

# 光子计数成像探测器位敏阳极研究

刘永安<sup>1,2</sup>, 李林森<sup>1,2</sup>, 刘 哲<sup>1</sup>, 强鹏飞<sup>1,2</sup>, 刘 舵<sup>1,2</sup>, 盛立志<sup>1</sup>, 田进寿<sup>1</sup>, 赵宝升<sup>1</sup>

<sup>1</sup>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, 陕西 西安 710119;

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 楔条形位敏阳极属于电荷分割型阳极,其在光子计数成像探测器中的作用是对光子事件进行位置解码,阳极性能参数对探测器的成像性能有重要影响。对楔条形位敏阳极的极间电容进行研究,通过理论模型得到了阳极极间电容的计算表达式;设计并制作了不同参数的阳极面板,测试分析了阳极周期长度、绝缘沟道宽度、阳极收集面积和衬底材料等因素与阳极极间电容间的关系。阳极极间电容测试结果与理论计算值相符,极间电容计算值与测试值之间的偏差在 10% 以内。

**关键词** 探测器; 光子计数成像; 楔条形阳极; 极间电容; 空间分辨率

**中图分类号** TN23; O434.2 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201737.0404001

## Study on Position-Sensitive Anode in Photon Counting Imaging Detector

Liu Yongan<sup>1,2</sup>, Li Linsen<sup>1,2</sup>, Liu Zhe<sup>1</sup>, Qiang Pengfei<sup>1,2</sup>, Liu Duo<sup>1,2</sup>,  
Sheng Lizhi<sup>1</sup>, Tian Jinshou<sup>1</sup>, Zhao Baosheng<sup>1</sup>

<sup>1</sup> State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China;

<sup>2</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** Wedge and strip anode(WSA) is one of charge division anodes. In the photon counting imaging detector, the role of the WSA is to decode the incident position of photon events. The anode performance parameters have an important influence on the imaging performance of the detector. The inter-electrode capacitance of WSA is studied, and its calculation formula is obtained by the theoretical model. The WSA panel with different parameters is designed and prepared. The relationship between cycle length, insulation gap width, anode collecting area, substrate material and the anode inter-electrode capacitance is analyzed. Test results show that the inter-electrode capacitance is in accordance with the theoretical calculation result and the deviation between calculated value and test value is within 10%.

**Key words** detectors; photon counting imaging; wedge and strip anode; inter-electrode capacitance; spatial resolution

**OCIS codes** 040.5160; 250.0040; 040.7190

## 1 引 言

基于微通道板(MCP)和楔条形阳极(WSA)的光子计数成像探测器具有分辨率高、线性性能好以及易于实施等优点,其被广泛应用于深空探测、生物超微弱发光、环境辐射检测等领域<sup>[1-3]</sup>。楔形(W)、条纹(S)和之字形电极(Z)分割得到的电荷量与电荷云中心在阳极上的相应位置呈线性关系,这是楔条形阳极探测器的工作原理,较详细的工作原理参看文献<sup>[4-7]</sup>。

WSA 探测器的空间分辨率性能与多个因素有关,这些因素主要包括光阴极噪声、微通道板性能、位敏

**收稿日期:** 2016-10-08; **收到修改稿日期:** 2016-12-02

**基金项目:** 国家自然科学基金(61471357,10878005)

**作者简介:** 刘永安(1982—),男,博士研究生,助理研究员,主要从事光电成像技术方面的研究。E-mail: liuya@opt.ac.cn

**导师简介:** 田进寿(1970—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事超快诊断技术、光电成像技术方面的研究。

E-mail: tianjs@opt.ac.cn

阳极分布噪声、读出电子学噪声以及探测器结构参数等<sup>[8]</sup>,其中,读出电子学噪声是影响楔条形阳极探测器性能的重要因素。读出电子学噪声主要来自电荷灵敏前置放大器的噪声,由于位敏阳极输出的电荷信号直接进入读出电子学的电荷灵敏前置放大器,前放的电子噪声与位敏阳极各电极间的电容密切相关。较大的极间电容会导致电子读出电路的噪声相应增大,进而导致探测器空间分辨率等性能变差。因此,通过优化位敏阳极参数来减小阳极极间电容是探测器优化的一种重要途径,它可以有效降低电子噪声,提高光子计数成像探测器系统的空间分辨率。

本文对 WSA 位敏阳极极间电容及其影响因素进行了研究,通过简化模型得到了圆形 WSA 极间电容的近似表达式;设计并制作了不同阳极周期长度、绝缘沟道宽度、阳极收集面积和衬底材料等的位敏阳极,实验测试结果与理论相符。这对优化阳极设计、减小阳极的极间电容进而提高探测器性能具有重要意义。

## 2 楔条形阳极的极间电容

WSA 属于电荷分割型阳极,三个电极共面并且相互交错,楔形、条纹以及之字形电极通过电极宽度的变化来得到事件的位置信息,如图 1 所示<sup>[4-7]</sup>,其中  $\epsilon_r$  为衬底相对介电常数, $h$  为阳极衬底厚度。如果将电极宽度和长度的连续变化考虑进去,在理论上计算 WSA 的极间电容是一个相当复杂的问题。为了研究阳极的极间电容及其影响因素,可通过模型简化来求解极间电容。由于阳极具有周期性,且阳极每一周期长度均包含有 1 个 W 电极宽度、1 个 S 电极宽度、2 个 Z 电极宽度和 4 个绝缘沟道宽度  $g$ 。为了便于计算阳极的极间电容,可将阳极所有周期中电极长度和宽度分别作平均等效。WSA 电极周期近似如图 2 所示,所有周期中的平均电极长度设为  $l_{ave}$ ,则单个周期中 W 电极和 S 电极长度均为  $l_{ave}$ ,Z 电极长度约为  $2l_{ave}$ ,阳极中各电极的总长度分别为单个周期中电极长度的  $N$  倍( $N$  为周期数)。同时,根据阳极设计中的各电极面积关系还可得到各电极的等效宽度。于是,W(或 S)电极和 Z 电极间电容可等效为 1 个周期中 W(或 S)等效电极与 Z 等效电极间电容的  $N$  倍。

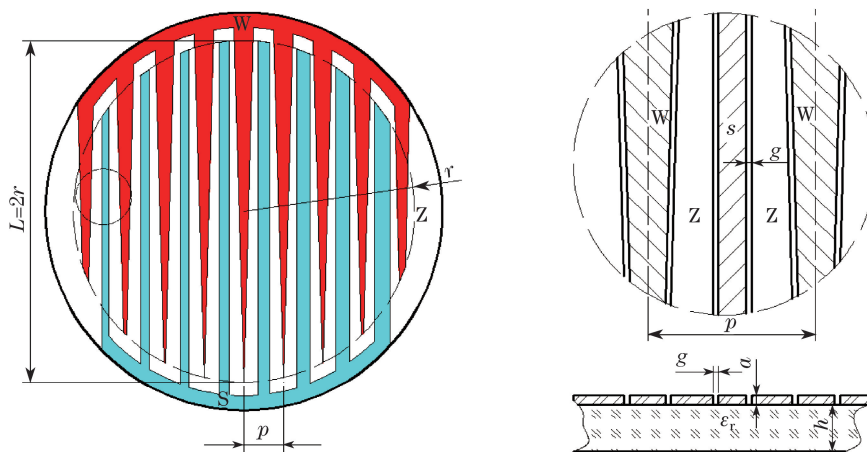


图 1 WSA 示意图

Fig. 1 Schematic of WSA

由图 1 可知,阳极电极长度一般远大于绝缘沟道宽度,W(或 S)电极与 Z 电极间距离为绝缘沟道宽度  $g$ ,电极厚度为  $a$ 。根据文献<sup>[8]</sup>,两平行共面电极极间电容可以看作由电极间线电容和条电容两部分组成。这里,线电容即为两平行圆柱体电容,条电容为两无厚度共面平行电极电容。根据等效模型,两平行圆柱体间距离为  $g$ ,圆柱体直径为  $a$ ,两无厚度平行条电极间距为  $g$ 。

由图 1 和图 2 可知,阳极的有效收集区域直径  $L$ ( $r$  为半径)一般远远大于阳极的周期长度  $p$ ,每一个周期内 W 和 S 电极长度近似相等,Z 电极长度为 W(或 S)电极长度的两倍。对于圆形 WSA,忽略绝缘沟道宽度时,阳极收集区域面积近似为阳极中所有电极面积之和,有

$$Nl_{ave}p = \pi r^2, \quad (1)$$

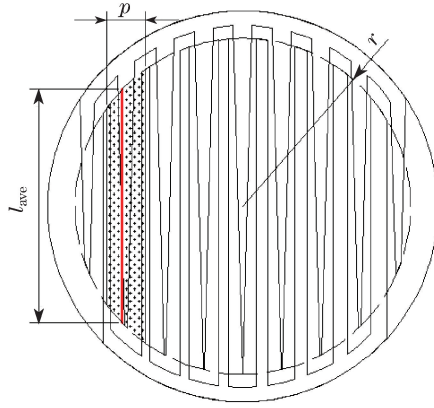


图 2 WSA 周期近似示意图

Fig. 2 Schematic of WSA under periodic approximation

式中  $N \approx \frac{L}{p}$ 。

可得到 W 电极和 S 电极的电极长度近似相等,即

$$l_w \approx l_s = Nl_{ave} = \frac{\pi r^2}{p} = \frac{\pi L^2}{4p}, \quad (2)$$

Z 电极长度近似为 W 或 S 电极长度的两倍,即

$$l_z \approx 2l_w \approx 2l_s = \frac{\pi L^2}{2p}. \quad (3)$$

因此,由两无线长金属导线间电容<sup>[9]</sup>可得 W 电极与 Z 电极、S 电极与 Z 电极之间的线电容  $C_{line}$  基本相等,即

$$C_{line} = l_{w(s)} \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0}{\ln\left[\frac{g^2 - 2a^2}{2a^2} + \sqrt{\left(\frac{g^2 - 2a^2}{2a^2}\right)^2 - 1}\right]} = \frac{\pi^2 L^2 \epsilon_0 \epsilon}{2p} \frac{1}{\ln\left[\frac{g^2 - 2a^2}{2a^2} + \sqrt{\left(\frac{g^2 - 2a^2}{2a^2}\right)^2 - 1}\right]}, \quad (4)$$

式中  $\epsilon = (\epsilon_r + 1)/2$ ,  $\epsilon_0$  为真空介电常数,  $l_{w(s)}$  为 W(S) 电极的总电极长度。

采用保角变换方法计算两无厚度平行共面电极电容<sup>[10-11]</sup>。一般在阳极设计中, W 电极和 S 电极面积基本相等,且为 Z 电极的一半,根据电极的面积和电极等效长度可得到 W 电极、S 电极和 Z 电极的电极等效宽度基本相等,减去绝缘沟道宽度后为

$$s = \frac{p}{4} - g, \quad (5)$$

式中  $s$  为电极等效宽度。一定厚度衬底上平行电极单位长度的条电容为<sup>[10]</sup>

$$C_1 = \epsilon_0 \left[ \frac{K(k'_0)}{K(k_0)} + \epsilon \frac{K(k')}{K(k)} \right], \quad (6)$$

式中  $K(x)$  为第一类完全椭圆积分,  $k_0 = \frac{g}{2s+g}$ ,  $k'_0 = \sqrt{1-k_0^2}$ ,  $k = \frac{\tanh\left(\frac{\pi g}{4h}\right)}{\tanh\left[\frac{\pi(2s+g)}{4h}\right]}$ ,  $k' = \sqrt{1-k^2}$ 。因此, W

(或 S) 电极和 Z 电极间总的条电容约为

$$C_{strip} = l_{w(s)} C_1 = \frac{\pi\epsilon_0 L^2}{4p} \left[ \frac{K(k'_0)}{K(k_0)} + \epsilon \frac{K(k')}{K(k)} \right]. \quad (7)$$

于是,圆形 WSA 的 W(或 S) 电极与 Z 电极间电容计算公式可表示为

$$C_{wz} \approx C_{sz} = C_{line} + C_{strip} \approx \frac{\pi^2 L^2 \epsilon_0 \epsilon}{2p} \frac{1}{\ln\left[\frac{g^2 - 2a^2}{2a^2} + \sqrt{\left(\frac{g^2 - 2a^2}{2a^2}\right)^2 - 1}\right]} + \frac{\pi\epsilon_0 L^2}{4p} \left[ \frac{K(k'_0)}{K(k_0)} + \epsilon \frac{K(k')}{K(k)} \right]. \quad (8)$$

### 3 实验测试

根据阳极极间电容模型和电容影响因素,分别设计制作了不同参数的阳极,并对相应阳极进行了实验测试,以验证模型并从实验上研究 WSA 极间电容和阳极参数间的关系。

#### 3.1 阳极周期对极间电容的影响

图 3 为制作的两个具有不同阳极周期长度的 WSA。WSA<sub>1</sub> 和 WSA<sub>2</sub> 两阳极基底均为 FR4( $\epsilon_r=4.2$ ),基底厚度为 0.3 mm,阳极有效面积、绝缘沟道宽度和金属膜厚度均一致。其中,WSA<sub>1</sub> 周期长度  $p_1=1$  mm, WSA<sub>2</sub> 周期长度  $p_2=1.2$  mm。利用电极电容计算公式[(8)式]得到的理论值和实验测试得到的测量值见表 1。由表 1 可见,计算的理论和实验测试值相符。在阳极其他各参数相同的条件下,增大阳极周期可减小阳极的极间电容。但是,阳极的周期大小还受到达阳极的电子云尺寸限制,阳极接收到的电子云尺寸小于 2 个周期长度时会出现调制畸变<sup>[12]</sup>。因此,阳极周期并不是越大越好,实际设计时要综合考虑设计需求和探测器结构参数以确定最佳周期长度。

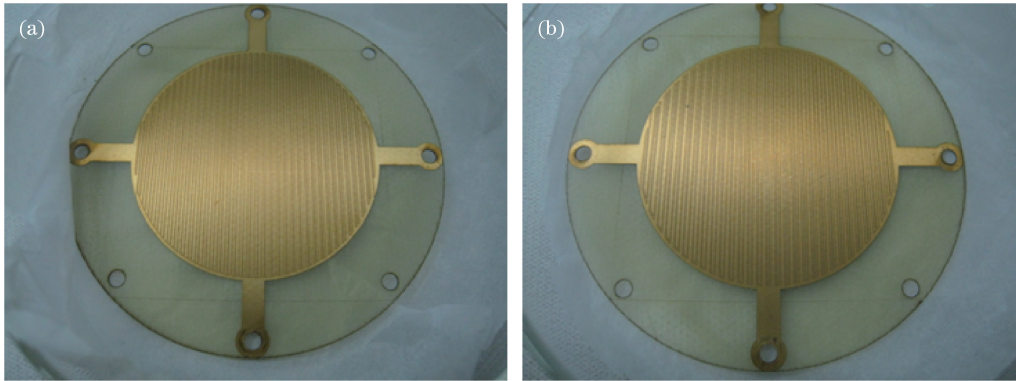


图 3 具有不同周期的 WSA 照片。(a) WSA<sub>1</sub>,  $p_1=1$  mm; (b) WSA<sub>2</sub>,  $p_2=1.2$  mm

Fig. 3 Photographs of WSA with different cycles. (a) WSA<sub>1</sub>,  $p_1=1$  mm; (b) WSA<sub>2</sub>,  $p_2=1.2$  mm

表 1 具有不同阳极周期的极间电容测试结果

Table 1 Test results of inter-electrode capacitance under different anodic cycles

WSA	Measured capacitance /pF			Theoretical capacitance /pF
	$C_{wz}$	$C_{sz}$	$C_{ws}$	$C_{wz}(C_{sz})$
WSA <sub>1</sub> ( $p_1=1.0$ mm)	137.2	131.7	73.0	128.75
WSA <sub>2</sub> ( $p_2=1.2$ mm)	119.1	115.7	63.5	109.05

#### 3.2 绝缘沟道宽度对极间电容的影响

图 4 所示为设计制作的两块具有不同绝缘沟道宽度的位敏阳极。WSA<sub>3</sub> 和 WSA<sub>4</sub> 均采用石英基底( $\epsilon_r=3.7$ ),阳极周期长度、有效收集面积和金属膜层材料及厚度均相同。WSA<sub>3</sub> 的绝缘沟道宽度为 30  $\mu\text{m}$ , WSA<sub>4</sub> 的绝缘沟道宽度为 50  $\mu\text{m}$ 。两阳极极间电容测试和理论计算结果见表 2。由表 2 可以看出,理论计算结果与实验结果相符。由于绝缘沟道宽度的增加,WSA<sub>4</sub> 的极间电容比 WSA<sub>3</sub> 的稍小。从实验结果还可以看出,绝缘沟道参数的改变对两相邻电极(WZ 电极和 SZ 电极)间的极间电容影响较大,对距离较远的相隔电极 W 和 S 的影响较小。但是,增大绝缘沟道宽度又会减小有效电极面积,从而降低探测器的灵敏度和空间分辨率。绝缘沟道宽度有一个较佳范围,根据实际要求,综合考虑阳极设计性能指标和加工工艺能力,绝缘沟道一般取 20~50  $\mu\text{m}$  为宜。

表 2 具有不同绝缘沟道宽度的位敏阳极极间电容测试结果

Table 2 Test results of inter-electrode capacitance under different insulation gap widths

WSA	Measured capacitance /pF			Predicted capacitance /pF
	$C_{wz}$	$C_{sz}$	$C_{ws}$	$C_{wz}(C_{sz})$
WSA <sub>3</sub> ( $g_3=30$ $\mu\text{m}$ )	102.5	102.5	58.6	101.86
WSA <sub>4</sub> ( $g_4=50$ $\mu\text{m}$ )	87.5	88.9	55.8	89.06

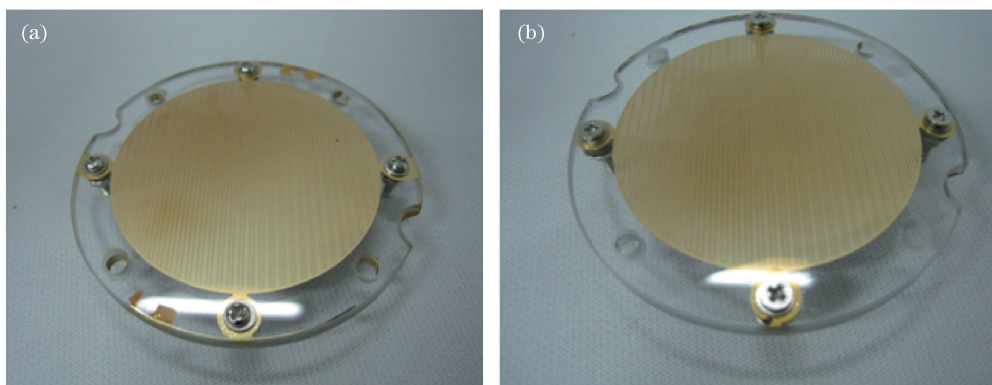


图 4 具有不同绝缘沟道宽度的 WSA 照片。(a) WSA<sub>3</sub>,  $g_3 = 30 \mu\text{m}$ ; (b) WSA<sub>4</sub>,  $g_4 = 50 \mu\text{m}$

Fig. 4 Photographs of WSA with different insulation gap widths. (a) WSA<sub>3</sub>,  $g_3 = 30 \mu\text{m}$ ; (b) WSA<sub>4</sub>,  $g_4 = 50 \mu\text{m}$

### 3.3 阳极收集面积对极间电容的影响

为测试不同收集面积阳极的极间电容,设计并制作了同 3.1 节中 WSA<sub>2</sub> 位敏阳极具有相同周期长度和绝缘沟道宽度的位敏阳极 WSA<sub>5</sub>,如图 5 所示。WSA<sub>5</sub> 的衬底同样为 FR4,基底厚度为 0.15 mm。WSA<sub>2</sub> 有效收集面积的直径为 35 mm, WSA<sub>5</sub> 有效收集面积的直径为 59 mm。对具有较大收集面积的 WSA<sub>5</sub> 进行了极间电容计算和测试,理论计算和实验测试结果见表 3。从测试结果可以看出,理论和实验预期相符。随着收集面积的增大,阳极极间电容迅速增加,这也是具有较大收集面积的 WSA 性能下降的主要原因之一。实际应用中,在满足参数设计要求的前提下,应尽量减小位敏阳极的收集面积,从而减小阳极的极间电容,提高探测器的性能。

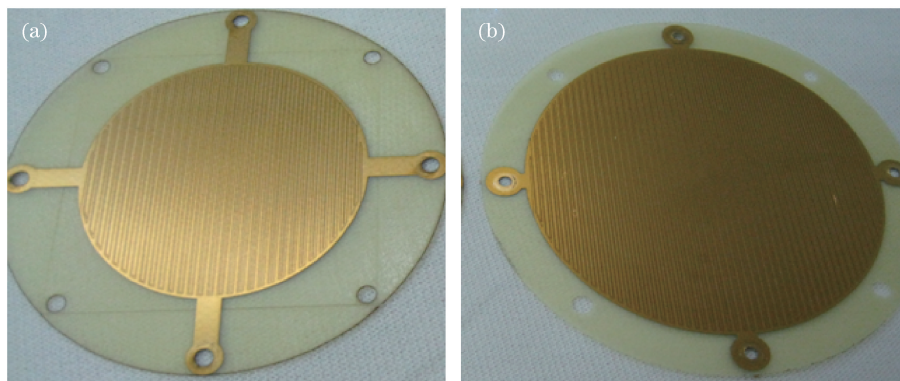


图 5 具有不同收集面积的 WSA 照片。(a) WSA<sub>2</sub>,  $L = 35 \text{ mm}$ ; (b) WSA<sub>5</sub>,  $L = 59 \text{ mm}$

Fig. 5 Photographs of WSA with different collecting areas. (a) WSA<sub>2</sub>,  $L = 35 \text{ mm}$ ; (b) WSA<sub>5</sub>,  $L = 59 \text{ mm}$

表 3 具有不同收集面积的极间电容测试结果

Table 3 Test results of inter-electrode capacitance under different collecting areas

WSA	Measured capacitance /pF			Predicted capacitance /pF
	$C_{wz}$	$C_{sz}$	$C_{ws}$	$C_{wz}(C_{sz})$
WSA <sub>2</sub> ( $L = 35 \text{ mm}$ )	119.1	115.7	63.5	109.05
WSA <sub>5</sub> ( $L = 59 \text{ mm}$ )	281.5	279.1	151.7	288.48

### 3.4 衬底对阳极极间电容的影响

阳极的周期长度、绝缘沟道宽度以及阳极的收集面积等均为阳极的重要设计参数。除了这些设计参数外,位敏阳极的衬底材料及其厚度等也会对阳极的极间电容产生重要影响。为了研究衬底材料对阳极极间电容的影响,同样以 3.1 节中 WSA<sub>2</sub> 作为对比阳极。设计制作了 WSA<sub>6</sub>,该阳极与 WSA<sub>2</sub> 具有完全一致的设计参数,如图 6 所示。两者区别为 WSA<sub>6</sub> 衬底采用石英材料( $\epsilon_r = 3.7$ ),石英基底厚度  $h$  为 2 mm, WSA<sub>6</sub> 衬底的相对介电常数比 WSA<sub>2</sub> 采用的 FR4 材料的介电常数( $\epsilon_r = 4.2$ )要小。表 4 为两者极间电容测试结果,从表 4 可知,采用具有较小介电常数的衬底可以在一定程度上减小阳极的极间电容。

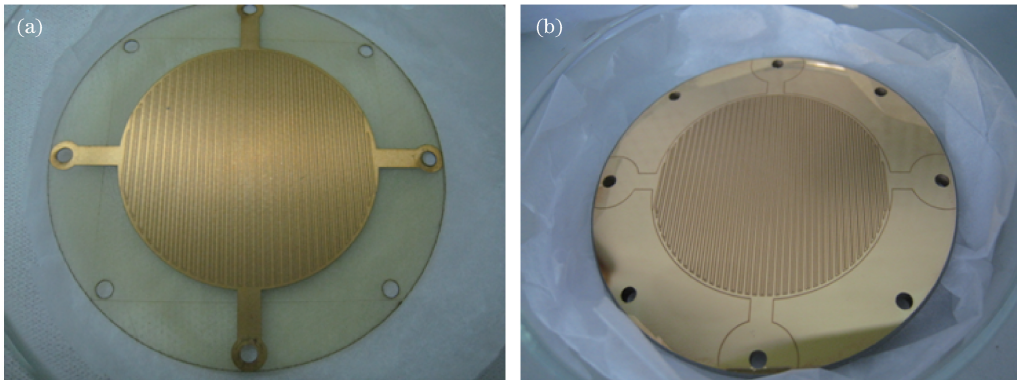


图 6 具有不同衬底的 WSA 照片。(a) WSA<sub>2</sub>; (b) WSA<sub>6</sub>

Fig. 6 Photographs of WSA with different substrates. (a) WSA<sub>2</sub>; (b) WSA<sub>6</sub>

表 4 具有不同衬底的极间电容测试结果

Table 4 Test results of inter-electrode capacitance with different substrates

WSA	Measured capacitance /pF			Predicted capacitance /pF
	$C_{wz}$	$C_{sz}$	$C_{ws}$	$C_{wz}(C_{sz})$
WSA <sub>2</sub> ( $\epsilon_r=4.2, h=0.3$ mm)	119.1	115.7	63.5	109.05
WSA <sub>6</sub> ( $\epsilon_r=3.7, h=2.0$ mm)	103.5	105.1	58.7	95.60

## 4 结 论

对 WSA 的极间电容进行了研究,通过模型简化得到了圆形 WSA 极间电容的计算表达式;分别设计制作了具有不同参数的位敏阳极,研究了各阳极参数与极间电容间的关系。实验结果表明:利用计算公式得到的阳极极间电容值与实际测试值的偏差在 10% 以内,阳极的周期大小、阳极收集面积和绝缘沟道大小对阳极极间电容的影响较大。对阳极极间电容的理论和实验研究,有助于分析阳极各参数对极间电容的影响,指导 WSA 位敏阳极的设计,减小阳极极间电容以提高探测器性能。实际应用中,主要采取以下几个措施来优化 WSA 设计:1)在满足参数要求的情况下,应尽量减小 WSA 的收集面积,有效减小极间电容,提高探测器性能;2)综合考虑探测器结构,根据阳极收集到的电子云尺寸,选取适当的阳极周期长度和绝缘沟道宽度;3)采用介电常数较小的衬底材料。

## 参 考 文 献

- [1] Tian Q G, Wang K D, Shan X, *et al.* A high-sensitivity angle and energy dispersive multichannel electron momentum spectrometer with  $2\pi$  angle range[J]. *Rev Sci Instrum*, 2011, 82(3): 033110.
- [2] Hirvonen L M, Petrášek Z, Suhling K. Wide-field time-correlated single photon counting(TCSPC) microscopy with time resolution below the frame exposure time[J]. *Nucl Instrum Meth A*, 2015, 787: 1-5.
- [3] Gruntman M. Passive optical detection of submillimeter and millimeter size space debris in low Earth orbit[J]. *Acta Astronautica*, 2014, 105(1): 156-170.
- [4] Zhao Feifei, Zhao Baosheng, Zhang Xinghua, *et al.* Properties of germanium thin film and its application in photon counting imaging system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(11) : 3236-3240.  
赵菲菲, 赵宝升, 张兴华, 等. Ge 薄膜特性及其在光子计数成像系统中的应用[J]. *光学学报*, 2009, 29(11): 3236-3240.
- [5] Zhu Xiangping, Zhao Baosheng, Liu Yonggan, *et al.* Experimental study on 30.4 nm extreme ultraviolet imaging detector[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(10): 1925-1929.  
朱香平, 赵宝升, 刘永安, 等. 30.4 nm 极紫外成像探测器的实验研究[J]. *光学学报*, 2008, 28(10): 1925-1929.
- [6] Liu Yonggan, Zhao Feifei, Hu Huijun, *et al.* Properties of photon counting imaging detector with Au photocathode[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(1): 0123002.  
刘永安, 赵菲菲, 胡慧君, 等. 采用金阴极的光子计数成像探测器的性能[J]. *光学学报*, 2011, 31(1): 0123002.

- [7] Yang H, Zhao B S, Liu Y A, *et al.* The resolution estimation of wedge and strip anodes[J]. Rev Sci Instrum, 2012, 83(9): 093107.
- [8] Lapingtona J S, Schwarz H E. The design and manufacture of wedge-strip anode[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1986, 33(1): 288-292.
- [9] Zhang Qing. Exact solution for the capacity of the two infinite long conducting wires[J]. Journal of Anhui University of Technology, 2003, 20(1): 84-86.  
张 清. 两无线长平行直导线间电容的精确解[J]. 安徽工业大学学报, 2003, 20(1): 84-86.
- [10] Gevorgian S, Berg H. Line capacitance and impedance of coplanar-strip waveguides on substrates with multiple dielectric layers[C]. 2001 31st European Microwave Conference, 2001, 31: 153-156.
- [11] Zheng Qiurong, Li Youquan, Zhang Hui, *et al.* Revision of inter-digital capacitance of high impedance ground plane design formulas[J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(12): 2319-2323.  
郑秋容, 李有权, 张 辉, 等. 高阻表面交指形电容设计公式的改进[J]. 电子学报, 2007, 35(12): 2319-2323.
- [12] Liu Yongan, Yan Qiurong, Sheng Lizhi, *et al.* Influence of charge cloud size on performance of UV photon-counting imaging detector[J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(4): 048501.  
刘永安, 鄢秋荣, 盛立志, 等. 电荷云尺寸对紫外光子计数成像探测器性能的影响[J]. 物理学报, 2011, 60(4): 048501.