

文章编号 1004-924X(2014)07-1732-05

## 光子计数探测器感应位敏阳极的电子云扩散

韩素立<sup>1,2</sup>, 陈波<sup>1\*</sup>, 尼启良<sup>1</sup>, 张宏吉<sup>1</sup>

(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:**针对基于感应位敏阳极的光子计数成像探测器中非晶态 Ge( $\alpha$ -Ge)膜的方块电阻对探测器成像性能的影响, 研究了方块电阻的选配范围和方法。由于方块电阻的大小会影响 Ge 膜上的电子云的扩散特性从而影响探测器的计数率和分辨率, 故本文根据菲克(Fick)扩散定律分析了吸收边界条件下非晶态薄膜上电子云的扩散特性。确定了电子云扩散时间与 Ge 膜方块电阻之间的数学关系, 推导获得了探测器高质量成像时非晶态 Ge 膜方块电阻的阻值为  $30 \sim 2700 \text{ M}\Omega/\square$ 。采用具有不同方块电阻的感应位敏阳极进行了实际成像实验, 结果表明: 当 Ge 膜方块电阻在上述范围时, 光子计数探测器在计数率为  $53 \text{ kc/s}$  时分辨率可以达到  $0.5 \text{ mm}$ 。实验结果证明了推导得出的方块电阻选配范围的正确性。

**关键词:**极紫外成像; 光子计数探测器; 感应位敏阳极; Ge 膜电阻; 电子云扩散

**中图分类号:** V447.3; TH724 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142207.1732

## Electron cloud diffusion property of photon counting detector based on induction readout

HAN Su-li<sup>1,2</sup>, CHEN Bo<sup>1\*</sup>, NI Qi-liang<sup>1</sup>, ZHANG Hong-ji<sup>1</sup>

(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)*

\* *Corresponding author, E-mail: chenb@ciomp.ac.cn*

**Abstract:** In consideration of the great influence of the sheet resistance of Ge thin film in a single-photon counting imaging detector on its imaging characteristics, this paper explores the selection of the resistance range. As the resistance values are relative to charge cloud diffusion on the Ge thin film, it will effect the counting rate and resolution ratio of the single-photon counting imaging detector. Therefore, the charge cloud diffusion characteristics on the Ge thin film under condition of absorbing boundary were analyzed based on FICK diffusion law and the relationship of the time of charge cloud diffusion on the thin film and the sheet resistance was calculated by the finite diffusion equation. The analysis results show that the photon counting detector has well spatial resolution and counting rate when the sheet resistance of Ge thin film is between  $30 \text{ M}\Omega/\square$  and  $2700 \text{ M}\Omega/\square$ . The imaging experiments on Ge film anode with different resistance values were performed, and obtained data demonstrate that the resolution of the photo counting detector can reach  $0.5 \text{ mm}$  at counting rate of  $53 \text{ kc/s}$  when sheet resistance of Ge thin film is in the theoretical range, which proves the

收稿日期: 2013-04-24; 修订日期: 2013-05-24.

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(No. 61275152, No. 61077016); 吉林省科技发展计划重大项目(No. 20116013)

validity of resistance value selection range by the proposed method.

**Key words:** ultraviolet imaging; photon counting detector; induced-charge position-sensitive anode; Ge film resistance; electron cloud diffusion

## 1 引言

二维位置灵敏阳极光子计数成像探测器具有灵敏度高、背景噪声低、量子效率高<sup>[1-3]</sup>等优点,可以对极微弱紫外光辐射信号进行成像,被广泛应用于空间探测。光子计数成像探测器由表面镀有光阴极的微通道板、周期性位敏阳极和相关读出电路 3 部分组成<sup>[4-5]</sup>。根据电子云接收方式的不同,光子计数探测器有两种成像方式:一种是经微通道板倍增后的电子云直接落到位敏阳极上进行成像;另外一种为感应读出方式,即电子云落到非晶态 Ge 膜上,在背面的楔条形阳极上感应出电子云进行成像。后一种成像方式中,探测器微通道板倍增的电子云避免了和阳极直接接触<sup>[6]</sup>,能够提高图像稳定性。当光子计数探测器加高压,阳极的电子云信号等工作参数确定时,非晶态 Ge 膜的方块电阻对探测器的成像性能起主要作用。如果 Ge 膜的方块电阻太大,落在 Ge 膜上的电子云难以通过接地电极释放,影响探测器的计数率等性能;如果方块电阻太小,电子云扩散太快会影响探测器的空间分辨率。因此,需要对电子云在非晶态 Ge 膜上的扩散特性展开分析。本文建立了电子云扩散时间与方块电阻之间的数学关系,通过分析确定了 Ge 膜方块电阻的选用范围,从而为研制高成像质量的光子计数探测器提供技术支持。

## 2 基于感应电荷的光子计数成像系统

光子计数成像探测器的系统结构如图 1 所示,该系统包括工作在脉冲计数模式下的微通道板(Micro Channel Plate, MCP)堆、感应电荷楔条形阳极(WSZ)和信号处理系统。电子云首先入射到 Ge 薄膜上,在石英基底另一面的楔条形阳极上感应出电子云。感应电子云经 WSZ 分割产生电荷脉冲,并由读出电路对脉冲进行处理,然后通过质心公式确定电子云的质心位置实现成像。

非晶态 Ge 膜是光子计数探测器的重要组成部分。非晶态 Ge 膜中带尾态和带隙态能够作为陷

阱,当载流子在扩展态中漂移时,会长时间停留在陷阱,因此实际迁移率要比扩展态中自由载流子的迁移率小得多。这些特性能够满足感应位敏阳极光子计数成像探测器对电子云扩散时间的要求。

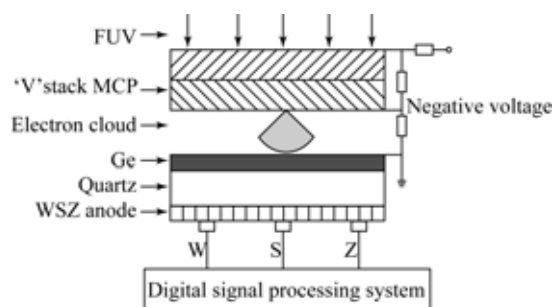


图 1 感应电荷位敏阳极光子计数探测系统简图

Fig. 1 Framework plot of induced charge position sensitive anode photon counting detector

图 2 展示了 X 射线衍射仪测得的磁控溅射制备的 Ge 薄膜大角衍射结果。通过 X 射线大角衍射可以看出,采用的非晶态 Ge 膜没有明显的衍射峰( $20^\circ$ 峰为石英基底衍射峰)。

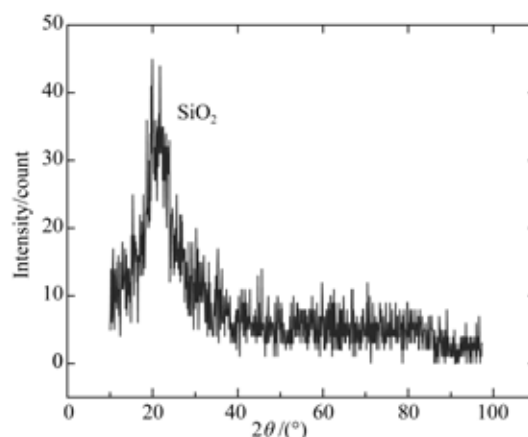


图 2 石英衬底下的大角 X 射线衍射

Fig. 2 XRD pattern of Ge film deposited on quartz glass

## 3 非晶态 Ge 膜电子云扩散特性研究

非晶态 Ge 膜的扩散特性会限制和影响探测器的分辨率和计数率,因此必须对 Ge 膜电子云的扩散时间与方块电阻之间的关系进行研究。

入射到 MCP 堆的光子经光阴极或 Ni-Cr 电极转化成光电子,在高压作用下光电子经过 MCP 倍增形成的电子云大致满足高斯分布。电子云的电荷密度可以近似表示为<sup>[7]</sup>:

$$\sigma(x, y) = \frac{q}{\pi r_i^2} \exp\left[-\frac{(x^2 + y^2)}{r_i^2}\right]. \quad (1)$$

电子云落到 Ge 膜上发生扩散。根据扩散理论中的 Fick 定律,宏观扩散电流  $J_p$  与扩散系数  $D$ 、电场  $F$ 、随时间变化的电子数密度  $n$ 、霍尔迁移率  $u_p$ 、点电荷电量  $q$  的关系为:

$$J_p = J_{dr} + J_{diff} = -qD \frac{dn}{dx} + qu_p n F. \quad (2)$$

电子云产生的总电流密度是漂移电流  $J_{dr}$  和扩散电流  $J_{diff}$  之和。对于方块电阻很大的薄膜样品,扩散起主要作用。式(2)结合连续性方程可以得到扩散方程(Fick 第二定律):

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D \frac{\partial^2 n}{\partial x^2}. \quad (3)$$

假设在  $x=0, t=0$  时,电荷量为  $Q_0$  的脉冲电荷落到 Ge 膜上,式(3)有解为<sup>[8]</sup>:

$$q(x, t) = \frac{Q_0}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{1}{Dt}} \exp\left[-\left(\frac{1}{Dt}\right)x^2\right], \quad (4)$$

其中:  $D$  为有效扩散系数,即化学扩散系数。

$$D = \frac{\partial \ln a_n}{\partial \ln n} D_p, \quad (5)$$

式中:热力学因子  $\partial \ln a_n / \partial \ln n$  可以看成是一个常量,  $a_n$  是材料中的有效电子,  $D_p$  是电子扩散常数。

根据爱因斯坦关系,电子扩散常数由下式决定:

$$D_p = \mu_p \frac{k_B T}{q}, \quad (6)$$

其中:  $k_B$  为波尔兹曼常数,  $\mu_p$  为材料的迁移率。

方块电阻  $R_s$  为:

$$dR_s = \frac{\rho}{dx} = \frac{1}{q\mu_p(x)p(x)dx_1}, \quad (7)$$

其中:  $\mu_p(x)$  为霍尔迁移率,  $p(x)$  为载流子浓度,  $q$  为单位电荷的电荷量,  $x_1$  为薄膜厚度。

由式(5)、式(6)、式(7)得出有效扩散系数与方块电阻的关系为:

$$D = \frac{\partial \ln a_n k_B T}{\partial \ln n} \frac{1}{q p(x) x_1 R_s}. \quad (8)$$

当载流子浓度  $p(x)$ 、温度  $T$  和薄膜厚度  $x_1$  一定时,方块电阻越小,电子在 Ge 膜扩散越快,扩散系数  $D$  越大。采用 Lakeshore 的 7707 霍尔效应测量系统测量厚度约为 12 nm 的 Ge 膜的载流子浓度和霍尔迁移率,结果如表 1 所示。

表 1 霍尔效应测得 Ge 薄膜的性能参数

Tab. 1 Performance parameters of Ge films tested by Hall effect

Field [G]	Resistivity / $(\Omega \cdot \text{cm})$	Hall coefficient / $(\text{cm}^3 \cdot \text{C}^{-1})$	Type	Carrier density / $\text{cm}^{-3}$	Hall mobility / $(\text{cm}^2 \cdot (\text{VS})^{-1})$
2.999 9E+3	1.360 9E+3	5.045 3E+3	$p$	1.237 2E+15	3.675 7E+0
9.000 0E+3	1.362 1E+3	1.532 4E+3	$p$	4.073 4E+15	1.116 4E+0
1.200 0E+4	1.363 0E+3	1.676 6E+3	$p$	3.723 2E+15	1.221 4E+0

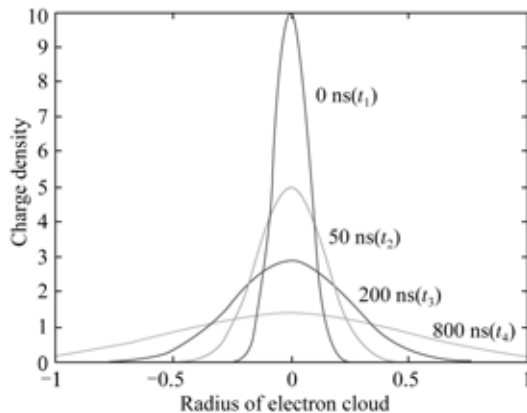


图 4 Ge 膜方块电阻为 200 MΩ/□ 时, Ge 膜上的电子云扩散

Fig. 4 Distribution of electron cloud deposited onto Ge film with  $R_s$  of 200 MΩ/□

根据式(3)和表 1 数据得出电子云在 Ge 膜上扩散随时间的变化曲线,如图 4 所示。

通过进一步建立模型来确定 Ge 膜方块电阻范围,使探测器具有良好的成像效果。

电子云在 Ge 膜上扩散也可以近似等效为图 5 所示的 RC 放电电路<sup>[9]</sup>。其中  $r_m$  是单位长度的阻抗,  $c_m$  是相对电极面积为  $A$  的电容。Ge 膜与电极形成良好的欧姆接触导出电荷,当  $x=L$  时,  $c_m=0$ 。

由单位长度表面电阻  $dr_m = r dx$ , 单位电容  $dC = c dx$ , 可得扩散方程<sup>[10]</sup>:

$$\frac{dI}{dt} = \frac{1}{rc} \frac{d^2 I}{dx^2}. \quad (9)$$

和式(3)类似,式(9)也为一维扩散方程。图

5 中:  $r_m = \frac{R_w}{L}$ ,  $c_m = \frac{C_f}{L} = \frac{L}{R_w D}$ ,  $R_w$  为扩散电阻。

电子云的释放时间为:

$$r_m c_m = 1/D. \quad (10)$$

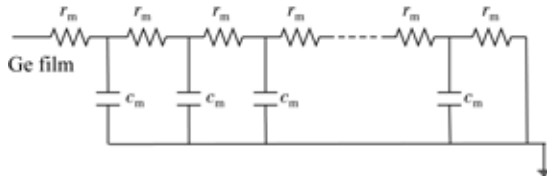


图 5 吸收边界条件下电子云在 Ge 膜上的扩散模型  
Fig. 5 Diffusion model of simple electron cloud on Ge film with absorbing boundary condition

由式(10)可知,电子云的释放时间与 Ge 膜的扩散系数成反比。

为了满足分辨率的要求,单光电子脉冲响应宽度范围内感应到的阳极电子云分布应近似不变。从阳极输出的单个光电子脉冲宽度  $T_{up}$  约为 1.5 ns,此时脉冲释放时间  $t_{up}$  应该满足  $t_{up} \geq 10 T_{up}$ 。由式(8)、式(10)得到最小方块电阻为:

$$R_{smin} = \frac{\partial \ln a_n}{\partial \ln n} \cdot \frac{k_B T}{q} \cdot \frac{t_{up}}{q p(x) x_1}. \quad (11)$$

光子计数探测器最高计数率为  $V_{cts}$ 。为保证 1 s 内电子云能够完全扩散,每个脉冲释放完的时间  $t_{ct}$  应该满足  $t_{ct} \leq 1/V_{cts}$ 。由式(8)、式(10)得到最大方块电阻为:

$$R_{smax} = \frac{\partial \ln a_n k_B T}{\partial \ln n q} \frac{t_{ct}}{q p(x) x_1}. \quad (12)$$

根据式(11)、式(12)选择合适的方块电阻,可使探测器的成像性能最佳。在实际应用中,工作环境(比如高温或低温)会影响薄膜方块电阻的取值,进而影响探测器性能。因此,应选取阻值范围内的中间数值,以获得良好的成像质量。

### 4 光子计数成像探测器成像实验研究

对一实际感应电荷位敏阳极光子计数探测器进行计算分析,将表 1 中 Ge 膜的相关参数代入式(11)进行计算,得到最小方块电阻近似为 30 MΩ/□。如果 Ge 膜的方块电阻小于 30 MΩ/□,电子云扩散太快,会影响探测器的分辨率性能。

光子计数探测器的最高计数率可以达到 100 kc/s。为保证 1 s 内这些脉冲能够完全扩散,

每个计数时间  $t_{count}$  应该满足  $t_{count} \leq 10^{-5}$  s。近似算得  $R_{smax} \approx 2700$  MΩ/□。当电阻大于 2700 MΩ/□时,会导致电子云扩散太慢,后续电子云难以被接收到,从而影响探测器的成像性能。

为了验证上述分析的正确性,用方块电阻不同的 Ge 膜阳极进行实际成像实验。实验中,当计数率较低时(15 kc/s),方块电阻约为 100 MΩ/□、500 MΩ/□ 和方块电阻约为 7 GΩ/□的感应电荷位置灵敏光子计数探测器的分辨率相近。从图 7 可知,探测器可以分辨到 1.26 lp/mm(能分辨出分辨率板上第 0 组第 3 个单元),对应的空间分辨率为 0.79 mm。当计数率较高时(约为 58 kc/s),方块电阻为 100 MΩ/□ 和方块电阻为 500 MΩ/□ 的光子计数探测器可

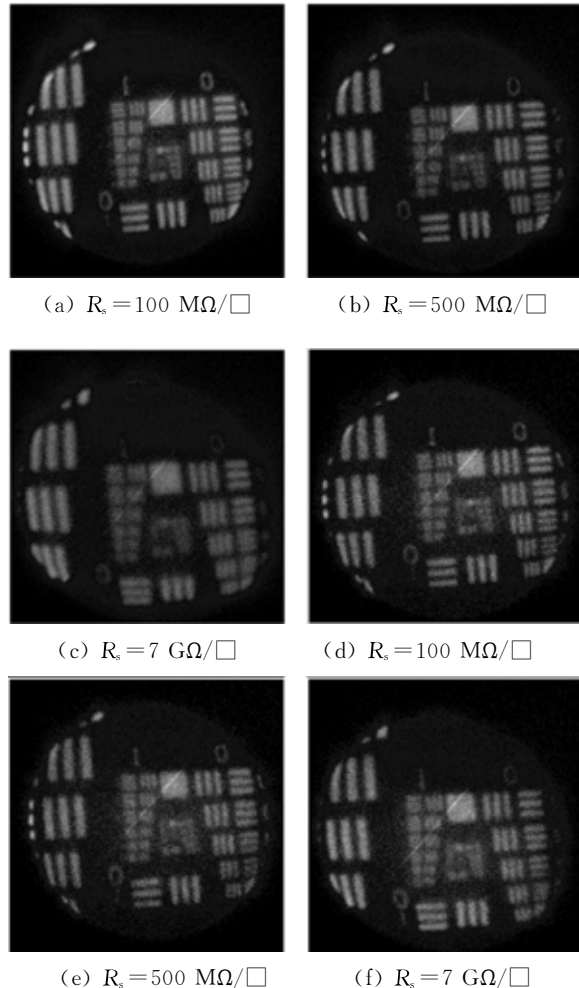


图 7 USAF1951 空间分辨率板成像(其中,图(a),(b),(c)的计数率约为 53 kc/s;图(d),(e),(f)的计数率约为 15 kc/s)

Fig. 7 UV images of USAF1951 resolution plate, where counting rate of fig. (a), (b), (c) is 53 kc/s; counting rate of fig. (d), (e), (f) is 15 kc/s

以分辨到 2 lp/mm(第 1 组第 1 单元),对应的空间分辨率为 0.5 mm;方块电阻为 7 G $\Omega$ /□的探测器可以分辨到 1.12 lp/mm(第 0 组第 2 个单元),对应的空间分辨率为 0.89 mm;方块电阻大于 2 700 M $\Omega$ /□的光子计数探测器在高计数率下的成像分辨率变差。因为方块电阻过大,计数率较高时,电子云不能及时进行释放,从而影响后来电子云位置的读出。从图 7 可以看出,在高计数率情况下,方块电阻在 100~500 M $\Omega$ /□内,感应电荷位敏阳极光子计数探测器具有更好的成像分辨率;在高计数率时,方块电阻大于 2 700 M $\Omega$ /□的光子计数探测器的成像分辨率变差。上述测试结果和理论计算结果吻合。

## 5 结 论

非晶态 Ge 薄膜作为感应位敏阳极光子计数

### 参考文献:

- [1] 尼启良,韩素立,陈斌,等. 球面微通道板在极紫外波段的量子探测效率[J]. 光学 精密工程, 2011, 19(11):2602-2607.  
NI Q L, HAN S L, CHEN B, *et al.*. Quantum detection efficiency of spherical microchannel plate in extreme ultraviolet [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(11):2602-2607. (in Chinese)
- [2] 何玲平,岳中英,刘世界,等. 光子计数位置灵敏探测器畸变多项式校正[J]. 光学学报, 2012, 32(6):0604002.  
HE L P, YUE J Y, LIU SH J, *et al.*. Polynomial correction of photon-counting position-sensitive detector's distortion[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(6):0604002. (in Chinese)
- [3] 尼启良,何玲平,刘世界,等. 使用感应电荷位敏阳极的极紫外单光子计数成像系统[J]. 光学 精密工程, 2010, 18(12):2543-2548.  
NI Q L, HE L P, LIU SH J, *et al.*. Extreme ultraviolet single photon-counting imaging system based on induced charge position-sensitive anode [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(12): 2543-2548. (in Chinese)

### 作者简介:



韩素立(1986—),女,河北邢台人,博士研究生,2009年于吉林师范大学获得学士学位,主要从事极紫外波段光子计数成像探测器方面的研究。E-mail:best\_hsl@163.com

成像探测器的重要组成部分,其方块电阻阻值会影响探测器的成像性能。如果 Ge 膜的方块电阻太大,落在 Ge 膜上的电子云难以通过接地电极释放,会影响探测器计数率等性能;而方块电阻太小,电子云则会扩散太快,从而影响探测器的空间分辨率。为了研制高成像质量的感应位敏阳极光子计数成像探测器,本文建立了非晶态 Ge 薄膜层上电子云扩散时间与方块电阻之间的数学关系,推导获得了探测器在高分辨率和高计数率状态时非晶态 Ge 膜方块电阻的阻值范围(30~2 700 M $\Omega$ /□),并采用具有不同方块电阻的 Ge 膜阳极进行了实际成像实验。结果表明,当 Ge 膜方块电阻在此范围时,光子计数探测器在计数率为 53 kc/s 时的分辨率可达 0.5 mm。实验结果证明了方块电阻选配范围的正确性。

- [4] LAPINGTON J S. Developments in imaging devices for microchannel plate detector [J]. *SPIE*, 2003, 4854:191-203.
- [5] 卜绍芳,尼启良,何玲平,等. 紫外波段微通道板光子计数探测器[J]. 中国光学, 2012, 5(3):302-309.  
BU SH F, NI Q L, HE L P, *et al.*. Microchannel plate photon counting detector in UV range [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(3):302-309. (in Chinese)
- [6] JAGUTZKI O, LAPINGTON J S, WORTH L B C, *et al.*. Position sensitive anodes for MCP readout using induced charge measurement [J]. *Nucl. Instr. and Meth. A*, 2002, 477(1-3):256-261.
- [7] DANTONIO P, JONNERT J. Small-angle-scattering evidence of voids in hydrogenated [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, 44:423-433.
- [8] SAITO M, SAITO Y, ASAMURA K. Spatial charge cloud size of microchannel plates [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2007, 78(2):023302.
- [9] ELLILA M. Charge diffusion in the capacitive readout of resistive cathodes [J]. *Nucl. Instr. and Meth.*, 1989, 277(2-3):507-512.
- [10] BISQUERT J. Theory of the impedance of electron diffusion and recombination in a thin film [J]. *J. Phys. Chem. B*, 2002, 106:325-333.

### 导师简介:



陈波(1961—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,1984年于吉林大学获得学士学位,主要从事软 X 射线-极紫外波段光学和空间光学的研究。E-mail:chenb@ciomp.ac.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)