

微通道波导栅型复合探测信号提取方法与验证

刘德兴^{1,2}, 母一宁^{1*}, 曹喆¹, 樊海波¹, 郝国印¹

(1. 长春理工大学理学院, 吉林 长春 130022; 2. 四川航天烽火伺服控制技术有限公司, 四川 成都 611130)

摘要: 为改善波导栅型薄膜复合探测器件位敏阳极读出光电信号质量, 降低栅型薄膜引起的电子束多径展宽对阳极探测信号的影响, 研究了微通道板波导栅型复合探测信号在阳极的直接耦合提取方法。根据低能电子束在多元介质中的散射模型, 利用蒙特卡洛统计方法对入射到栅型薄膜中的低能电子束轨迹进行模拟, 并分析均匀分布和高斯分布下波导栅极引入噪声和透射电子束径向偏移对阳极信号提取精度的影响。对透射过栅型薄膜到达阳极的微弱光电脉冲信号的前置放大和串联压控多级级联放大模式, 给出适用于加性高斯分布噪声叠加下基于 Sallen-Key 拓扑结构的四阶切比雪夫低通滤波和峰值保持电路的专用提取方案, 减小波导栅型薄膜对信号信噪比和频响特性的影响。搭建专用波导栅型复合探测位敏信号读出平台, 结合系统并行单点接地的连接模式和楔条形阳极位敏电荷直接耦合提取方式, 验证器件阳极信号提取方法, 获得 2 μ s 脉宽, 200 kHz 频率的准高斯脉冲提取信号。

关键词: 栅型薄膜; 电子束; 信号提取; 高斯脉冲

中图分类号: TN06; TN29 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.1016002

Extraction method and experiment validation for signal of complex detection based on microchannel waveguide gate

Liu Dexing^{1,2}, Mu Yining^{1*}, Cao Zhe¹, Fan Haibo¹, Hao Guoyin¹

(1. School of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

2. Sichuan Aerospace Beacon Fire Servo Control Technology Company limited, Chengdu 611130, China)

Abstract: In order to improve the photoelectric signal quality from position-sensitive anode of waveguide-gate thin film complex detector and reduce the influence of the multi-path broadening of the electron beams caused by the thin gate film, a direct extraction method of the complex detection signal of the waveguide gate based on micro channel plate was studied. According to the scattering physical model of electron beams with low energy in multimedia materials, the trajectory of incident low-energy electron beams was simulated by Monte Carlo statistical method in the gate film. Further more, accuracy deviation of signal extraction of the anode resulted from noises introduced from the waveguide gate was respectively analyzed under uniform distribution and Gaussian distribution. Accuracy deviation of signal

收稿日期: 2019-05-11; 修订日期: 2019-06-21

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(51602028); 吉林省科技发展计划重点科技攻关项目(20150204049GX, 20150204083GX); 吉林省科技发展计划青年科研基金(20160520114JH); 吉林省科技发展计划中青年科技创新领军人才及团队项目(20180519019JH); 吉林省教育厅“十三五”科学技术研究规划重点项目(JJKH20170602KJ); 2018 年吉林省发改委产业创新专项资金(2018C040-3); 2018 年中科院天文光学技术重点实验室开放课题(CAS-KLAOT-KF201803)

作者简介: 刘德兴(1991-), 男, 硕士生, 主要从事光电子器件与系统、专用集成电路设计方面的研究。Email: dexing6119@163.com

导师简介: 母一宁(1985-), 男, 副教授, 博士, 主要从事物理电子学与空间光通信方面的研究。Email: muyining1985@163.com

extraction of the anode affected by the radial position shift of transmission electron beams in the process of transmission through the thin gate film was analyzed as well. The preamplification mode and series voltage controlled multi-stage cascade amplification mode were researched for weak photoelectric signal pulses came through the thin gate film to the anode. A fourth order Chebyshev low pass filtering method based on a circuit topology named Sallen-Key was proposed under additive Gauss distribution noise to reduce the influence of waveguide gate film on signal-to-noise ratio and make frequency response characteristics of signal wave form better. A peak sample and hold circuit of multi signal channels was presented as well. A complete and special platform was constructed to achieve the extraction of position sensitive signal from the waveguide-gate complex detection device, combined with parallel single point grounding connection mode of the whole readout system of anode signal and the direct extraction of position sensitive charge on wedge stripe anode. The signal extraction method of the device's anode was verified in a vacuum chamber. The quasi-Gaussian impulse extraction signal with 2 μs pulse width and 200 kHz frequency was obtained.

Key words: gate film; electron beams; signal extraction; Gaussian impulse

0 引言

随着人类探索太空活动的逐年增多,对空间目标的感知与信息传输的需求已日趋迫切,通过光电探测器件实现空间复合探测技术成为国内外研究的热点^[1-3]。微通道板光电倍增管(Microchannel Plate Photomultiplier, MCP-PMT)(如滨松、北方夜视的 MCP-PMT)采用多片微通道板(Microchannel Plate, MCP)结构对微弱光电信号进行连续倍增,随着入射到孔道的电子数量增大,产生的电子自饱和效应会制约其增益的提高。近年来,本项目组提出利用空间波导机构^[4-7]收集两级微通道板极间耦合损失的电子束功率实现复合探测功能,而引入具有电子透射能力的波导栅型薄膜结构,利用其对器件空间电场下电子束的透射和分流,在实现传统 MCP-PMT 无法完成的复合探测功能的同时,有效避免了多片 MCP 级联耦合时非开口区和自饱和效应造成的器件增益损失,巧妙回避了传统光学复合探测的功率分配与分时探测的难题^[8]。

基于微通道板的光电探测器件已经广泛应用于空间探测领域,其位敏阳极可用于对空间目标进行位置检测或者成像探测。参考文献[9]在连续型电荷分割式位敏阳极上制作呈高阻抗特性的半导体薄膜电极,通过到达电子束的电荷感应式提取信号,这种信号提取方式虽然能够使得电荷分割型阳极附近的

电场分布更加均匀,但是由于高阻层的存在势必会减小阳极收集的总电荷量,从而影响器件探测灵敏度。参考文献[10]研究发现由于 MCP 的通道内气体残留形成的离子反馈效应会造成楔条形(WSZ)位敏阳极读出信号峰堆积和尾堆积的现象,对探测器位敏信号提取性能产生影响。参考文献[11]中提出相对于无膜的 MCP 而言,加防离子反馈膜的 MCP 噪声因子会因为入射电子与输入面膜层发生碰撞引起电子散射而增加,而这部分由膜层产生的噪声会在微通道孔连续打拿倍增后传递到器件结构中的位敏阳极,进而影响阳极读出信号质量。

针对以上分析中基于微通道板的位敏阳极探测时遇到的问题,文中结合项目组近年来提出的空间复合探测用波导栅型器件结构,对器件中电子束调制分流后位敏阳极上收集的微弱光电信号提取方法展开研究。分析了在微通道板复合探测器件中引入波导栅型复合薄膜后对阳极位敏信号的影响,提出了波导栅型复合探测器件中阳极电荷信号直接耦合提取方法,并进行真空环境下的验证性实验,验证了该方法能提高波导栅型复合探测器件的信噪比和探测灵敏度,减小空间电子束因透射栅极薄膜导致的阳极位敏探测误差。

1 器件工作原理

波导栅型复合探测器件及工作原理如图 1 所示,脉冲光信号透过光学接收窗 a 聚焦于光电阴极

b 表面,并发生外光电效应。从阴极材料中溢出的光电子,在负高压电场加速下,入射到上层倍增用微通道板 c 中,经连续打拿倍增后形成电子束。电子束在空间电场作用下向复合栅型结构上的金属导电薄膜电极 d 运动,金属导电薄膜与下级微通道板之间附有一层有机隔离薄膜 e 用以实现栅极信号提取极与 MCP 供电极间的电学隔离。在栅极薄膜的调制作用下,产生电子分流,部分电子由栅极的金属层截获并

导出高频脉冲通信用信号,而能够成功渡越栅极薄膜的电子入射到下级波导用微通道板 f 引发二次电子倍增以提高微弱成像信号探测灵敏度,倍增的电子最终被楔条形阳极 g 收集并由信号采集电路完成读出,用于成像或者定位。通过更换不同材料的光阴极(如金阴极、多碱阴极等),该结构复合探测器件能够实现信号光感知范围从紫外到可见光乃至近红外波段的延展。为简化工艺制作流程,验证实验采

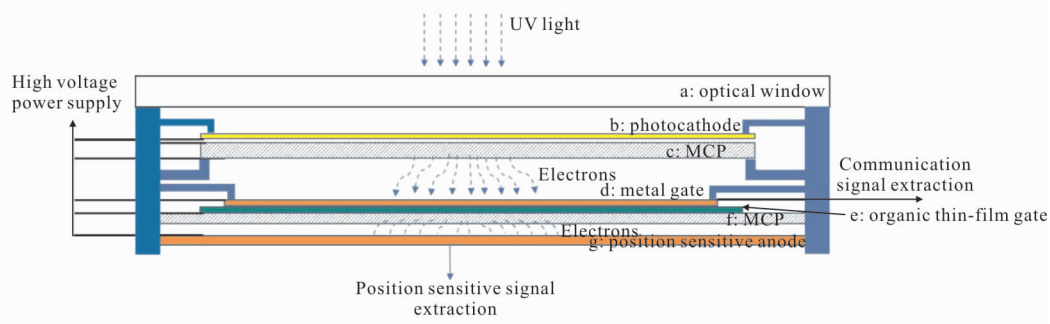


图 1 波导栅型薄膜复合探测器件原理图

Fig.1 Schematic of waveguide-gate film complex detector

用蒸镀的,对紫外光响应的金阴极。

以 200 个入射电子在 2 keV 能量下入射栅极固体薄膜的情况为例,利用 Monte Carlo 统计模拟方法进行电子束轨迹模拟。如图 2 所示,栅型复合薄膜会造成入射信号电子束产生 X 轴向路径上的弥散,

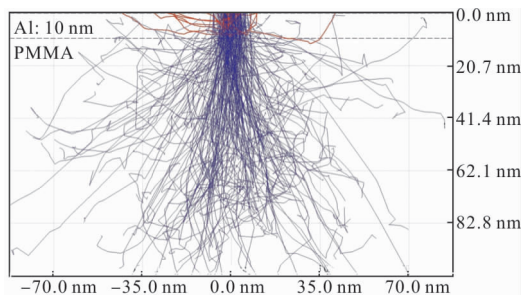


图 2 电子束在栅型薄膜中的散射轨迹模拟

Fig.2 Simulation of scattering trajectories of electrons beam in the gate films

即部分透射过栅型薄膜的电子的出射位置相对其初始位置会发生偏移。对于透射过复合栅型薄膜并经过 MCP 二次倍增后的出射电子,其电子束分布若采用均匀分布模型,则阳极上 WSZ 分得的电荷量与电子束覆盖的楔条形每一极总面积的大小有关,也即每一极收集的电荷量会随着电子束质心坐标偏差而

改变;其电子束分布若采用高斯分布模型^[12],则阳极电子束的电荷分布函数为:

$$N(r)= \begin{cases} \left(\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{r}{\sigma}\right)^2} \right) - \left(\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}(2.75)^2} \right) & r \leq 2.45\sigma \\ 0 & r > 2.75\sigma \end{cases} \quad (1)$$

式中: r 为从下层 MCP 出射后到达阳极的电子束斑半径,其本身大小与 MCP 到阳极间距、MCP 到阳极加速电压、MCP 的增益有关^[13]。被 WSZ 三极收集的电荷分别为:

$$Q_w = \int_0^{2.75\sigma} N(r)L_w(r)dr \quad (2)$$

$$Q_s = \int_0^{2.75\sigma} N(r)L_s(r)dr \quad (3)$$

$$Q_z = \int_0^{2.75\sigma} N(r)L_z(r)dr \quad (4)$$

根据简化的楔条形阳极位置解码公式:

$$X = \frac{2Q_s}{Q_s + Q_w + Q_z} \quad (5)$$

$$Y = \frac{2Q_w}{Q_s + Q_w + Q_z} \quad (6)$$

偏移(即脱靶)的电子束会直接影响位敏阳极上三个电极收集的电荷量分布(见图 3),导致器件对光

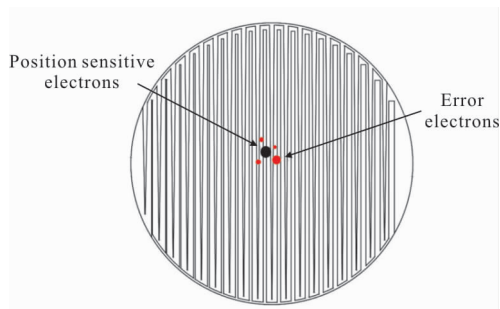


图 3 电子束多径展宽对位敏阳极探测的影响

Fig.3 Effect of multi-path broadening of electron beam on position-sensitive anode detection

子事件发生的坐标感知发生偏差,此时若忽略电极间绝缘沟道,反映到质心坐标公式变为:

$$X' = \frac{2Q_S(r+\Delta r)}{Q_S(r+\Delta r)+Q_W(r+\Delta r)+Q_Z(r+\Delta r)} \quad (7)$$

$$Y' = \frac{2Q_W(r+\Delta r)}{Q_S(r+\Delta r)+Q_W(r+\Delta r)+Q_Z(r+\Delta r)} \quad (8)$$

式中: Δr 为由栅极薄膜导致的电子束散射后径向展宽量,因此栅极薄膜引入的坐标误差 ΔX , ΔY 可分别由公式(7)减公式(5),公式(8)减公式(6)获得,最终表达式与 Δr 有关。

此外,电子透射复合薄膜的过程是一个伴随着热效应的随机散射过程(见图4),与薄膜的尺寸和入

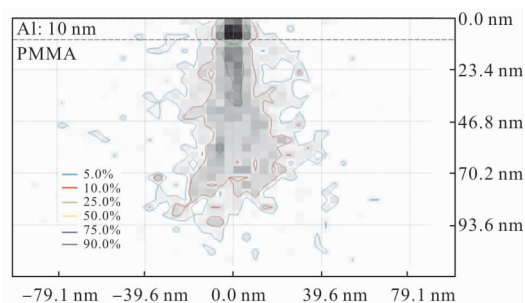


图 4 电子束在栅型薄膜中的能量分布模拟

Fig.4 Energy distribution of electrons in thin gate films

射电子能量有关,而栅型复合薄膜是由多元介质材料组成的,薄膜制备过程中由于工艺条件的改变或者波动也会带来膜层缺陷。因此,薄膜的尺寸效应和结构缺陷效应会导致光电信号在器件内部传输过程中噪声的引入^[4],反映到对电子束质心坐标的影响为:

$$\Delta X'' = X'' - X = \frac{2(Q_S + Q_{n1})}{Q_S + Q_{n1} + Q_W + Q_{n2} + Q_Z + Q_{n3}} - \frac{2Q_S}{Q_S + Q_W + Q_Z} \quad (9)$$

$$\Delta Y'' = Y'' - Y = \frac{2(Q_W + Q_{n2})}{Q_S + Q_{n1} + Q_W + Q_{n2} + Q_Z + Q_{n3}} - \frac{2Q_W}{Q_S + Q_W + Q_Z} \quad (10)$$

Q_{n1} 、 Q_{n2} 、 Q_{n3} 是等效到 WSA 三极上的噪声电荷。假设由于薄膜本身引起的噪声总量是一个定值:

$$Q_n = Q_{n1} + Q_{n2} + Q_{n3} \quad (11)$$

将公式(11)代入公式(9)、(10)并化简,电子束质心坐标的误差为:

$$\Delta X'' = \frac{2}{1 + \frac{(Q_S + Q_Z) + (Q_n - Q_{n1})}{Q_S + Q_{n1}}} - \frac{2}{1 + \frac{(Q_S + Q_Z)}{Q_S}} \quad (12)$$

$$\Delta Y'' = \frac{2}{1 + \frac{(Q_W + Q_Z) + (Q_n - Q_{n2})}{Q_W + Q_{n2}}} - \frac{2}{1 + \frac{(Q_W + Q_Z)}{Q_W}} \quad (13)$$

可见当 W 极和 S 极收到的噪声增大时,电子束质心坐标定位误差增大。

综上所述,引入栅型薄膜带来的电子束信噪比和电子束聚焦偏差量会影响到阳极位敏信号提取精度。为了改善信噪比同时减小器件中电子束径向偏移对脉冲信号的影响,使后端数字采样系统获得更好的信号质量,需对阳极前端模拟放大和信号调理系统展开研究。

2 前端电子学提取方法

前置放大电路主要作用是利用电流-电压转换器实现对楔条形位敏阳极输出的微弱电信号获取,并匹配后置处理电路与探测器之间的阻抗,因此要求放大器拥有很强的共模信号抑制能力,低输入偏置电流,足够的带宽增益积和负载能力。T 型电阻网络反馈法能够提升前置响应时间,但网络中更多电阻也降低了前置电路的抗噪声性能,而根据多级放大器级联下的噪声系数公式,整个多级放大系统的噪声主要来源于前置放大器。因此,采用带金属屏蔽外壳的 AD549 为电流-电压转换器的电阻直接反馈式前置放大电路,并采用电池组供来降低前置噪声的影响。反馈电容和反馈电阻的选择,根据系统对信噪比和响应时间的要求进行权衡。

光电探测器件输出的微弱信号测量范围通常在 μA 量级以下,在前置反馈电阻不大的情况下,信号增益的提升一般无法只通过前置放大电路的一级转

换实现,其后需跟随多级线性主放来增加电压增益。主放采用多级压控增益放大(VCA)电路,随着输入信号幅度的变化产生一个相应变化的直流电压,利用这一电压去控制一种可变增益放大器的放大倍数:当输入信号幅值较大时,VCA 电压控制可变增益放大器的放大倍数减小,当输入信号幅值较小时,VCA 电压控制可变增益放大器的放大倍数增加。因此,VCA 电路可以达到稳定输出信号幅值的目的。为了尽可能提高两级放大电路的信噪比,降低前一

级放大器产生的噪声被后一级放大器放大的可能性,每路 VCA 电路由两级 AD603 采用顺序控制方式级联,当增益控制电路的控制电压 V_G (即 V_{GPOS} 与 V_{GNEG} 之差)在 $-500\sim 500$ mV 范围内时,单级电压增益 G 与 V_G 满足线性关系:

$$G(\text{dB})=40V_G+G_{0i} \quad (i=1, 2, 3) \quad (14)$$

$$V_G=V_{GPOS}-V_{GNEG} \quad (15)$$

G_{0i} 分别为三种不同模式反馈网络下的增益常量,如图 5 所示。

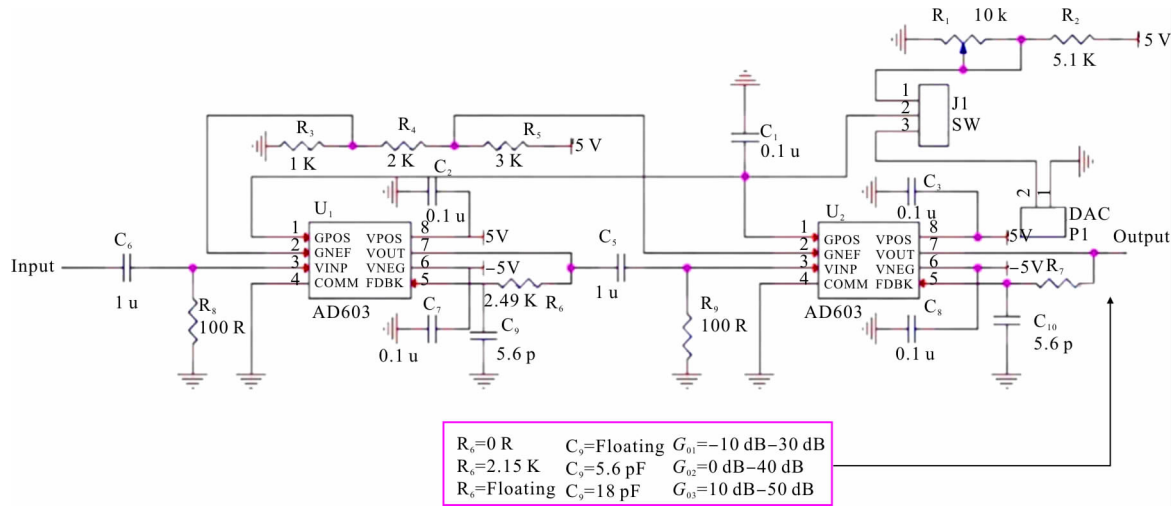


图 5 两级压控增益放大电路

Fig.5 Two-stage voltage-controlled amplifier circuit

对于微弱缓变光电探测信号,采用先放大再滤波的方案,这样信号通过放大器可方便以回避各种前端阻抗匹配上的问题,也可以起到一个隔离缓冲的作用,在后级信号调理时可以更好地利用滤波器来抗信号与噪声混叠。

在低通有源模拟滤波器中,切比雪夫型低通滤波相较于巴特沃斯型和贝塞尔型,其通带到阻带之间的过渡在相同阶数下更陡峭^[15],切比雪夫型低通滤波器的最低阶确定式为:

$$n \geq \frac{\text{arccosh} \sqrt{(10^{0.1\alpha_2} - 1)/(10^{0.1\alpha_1} - 1)}}{\text{arccosh}(f_2/f_c)} \quad (16)$$

式中: f_c 为等纹波通带截止频率; α_1 为以 dB 表示的通带内纹波幅度; f_2 是阻带中指定衰减量为 α_2 (dB) 的频率。考虑到前置放大器在开环时的频响增益关系,取 f_c 为 1 MHz, f_2 为 3 MHz, α_1 为 0.1, α_2 为 40,求得 n 最小值为 4。四阶切比雪夫型低通滤波器电

压传递函数表示由以下二式确定:

$$|H(\omega)| = \sqrt{\frac{1}{1 + \varepsilon^2 T_n^2\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)}} \quad (17)$$

$$|T_n(\omega)| = \begin{cases} \cos(n \cdot \arccos(\omega/\omega_c)) & |\omega| \leq \omega_c \\ ch(n \cdot ch^{-1}(\omega/\omega_c)) & |\omega| > \omega_c \end{cases} \quad (18)$$

在设计有源滤波器电路时,直接实现三阶以上传递函数的电路相对困难,所以采用将高阶传递函数分解为几个低阶传递函数乘积的形式,即:

$$H_n(\omega) = H_1(\omega)H_2(\omega) \cdots H_k(\omega) \quad (19)$$

则四阶切比雪夫型低通滤波器可由二级二阶切比雪夫低通滤波器级联而成,并结合 Sallen-Key 电路拓扑结构,得到低通有源滤波电路原理图如图 6 所示。

从波导栅型薄膜产生的噪声会伴随信号经过 MCP 倍增后一起到达阳极,噪声的分布函数应该类

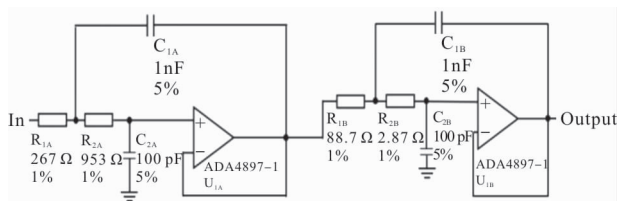


图 6 基于 Sallen-Key 拓扑的低通滤波

Fig.6 Low pass filtering based on Sallen-Key topology

似位敏信号的分布函数, 因此可以利用仿真手段在一个高斯分布的信号上叠加加性高斯分布噪声生成信噪比为 10 dB 的信号模拟位敏阳极输出的信号, 并输入设计的低通有源滤波器, 进行理论波形模拟, 仿真波形结果如图 7 所示, 信号经过滤波后部分高次噪声被滤除, 波形更趋近于标准的高斯脉冲, 信噪比提高 13 dB。

在完成滤波后, 为了进一步提高后续模数转换电路对窄脉冲信号的感知能力^[16], 设计了一种多路

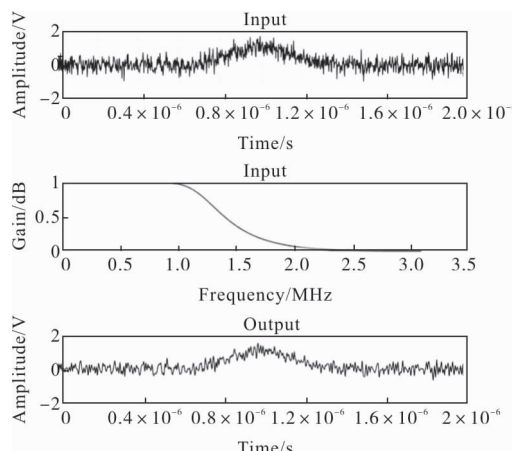


图 7 滤波效果仿真

Fig.7 Simulation diagram of filtering

并行峰值保持电路(见图 8)来获取前级电路输出信号的幅值并保持一段时间。该峰值保持电路由两个采样/保持电路和一个高速电压比较器组成, 其原

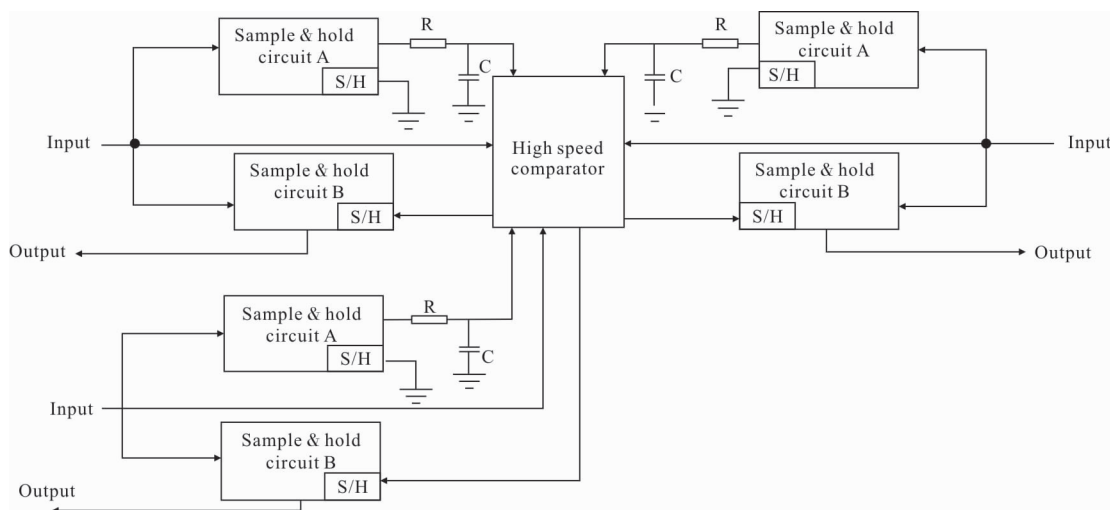


图 8 峰值保持器原理图

Fig.8 Schematic of a peak holder

理如图 8 所示, 采样/保持电路 A 端口始终置低(接地), 保持对来波信号的采样状态, 而 RC 滤波延迟对电压器两输入形成了微小的相位差, 使得电压比较器能够在输入信号达到峰值的时刻完成输出电平的跳变, 提供给采样/保持电路 B 以电平触发信号, 完成对输入峰值的采样或者保持。多路并行的峰值采样/保持状态转换触发信号由同一电压比较器多通道输出, 保证了多路脉冲信号展宽在时域上的同步性。

3 验证实验及数据分析

搭建的验证实验平台如图 9 所示, 由于整个验证实验中, 器件处在分子泵和离子泵运行下的真空腔室内(真空度在 10~5 Pa), 读出的信号处于强电磁场高噪声中。为了减小多级电路的公共阻抗耦合噪声, 缩小干扰磁场感应回路的面积, 真空腔金属外壳、信号提取系统都必须做接地处理。考虑在频率要求不高的情况下, 各电路的地电流不应经过地线

阻抗而相互耦合干扰，电路系统采用并行单点接地。整个器件的供电和阳极前置放大器的电源采用电池组，并根据各部分电位关系进行电池间的串联，以进一步降低电压震荡引入的纹波噪声，消除地电位差对信号回路的影响。通过多路线性稳压电源为后级信号调理电路提供不同范围的供电值。由于阳极顶部和底部存在 W 形和 S 形电极的公共部分，当空间电子束尺寸过大时容易产生纵向的畸

变，而引入了波导栅型结构，电子束透射薄膜过程中的径向展宽会加剧畸变。可采取如下改善方法：通过改进制备工艺减小栅型结构复合薄膜厚度；在保证栅极电流输出和不发生真空击穿情况下，适当加大栅型结构处加速电压 (Acceleration Voltage, AV)；位敏阳极到下层微通道板的间距应该从 0.5 mm 进一步减小；在未来封装整管时用电绝缘填充材料封闭楔条形图案的公共区域；考虑到极间电容增加

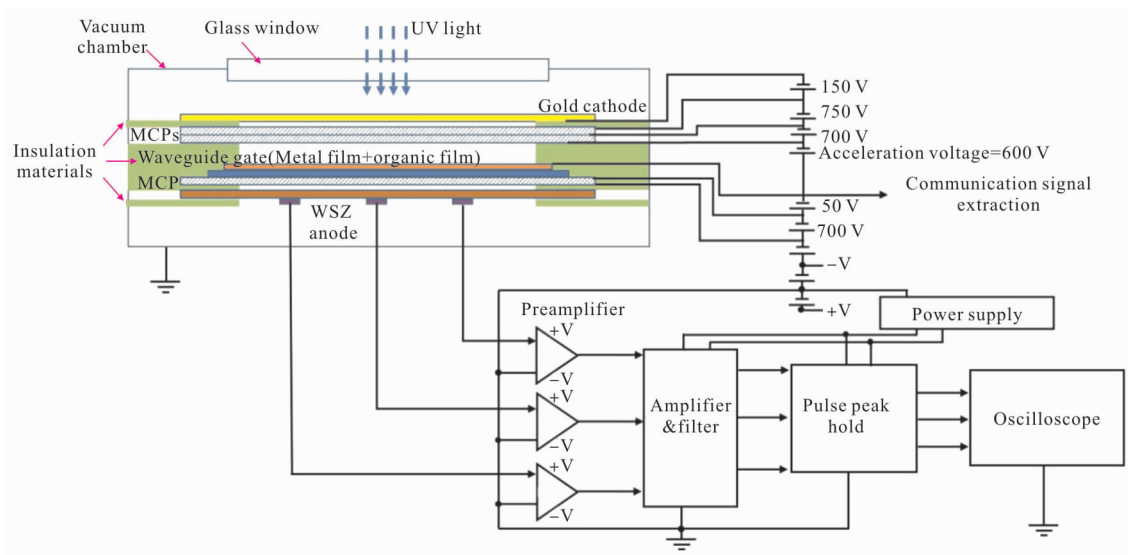


图 9 波导栅型复合探测器件位敏信号读出平台

Fig.9 Position sensitive signal readout platform for waveguide-gate complex detector

会导致频响性能下降，适当增加阳极有效探测区域面积。

位敏阳极若采用感应电荷读出方式^[17]，隧穿过栅极薄膜并经过下层微通道板倍增后的电子需要再通过一层半导体锗层产生感应电荷，导致位敏阳极上收集到总电荷量损失，并且会增加 WSA 上三个电极之间的极间串扰，从而对后续系统的探测灵敏度造成影响^[18]，因此阳极采用电荷直接读出方式。利用激光打标机在陶瓷基底上制作楔条形图样，电阻热蒸发铝材料在基底上镀导电金属膜来代替掩膜光刻，降低了工艺成本，简化了制备流程，制备完成的楔条形阳极如图 10 所示。为保证探测器灵敏度和空间分辨率^[19]，极间绝缘沟道宽度在 20 μm，陶瓷基底厚度为 2 mm，电极厚度达百纳米以上，为适配下层 MCP，阳极圆形轮廓直径为 36 mm。

验证实验中光电子激发阴极采用透射式金阴极，考虑到一般采用的汞灯或者氙灯为气体密封式

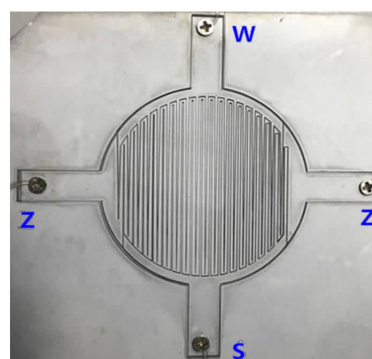


图 10 楔条形阳极结构实物

Fig.10 Wedge-strip anode structure

电弧放电光源，其冲调制频率较低^[20]，故使用 280 nm 紫外 LED 光源(见图 11)作为信号源。

紫外脉冲触发源包括直流驱动部分和脉冲调制部分，利用 PWM 信号来实现频率和脉宽调制。通过调整外部 RC 电路，进而在纳秒到秒的频响范围内生成所需要的光脉冲宽度，产生的信号馈送到发光

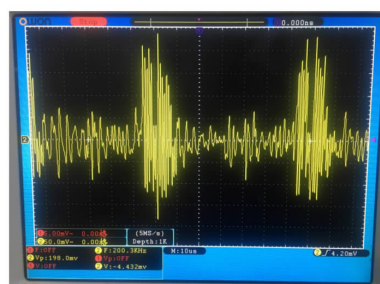
二极管驱动器的使能管脚，以正确的定时序列通过外部电流源驱动紫外光源发出脉冲光。



图 11 实验用紫外脉冲光源

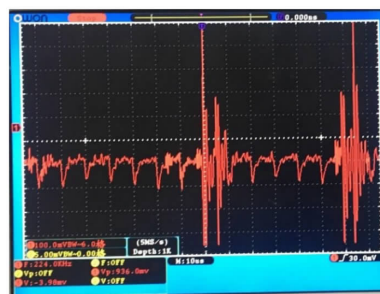
Fig.11 Ultraviolet pulse light source in verification experiment

从图 12(b)可看出,波导栅型复合探测器件的位敏阳极可以对脉宽 $2 \mu\text{s}$, 频率 200 kHz 的紫外光瞬时脉冲信号很好响应,形成了反向准高斯脉冲波形,而栅型薄膜对光电脉冲信号的影响,在位敏阳极提取的信号上表现为经反向放大器放大后的反向脉冲处存在波动和混叠。结合图 12(b)、(c),有源滤波后相对滤波前,信号脉冲波形平滑度更好,峰值处的噪声干扰明显减小;而基线的上移是由于信号中含有直流分量,可利用适值的电容做隔直处理。图 12(a)给出了在不加脉冲光源即无信号输入情况下,前端读出电路的输出结果。从图 12(a)中可以看出,即便对整个光电器件和读出系统做了接地处理,存在一部分高频噪声依然很难被克服,这主要源自于该波导栅型复合探测器件的暗电流噪声和为了保持实验腔室真空度而运行的真空泵带来的影响,而当关闭分子泵和离子泵时,通过示波器观察可发现高频噪声的幅值在逐渐减小。因此,图 12(b)、(c)中高频噪声也来源于验证实验中真空实验平台的分子泵和离子泵产生的高频电磁场。当器件实现金属化真空封装后,可以得到很好的消除。最后,将三路准高斯脉冲做反向和脉冲展宽处理后送入高速 A/D 进行数据采集通过 FPGA 传送至上位机进行算法处理并生成光子位置图像。



(a) 无信号输入时的暗噪声

(a) Dark noise without signal input



(b) 滤波前信号

(b) Signal waveform after filtering



(c) 滤波后信号

(c) Signal waveform after filtering

图 12 波导栅极复合探测器件位敏阳极单通道信号波形
Fig.12 Single channel's position-sensitive anode signal waveform of waveguide-gate complex detector

4 结论

介绍了波导栅型薄膜复合探测器件基本结构和工作原理,根据低能电子束在多元介质中散射的物理模型,对电子束在器件内部栅型薄膜透射的纵向轨迹和能量分布进行蒙特卡洛模拟并映射到位敏阳极。针对波导栅型复合探测器件中引入的复合薄膜对位敏阳极信号在直接提取方式下的影响,研制了专用的前端模拟信号读出电子系统,通过顺序级联压控放大和基于 Sallen-Key 电路拓扑结构的四阶

切比雪夫型低通有源滤波,并通过搭建波导栅型复合探测器件真空动态测试平台进行器件级的阳极信号读出实验,得到了脉冲宽度为 2 μs ,频率 200 kHz 的准高斯脉冲信号,减小了噪声和信号的堆叠现象,验证了器件阳极信号提取方法的可行性,为以波导栅型复合探测器件为基础的空间激光探测成像通信一体化提供了理论支撑与技术储备。

参考文献:

- [1] Liu Dexing, Mu Yining, Song De, et al. Preparation and experiment validation for a waveguide gate film complex detector [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(10): 1004001. (in Chinese)
- [2] Fan Xinkun, Zhang Lei, Song Yansong, et al. Simultaneous detection technology of tracking and communication based on four quadrant detector [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(9): 0906009. (in Chinese)
- [3] Conti L, Barnstedt, Hanke L, et al. MCP detector development for UV space missions [J]. *Astrophysics and Space Science*, 2018, 363(4): 63.
- [4] 母一宁. 新型瞬态电真空半导体光电子器件与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2018: 59-62.
- [5] Mu Yining, Du Yue, Li Ye, et al. Complex waveguide anode microchannel plate-photomultiplier tube (MCP-PMT) for space optical communication [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2016, 44(11): 2812-2816. (in Chinese)
- [6] Mu Yining, Du Yue, Li Ye, et al. Feature analysis and experiment validation for complex waveguide anode MCP-PMT [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(8): 0820004. (in Chinese)
- [7] Gao Xu, Mu Yining, Li Ye, et al. Verification experiment of electron shunt for complex wave guide grid microchannel plate-photomultiplier tube[C]//SPIE, 2016, 10255: 102552X.
- [8] Jiang Huilin, Fu Qiang, Zhang Yalin, et al. Discussion of the laser ranging with polarization spectral imaging observations and communication technology for space debris[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(4): 0401001. (in Chinese)
- [9] Ni Qiliang, Xiang Qiudong, Liu Xiufu, et al. High speed position readout circuit design for extreme ultraviolet photon-counting imaging detector [J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2017, 47(11): 1986-1990. (in Chinese)
- [10] Wang Xiaodong, Zhu Xiaoming, Lü Baolin, et al. Image tailing processing of WSZ position sensitive anode detector based on MCP [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(9): 2439-2444. (in Chinese)
- [11] Zhu Yufeng, Shi Feng, Liu Shulin, et al. Analysis and test on noise factor of micro-channel plate with ion barrier film [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(2): 499-502. (in Chinese)
- [12] Han Suli, Chen Bo, Ni Qiliang, et al. Electron cloud diffusion property of photon counting detector based on induction readout[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(7): 1732-1736. (in Chinese)
- [13] Liu Yonggan, 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. (in Chinese)
- [14] Shekhar S, Cho D, Cho D G, et al. Mapping nanoscale effects of localized noise-source activities on photoconductive charge transports in polymer-blend films[J]. *Nanotechnology*, 2018, 29(20): 205204..
- [15] Mitros P. Filters with decreased passband error [J]. *Circuits & Systems II Express Briefs IEEE Transactions on*, 2016, 63(2): 131-135.
- [16] Wey I C, Peng C C, Chow H C. Wide bandwidth and high precision power supply noise detector by using dual peak detection sample and hold circuits [J]. *International Journal of Circuit Theory & Applications*, 2014, 42(5): 529-541.
- [17] Ni Qiliang. Soft X-ray and extreme ultraviolet photon-counting imaging detector with curved surface microchannel plate and induced charge position-sensitive anode [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(5): 847-872. (in Chinese)
- [18] Zhang Zhiqun, Hu Juan, Chen Hua, et al. Low-crosstalk silicon photonics arrayed waveguide grating[J]. *Chinese Optics*, 2017, 15(4): 041301.
- [19] Liu Yonggan, Li Linsen, Liu Zhe, et al. Study on position-sensitive anode in photon counting imaging detector[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(4): 0404001. (in Chinese)
- [20] Yang Yu, Chen Xiaohong, You Bo, et al. Design of solar blind ultraviolet LED real-time video transmission system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(10): 1022001. (in Chinese)