

紫外单光子成像系统的研究^{*}

张兴华^{1)†} 赵宝升¹⁾ 缪震华^{1)‡} 朱香平¹⁾ 刘永安^{1)‡} 邹 玮¹⁾

1) 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, 西安 710119)

2) 中国科学院研究生院, 北京 100049)

(2007 年 10 月 9 日收到, 2007 年 12 月 5 日收到修改稿)

搭建了紫外单光子成像系统, 详细介绍了该系统的组成、工作原理和分辨率性能测试. 由汞灯发出的紫外光经过大气散射、多块减光片得到了紫外单光子流. 单光子直接打在微通道板上, 微通道板产生的倍增电子由楔条形阳极收集, 电荷灵敏前置放大器将阳极输出的电荷信号转变为电压信号, 主放大器对前放信号进行滤波整形. 利用高速数据采集卡连续采集主放大器的输出波形, 通过软件对采集波形进行处理, 采用图像处理技术得到了紫外单光子 10 min 的计数图像, 并对图像进行了畸变校正. 此外, 通过自己设计的分辨率板, 测得该系统的分辨率可达 150 μm . 该系统在极微弱光探测成像、生物发光、空间环境探测等方面具有广泛应用.

关键词: 单光子计数成像, 阳极探测器, 楔条形阳极, 分辨率

PACC: 4280Q, 2940T, 2970J

1. 引 言

随着生物医学、空间探测以及环境辐射检测技术的发展, 对微弱光的检测要求越来越高. 当光微弱到以单个光子发射时, 一般的弱光成像器件已经不能满足要求, 只有利用单光子计数模式, 才能探测到单光子信息. 单光子信号一般通过将光信号转换为电信号来判断. 以光电倍增管作为接收器为例, 当光子入射到光电探测器上时, 倍增管的光阴极释放的电子在管内电场作用下运动至阳极, 在阳极的负载电阻上将会出现一个光电子脉冲. 由于入射光子数很多, 光电子脉冲互相叠加, 光电倍增管会输出很高的直流电平; 当入射光功率逐渐减弱时, 光电子脉冲的叠加逐渐减小, 光电倍增管的输出直流电平逐渐下降, 光电子脉冲愈来愈分离; 当入射光功率减小到 10^{-16} W 时, 光电探测器上的光电子脉冲呈现出间断的随机分布, 此时光源为单光子发射^[1].

本文详细介绍了紫外单光子成像系统的组成、工作原理和分辨率性能测试, 利用搭建的紫外单光子成像系统得到了紫外单光子计数图像并对该系统的分辨率进行了测试. 由于单光子计数成像可以同

时获得光子的时间和位置信息, 因此, 单光子计数成像在光谱测量、生物发光、放射探测、高能物理、空间探测等领域有着特殊的作用^[2,3].

2. 系统组成和工作原理

图 1 是紫外单光子成像系统结构示意图和实物图. 微通道板和楔条形阳极密封在真空中. 从汞灯发出的光经过多片减光片后, 成为光强极微弱的紫外光. 对于极微弱光, 必须通过光电转换, 电子倍增后才便于处理. 光电倍增管 (PMT) 和微通道板 (MCP) 都可以实现电子倍增, 但是 PMT 只能探测一维信号, 虽然可以用于单光子计数, 但是不能实现计数成像; 而 MCP 可以探测二维空间和时间信息, 不仅可以实现计数功能, 而且可以进行计数成像. 因此, MCP 在生物医学、环境辐射探测、远距离微弱信号探测等方面获得了广泛的应用. 本文将两块 MCP 级联排列成 V 形, 这种排列方式可以获得高的电子增益, 并且能抑制离子反馈. 据报道^[4], 按 V 形方式排列的两块 MCP 的增益可以超过 5×10^7 , 暗计数率一般在 $1 \text{ count}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2)$ 以下.

^{*} 中国科学院知识创新工程方向性项目资助的课题.

[†] E-mail: xinghua146@yahoo.com.cn

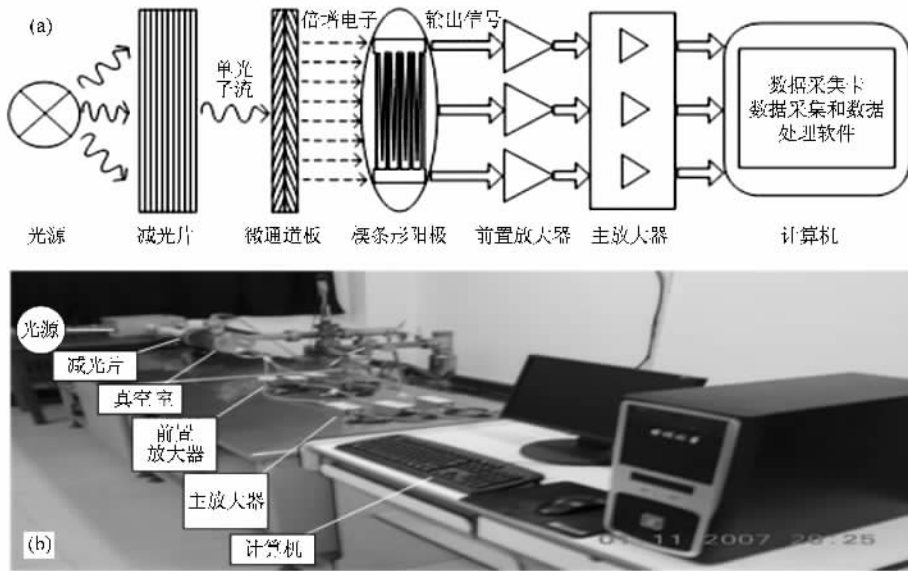


图1 (a)紫外单光子成像系统结构示意图 (b)紫外单光子成像系统实物图

MCP 虽然可以探测二维信息,但是要想计算粒子的位置,还需要一个阳极收集从 MCP 出来的电子。阳极的种类很多,有电阻阳极、楔条形阳极、阵列阳极和延迟线阳极。由于楔条形阳极(WSA)位置分辨率高,线性好,大面积成像畸变小,制作工艺相对简单,后续电路也不太复杂,因此,我们采用 WSA 收集电子。其具体工艺参数可参考文献 [5]。

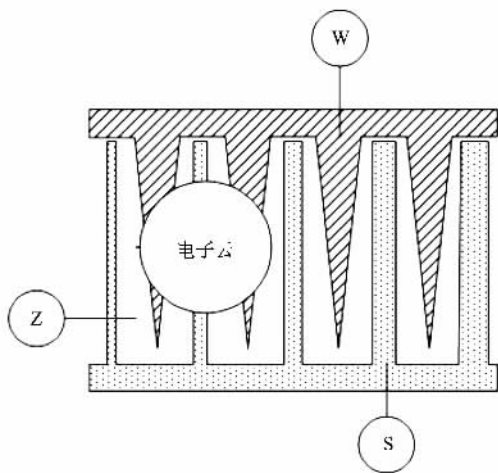


图2 WSA 阳极位置探测原理图

图2是 WSA 位置探测原理图, W 代表楔形电极, S 代表条形电极, 剩余部分是之字形电极, 用 Z 表示, W, S 和 Z 之间相互绝缘。由于 W 在 Y 方向的宽度不同, S 在 X 方向的宽度不同, 当从 MCP 出来的电子在电场作用下运动至 WSA 时, 分别被 W, S

和 Z 三个电极收集, 三个电极收集的电荷量分别为、 Q_w , Q_s 和 Q_z 。电子云在每个电极的相关区域是位置的线性函数, 当电子云位于 WSA 左边时, Q_s 较小; 当电子云位于 WSA 右边时, Q_s 较大。同理, 当电子云位于 WSA 下面时, Q_w 较小; 当电子云位于 WSA 上面时, Q_w 较大^[4]。电子云的质心坐标可以通过下式确定^[6]：

$$X = \frac{2Q_s}{Q_w + Q_s + Q_z}, \quad (1)$$

$$Y = \frac{2Q_w}{Q_w + Q_s + Q_z}. \quad (2)$$

从阳极出来的信号是单个的光电子脉冲, 通过信号线的延时作用后, 脉冲持续时间约几十纳秒, 幅值约十几至几十毫伏。这种脉冲信号并不适合后续电路处理, 必须通过电荷灵敏放大器将电荷信号转换为电压信号。电荷灵敏放大器的基本原理如图3所示^[7]。其中 A 为集成运算放大器, C_f 是反馈电容, R_f 是反馈电阻, C 为耦合电容, R_D 是探测器偏置电阻。假设从阳极出来的电荷量为 Q_D , 根据电路知识可知, 输出脉冲的幅值 V_{out} 为

$$V_{out} = V_{in} A_0 = \frac{Q_D A_0}{C_i + (1 + A_0) C_f} \approx \frac{Q_D}{C_f}, \quad (3)$$

其中 V_{in} 为输入电压的幅度, A_0 是运放的闭环放大倍数, C_i 是输入电容, 由于 $(1 + A_0) C_f \gg C_i$, 所以 C_i 变化对电荷灵敏前放增益的影响可以忽略不计, 从而使得电荷灵敏前置放大器的输出电压有很好的稳

定性^[8].

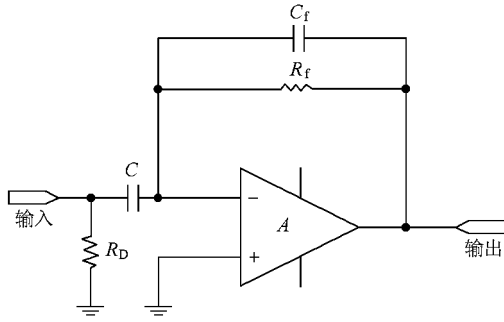


图 3 基本的电荷灵敏前置放大器原理图

虽然前置放大器对阳极输出的信号进行了处理和放大,但是输出信号的上升沿非常陡,并不适合后续的采样和处理,因此,还需要用主放大器对前置放大器的输出信号进一步处理。主放大器主要有两个作用,一是把小信号放大到需要的幅度;二是滤除噪声,提高信号信噪比,改善信号的波形。经过主放大器处理的信号,我们选择了软件处理方式,这样既降低了成本,也大大缩短了开发时间。我们利用 PCI9812 数据采集卡,用 VC++ 语言开发了数据采集和处理软件,直接采集主放大器输出的信号,通过程序找到 W、S 和 Z 的峰值电压,通过不同时刻打在该位置的电子云数目进行光子计数,根据 WSA 上不同位置的计数,应用图像处理技术,得到了单光子累计所成的图像。

3. 结果和讨论

图 4 是 MCP 工作在饱和增益模式时,WSA、电荷灵敏前置放大器和主放大器输出的信号波形,原图像是彩色图像,这是利用 Matlab 软件转换得到的灰度图像。当光比较弱时,同一时刻有大量光子打在微通道板上,从微通道板出来的大量倍增电子同时被 WSA 收集,形成直流偏压。随着减光片个数的增加,透过减光片的光子数越来越少,而阳极上输出的直流偏压也越来越小。当从减光片出来的光微弱到以单光子入射到 MCP 时,阳极无直流偏压输出,而是输出一些分立的电脉冲信号。从图 4(a)可以看出,当入射光是单光子入射时,阳极的输出信号为一系列随机分布的电脉冲。这就为判断单光子入射提供了直观的依据。

图 4(b)是经过电荷灵敏前置放大器处理后的波形。从图中可以看到信号幅值已经被放大,信号上

升很快而下降相对较慢,由于噪声的影响,信号曲线不是很光滑。噪声的来源很多,主要来自三个方面,一是到达阳极的电子产生的随机分布噪声;二是来自 MCP 的噪声;三是来自前置放大器的噪声^[6]。

由于前置放大器输出的信号有大量的噪声,并且信号波形也不利于计算,因此需要通过主放大器对信号进行滤波和整形。图 4(c)是经过主放大器滤波和整形后的输出信号波形。由图 4(c)可以看出噪声被滤除后波形比较光滑,信号波形接近准高斯形状。采用数据采集卡同时采集三路主放大器的输出信号,通过开发的软件进行去噪和峰值检测,利用(1)式和(2)式计算出电子云的质心位置,同时对该位置计数一次。随着采样时间的增加,可以得到不同位置的光子计数,从而为光子计数成像提供数据。

图 5(a)是用有机材料制作的九孔掩模板照片,其中掩模板孔径为 2 mm,中心间距为 6 mm。图 5(b)是将掩模板紧贴在 MCP 输入面所成的单光子计数图像。它是该系统在 2.5 MHz 采样频率下采集 10 min 得到的单光子计数图像,它的灰度级为 256。从图 5(b)可以看出,在掩模板有孔的地方,通过的光子数多,灰度值大,图像比较亮,而掩模板没有孔的地方,基本没有光子透过,灰度值小,图像较暗。由图 5 还可以看出,掩模板是正方形,而掩模板的像并非正方形,而是发生了畸变,图像畸变主要是由于 WSA 阳极之间的电容耦合以及前放和主放等电路噪声引起的^[4]。图 5(c)是通过 Matlab 程序将图 5(b)校正后的图像。校正时,首先利用图 5(a)得到掩模板的 9 个孔心的中心坐标,然后以这些坐标为基准调整畸变图像中计数点的位置,从而得到校正图像。

为了测试该系统的分辨率,我们设计了分辨率测试板,图 6(a)是分辨率测试版的掩模板照片。条纹区域的外接圆直径为 40 mm,亮条纹为通光部分,其中第一象限和第二象限分别是六组条纹,第三象限和第四象限分别是五组条纹。每组条纹的间隔为 1000 μm ,并且每组条纹均包括三条宽度相同的亮条纹,相邻亮条纹间隔为该组一条亮条纹的宽度。第一象限和第二象限中的亮条纹宽度分别为 75, 100, 200, 300, 400, 500 μm ,第三象限和第四象限中的亮条纹宽度分别为 150, 250, 350, 450, 550 μm 。

利用分辨率测试掩模板,通过光刻技术制作了分辨率测试板,将分辨率测试板紧贴在 MCP 入射面,在系统真空度优于 1×10^{-5} Pa, MCP 两端电压为 -1850 V, MCP 出射面和 WSA 之间的电压为 -300

V₁MCP 和 WSA 之间的距离为 14 mm 的条件下,测量了该系统的分辨率性能.图 6(b)是采样频率为 2.5 MHz,采集 20 min 得到的分辨率板单光子图像,图 6(c)是对图 6(b)的中心区域放大后的像.由于入射光不均匀,从而导致分辨率板所成的像亮度不均匀.从图 6(b)可以看出,中心区域的条纹线性度较好,而边缘部分的条纹发生了扭曲变形,这主要是由

于电子云半径过大,WSA 的 W 和 S 电极的公共部分收集到电子,从而导致电子云质心坐标计算偏差引起的.通过减小电子云半径,可以减小这种扭曲变形,但是会降低系统的分辨率,当电子云半径过小时,还会出现调制现象^[9].从图 6(c)可以看出,X 方向的分辨率优于 200 μm,而 Y 方向的分辨率最高可达 150 μm.

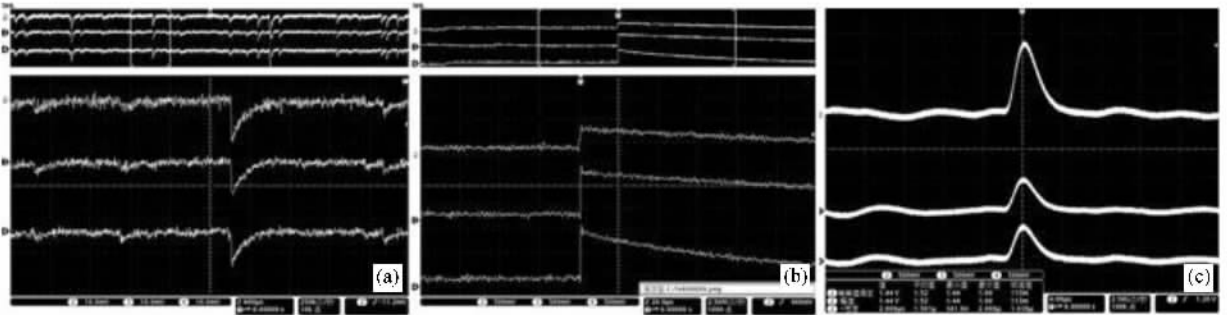


图 4 (a) WSA 输出的信号波形 (b)前置放大器输出的信号波形 (c)主放大器输出的信号波形

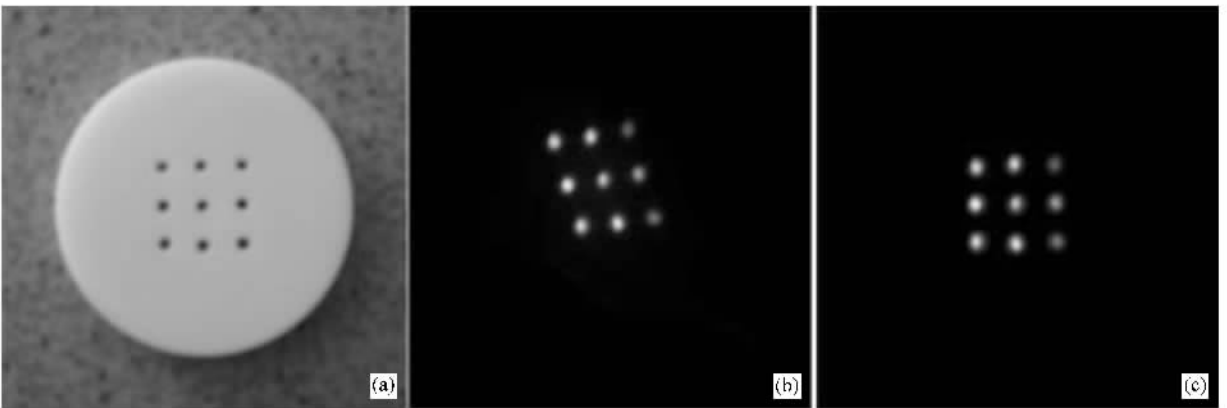


图 5 (a)九孔掩模板 (b)掩模板的像 (c)校正后的掩模板的像

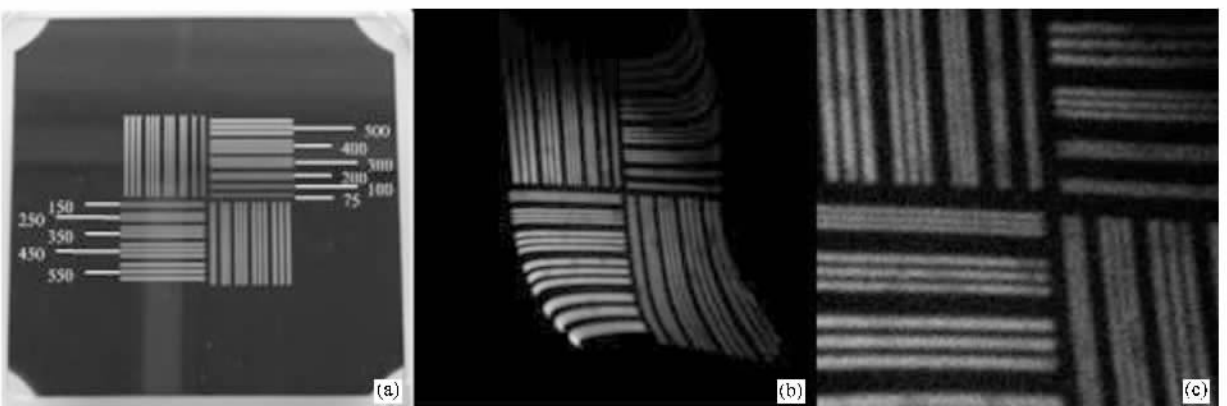


图 6 (a)分辨率测试掩模板 (b)分辨率板所成的像 (c)中心区域放大的像

4. 结 论

搭建了紫外单光子成像实验系统. 利用 VC++ 语言开发了数据采集和数据处理软件, 通过软件处理主放大器的输出信号, 该方法降低了成本, 缩短了开发周期. 使用该系统在 2.5 MHz 采样频率下连续采集 10 min 得到了紫外单光子计数图像, 该图像形状和掩模板相似, 但是有一定的图像畸变. 图像畸变是由于 WSA 三个电极之间的电容耦合和电路噪声

引起的. 当系统的真空度优于 1×10^{-5} Pa, MCP 两端电压为 -1850 V, MCP 出射面和 WSA 之间的电压为 -300 V, MCP 和 WSA 之间的距离为 14 mm 时, 利用分辨率板测试了该系统的分辨率. 该系统在 Y 方向的分辨率最高可达 150 μm . 此外, 该单光子成像系统通过在 MCP 输入面加上不同的光电阴极材料还可以实现对其他波段的单光子计数成像.

在此衷心感谢中科院空间科学与应用研究中心的李磊、徐荣兰、王劲东等同志对此次实验工作的大力支持与指导.

-
- [1] Wang X H, Hu X Q, Yu X, Wang S S, Cao G R 1997 *Journal of Beijing Institute of Technology* **17** 503 (in Chinese) [王晓辉、胡新奇、俞 信、王苏生、曹根瑞 1997 北京理工大学学报 **17** 503]
- [2] Zhang J Y, Hao S S 2002 *Radio Communications Technology* **28** 62 (in Chinese) [张建英、郝书顺 2002 无线电通信技术 **28** 62]
- [3] Liu H F 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5186 (in Chinese) [刘华锋 2006 物理学报 **55** 5186]
- [4] Ogletree D F, Blackman G S, Hwang R Q, Starke U, Katz J E 1992 *Rev. Sci. Instrum.* **63** 104
- [5] Miao Z H, Zhao B S, Liu Y A, Zhu X P, Zhang X H 2008 *Acta Photonica Sinica* **37** 11 (in Chinese) [缪震华、赵宝升、刘永安、朱香平、张兴华 2008 光子学报 **37** 11]
- [6] Martin C, Jelinsky P, Lampton M, Malina R F, Anger H O 1981 *Rev. Sci. Instrum.* **52** 1067
- [7] Geng B, Fang F, Zhang G H, Zheng Y T 2005 *Nuclear Electronics & Detection Technology* **25** 813 (in Chinese) [耿 波、方 方、张国华、郑奕挺 2005 核电子学与探测技术 **25** 813]
- [8] Su H, Zhou B, Li X G, Ma X L 2003 *Nuclear Electronics & Detection Technology* **23** 105 (in Chinese) [苏 弘、周 波、李小刚、马晓莉 2003 核电子学与探测技术 **23** 105]
- [9] Smith A, Kessel R, Lapington J S, Walton D M 1989 *Rev. Sci. Instrum.* **60** 3509

Study of ultraviolet single photon imaging system ^{*}

Zhang Xing-Hua^{1,2,†} Zhao Bao-Sheng¹⁾ Miao Zhen-Hua^{1,2)} Zhu Xiang-Ping¹⁾ Liu Yong-An^{1,2)} Zou Wei¹⁾

¹ *State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China*

² *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

(Received 9 October 2007 ; revised manuscript received 5 December 2007)

Abstract

An ultraviolet single photon imaging system was built and its structure, working principle and spatial resolution are reported. Ultraviolet single photon can be obtained by ultraviolet light emitted by a mercury lamp and is attenuated by filters. Single photon irradiates on the microchannel plate directly, producing the multiplied electrons. The multiplied electrons are collected by wedge and strip anode. The charge signal coming from the anode is transformed to voltage signal by a charge-sensitive preamplifier. Then the voltage signal is filtered and shaped by a main amplifier. The output wave signal is collected by high speed data collection card continuously and processed with software. Finally, a ten-minute counting image of ultraviolet single photon is acquired and its revised image is obtained by image processing. The spatial resolution of this system can reach 150 micrometers as tested with the self-designed resolution board. The system can be used widely for very faint luminescence detecting/imaging, biological luminescence and space environment weak light detection.

Keywords : single photon counting image, anode detector, wedge and strip anode, resolution

PACC : 4280Q, 2940T, 2970J

^{*} Project supported by the Chinese Academy of Sciences Knowledge Innovation Engineering

[†] E-mail : xinghua146@yahoo.com.cn