静电场的作用下.在真空室下的探测器满足麦克斯韦方程组,即

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (12)$$

$$\nabla \times B = \mu J + \mu \epsilon \frac{\partial E}{\partial t} \quad (13)$$

$$\nabla \cdot E = \frac{\rho}{\epsilon} \quad (14)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (15)$$

式中, E 是电场, B 是磁感应强度, J 和 ρ 是自由电流密度和自由电荷密度, ϵ 和 μ 分别是介电常量和磁导率.

在探测器系统中, B 近似为 0, 所以 Vernier 阳极面板电势分布 $\varphi(x, y, z)$ 满足

$$E = -\nabla \varphi(x, y, z) \quad (16)$$

将式(16)代入式(14), $\varphi(x, y, z)$ 满足泊松方程,即

$$\nabla \cdot \epsilon \nabla \varphi(x, y, z) = \rho \quad (17)$$

根据唯一性定理,当给定边界条件时,可以得到电势分布的唯一解集,即

$$\begin{cases} \varphi(x, y, z) |_{(x, y, z) \in \tau_i} = U \\ \varphi(x, y, z) |_{(x, y, z) \in \tau_e} = 0 \end{cases} \quad (18)$$

式中, τ_i 为真空中空气区域电极所构成的集合; τ_e 是电极 i 上的点构成的集合.

根据 Gauss 定理,可知 Vernier 阳极不同电极收集到的电荷量 Q_i 为

$$Q_i = -\oiint \epsilon \nabla \varphi(x, y, z) dV \quad (19)$$

3.2 计算分割噪声仿真过程

利用 Comsol 软件模拟 Vernier 阳极探测器成像过程,即可避免后续电路中电子噪声的影响,同时可提供一种有效准确计算分割噪声的方法.

Comsol 的仿真原理基于 Vernier 型单光子电荷分割型探测器成像过程.

仿真过程为:

1) 进入 Comsol 界面,选择三维静电场模块.

2) 将如图 3 所示的 Vernier 阳极面板模型导入 Comsol 界面, Vernier 阳极面板的基本参量见表 1.

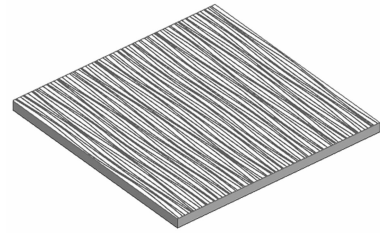


图 3 三维的 Vernier 阳极面板模型

Fig. 3 Three-dimensional Vernier anode model

表 1 Vernier 阳极模型参量

Table 1 Parameters of the Vernier anode model

Parameters of the Vernier anode	Value
Anode panel area/ mm ²	19.8 × 19.8
The number of pattern pitches	9
Substrate thickness/ mm	1.0
Relative permittivity	2.4
Width of insulation channel/ μm	30

3) 建立电子云模型.真空中电子云团的电量并不是均匀分布的,其大致满足高斯分布^[14],即

$$C(x, y) = \begin{cases} \frac{Q}{\sqrt{2\pi}} e^{-r^2/R^2} & (r \leq R) \\ 0 & (r > R) \end{cases} \quad (20)$$

式中, Q 是电子云团中心处的电量, R 是电子云团的分布半径, $r = (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2$, x_0, y_0 为电子云质心位置.

根据电子云团在真空室中 t 时刻的运动情况^[15], 可以描述为

$$\begin{aligned} r &= \sqrt{2E_e/m_e} t \sin \theta \\ D &= \sqrt{2E_e/m_e} t \cos \theta + \frac{eUt^2}{2m_e d} \end{aligned} \quad (21)$$

式中, E_e 和 θ 分别是电子的出射能量与出射角度, D 是 MCP 与阳极之间的距离, U 是加速电压, e 和 m_e 是电子的电量和质量.

在实际成像实验中通过调节加速电压 U 和 MCP 与阳极之间的距离 D 来获取不同的电子云半径.

综上, 建立的电子云分布模型如图 4, 设电子云半径 $R = 4.4 \text{ mm}$, 电子云团中心处电荷量 $Q = 3.2 \times 10^{-12} \text{ C}$.

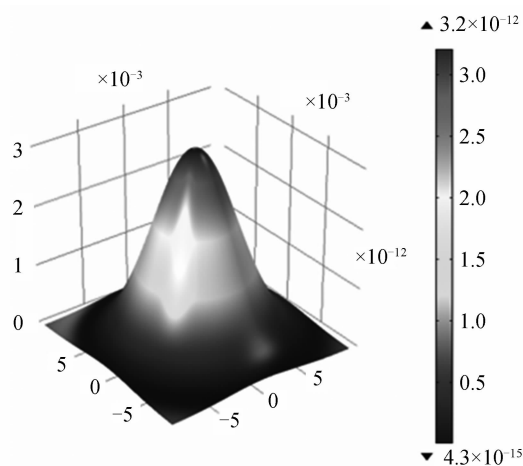


图 4 电子云团分布模型

Fig. 4 Model of the charge cloud distribution

4) 定义 Vernier 阳极模型属性. 选择材料库中的空气、铝膜、石英材料分别设置 Vernier 阳极的绝缘沟道, 面板导电区域以及阳极基底.

5) 分别对阳极面板的导电区域和绝缘沟道进行划分网格, 如图 5.

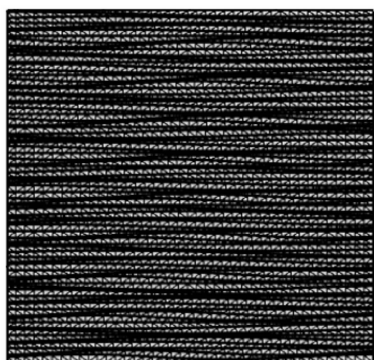


图 5 Vernier 阳极模型的网格划分

Fig. 5 Mesh generation of the Vernier anode model

6) 求解. 探测器读取方式采用感应式读出方

式^[16], 故将电子云降落在 Vernier 阳极背面的中心处, 带有绝缘沟槽的阳极面负责收集感应出的电荷量. 图 6 是阳极面板的电势分布图.

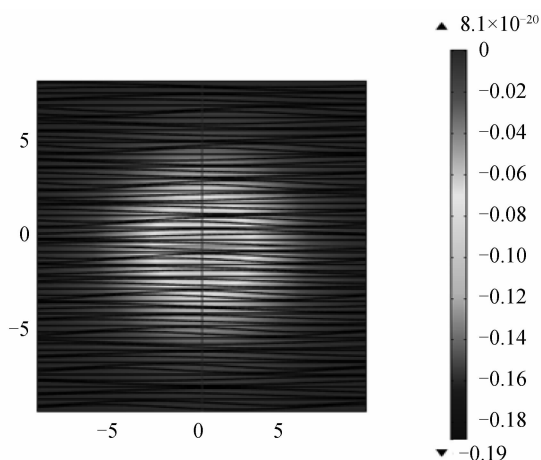


图 6 电子云降落在 Vernier 阳极面板的电势分布

Fig. 6 Potential distribution of the Vernier anode which the charge cloud lands on

7) 利用软件的后处理计算模块, 分别得到 9 路电极收集到的电荷量.

4 结果与讨论

4.1 基于 Vernier 阳极探测器的模拟成像

利用分割噪声仿真计算方法求出 Vernier 阳极探测器的 9 路模拟输出电荷量, 再依据 Vernier 阳极探测器位置编码式(1), 对一组 5×5 的针孔阵列进行模拟成像.

Vernier 电荷分割型阳极探测器的模拟成像如图 7, 验证了 Vernier 阳极质心位置编码算法, 说明 Comsol 仿真探测器成像过程中, Vernier 阳极各电极收集到的电荷量值的准确性.

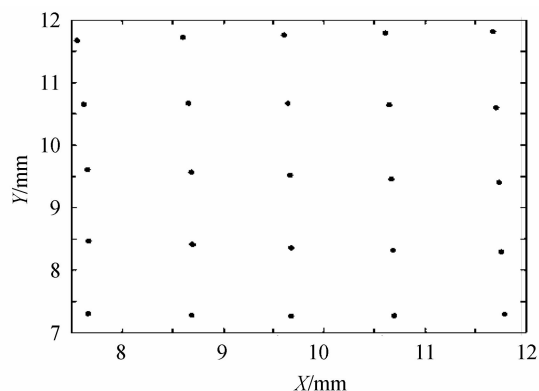


图 7 基于 Vernier 阳极 MCP 光子计数探测器的模拟成像

Fig. 7 Imaging simulation of MCP photon counting detector based on the Vernier anode

4.2 分割噪声对电子云团质心位置的影响

为研究 Vernier 阳极面板上分割噪声的分布, 重复仿真计算分割噪声的过程, 计算出电子云沿 x 轴方向

运动时,分割噪声对电子云质心位置的变化,如图 8.

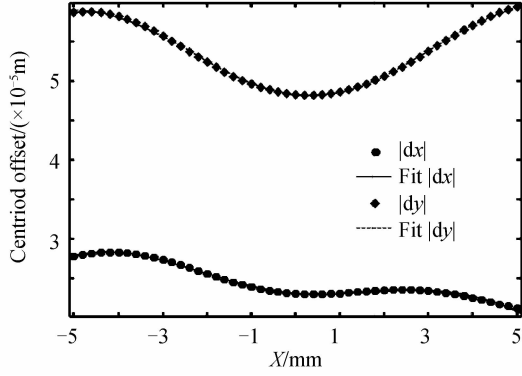


图 8 x 方向上电子云质心偏移量

Fig. 8 Centroid position offset of charge cloud along the x direction

图中电子云质心位置 y 方向绝对偏移量大于 x 方向,在理论上表明分割噪声会对图像产生一个拉伸的作用.此外,利用二级傅里叶函数对两组数据点进行了曲线拟合,获得较好的吻合.故可知对于 Vernier 阳极,分割噪声对电子云质心位置偏移量公式可以表为

$$\begin{cases} dx=f(x)=a_0+a_1 \cos (\omega \cdot x)+b_1 \sin (\omega \cdot x)+ \\ a_2 \cos (2 \omega \cdot x)+b_2 \sin (2 \omega \cdot x) \\ dy=f(x)=c_0+c_1 \cos (\omega_1 \cdot x)+d_1 \sin (\omega_1 \cdot x)+ \\ c_2 \cos (2 \omega_1 \cdot x)+d_2 \sin (2 \omega_1 \cdot x) \end{cases} \quad (22)$$

式中, $a_0, a_1, b_1, a_2, b_2, c_0, c_1, d_1, c_2, d_2, \omega, \omega_1$ 为常系数.

4.2.1 质心位置偏移量与阳极面板参量的关系

由图 2 和式(22)可知, Vernier 阳极面板结构由多条正弦函数构成,而且分割噪声造成的电子云团质心位置偏移量可以利用正余弦函数的线性组合来表示,由分割噪声产生的质心位置偏移量与阳极面板结构参量具有一定关联.因此研究了在不同阳极结构参量下,分割噪声对电子云团质心位置的影响情况.

Vernier 阳极的设计和制作工艺中重要的阳极参量是周期宽度 P ($P=19.8/N$) 和绝缘沟道宽度 d 的选取.首先,在其他阳极参量条件不变,仅改变模型周期数 N 的情况下,计算电子云沿 x 方向扫描时,分割噪声对电子云质心位置产生的影响.

图 9 中可见,周期数 N 越大的阳极面板,分割噪声产生的位置偏移量越小.当电子云团降落在不同周期宽度下阳极面板的固定位置时,周期数 N 与质心位置偏移量的关系如图 10.

图 10 中可知,周期数 N 与位置偏移量之间成线性关系.利用周期宽度 P 与周期数 N 之间的关系,可以得到坐标偏移量与周期宽度 P 的表达式,即

$$\begin{cases} dx=L(N)=\frac{Z_1}{P}+Z_2 \\ dy=L(N)=\frac{Z_3}{P}+Z_4 \end{cases} \quad (23)$$

式中, Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 为常系数.

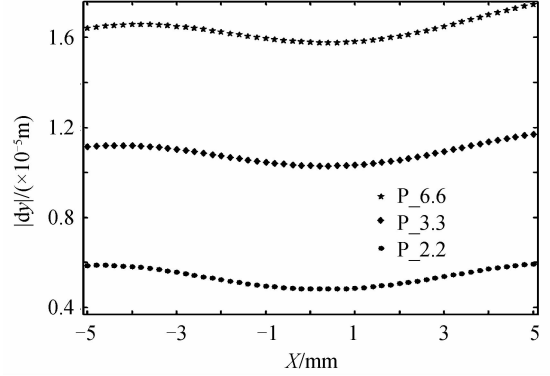


图 9 不同面板周期数下电子云团沿 x 方向运动时 y 轴的质心位置偏移量

Fig. 9 The y axis centroid position offset with different anode pitch when charge cloud goes along the x direction

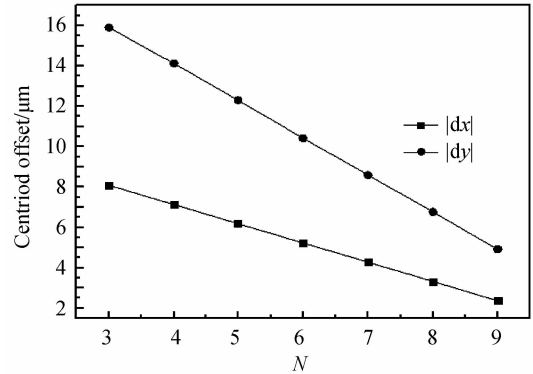


图 10 不同周期数下的电子云团质心位置偏移量

Fig. 10 Centroid position offset of charge cloud with different pitch

根据文献[17-18]和焊接加工工艺的限制,目前设计 Vernier 阳极面板时, P 值在 $636 \mu\text{m} \sim 1.44 \text{ mm}$ 范围.从图 10 中可知,当 $P=2.2 \text{ mm}$ 时, dx 低于 $3 \mu\text{m}$;根据式(23)计算可知,当 $P=1.65 \text{ mm}$ 时, dy 低于 $2 \mu\text{m}$;当 P 小于 1.44 mm 时,由分割噪声造成的电子云的质心位置偏移量低于微米的量级.因此,在 $P < 1.44 \text{ mm}$ 时,设计阳极面板可以主要考虑由其他因素造成的质心位置偏移.

此外,绝缘沟槽宽度 d 也是设计与加工 Vernier 阳极面板重要参量.为了得到绝缘沟槽宽度 d 与质心位置偏移量的关系,将电子云团入射阳极面板中心,在保持阳极面板其他参量不变,改变绝缘沟道宽度 d 时,电子云质心位置偏移值,如图 11.

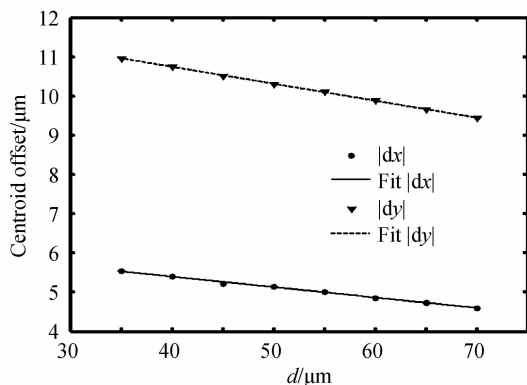


图 11 不同绝缘沟道宽度下质心位置偏移量

Fig. 11 Centroid position offset of charge cloud with different insulated groove width

从图 11 可知,电子云团入射阳极中心处产生的位置偏移量与绝缘沟槽 d 成线性递减关系. 从线性拟合结果,可得 dx, dy 表达式为

$$\begin{cases} dx = g(d) = -p_1 \cdot d + p_2 \\ dy = g(d) = -p_3 \cdot d + p_4 \end{cases} \quad (24)$$

式中, p_1, p_2, p_3, p_4 是比例系数.

图 11 中,当 $d = 70 \mu\text{m}$ 时, $dx = 4.6 \mu\text{m}$, $dy = 9.4 \mu\text{m}$. 根据式 (24) 计算可得, $d = 190 \mu\text{m}$ 时, $dx = 1.179 \mu\text{m}$, $dy = 4.36 \mu\text{m}$, 可知在极大增加绝缘宽度的情况下,质心偏移量的值都没有降到微米量级以下. 在实际情况中,较宽的绝缘沟槽会减少阳极面板的有效工作面积,使收集到的电荷量不充足,导致图像产生畸变;同时根据周期宽度 P 值的范围,在加工 Vernier 阳极面板时,不会允许较宽绝缘沟槽存在. 目前,根据 Vernier 阳极面板制作工艺, d 值一般在 $25 \sim 65 \mu\text{m}$ 之间.

4.2.2 质心位置偏移量与电荷量的关系

从分割噪声理论模型中了解到分割噪声与电荷量分布有着直接关系. 因此仿真不同电荷量下,分割噪声对电子云团产生的质心偏移位置必不可少. 由图 1 可知,单光子计数探测器电荷量的多少由 MCP 决定. 对于一般的 MCP 来讲,通常增益在 $10^6 \sim 10^7$ 之间,故一个光电子经 MCP 放大后的电量大约在 $10^{-13} \sim 10^{-12} \text{C}$ 之间. 图 12 是不同 MCP 增益下电子云的质心位置的偏移曲线.

由图 12 可知,在电荷量小于 10^{-12}C 时,质心坐标值将出现很大的位置偏移. 随着电荷量的增加,偏移量将快速下降. 对数据点进行拟合, dx, dy 满足

$$\begin{cases} dx = M(Q_{\text{MCP}}) = q_1 / \sqrt{Q_{\text{MCP}}} \\ dy = M(Q_{\text{MCP}}) = q_2 / \sqrt{Q_{\text{MCP}}} \end{cases} \quad (25)$$

式中, q_1, q_2 为比例系数, Q_{MCP} 是一个光电子经 MCP 放大后的电荷量.

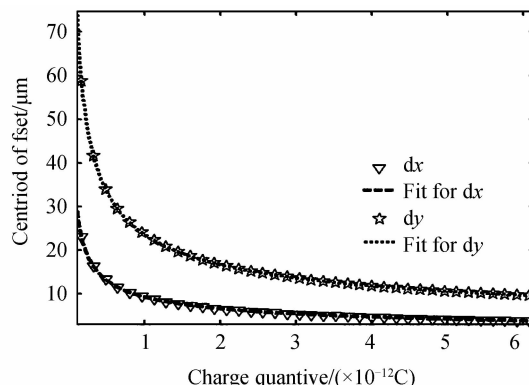


图 12 不同电荷量下电子云质心位置的偏移量

Fig. 12 Centroid position offset of charge cloud with different electric charge

可得出分割噪声限制探测器位置偏移量与 $\sqrt{Q_{\text{MCP}}}$ 成反比. 图 12 中,当 MCP 增益为 1×10^7 时, $dx = 7.29 \mu\text{m}$, $dy = 18.58 \mu\text{m}$; 根据式 (25) 计算可得,当 MCP 增益为 1×10^8 时, $dx = 2.3 \mu\text{m}$, $dy = 5.76 \mu\text{m}$. 因此提高 MCP 的增益,将有效降低分割噪声对电子云质心位置的影响. 目前,实验中通常采用 2 块 V 型或 3 块 Z 型 MCP 级联的方式来获得 10^7 或者更高增益^[18].

电子云团质心位置偏移量为

$$\begin{cases} dx = K \frac{d}{p} f(x) / \sqrt{Q_{\text{MCP}}} \\ dy = K_1 \frac{d}{p} f(x) / \sqrt{Q_{\text{MCP}}} \end{cases} \quad (26)$$

式中, K, K_1 为比例系数.

5 结论

本文研究了微通道板光子计数探测器分割噪声,发现大量电子的再分布过程会导致电子云团质心位置出现偏移量,这是实际中 Vernier 阳极探测器达不到理论分辨率的原因之一. 由于分割噪声来自于阳极面板上的感应电荷量,而与实验中收集到的电荷量无关,采用三维有限元的仿真方法对 Vernier 阳极探测器的分割噪声进行了计算,并且针对不同 Vernier 阳极面板结构下分割噪声的分布进行了研究. 计算结果表明, Vernier 阳极探测器的分割噪声分布符合二级傅里叶函数,并且与阳极面板的周期宽度 P 、 $\sqrt{Q_{\text{MCP}}}$ 成反比,与绝缘沟槽宽度 d 成线性关系,该结构为优化探测器 Vernier 阳极面板参量提供了参考依据. 文中的计算方法同样适用于基于其他不同阳极结构的 MCP 光子计数探测器分割噪声研究.

参考文献

- [1] SIEGMUND O H W, TREMSIN A, VALLERGA J V, *et al.* Cross strip imaging anodes for microchannel plate detectors [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2001, **48**(3): 430-434.
- [2] WILHELM K, CURDT W, MARSCH E, *et al.* SUMER-solar ultraviolet measurements of emitted radiation[C]. SPIE,

- 1994, **162**(1): 189-231.
- [3] YOSHIOKA K, MURAKAMI G, YOSHIKAWA I, *et al.* EUV observation from the Earth-orbiting satellite, EXCEED [J]. *Advance in Space Research*, 2010, **45**(2): 314-321.
- [4] SONG Juan, ZHAO Bao-sheng, SHENG Li-zhi, *et al.* Research on shared anode used for the large area array MCP detector[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(8): 0823002. 宋娟,赵宝升,盛立志,等. 基于 MCP 大面阵 X 射线探测器共享阳极的研究[J]. *光子学报*, 2014, **43**(8):0823002.
- [5] TIAN Yang. High efficiency event-counting thermal neutron imaging using a Gd-doped micro-channel plate [J]. *Chinese Physics C*, 2014, **38**(8): 086003.
- [6] WANG Yi-ming. Readout for a large area neutron sensitive microchannel plate detector [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2015, **784**: 226-231.
- [7] DAI Shu-wu, JIA Ying-zhuo, ZHANG Bao-ming, *et al.* Chang' E-3 scientific payloads and its checkout results[J]. *Science in China Technologica*, 2014, **44**(4): 361-368. 代树武,贾瑛卓,张宝明,等. 嫦娥三号有效载荷在轨测试初步结果[J]. *中国科学:计数科学*, 2014,**44**(4):361-368.
- [8] SCHWARZ H E. The partition noise quantum limit on the accuracy of charge measurement exceeded [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 1985, **238**: 124-126.
- [9] XING Yan, CHEN Bo, WANG Hang-feng, *et al.* Simulation and experiment for electrode capacitance based on Vernier anode photon counting detector [J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, **64**(8): 080702. 邢妍,陈波,王海峰,等. Vernier 型光子计数探测器阳极电容仿真与试验研究[J]. *物理学报*, 2015, **64**(8):080702.
- [10] JOHN T. The application of the partition noise theory[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 1988, **264**: 523-525.
- [11] BARSTOW M A, BANNISTER N P. The joint astrophysical plasmadynamic experiment (J-PEX): a high-resolution rocket spectrometer[C]. SPIE, 2000, **4140**: 199-210.
- [12] YAN Q R, ZHAO B S, YANG H, *et al.* Decoding algorithms for improving the imaging performance of Vernier anode readout[C]. SPIE, 2012, **8332**: 83320K.
- [13] MOOD A M, GRAYBILL F A, BOES D C. Introduction to the theory of statistics [M]. New York: McGraw-Hill, 1974.
- [14] HE Ling-ping. Study of imaging characteristics of EUV photon counting detector [D]. Changchun: the Changchun institute of Optics, Fine Mechanics and Physics Chinese Academy of Sciences. 2010,14-30. 何玲平. 极紫外光子计数探测器成像特性研究[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,2010,14-30.
- [15] TREMSIN A S, SIEGMUND O H W. Spatial distribution of electron cloud footprints from microchannel plates: Measurements and modeling [J]. *Review of Scientific Instrument*, 1999, **70**(8): 3283-3288.
- [16] NI Qi-liang, Optimization for spatial resolution and count rate of far ultraviolet photon-counting imaging detector based on induced charge position-sensitive anode [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, **34**(8): 0804001. 尼启良. 远紫外光子计数成像探测器分辨率及计数率的优化[J]. *光学学报*, 2014, **34**(8):0804001.
- [17] LAPINGTON J S, SANDERSON B. Microchannel plate limited resolution with the Vernier anode[C]. SPIE, 2000, **4139**: 242-249.
- [18] YANG Hao, ZHAO Bao-sheng. Decoding algorithms of single photon counting imager based on two-dimensional Vernier anodes[J]. *Science China-Physics Mechanics & Astronomy*, 2011, **54**(11): 1943-1947.
- [19] WANG Guang-ming, ZHAO Bao-sheng, WEI Pei-yong, *et al.* The research of WSZ extreme ultraviolet detector and the data acquisition circuits[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(12): 1824-1826. 王光明,赵宝升,魏培永,等. WSZ 极紫外探测器及其信号采集电路的研究[J]. *光子学报*, 2006, **35**(12):1824-1826.