文章编号 2095-1531(2019)06-1303-08

基于电容分割的光子计数成像探测器读出 阳极优化设计及仿真

何玲平¹*,岳巾英²,张宏吉¹,陈 波¹ (1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033; 2. 长春工程学院,吉林 长春 130021)

摘要:本文提出了一种基于电荷电容分割位置分辨原理的光子位置读出阳极,能够大幅提高该类探测器的空间分辨率和光子计数率。首先,介绍了影响现有光子计数成像探测器成像性能的关键因素,分析了采用电容分割位置分辨方法的优势;其次,对电荷电容分割原理展开了理论推导,分析了光子位置与阳极读出信号变化的空间位置的相关性;再次,在理论推导的基础上,分析了电容分割读出阳极相关物理参数对其空间位置分辨能力的影响;然后,提出了电容分割位置分辨阳极的优化设计原则,并设计了一种新型的基于电容分割的二维光子位置读出阳极。最后,利用有限元仿真工具COMSOL建立了该电容阳极的模型,进行了位置分辨原理仿真,并评估了空间分辨的准确性。仿真结果表明:阳极的位置分辨误差小于 50 μm,中心区域的位置分辨误差小于 5 μm,阳极的位置分辨性能优良。

关 键 词:光子计数成像;位置分辨阳极;电荷电容分割;阳极优化设计;位置相关中图分类号:TP394.1; TH691.9 **文献标识码:**A doi:10.3788/CO.20191206.1303

Optimization and simulation for photon-counting imaging detector readout anode based on capacitance division

HE Ling-ping^{1*}, YUE Jin-ying², ZHANG Hong-ji¹, CHEN Bo¹
(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Changchun 130033, China;
2. Changchun Institute of Technology, Changchun 130021, China)

* Corresponding author, E-mail; help@ciomp. ac. cn

Abstract: This paper proposes a new position-resolving readout anode based on charge capacitance-division, which can improve the spatial resolution and photon counting rate of its detector. Firstly, the key factors affecting the imaging performance of existing photon-counting imaging detectors are introduced and the advantages of using capacitance-division readout anodes are analyzed. Secondly, the principle of charge capacitance-division is theoretically deduced and the relation between photon position and detector signal output is analyzed. Then, based on the theoretical deduction, the impact of a capacitance-division anode's physical parameters on the detector's performance is analyzed. After that, the optimized design principle for a capacitance-division position-resolved anode is proposed. A novel readout anode based on charge capacitance-division for a

photon counting detector is designed. Finally, by using the finite element simulation tool COMSOL, a model for that readout anode is established, which is used to simulate the process of position-sensitivity and its accuracy. The simulation results show that the position-resolution performance of the new readout anode with the optimized design is better than 50 µm in most areas.

Key words: photon counting imaging; position-resolved anode; charge capacitance-division; readout anode optimization; position correlation

1 引言

光子计数成像探测器兼具超低噪声和超高灵敏度的优点,能够以光子计数的形式对微弱目标进行成像探测,广泛应用于空间天文学、粒子探测、生物荧光成像等重要领域。光子计数成像探测器一般使用微通道板作为光电转换及电子倍增器件,使用位置读出阳极分辨光子位置,通过大量光子计数统计目标图像。位置分辨读出阳极是光子计数成像探测器的主要部件之一,也是实现探测器成像功能的关键器件[18]。

在光子计数成像探测器的发展过程中,研究 人员开发了多种位置分辨读出阳极,它们在结构、 性能、原理等各方面存在巨大差异。早在上世纪 70 年代, M. Lampton 等人提出了基于电阻电荷分 割原理的位置分辨阳极,阳极面板不同位置到四 角上的读出电极的电阻随距离线性变化,从而使 电极读出的光子电荷信号也与空间距离线性相 关[9];80 年代 OHW. Siegmund 等人提出了基于几 何电荷分割原理的位置分辨阳极,由3个周期性 面积变化的电极组成,不同位置电荷分割面积线 性变化,以实现信号与位置的相关性[10];90 年代 David B. Kasle 等人提出了类似 CCD 结构的 MA-MA 多电极位置分辨阳极,每一个电极相当于一 个光子计数像元[11];S. E. Sobottka 等人提出了基 于延迟线到达时间差的位置分辨阳极[12]。这些 位置分辨阳极中, 电阻分割阳极、几何分割阳极及 延迟线阳极采用少数几路电荷信号处理单元即可 工作,以简单的结构、较低的成本可获得较理想的 图像,但由于光子信号是串行读出,探测器的最高 计数率存在瓶颈,一般不超过100 kcps; MAMA型 多电极读出阳极类似 CCD,每个电极都是独立的 光子读出单元,阳极读取光子位置时是平行的,可

以获得很高的光子计数率,但相应的电子学系统 极其庞大,且其分辨能力完全取决于电极尺寸的 大小,随着分辨率要求的提高,系统复杂度及成本 急剧增加。综上所述,目前常用的光子计数探测 在成像分辨率、光子计数率等方面存在瓶颈。

位置分辨阳极的空间分辨性能取决于光子电 荷信号的测量精度,而光子电荷信号测量信噪比 主要由信号大小及读出噪声决定。在现有技术条 件下,微通道板的增益性能提升空间有限,要增加 信号大小只能通过提高电荷前置放大器的积分时 间来实现,而这又会影响探测器的计数率。因此, 在设计光子计数探测器时,需要在分辨率与计数 率性能之间取得平衡。而如果能够降低光子电荷 信号的读出噪声,那么这个平衡点就可得到提高, 即同时提高分辨率和计数率。本文提出一种基于 电容电荷分割原理的二维位置分辨阳极,整个阳 极的信号电容传输特性使其阻容抗极低,从而能 够大幅降低光子信号的读出噪声,提高探测器的 分辨率及计数率。下文将介绍电荷电容分割原 理,分析阳极各项物理参数对成像性能的影响,提 出阳极优化设计原则,并使用有限元分析软件对 电荷电容分割位置分辨原理进行仿真,并评估阳 极位置分辨的线性。

2 电容电荷分割位置分辨原理推导

电荷分割是常用于粒子位置探测的空间分辨技术。电荷电容分割位置分辨技术最早用于高能粒子的位置探测,一般由一个一维或二维的阳极单元阵列电容网络组成,在电容网络的两端或四角引出读出电极,由电子学读出降落电子云位置。R. Gott、W. Parkes等人最早提出了一种基于金属丝的电荷电容分割探测器,用于 X 射线天文探测; Alberto Pullia、F. J. Walter等人提出在 X 射线

条纹相机中应用电容读出技术用于减少读出通道的数量^[13-15]。由于电荷电容分割阳极是一种纯电容阳极,其阻抗极低,比一般的几何分割阳极小一个数量级,因此在探测器前置放大器处产生的噪声极低。阳极阻抗降低相应会降低对信号测量信噪比的要求,因此可以降低脉冲整形电路的成形时间,提高光子计数探测器的分辨率和计数率。

与一般的位置测量方式不同,电荷电容分割技术不需要为每个电极配置一路信号测量电路。对于一个一维的电容分割阳极来说,它虽然可能含有多个电极,但只需要测量阳极两端读出电极的信号即可计算出降落电子云的位置。图 1 为一个一维条纹电极阵列的电容阳极示意图。图中 C 为各条纹之间的连接电容, C_f 为读出电极前置放大电路的反馈电容。

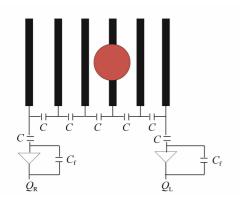


图 1 一维电容分割阳极示意图

Fig. 1 Schematic diagram of 1-D capacitance division anode

当电子云降落在某一个电极上时,将通过电荷感应的方式在读出前置放大器的输出端产生相应的电荷。电子云降落相对位置 X 与两端前置放大器感应生成的电荷信号的关系为:

$$X = \frac{x}{x_{\rm T}} = \frac{Q_{\rm R}}{Q_{\rm R} + Q_{\rm L}} , \qquad (1)$$

其中, x_T 为一维阳极的总长度, Q_R 为阳极右端读出电极连接的前置放大器感应生成电荷信号, Q_L 为阳极左端读出电极连接的前置放大器感应生成电荷信号, Q_R+Q_L 为总的测量信号。因为电子云降落所在电极与两端放大器之间的电容值存在位置相关性,因此,两端前置放大器分割感应的电荷值也体现了位置相关性,测量这两个位置相关的电荷信号,即可计算出降落电子云团的质心位置。

下面将分别对只有单个电荷收集电极的电容阳极 和具有多个收集电极的电容阳极的位置分辨原理 进行推导。

2.1 单个收集电极的电容阳极位置分辨原理

先以含单个收集电极的电容阳极为例,推导 这种阳极读出信号与信号位置的相关性。

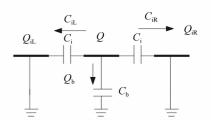


图 2 单个收集电极电容阳极示意图

Fig. 2 Schematic diagram of single electrode capacitance anode

图 2 为只含单个收集电极的电容阳极,其两 端各有一个读出电极,收集电极与读出电极之间 存在一个互感电容 C_i ,同时每个电极存在一个对 地电容 C_{l} ;对地电容会导致电极收集电荷泄露, 因此设计时应该使此电容尽量小。 C_i 为收集电容 与读出电极间的互感电容, C_b 为电极的对地电容, C_f 为电荷前置放大器的反馈电容。这里定义 C_{in} 为前置放大器的等效输入电容, $C_{in} = K \times C_f, K$ 为 电压增益。为了保证读出电极尽可能多收集电 荷,一般前置放大器的内置电容都比较大,即 C_{in} 远大于 C_i 。收集电极的电荷整体被分割成3部 分:读出电极根据读出电容 C_{ii} 和 C_{ii} 的大小各自 读出一部分电荷 $Q_i = C_i \times Q/(C_d + 2C_i)$, 第三部 分电荷被对地电容泄漏 $Q_b = C_b \times Q/(C_b + 2C_i)$, 一般要求 C_i 远大于 C_b 。电荷传播到读出电极后, 前置放大器感应的电荷量受以下电容影响:前置 放大器的等效输入电容 C_{in} ,阳极相对电路的等效 电容 $C_{i,i}$ 或 $C_{i,i}$,以及读出阳极的对地电容。对于 如图1所示的单收集电极阳极,阳极等效电容为 $C_{iL} = C_{iR} = C_i/2$ 。因此,前置放大器分割的电荷值 为:

$$Q_{iL} = Q_{iR} = \frac{C_{in}}{C_{in} + C_{b} + 1/2C_{i}}$$
, (2)
由于 C_{d} 远小于 C_{i} , C_{i} 远小于 C_{in} ,则有:

$$Q_{\rm il} = Q_{\rm iR} \approx \frac{C_{\rm in}}{C_{\rm in} + \frac{1}{2}C_{\rm i}} \frac{Q}{2} \approx \frac{Q}{2}.$$
 (3)

2.2 多个收集电极的电容阳极位置相关性

接下来分析5个收集电极的电容阳极的电荷 分割情况。图3为一个一维5单元收集电极电容 阳极示意图。

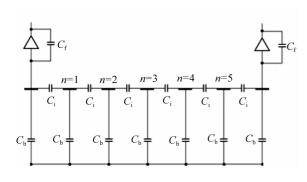


图 3 5 个收集电极电容阳极示意图

Schematic diagram of five electrodes capacitance anode

分割成3份,其中被两端前方采集到的电荷量为: (4)

现在考虑5个收集电极的情况。假设光子落 在第n个收集电极上,电荷Q同样被 $C_b \setminus C_{il}$ 和 C_{iB}

$$\begin{cases} Q_{\rm L} = \frac{C_{\rm nL}}{C_{\rm b} + C_{\rm nL} + C_{\rm nR}} Q \\ Q_{\rm R} = \frac{C_{\rm nR}}{C_{\rm b} + c_{\rm nL} + C_{\rm nR}} Q \end{cases} , \tag{4}$$

由电极位置关系可知离读出电极最近电极的 等效电容为 $(C_{in} \ge C_i \ge C_b)$:

$$C_{1L} = C_{5R} = \frac{C_{in}C_{i}}{C_{in} + C_{i}} \approx C_{i},$$
 (5)

其他收集电极的相对电路的等效电容为:

$$C_{2L} = C_{4R} = \frac{(C_{1L} + C_b)C_i}{C_{1L} + C_b + C_i} \approx \frac{(C_i + C_b)C_i}{C_i + C_b + C_i} \approx \frac{C_i}{2}, \quad (6)$$

$$C_{3L} = C_{3R} = \frac{(C_{2L} + C_b)C_i}{C_{2L} + C_b + C_i} \approx \frac{(\frac{C_i}{2} + C_b)C_i}{\frac{C_i}{2} + C_b + C_i} \approx \frac{C_i}{3},$$
 (7)

$$C_{4L} = C_{2R} = \frac{(C_{3L} + C_b)C_i}{C_{3L} + C_b + C_i} \approx \frac{(\frac{C_i}{3} + C_b)C_i}{\frac{C_i}{3} + C_b + C_i} \approx \frac{C_i}{4},$$
 (8)

$$C_{5L} = C_{1R} = \frac{(C_{3L} + C_{b})C_{i}}{C_{3L} + C_{b} + C_{i}} \approx \frac{(\frac{C_{i}}{4} + C_{b})C_{i}}{\frac{C_{i}}{4} + C_{b} + C_{i}} \approx \frac{Ci}{5}.$$
 (9)

因此,将式(5)~式(9)依次代入式(4),即可 得到电子云降落在不同手机电极上时两端前置放 大器采集的电荷量。可以看出,读出电荷与降落 收集电极的位置呈现明显的相关性。

二维电容阳极优化设计

3.1 普通二维电容阳极

第二节推导了一维电荷电容阳极位置分辨原 理,但实际应用中更为常见的是二维位置分辨。 常见的二维电容阳极工作原理与一维基本类似, 一般是将两个不同方向的一维电容阳极叠加在一 起工作,如二维金属丝电容阳极和二维微条纹电 容阳极。图 4 为两个一维微条纹电容阳极上下两

层叠加得到的一个二维电容阳极位置分辨阳极。

通过上述电容阳极工作原理推导过程,可以 看出,前置电荷放大器的等效输入电容、电极互感 电容、电极对地电容之间必须满足以下关系: $C_{in} \ge C_i \ge C_b$,才能保证电荷降落位置与电荷分割 的相关性,同时确保收集到的电荷大于对地泄漏 的电荷。为了满足电极电容与位置的相关性,对 阳极设计提出以下要求:

- (1)电荷前置放大器选择合适的等效输入电 容,在保证电路电荷测量动态范围的前提下,尽量 增加 C_{in} ;
- (2)优化设计电容阳极的布局,使其对地寄 生电容 C_{ι} 尽量小:
 - (3)选择合适材料、电极间距、电极尺寸、电

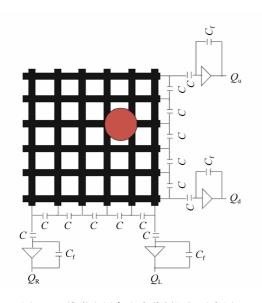


图 4 二维微金属条电容分割阳极示意图

Fig. 4 Schematic diagram of two-dimensional metal strip capacitance anode

极厚度等,使得 C_i 尽量大;

- (4)收集电极数量不宜过多,否则对地寄生 电容累积效应过大;
- (5)选择介电常数尽量大的材料作为阳极基底材料,并使用隔层面积重叠的方式增加电极间的互电容;
- (6)使用隔层面积重叠方式增加互电容时,应尽量减少基底材料的厚度,以进一步增加 C_{i} 。

3.2 互电容二维电容阳极

无论是微条纹还是微金属丝电容阳极,为了增加电极间的互电容,都需要增加条纹或金属丝电极的长度,而这又会导致电极对地寄生电容增加,降低阳极收集到的电荷信号。因此,本文在参考现有电容阳极的基础上,提出了一种基于隔层面积重叠方式的二维电容阳极优化设计,既提高了电极间的互电容,又降低了收集电极的对地电容。如图 5 所示,该阳极镀制在 0.2 mm 陶瓷平面上,包括上下两层;上层为方片电极阵列,用于增加电极间的互电容。该阳极上层共包括 7×7个分离方片金属电极(材料为铜),电极厚度为 0.01 mm,电极尺寸为 3 mm×3 mm,电极间间距为 0.2 mm;下层为重叠棱形阵列,尺寸为 2.5 mm×2.5 mm,厚度为 0.01 mm。为了尽量增加电极阵

列电极间互电容,设计阳极时需要将下层的每个 棱形与上层4个相邻电极单元以均等面积重叠。 在阳极的上端、微通道板的后端需要放置一块高 电阻膜层,该高电阻膜层起到实际的电子收集作 用;电子云在高电阻膜层会保持形状一定时间,并 通过电容感应在下方的电容阳极上生成同等形状 和质心位置的电荷镜像;高电阻膜层上的累积电 荷通过接地线导走,而电容阳极测量的电荷信号 实际是电子云团通过高电阻膜层产生的镜像电 荷。

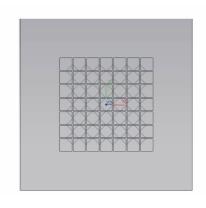


图 5 互电容二维电容阳极示意图

Fig. 5 Schematic diagram of mutual capacitance anode

4 个读出电极位于阳极 4 个角处,每个读出电极连接一路电荷前置放大器。当一个电子云降落在阳极上时,4 个电极分别采集 4 个电荷信号 $Q_A \ Q_B \ Q_D$,由于信号大小与电子云位置的相关性,可以用下式计算得到电子云质心的相对位置:

$$\begin{cases} X = \frac{Q_{A} + Q_{B}}{Q_{A} + Q_{B} + Q_{C} + Q_{D}} \\ Y = \frac{Q_{A} + Q_{D}}{Q_{A} + Q_{B} + Q_{C} + Q_{D}} \end{cases}$$
(10)

光子计数探测器的分辨率主要受光子电荷信号的探测信噪比决定,而影响探测信噪比的主要是电荷灵敏前置放大器噪声。电荷前置放大器噪声主要由位置分辨阳极相对于输入端的输入电容所决定。一般来说,前置放大器输入噪声可以由下式表示:

$$N = N_{\rm o} + N_{\rm c}C_{\rm i}, \qquad (11)$$

式中,N。为前置放大器零输入负载电容时噪声的 RMS 值,典型的电荷灵敏前置放大器如 AMPTEK 公司的 A250 的零负载噪声约为 $100e^-$; N_c 为单位 负载电容产生的电子噪声个数的 RMS 值,输入电容小于 100 pF 时约为 15 e $^-$ /pF; C_i 为探测器阳极 收集电极相对于前置放大器的输入电容的负载电容值。由于电容电荷分割阳极的低电容特性,尺寸25 mm左右的阳极相对于前置放大器的输入电容在 $5\sim8$ pF 之间,因此产生的前置放大器噪声整体约为 250 e $^-$; 探测器使用的 MCP 增益为 10^6 $\sim 10^7$, 电容阳极每路分割信号大小约为 1×10^6 量级, 电荷信号探测信号与电子噪声比值约为 5~000:1。因此,基于电容电荷分割阳极的光子计数探测器的光子信号测量的信噪比更佳。

4 互电容阳极位置分辨性能有限元 仿真

为了验证本文设计的二维电容阳极的位置分辨性能,利用有限元仿真软件 COMSOL 建立了有限元模型。COMSOL 是一款通用的工程仿真软件平台,可以模拟电磁、结构力学、声学、流体、传热、化工等各领域的产品设计和过程,它的 AC/DC 模块可以用来理解、预测和设计稳态、低频和瞬态应用中的电场和磁场。使用麦克斯韦方程组的微分形式,并结合初始条件和边界条件,可以对关心的参数进行求解。

使用 COMSOL 对二维互电容阳极建模时,首 先选择合适的电极材料和基底材料,根据设计定 义电容阳极几何结构,如电极大小、个数、厚度、间 距及基底厚度等;然后,定义适当的静电场模型 AC/DC 接口、边界条件和初始条件;之后,定义有 限元网格,选择求解器以及可视化方式,至此二维 互电容阳极模型建立完毕。定义一个高斯分布、 面积约为两个电极单元的光子电子云,并根据该 电子云降落在电容阳极的不同位置,选择与读出 电极连接的前置放大器的收集电荷量作为求解 器,并按照公式(10)计算电子云的质心位置。最 后,计算所有电子云位置电容分辨仿真计算值与 实际降落位置之间的偏差。位置分辨仿真示意图 如图 6所示。

电容阳极位置分辨仿真过程中,先固定光子

电荷信号降落位置在 Y 方向位置保持不动, X 方向位置在 -7.5~7.5 mm 之间等间隔移动,之后,增加电荷信号采集电路的电子噪声,并运行仿真模型,得到的电容阳极位置分辨仿真结果如图 7 (a) 所示;同理,沿阳极对角线方向投掷光子电荷信号,得到电容阳极位置分辨仿真结果如图 7 (b) 所示。

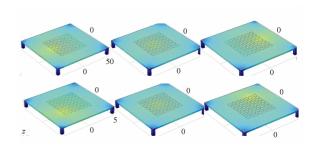


图 6 光子电荷位置分辨仿真示意图

Fig. 6 Simulation diagram of photon charge position resolution

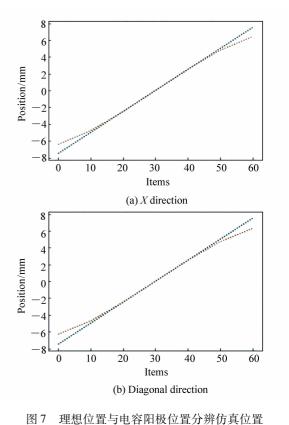


Fig. 7 Ideal position and capacitance anode simulation position

从图7可以看出,电容阳极分辨模型仿真得

到的电子云质心位置与电子云理论降落位置在 -5~5 mm 内基本重合,在阳极边缘即 -5~ -7.5 mm部分和5~7.5 mm部分的误差相对较大,具体误差分布如图8所示。

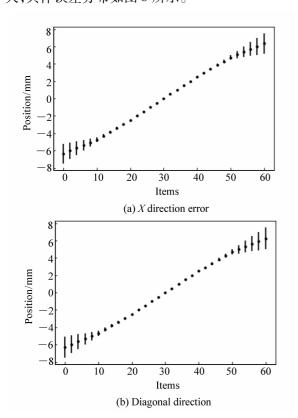


图 8 电容阳极位置分辨误差

Tig. 8 Capacitance anode position resolution error

从图 8 中可以看出,电容阳极的对角线方向

此 X 方向的位置分辨误差稍大一些,主要是因为对角线方向边缘位置光子电荷信号超出电容阳极收集范围的比例更大一些。在阳极的最边缘区域,位置分辨误差约为 1 mm。导致边缘位置分辨

误差变大的原因主要是降落的光子电荷信号是一个具有一定面积的电子云团,当它打在阳极边缘的时候,有一部分电荷阳极无法收集,导致光子位置计算误差变大。在光子电荷基本被电容阳极收集的情况下,该阳极的位置分辨误差较小,RMS值小于50 μm;阳极中心部位的位置分辨误差约为5 μm。从仿真结果可以看出,基于电荷电容分割技术的二维电容位置分辨阳极具有较高的空间分辨能力,能够大幅提升光子计数成像探测器的成像能力。

5 结 论

本文针对光子计数成像探测器常用位置分辨 阳极存在成像性能提升有限的情况,基于电荷电 容分割位置分辨原理提出了一种新型的二维电容 阳极。这种阳极具有电荷信号纯电容传播路径的 特性,使得它的电荷信号读出噪声更低,因此具备 更高的空间分辨率和计数率。接着,提出了电容 阳极的优化设计原则,并基于此建立了一个二维 电容阳极 COMSOL 有限元仿真模型,对该电容阳 极的位置分辨性能进行了仿真。仿真结果表明, 在光子电荷信号被完整收集的情况下,阳极的位 置分辨误差小于50 µm,中心区域的位置分辨误 差小于 5 μm, 阳极的位置分辨性能优良。为了尽 量消除电容阳极边缘的位置分辨误差,阳极有效 收集面积应该大于实际成像区域的至少一个电子 云大小;同时,为了在不增加尺寸的情况下尽量提 高电容阳极的收集面积,电子云团的大小需要调 整至合理尺寸。

参考文献:

- [1] 李云鹏,郑鑫,张宏吉,等. Ge 薄膜性能及其在光子计数成像探测器中的应用[J]. 光学 精密工程,2014,22(5): 1143-1149.
 - LI Y P,ZHENG X,ZHANG H J, et al. . Properties of germanium films and their applications to photon counting imaging detectors [J]. Opt. Precision Eng., 2014,22(5):1143-1149. (in Chinese)
- [2] 韩素立,陈波,尼启良,等. 光子计数探测器感应位敏阳极的电子云扩散[J]. 光学 精密工程,2014,22(7):1732-1736.
 - HAN S L, CHEN B, NI Q L, et al. . Electron cloud diffusion property of photon counting detector based on induction read-out [J]. Opt. Precision Eng., 2014,22(7):1732-1736. (in Chinese)
- [3] 韩素立,郭劲,刘洪波,等. 多像素光子计数器在单光子探测中的应用[J]. 光学 精密工程,2011,19(5):972-976.

- HAN S L, GUO J, LIU H B, et al. . Application of multi-pixel photon counters to single photon detection [J]. Opt. Precision Eng., 2011, 19(5):972-976 (in Chinese)
- [4] 陈文洋, 邹明强, 刘峰, 等. 化学发光检测光子计数的统计特性[J]. 发光学报, 2015, 36(7):854-859.

 CHEN W Y, ZOU M Q, LIU F, et al.. Photon counting statistical analysis for chemiluminescence detection[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2015, 36(7):854-859. (in Chinese)
- [5] 章海锋,马力,刘少斌. 时变磁化等离子体光子晶体的禁带特性[J]. 发光学报,2009,30(2):142-146.

 ZHANG H F, MA L, LIU SH B. The forbidden band gap of time-varying magnetized plasma photonic crystals[J]. *Chinese Journal of Luminescence*,2009,30(2):142-146. (in Chinese)
- [6] 苏安,张宁.单负材料—维光子晶体的透射谱特性[J]. 发光学报,2010,31(3):439-444.

 SU A,ZHANG N. Transmission spectrum characteristics of single-negative materials with one-dimensional photonic crystal [J]. Chinese Journal of Luminescence, 2010,31(3):439-444. (in Chinese)
- [7] 刘桢,沈冬,王骁乾,等. 蓝相液晶材料与光子学器件研究进展[J]. 液晶与显示,2017,32(5):325-338.

 LIU ZH,SHEN D,WANG X Q, et al.. Progresses on the researches of blue phase liquid crystal materials and photonic devices[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays,2017,32(5):325-338. (in Chinese)
- [8] 杜木青, 张伶莉, 刘永军. 液晶及其不同填充结构对光子晶体光纤传输特性的影响[J]. 液晶与显示, 2018, 33(2): 116-122.

 DU M Q, ZHANG L L, LIU Y J. Effect of liquid crystal and its different filling structure on the transmission properties of photonic crystal fiber[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2018, 33(2):116-122. (in Chinese)
- [9] LAMPTON M, PARESCE F. The ranicon: a resistive anode image converter [J]. Review of Scientific Instruments, 1974, 45 (9):1098-1105.
- [10] SIEGMUND O H W, LAMPTON M, CHAKRABARTI J B S, et al.. Wedge and strip image readout systems for photon-counting detectors in space astronomy [J]. Journal of the Optical Society of America A, 1986, 3(12);2139-2145.
- [11] KASLE D B, MORGAN J S. High-resolution decoding of multianode microchannel array detectors [J]. *Proceedings of SPIE*, 1991, 1549;52-58.
- [12] WILLIAMS M B. A photon-counting imaging detector using mcps with delay line readout [D]. Virginia; University of Virginia, 1990:5373.
- [13] FRASER G W. X- and γ-ray imaging using microchannel plates [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 1984, 221(1):115-130.
- [14] GOTT R, PARKES W, POUNDS K A. The use of channel multipliem arrays for one and two dimensional X-ray image dissection [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1970, 17(3) 367-373.
- [15] WIZA J L, HENKEL P R, ROY R L. Improved microchannel plate performance with a resistive anode encoder [J]. Review of Scientific Instruments, 1977, 48(9):1217-1218.

作者简介:



何玲平(1982—),男,汉族,江西省新余市,现在长春光学精密机械与物理研究所工作,主要从事短波光学空间仪器研制、光子计数成像探测技术等方面的研究。E-mail:help@ciomp.ac.cn