

Vernier 阳极设计与成像模拟

赵爱荣^{1,2}, 尼启良^{1*}, 宋克非

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. 中国科学院大学, 北京 100049

摘 要 光子计数成像探测器作为探测微弱光的重要手段, 由微通道板, 解码阳极以及后续的读出电路组成, 其中解码阳极的性能直接影响着探测器的成像质量。作为一种电荷分割型阳极, Vernier 阳极利用周期性的正弦电极区域替代了楔条形阳极(WSA)的线性电极, 可获得高的成像分辨率和大的电极活动区域。根据 Vernier 阳极的设计原理对 Vernier 阳极进行了仿真和设计, 首先, 介绍了矢量形式的阳极解码, 确定了阳极设计参量为阳极周期长度, 电极振幅及电极波长; 其次, 分析了各阳极设计参量对探测器成像的影响, 利用 Labview 软件分别模拟了电子云, Vernier 阳极板以及其相互作用成像情况, 确定了 Vernier 阳极周期长度与粗调波长之间的关系以及设计参数一定时, 成像达到最佳的电子云大小, 依照模拟结果和实际的加工条件, 设计和制备了周期为 $891\ \mu\text{m}$, 绝缘沟道为 $25\ \mu\text{m}$, 振幅为 $50\ \mu\text{m}$, 粗调数为 5 的九路 Vernier 阳极。

关键词 Vernier 阳极; 光子计数成像探测器; 微通道板; 紫外; Labview 仿真

中图分类号: O434.12 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2015)12-3334-05

引 言

基于微通道板(MCP)的位置灵敏阳极探测器具有高信噪比、高探测灵敏度、宽动态范围、较好的抗漂移性等优点, 在单光子成像方面拥有无法比拟的优势, 已经被广泛的应用于空间 X 射线、高能带电粒子、近红外、可见光、紫外光等多领域的成像探测。

按照位置敏感方式, 位置灵敏阳极探测器^[1]可以分为离散型阳极和连续型阳极, 连续型阳极的分辨率远高于离散型阳极, 连续型阳极可分为阻抗型阳极和电荷分割型阳极, 电荷分割型阳极利用不同电极收集到的电荷量大小来解码事件位置, 包括楔条形阳极^[2], 交叉型阳极^[3]和 Vernier 阳极^[4]。楔条形阳极(WSA)^[2]由于其简单的电路输出系统, 良好的分辨率, 得到了广泛的应用, 但是也存在局限性, 它需要在位置分辨率和最大计数之间权衡, 并且它是线性电极, 从根本上限制了成像。

Vernier 阳极^[5]作为一种电荷分割型阳极, 利用周期性的正弦电极区域替代了 WSA 的线性电极, 有效地克服了 WSA 的线性电极动态范围小的局限性, 消除了由于线性分

割导致的固定图形噪声, 可以大大提高成像分辨率。

目前, 中国科学院西安光机所对 Vernier 阳极进行了详细研究, 取得了较好的研究成果^[5-6], 所研制的开口型 MCP 的金属 Vernier 阳极探测器分辨率已能达到 $100\ \mu\text{m}$, 但只是对解码原理做了介绍, 没有给出详细的阳极设计原则; 国外报道的开口型 MCP 感应电荷 Vernier 阳极探测器的分辨率能达到 $10\ \mu\text{m}$ ^[7-8], 也仅是给出了结果, 没有说明感应电荷 Vernier 阳极的设计原理及获得高分辨率的方法。本文利用矢量方法给出了 Vernier 阳极解码原理, 利用 Labview 软件模拟 Vernier 阳极成像, 得到阳极设计参数之间的关系以及阳极与电子云之间的关系, 根据模拟结果, 设计并制备了 Vernier 阳极。

1 位敏阳极探测器结构

位敏阳极探测器包括工作在脉冲计数模式下的 MCP 堆, 位置敏感阳极及其位置读出电路, 如图 1 所示。在单光子计数模式下, 工作在饱和增益模式的 MCP 堆通过 2 片 V 型级联可获得 $10^6 \sim 10^7$ 的电子增益, 3 片 Z 型级联可获得 $10^7 \sim 10^8$ 的电子增益。探测器的工作原理为光子入射到镀有

收稿日期: 2014-07-01, 修订日期: 2014-11-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(61275152, 61475154)资助

作者简介: 赵爱荣, 1987 年生, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士研究生

e-mail: airong_zhao@hotmail.com

* 通讯联系人 e-mail: niqiliang@hotmail.com

光电阴极的 MCP 上, 阴极将其转换成光电子, 经过 MCP 堆的电子倍增在 MCP 堆的输出端产生电子云, 电子云团在静电场作用下到达阳极, 经过阳极的分割产生电荷脉冲, 再由后面的位置读出电路与图像采集软件对这些脉冲进行放大、整形、解码来确定感应电子云的质心位置, 即入射的光子位置。

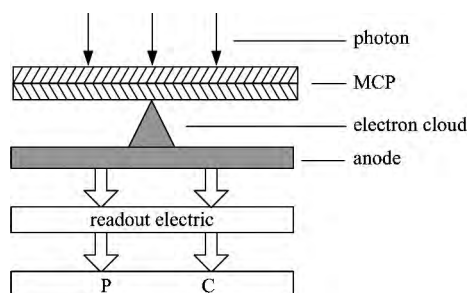


Fig 1 Sketch of anode photon counting detection system

2 Vernier 阳极解码原理

九电极二维 Vernier 阳极结构简图如图 2(a) 所示, 为了阐明其解码原理仅给出一个周期, 图中的实线表示绝缘沟道, 绝缘沟道之间的部分代表金属电极。真实的 Vernier 阳极由多个周期沿 y 轴方向水平排列, 每个周期分为宽度相等的三组, 每组包含三个电极, 这三个电极的宽度以相同的波长沿 x 方向正弦变化, 但相位相差 120° 。每组三个电极上收集的电荷比值可以用来确定一个相位值, 该相位值是周期性变化的, 相位值给出了一个周期内的“精位置”, 而三组确定出来的三个相位值组合提供出光子在哪个周期内, 即“粗位置”, 二者结合可以用于确定光子的位置。每组相位 θ 的变化与光子位置坐标成线性, 变化的方向如图 2(b) 所示, 分别为 $\vec{A}$, $\vec{B}$, $\vec{C}$, 简化为图 2(c)。

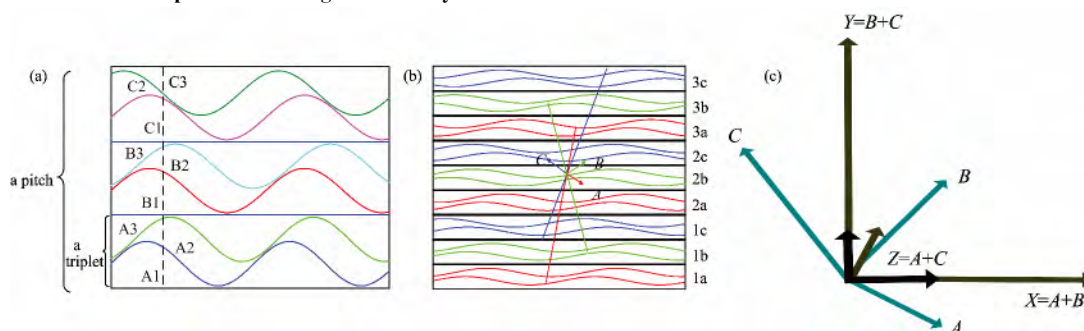


Fig 2 (a) schematic of Vernier anode with a pitch; (b) three pitches showing phase variation; (c) vectors of the triplet phase

令 $\vec{X} = \vec{A} + \vec{B}$, $\vec{Y} = \vec{B} + \vec{C}$, $\vec{Z} = \vec{A} + \vec{C}$, $Z' = |\vec{A} + \vec{C} - \vec{X}/mn - \vec{Y}/n|$, 其中 $\vec{X}$, $\vec{Y}$ 为沿着 x , y 方向的相位变化, m , n 为沿 x , y 方向的相位变化的周期数, 即粗调数, $\vec{Z}$ 为在整个阳极

平面的相位变化, Z' 为每个粗调像素对应的固定的值, 随着粗调像素的增加而增加, 相位值变化如图 3 所示。

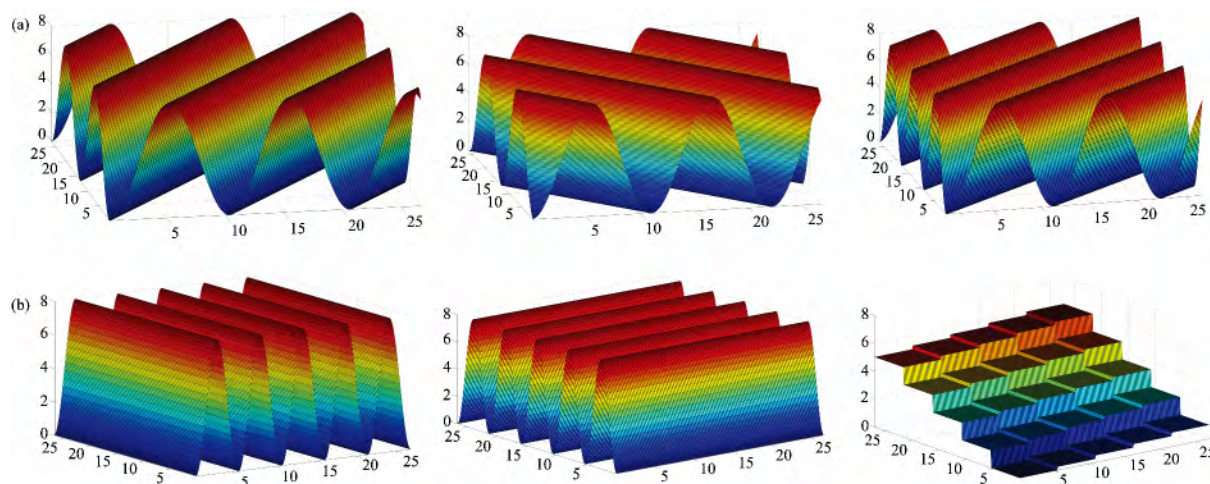


Fig 3 (a) the variation of the phases A, B, C with position; (b) the variation of the phases X, Y with position and the value of Z'

$\vec{A}$, $\vec{B}$, $\vec{C}$ 的值分别为

$$\vec{A} = \left(\frac{mn+1}{2mn}, -\frac{n-1}{2n} \right) \quad (1)$$

$$\vec{B} = \left(\frac{mn-1}{2mn}, \frac{n-1}{2n} \right) \quad (2)$$

$$\vec{C} = \left(\frac{mn-1}{2mn}, \frac{n+1}{2n} \right) \quad (3)$$

相应的波长值分别为

$$\lambda_A = \frac{\lambda}{\sqrt{\left(\frac{nm+1}{2nm}\right)^2 + \left(\frac{n-1}{2n}\right)^2}} \quad (4)$$

$$\lambda_B = \frac{\lambda}{\sqrt{\left(\frac{nm-1}{2nm}\right)^2 + \left(\frac{n-1}{2n}\right)^2}} \quad (5)$$

$$\lambda_C = \frac{\lambda}{\sqrt{\left(\frac{nm+1}{2nm}\right)^2 + \left(\frac{n+1}{2n}\right)^2}} \quad (6)$$

其中 $\lambda = \frac{L_x}{m} = \frac{L_y}{n}$ 是粗调波长。 L_x, L_y 为 x, y 方向阳极的总宽度。

电极宽度为

$$A_1 = o + a \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda_A} x + \varphi\right) \quad (7)$$

其中, o 为产生正的电极的位置偏移, a 为电极的正弦振幅, φ 为绝缘沟道初始相位, λ_A 为电极波长。由此可见, 需要对周期长度、振幅大小以及波长进行设计, 而式(4)~式(6)显示的波长主要与粗调波长有关, 因此, 对 Vernier 阳极的设计主要是确定粗调波长 λ 、周期长度 p 、电极正弦振幅大小 a 等几个参数。

3 Vernier 阳极参数确定

3.1 电极正弦振幅的确定

由式(7)可知, 当电极的位置偏移等于电极的正弦振幅即 $o=a$ 时, 此时 A_1 电极的动态范围最大, 为总电极面积的 $1/9$ 。在实际的设计中, 为了保证电极的连续性, 要求 $o>a$, 即存在最小阳极宽度 c , 使得 $c=o-a>0$ 。最小电极宽度要在电极电容和电极动态范围之间权衡, 最小电极宽度越小, 电极的电容越大, 而最小电极宽度越大, 电极的动态范围越小。

3.2 周期长度与粗调波长的确定以及电子云大小的确定

Vernier 阳极的粗调波长由电子云大小决定, 而电子云大小由周期长度控制^[7]。为了研究周期长度与粗调波长的比值以及其与电子云大小的关系, 利用 Labview 8.5 软件对 Vernier 阳极的成像进行了模拟。模型构建分为如下几个步骤:

(1) 模拟 Vernier 阳极面板。根据阳极设计原则, 利用二维数组分别对九路电极进行描述, 在电极区域内二维数组元素置 1, 其余区域置 0。如图 4(a) 为 5 个周期的九路 Vernier 阳极面板。模拟的阳极数组大小为 445×2673 , 周期长度为 89.1, 粗调波长为 534.6。

(2) 对降落到阳极平面的电子云电荷分布进行模拟。由于从 MCP 扩散后的电子云的电荷分布不均匀, 降落到阳极平面的电子云电荷分布采用高斯分布描述。图 4(b) 显示质心坐标为 (300, 300)、半径为 300 的电子云。

(3) 建立如图 4(c) 所示的成像目标仿真模型, 模型为 11×11 的目标点阵, 点与点的间隔为 10。

(4) 设计算法, 将仿真模型通过电子云投射到阳极面板上, 大量采集光子, 得到阳极上的成像。

阳极结构复杂, 完全模拟十分困难, 建立阳极模型时忽略了绝缘沟道宽度, 且使得正弦振幅等于 $1/9$ 周期长度, 即最小阳极宽度为 0, 由于数据量较大, 只对 8 个周期进行了仿真, 得到了 712×712 的阳极平面。分别对周期长度与粗调波长比值为 $1/4, 1/6, 1/10$ 进行成像。当比值为 $1/6$ 时, 此时周期长度为 148.5, 粗调波长为 891, 成像效果最佳, 见图 5(b); 粗调波长不变, 改变周期长度为 222.75, 使得比值为 $1/4$, 此时成像产生扭曲, 见图 6(a)。周期长度不变, 改变粗调波长为 594, 使得比值为 $1/4$, 此时点阵的水平坐标基本不变, 而竖直坐标产生偏移, 见图 6(b)。相对于 $1/6$ 比值情况, 该周期长度, 电子云大小没有变化, 可能原因为粗调波长太小, 模拟时分精度不够, 导致电子云取样不完全。周期长度与粗调波长比为 $1/10$, 周期长度为 148.5, 波长为 1485, 此时产生的图像畸变较小, 见图 6(c)。

对比图 5(a)~(c) 可以看出, 当电子云半径为 150, 即覆盖 2 个周期时, 成像产生畸变, 当电子云半径为 320 时, 成像边缘有扭曲, 当电子云半径为 300, 即覆盖 4 个周期时, 成像达到最佳。

由仿真结果可以看出, 当周期长度与电极波长比约为 $1/6$, 电子云覆盖 4 个周期时, 成像效果较好; 比值为 $1/4$ 时, 周期长度过大, 成像扭曲, 电极波长过小, 成像位置偏移; 比值为 $1/10$ 时, 成像畸变较小, 但是需要更大的电子云, 减小了阳极有效面积。

很多实际的因素限制了最小的周期长度。

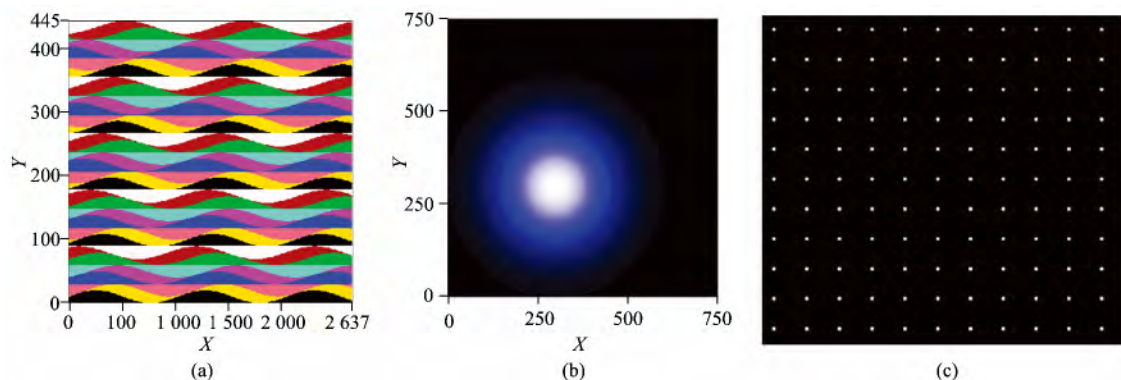


Fig 4 (a): Simulated Vernier anode with five pitches; (b): Simulated electron cloud; (c): Simulated target in lattice

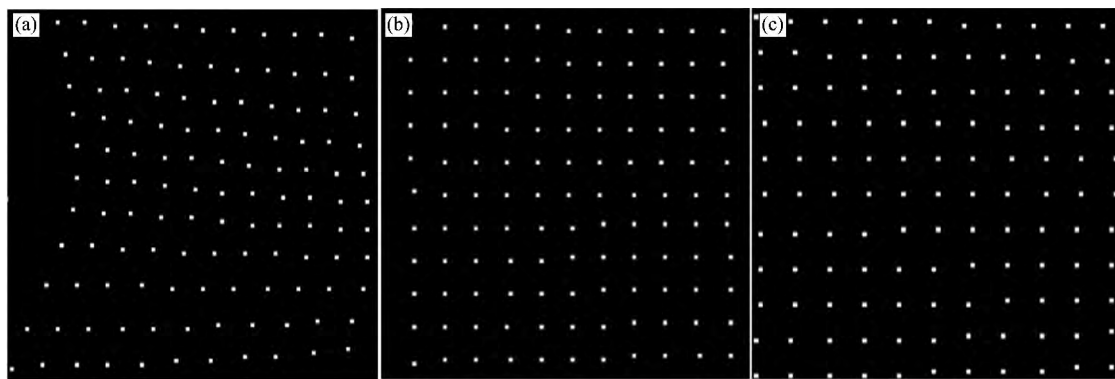


Fig 5 Pitch/coarse wavelength equals 1/6, pitch is 148.5, wavelength is 891.0

The radius of the electron cloud is 150 (a), 300 (b), 320 (c)

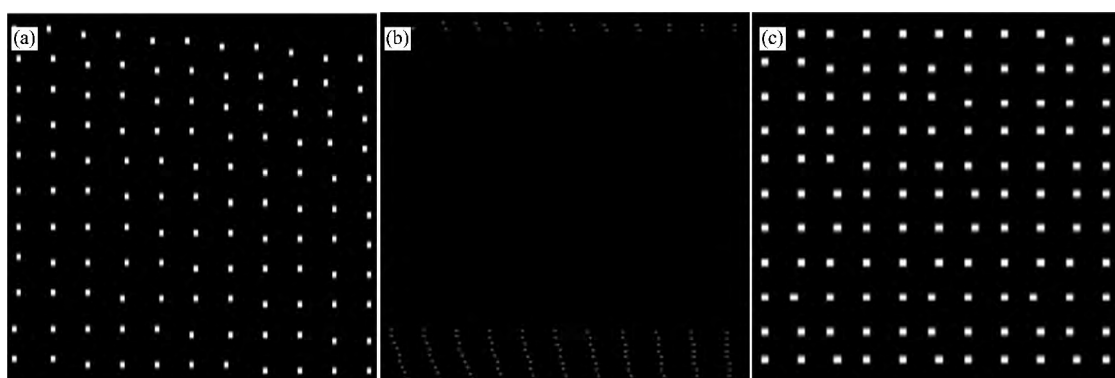


Fig 6 (a): Pitch/coarse wavelength equals 1/4, pitch is 222.75, wavelength is 891.0; (b): Pitch/coarse wavelength equals 1/4, pitch is 148.5, wavelength is 594.0; (c): Pitch/coarse wavelength equals 1/10, pitch is 148.5, wavelength is 1485.0

(1) 随着周期长度的减小, 电极间电容将会增加, 将增加电子噪声, 降低位置分辨率。

(2) 周期长度减小, 制作面板时的机械错误会增加, 激光技术对于电极宽度有一定要求。

(3) 利用引线键合技术来使得电子互连, 引线键合技术对电极宽度有一定要求。

根据解码原则, 模拟结果以及实际的加工技术, 设计了九路 Vernier 阳极, 在厚度为 1 mm 的石英上镀铜, 阳极周期长度为 891 μm , 绝缘宽度为 25 μm , 有效振幅为 50 μm , 周期数 $m=n=5$ 。图 7(a)和(b)分别为设计、加工的 Vernier 阳极面板。在 400 倍的显微镜下对加工好的阳极面板进行了检查, 阳极结构完好, 没有毛刺现象。

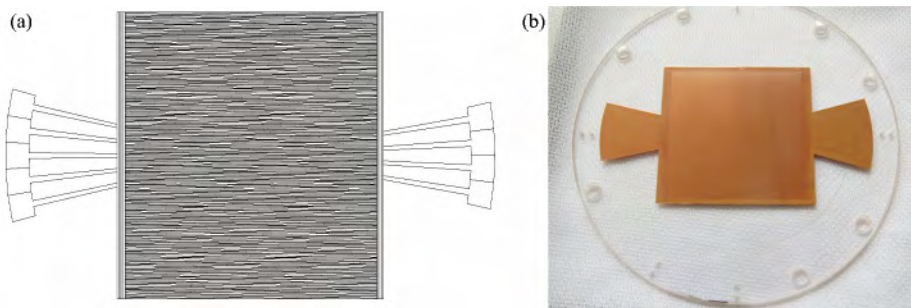


Fig 7 (a): Designed Vernier anode; (b): Developed Vernier anode

4 结 论

采用矢量方法对 Vernier 阳极解码进行说明, 指出阳极设计主要是对粗调波长, 周期长度以及正弦振幅进行设计, 利用 Labview8.5 软件对 Vernier 阳极探测器成像进行仿真,

分别探究 Vernier 阳极周期长度与粗调波长比值为 1/4, 1/6, 1/10 时的探测器成像情况, 由仿真结果可以看出, 当阳极周期长度与粗调波长比值为 1/6, 电子云覆盖 4 个阳极周期时, 成像达到最佳。根据仿真结果以及实际的加工技术, 设计并制备了周期长度为 891 μm , 绝缘宽度为 25 μm , 有效振幅为 50 μm , 周期数 $m=n=5$ 的九路 Vernier 阳极。

References

- [1] Martin C, Anger H O, Lampton M. Rev. Sci. Instrum, 1981, 52(7): 1067.
- [2] ZHU Xiang-ping, ZHAO Bao-sheng, LIU Yong-an(朱香平, 赵宝升, 刘永安). Acta Optica Sinica(光学学报), 2008, 10(28): 1925.
- [3] Tremsin A S, Siegmund O H W, Vallerger J V, et al. Proc. SPIE, High Energy, Optical, and Infrared Detectors for Astronomy II, 2006, 6276: 627616.
- [4] Lapington J S, Sanderson B. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2002, 477: 250.
- [5] Yang Hao, Zhao Baosheng. Science China, 2011, 54: 1943.
- [6] Yang Hao, Zhao Baosheng, Yan Qiurong. Science China, 2013, 56(8): 1472.
- [7] Lapington J S, Sanderson B. Proc. SPIE, Instrumentation for UV/EUV Astronomy and Solar Missions, 2000, 4139: 242.
- [8] Lapington J S, Sanderson B, Worth B C. Proc. SPIE, EUV, X-Ray, and Gamma-Ray Instrumentation for Astronomy IX, 1998, 3445: 535.

Vernier Anode Design and Image Simulation

ZHAO Ai-rong^{1,2}, NI Qi-liang^{1*}, SONG Ke-fei

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 Based-MCP position-sensitive anode photon-counting imaging detector is good at detecting extremely faint light, which includes micro-channel plate (MCP), position-sensitive anode and readout, and the performances of these detectors are mainly decided by the position-sensitive anode. As a charge division anode, Vernier anode using cyclically varying electrode areas which replaces the linearly varying electrodes of wedge-strip anode can get better resolution and greater electrode dynamic range. Simulation and design of the Vernier anode based on Vernier's decode principle are given here. Firstly, we introduce the decode and design principle of Vernier anode with nine electrodes in vector way, and get the design parameters which are the pitch, amplitude and the coarse wavelength of electrode. Secondly, we analyze the effect of every design parameters to the imaging of the detector. We simulate the electron cloud, the Vernier anode and the detector imaging using Labview software and get the relationship between the pitch and the coarse wavelength of the anode. Simultaneously, we get the corresponding electron cloud for the designing parameters. Based on the result of the simulation and the practical machining demand, a nine electrodes Vernier anode was designed and fabricated which has a pitch of 891 μm , insulation width of 25 μm , amplitude of 50 μm , coarse pixel numbers of 5.

Keywords Vernier anode; photon-counting imaging detector; micro-channel plate (MCP); UV band; Labview simulation

(Received Jul. 1, 2014; accepted Nov. 5, 2014)

* Corresponding author