

采用多像素光子计数器的单光子探测模块设计

杨延丽¹, 郑新旺¹, 杨光松²

(1. 集美大学诚毅学院, 福建 厦门 361021; 2. 集美大学海洋信息工程学院, 福建 厦门 361021)

[摘要] 为了在化学发光仪器中替代传统的光电倍增管(PMT), 克服PMT体积大、探测效率低、需要上千伏偏置电压的缺点, 设计了一种多像素光子计数器(MPPC)的单光子探测模块。在对前置放大器电路进行理论分析和仿真的基础上, 设计了放大电路、MPPC偏置电路和制冷电路; 利用高速比较器进行脉冲信号鉴别, 滤除噪声和干扰; 采用软件校正的办法处理脉冲堆积, 进一步提高了计数准确性。测试结果表明, 该模块的变异系数、线性相关系数、重复性等指标均优于传统的PMT探测器, 能有效地应用于单光子计数检测分析仪器。

[关键词] 多像素光子计数器; 化学发光; 放大电路; 脉冲堆积

[中图分类号] TN 29

Design of Photon Detector Module on Multi-Pixel Photon Counter

YANG Yanli¹, ZHENG Xinwang¹, YANG Guangsong²

(1. Chengyi University College, Jimei University, Xiamen 361021, China;

2. School of Ocean Information Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China)

Abstract: Multi-pixel photon counter (MPPC) has the advantages of excellent photon resolution ability, low voltage operation, insensitivity to magnetic fields and high reliability. Due to disadvantage of photo multiplier tube(PMT), such as large volume, low detection efficiency and bias voltage of thousands of volts, a photon detection module using MPPC is designed to replace the traditional PMT in chemiluminescence instruments. The amplification circuit, MPPC bias power supply circuit and refrigeration circuit are designed after theoretical analysis and simulation, and the pulse signal identification is performed using a high-speed comparator to filter out noise and interference, besides, the pulse stack is processed by software correction to further improve the counting accuracy. The results show that the designed photon detection module has priority over traditional PMT detector in the coefficients of variant, linear correlation and the repeatability. It can be used in the single-photon counting detection and analysis instrument.

Keywords: multi-pixel photon counter; chemiluminescence; amplification circuit; pulse stack

0 引言

化学发光是指在反应体系中某种物质的分子吸收了反应所释放的能量, 由基态跃迁到激发态, 然后再从激发态返回到基态时, 会把能量以光辐射的形式释放出来。处于激发态的中间体返回到基态时所释放的光辐射波长范围为 300 ~ 650 nm, 化学发光释放的光子数范围大约在每秒几百到几千万之

[收稿日期] 2021-05-18

[基金项目] 福建省中青年教师教育科研项目(JAT191159)

[作者简介] 杨延丽(1976—), 女, 高级工程师, 从事嵌入式系统、自动化设备方向研究。

<http://xuebaobangong.jmu.edu.cn/zkb>

间,最大发光强度约为 10^8 RUL/s (RUL, 相对发光单位, $1\text{ RUL}=1\sim 10$ 个光子),这是一种非常微弱的光信号^[1]。在光信号极其微弱时,光电流就不再是连续的,会离散成一个个的光子,称为单光子。这时,需要采用高灵敏度的单光子探测器对这种非常微弱的光信号进行单光子计数,从而探测微弱光的强度,实现生物、医学等领域的化学发光免疫分析。

目前一般化学发光单光子计数大多采用光电倍增管(photo multiplier tube, PMT)作为光电传感器,它具有增益高、暗电流低等优点,但是体积较大、探测效率低,特别是工作时必须配上千伏的偏置电压,限制了它在小型、便携式的仪器中的应用。多像素光子计数器(multi-pixel photon counter, MPPC)是一种新型的单光子计数器,它的一个 Pixel 是指一个雪崩光电二极管(avalanche photo diode, APD),可以实现超低量级的微弱光探测。APD 工作在盖革模式(Geiger-mode)下,当接收到一个光子时,所产生的光生载流子触发雪崩,雪崩击穿后的光电转换增益可达 $10^5\sim 10^7$ 。MPPC 又称为硅光电倍增器(SiPM),它由数百至数万个直径为几微米到几十微米的 APD 单元阵列集成在同一个单晶硅片上构成^[2],它可以在较低的工作电压下有较高的增益,输出信号幅度正比于同时发生雪崩击穿的 APD 单元数目。MPPC 具有目前最优秀的光子数分辨能力,没有像线性模式 APD 那样大的增益起伏或过噪声,具有比光电倍增管好得多的单光子分辨本领,具有体积小、工作电压低、不受磁场干扰、可靠性高等优点^[3]。为了克服 PMT 的缺点,本文采用 MPPC 替代 PMT,设计一种便携式单光子计数模块,并分析电路特点和误差原因,提出软硬件改进措施,以期提升变异系数、线性相关系数等指标。

1 采用多像素光子计数器的单光子探测模块设计方案

本设计选用的 MPPC 的型号为日本滨松 S11028-100,它是带制冷的 MPPC 多像素光子计数器,其峰值灵敏度波长 440 nm,光谱响应范围 320 ~ 900 nm,与化学发光的中心波长和范围相匹配。S11028-100 探测面积 $1\text{ mm}\times 1\text{ mm}$,像素 100 个,像素尺寸 $100\text{ }\mu\text{m}\times 100\text{ }\mu\text{m}$,时间分辨率 200 ~ 300 ps,增益 2.4×10^6 ,工作电压 $(68.25\pm 10)\text{ V}$ 。本模块整体设计方案如图 1 所示。S11028 自带内部温度传感器和两级热电制冷器,采用微处理器的 ADC 获取其内部温度,根据温度情况由 I/O 口控制热电制冷器,将工作温度恒定在 -10°C 左右。S11028 在恒定低温下工作,可以大大降低暗噪声。高压偏置电源微调由微处理器的 DAC2 控制。单光子入射到 APD 阵列后,所产生的光生载流子触发雪崩产生脉冲,将光子脉冲信号放大后送入高速甄别器,与 DAC1 产生的参考电平进行比较,去掉噪声和干扰,甄别出光子信号,将其送入单稳态触发器生成脉冲波,再送入微处理器进行光子计数。

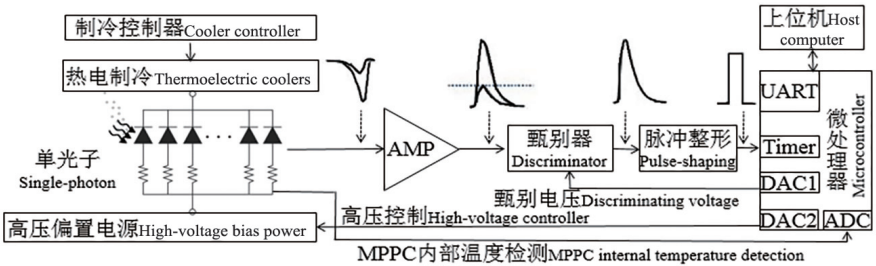


图 1 单光子探测模块框图

Fig.1 Block diagram of photon detector module

2 模块硬件电路设计

单光子计数探测模块的硬件电路主要包括高压偏置电源、制冷控制电路、跨导放大器、高速比较器、触发器和微处理器。

2.1 MPPC 光子探测原理

MPPC 的每一个 APD 都工作在盖革模式下,APD 单元偏置电压 V_b 高于击穿电压 V_{br} 若干伏,当其中一个 APD 单元接收到一个光子时,按一定的概率产生一个光电子,该电子在耗尽区产生诱导雪崩击穿,

产生一个恒定的电脉冲输出, 其光电转换增益可达 $10^5 \sim 10^6$ 。为了防止雪崩被击穿, 淬灭电阻提供一个回路放电, 雪崩管回到初始状态, 等待下一个光子打来。由于 MPPC 的结构特点, 适合采用无源抑制的工作方式^[4], 其工作电路和等效电路如图 2 所示。图 2a 中, 输出信号从 R_s 淬灭电阻上得到, 送入放大器。图 2b 是 MPPC 的等效电路, 其中: MPPC 等效为一个开关和一个电压源的串联; V_{br} 是 MPPC 内每一个 APD 的雪崩击穿电压; R_d 是 APD 的体电阻, 约几百到几千 Ω 不等; C_d 是 APD 的结电容, 一般为 pF 量级; C_s 为电路分布电容。APD 处于雪崩触发就绪状态时, 相当于 K 打开; 当有光子入射时, 光阴极把光子通过内光电效应转换成光电子, 触发雪崩, 相当于 K 闭合; 电容 C_s 、 C_d 通过体电阻 R_d 放电, 抑制开始, 时间常数 $T_q = R_d(C_s + C_d)$, 当 C_s 上的电压下降到小于击穿电压 V_{br} 时, 雪崩终止, 相当于 K 断开; 外加反向偏置偏压 V_r 通过大电阻 R_L 重新给 C_s 和 C_d 充电, 以恢复 APD 上的偏置电压到击穿电压 V_{br} 以上, 时间常数为 $T_r = R_L(C_s + C_d)$ 。由此可知, R_L 足够大能使雪崩电流迅速降低。

2.2 高压偏置电源和制冷控制电路

作为单光子探测器的偏置电源需要满足以下几个条件: 1) 电压要满足该型号的规格要求, 能够达到雪崩击穿电压以上; 2) 能够提供足够大的电流, 满足雪崩时电流迅速增大的要求; 3) 电源纹波要足够小, 有足够的稳定性, 减小由于电压抖动带来的噪声。另外 MPPC 对温度变化比较敏感, 其暗电流、暗计数噪声、雪崩电压等会随着温度的变化而变化, 需要恒定的工作温度才能稳定地工作。暗计数噪声大部分是温度导致的, 降低工作温度需要降低噪声, 但是温度太低也会导致灵敏度下降, 所以需要选择合适的工作温度。

本模块选用 EMCO 公司的高精度低噪声偏置电源 CA02P-5, 输出电压最大可达 200 V, 最大输出电流 5 mA, 纹波系数小于 0.01%, 满足 S11028 的要求。CA02P-5 通过 DAC 控制输出电压, 可以灵活地通过软件进行偏置电源调节。它还提供一个低阻抗的电压监视器, 用于监测 S11028 的工作电压情况。最后输出在 pin1 HV 脚, 在 pin1 上加较大电容, 外接 LC 滤波电路, 得到低纹波设计。该电源设计成独立模块, 用铁盒封闭, 以便减少对外界电路的影响。

偏置电源和制冷控制电路如图 3 和图 4 所示。制冷控制选用 ThermOptics 公司的半导体热电制冷专用驱动芯片 DN1221, 设计目标是将 S11028 工作温度控制在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。查 S11028 内部负温度系数热敏电阻参数表, 可知 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 对应的阻值 R_T 为 $40\text{ k}\Omega$, 根据 DN1221 的要求 pin2 和 pin3 之间所接 R_s 要等于目标温度下的热敏电阻阻值, 故接一个 $50\text{ k}\Omega$ 精密电位器。

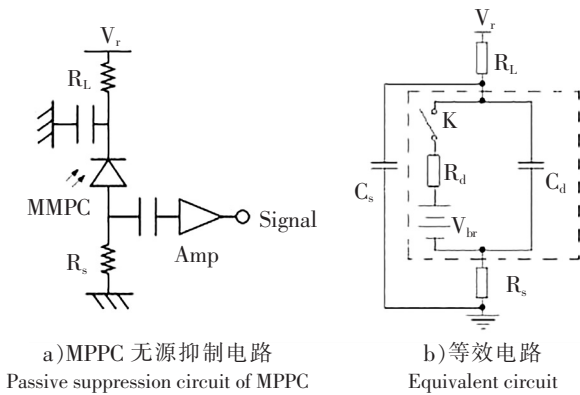


图 2 MPPC 无源抑制电路及等效电路图

Fig.2 Passive suppression circuit and equivalent circuit of MPPC

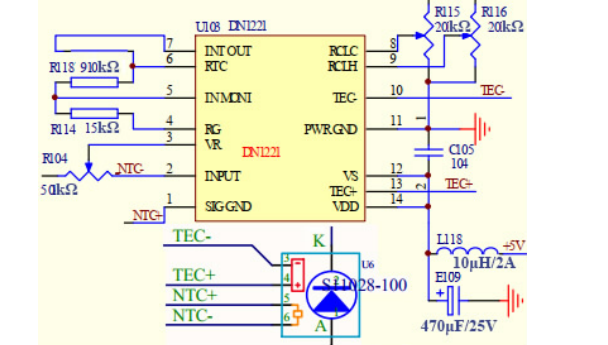


图 3 偏置电源电路

Fig.3 Biased power supply circuit

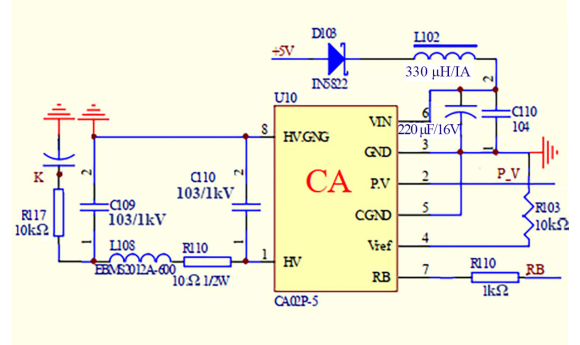


图 4 TEC 制冷控制电路

Fig.4 Refrigeration circuit

2.3 放大电路设计

从 MPPC 获得的单光子光电流信号需转换成电压信号, 然后进一步放大^[5], 将放大后的信号从背景噪声中识别并提取出来, 最后转换成标准矩形脉冲信号输出。在化学发光微弱光范围内, MPPC 输出脉冲宽度为 10 ~ 20 ns 的负向电流, 以及输出幅度不等、离散的电流脉冲信号。化学发光免疫反应发光频率范围约为 50 MHz 左右, 因此前置放大器中放大带宽应该在 100 MHz 以上。为此, 本模块选用 TI 公司的 THS3001, 它是电流负反馈型的高速运算放大器, 具有 420 MHz 的 -3 dB 带宽、低噪声, 并且在带宽内平坦度良好, 转换速率高达 6500 V/μs, 在大信号应用场合只需要 40 ns 的建立时间, 满足信号快速响应的要求。THS3001 还具有非常低的非谐波失真, 在频率为 1 MHz 时 THD 小于 -96 dB, 反向输入端输入偏置电流仅为 2 μA。由于本模块需要放大负极性脉冲信号, 所以使用 ±5 V 双极性电源供电。

在微弱光电检测电路中, 微弱信号提取的关键在于前置放大器的设计。第一级放大器的重点在于抑制噪声, 后级放大电路则需要重点考虑增益、带宽、阻抗匹配、稳定性等。本电路采用电流反馈型放大电路, 减少带宽损失。共采用四级放大, 一则可以获得正的输出信号, 二则可以减少后级放大电路大信号输入对带宽的影响, 获得一个较理想的幅频特性。第一级为电流—电压 (I/V) 转换的电流反馈运放电路, 有效的光信号都比较微弱, 再由 MPPC 转化成的光电流信号更微弱。利用电流反馈运放电路让光电流向反馈电阻流动, 从而在放大电路输出端转化成为电压。前置放大器具有相对较低的噪声, 以及相对较大的带宽, 比较适合 MPPC 输出的微弱信号的提取。第二级至第三级为反向比例运放, 第四级为射极跟随器。

电流反馈运放的反向输入电阻非常小, 所以它对反向输入端杂散电容的敏感度比电压反馈运放要小很多, 这对电流—电压转换非常有利。电流反馈运放的增益和带宽是相互独立的, 电流反馈放大器的带宽和稳定性仅受反馈电阻影响, -3 dB 带宽计算公式为:

$$f_c = (2\pi R_f C_c)^{-1}.$$

其中: R_f 为跨阻电阻; C_c 为运放寄生电容, 在本文中取 320 pF^[6]。代入参数可得: $R_f = (2\pi f_c C_c)^{-1} = (2 \times 3.14 \times 420 \times 10^3 \times 320 \times 10^{-12})^{-1} = 1185 \Omega$ 。反馈电阻 R_f 取值为 1.2 kΩ, R_f 取值合适有利于增加运放稳定性, 消除过冲。

为验证放大器设计思路, 使用 Multisim 软件分别对输入端、四级输出端进行了仿真测试。整体仿真放大电路如图 5 所示, 向输入端输入 400 μA 的脉冲电流信号, 从第四级输出幅值为 3.3 V 的正脉冲信号。仿真输出总波形如图 6 所示, 其中 V3、V4、V5 波形分别是图 5 中所标识的测试点的波形。本模块放大电路的第一级原理图如图 7 所示, 实物如图 8 所示, 从示波器最后一级输出实测到的波形如图 9 所示, 图 9 中上面的波形为放大电路第一级输出 200 mV 脉冲, 图 9 中下面的波形为第四级输出 4 V 脉冲。

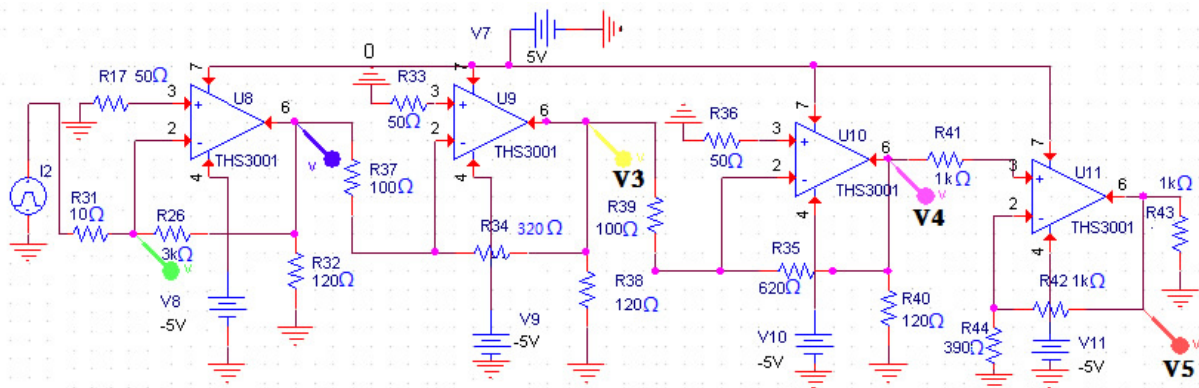


图 5 放大电路仿真电路图

Fig.5 Amplifier circuit simulation circuit

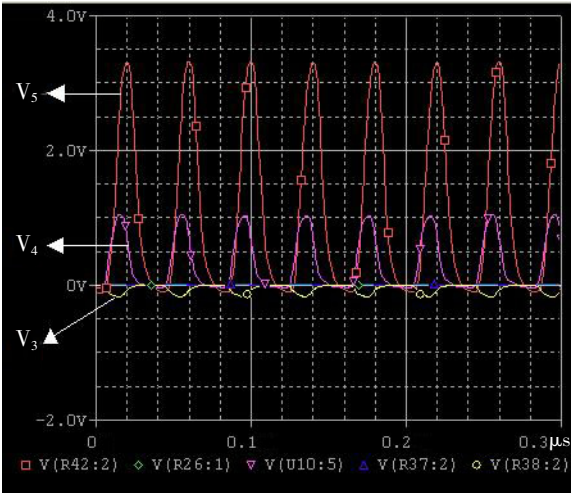


图 6 仿真输出总波形图

Fig.6 Total waveform of simulation output

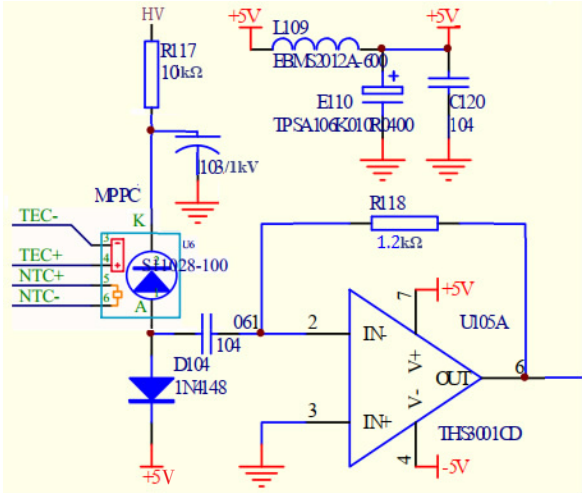


图 7 第一级运放电路图

Fig.7 First stage operational amplifier circuit

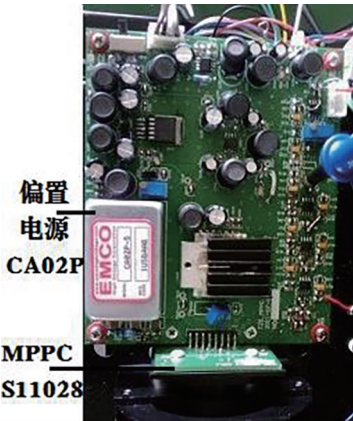


图 8 模块实物图

Fig.8 Photo of module

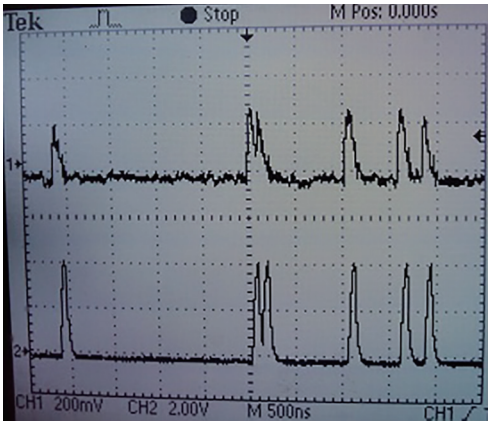


图 9 示波器观测波形

Fig.9 Waveform from the oscilloscope

2.4 甄别和脉冲整形输出电路

通常情况下, 光子信号脉冲幅度要比噪声信号幅度大, 噪声信号往往伴随着光子脉冲信号产生, 或者在光子脉冲信号之间以不规则的小脉冲出现。所以, 可以通过信号幅度鉴别的方式来滤除噪声。MPPC 每个像素在探测到光子时输出脉冲的幅度是相同的, 多个像素最终输出信号是单个输出信号相互叠加的结果。图 10 为光脉冲在 MPPC 中激发并被线性放大后的输出波形, 当有双光子同时被探测到, 输出的幅度等于两个脉冲叠加的高度。同理, 当有三个光子被同时探测到, 则输出幅度是三个脉冲叠加的高度^[7]。可以采用双阈值的鉴别方法区分单光子和双光子, 这种鉴别器有两个阈值电平 V_H 和 V_L 。当脉冲电平低于 V_L 时, 此时脉冲属于噪声和干扰, 计数值为 0; 当脉冲电平处于 V_L 和 V_H 之间时, 属于单光子脉冲, 计数值为 1; 当脉

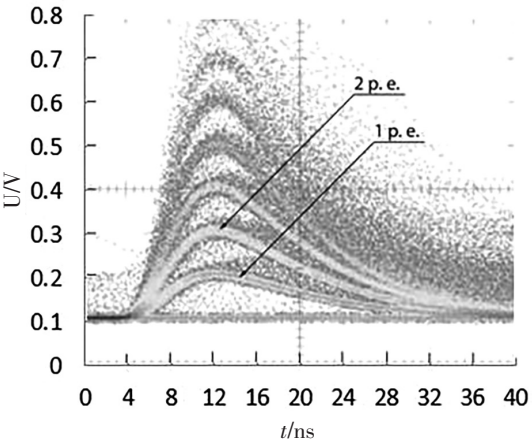


图 10 示波器上 MPPC 输出波形

Fig.10 Output waveform of MPPC from the oscilloscope

冲电平大于 V_H 时, 属于双光子脉冲, 计数值为 $2^{[8]}$ 。至于三光子及以上的多光子脉冲, 由于光子计数服从泊松分布, 采用软件校正的方法进行修正。

光子脉冲信号送入高速比较器 AD8611 的正输入端, 比较正输入端与负输入端的电压, 甄别出有效的光子信号脉冲。AD8611 是 8 引脚单路 4 ns 高速比较器, 速度快延迟小, 具有锁存功能和互补输出, 输入频率可达 100 MHz, 3 ~ 5 V 的单电源供电。AD8611 具备高速特性, 满足本模块对有效脉冲信号鉴别的需要。某些化学发光需要宽量程, 当发光强度稍大时, 已经从一个光子变成光电流了, 此时单光子计数的方式不再适用。为了解决这个高端饱和的问题, 在输出电路上增加一路 ADC 采集光电流电路, 放大电路输出端, 一路送入比较器, 一路送入运放 TLC2722, 用差分方式送入微处理器 12 bit ADC 进行模数转换, 再根据标定数值转换成对应的光子数。

3 单光子计数软件修正

MPPC 单光子计数误差的产生主要源于暗计数噪声、串扰、后脉冲效应、脉冲堆积等。根据 MPPC 特性, 暗计数的误差是所计光子数的平方根。例如光子计数值为 4×10^5 , 其包含的暗噪声为 $\sqrt{4 \times 10^5} \approx 632^{[9]}$, 所以这部分的暗噪声用软件的方法减掉即可。但在单光子计数值较高的情况下, 由脉冲堆积效应造成的多光子峰是误差的主要来源。

图 10 是光子在 MPPC 上激发并线性放大后, 在示波器观察到的 MPPC 输出波形图。多个光子同时打在 MPPC 时, 总输出信号是每个接受到光子的像素输出信号相互叠加的结果。轨迹波峰越高, 代表着入射的光子数越多, 每条轨迹间隔约 100 mV, MPPC 每个像素的增益均匀性比较一致。这种多光子脉冲, 使用多级阈值鉴别的方法很难实现, 由于入射光子统计结果服从泊松分布^[10], 并且光子越密集, 在同一分辨时间长度内出现的光子数越多, 误差越大, 这种脉冲堆积得采用软件的办法进行校正。

校正的方法有两种: 一是根据化学发光脉冲堆积发生的概率与光子脉冲频率的关系^[11], 用脉冲堆积发生概率倒算实际光子数。例如, 光子脉冲频率为 600 kHz 时, 误差为 9%, 倒算修正后为 654 kHz; 二是使用内插法修正。假定入射到 MPPC 的光子是完全随机的, 则光子在单位时间内到达 MPPC 的概率可以认定为均匀的。S11028 的时间分辨率 FWHM 为 200 ~ 300 ps, 根据泊松分布, i 个光子在时间 t 内出现的概率^[12] $P(i) = C_n^i t^i (1-t)^{n-i} = (nt)^i \cdot e^{-nt}/i!$ 。其中 n 为不存在脉冲堆积时对应的计数率。而实际探测到的脉冲数 $N = nP(0) = ne^{-nt}$, 所以计数误差 $E(n) = (n - N)/n = 1 - e^{-nt}$ 。由此可知, 入射光子数越多误差就越大。不修正情况下, 实测光子计数最大只能达到 4.5×10^7 RUL, 即加大发光强度, 该计数值无法增大, 无法满足测量范围要求。设修正系数 $k = N/n_k$, 其中 k 与光子数目的输入量级相关。根据光子输入的数量级, 在选定的分段区间内, 利用中间值 n_k 为插值, 计算修正系数 k , 即可以对该选定的分段区间内光子数进行修正。

经过两种校正方法对比, 第一种按脉冲堆积发生的概率估算的误差太大, 并且只能用近似的固定误差比例计算, 无法满足量程的要求; 第二种内插法计算结果比第一种小, 并且可以灵活地根据实测值进行修正, 基本满足要求。

4 指标测试

参照国家行业标准 YY/T 1174—2010 《半自动化学发光免疫分析仪的规定》^[13], 主要测试指标标准为: 变异系数 (CV) $C_v \leq 2\%$, 稳定性 $A \leq 3\%$, 不小于 3 个发光数量级范围内线性相关系数 $r \geq 0.99$ 。测试方法采取该国标中规定的试剂法和参考光源法, 测试所用光源采用中心波长 465 nm 蓝光 LED 加不同衰减片的方法模拟单光子脉冲^[14~15], 该光源采用化学发光试剂标准品标定。

4.1 与 PMT 仪器对比测试

使用参考光源分别测试 PMT 化学发光仪和本模块, 测试参考光源标称值为 1×10^3 、 5×10^3 、 $5 \times$

10^4 、 5×10^5 、 2×10^6 、 5×10^6 RUL (以 PMT 的计数为准标称的相对光子数), 对每个发光孔用两种仪器分别测试 20 次。用 20 次的值计算算术平均值 $\bar{X}(\bar{X} = (1/n) \sum_{i=1}^n x_i)$ 、标准差 $S(S = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 / (n - 1)})$, 用 $C_v = S \div \bar{X} \times 100\%$ 计算出变异系数, 结果如表 1 所示。

表 1 PMT 和 MPPC 分别测试参考光源
Tab.1 PMT and MPPC test reference light source respectively

参考光源 Reference light source	标称值/RUL	1×10^3	5×10^3	5×10^4	5×10^5	2×10^6	5×10^6
PMT	平均值 Avg/RUL	901	4 563	57 226	537 531	2 646 273	5 490 181
	变异系数 CV	7.92%	3.60%	4.20%	3.82%	1.85%	1.43%
MPPC	平均值 Avg/RUL	50 116	60 475	762 957	7 525 434	51 705 386	71 372 353
	变异系数 CV	0.92%	0.83%	1.02%	0.67%	0.58%	0.33%

该 PMT 仪器采用滨松 CR115, 橡胶套覆盖被测孔后通过光纤棒导光, 将单孔发光导至 PMT 光阴极测试光子数。

由于 MPPC 是由盖革模式雪崩光电二极管阵列组成的, 光生载流子在高电场下电离产生新的电子—空穴对。新产生的载流子同样也会被加速产生电子—空穴对。而 PMT 的增益来自于倍增系统的二次电子发射效应。MPPC 具有优良的时间分辨率, 同时入射的光子越多输出脉冲越高, 这些特性使 MPPC 测得的相对光子数值远大于 PMT。

由表 1 可知, 本 MPPC 模块的各个参考光源发光值重复性 (变异系数 CV) 都小于 1.1%, 而传统使用 PMT 测试的仪器只能做到小于 8%。

4.2 测光值变异系数和线性相关系数测试

按照国标将参考光源的下限值测试 10 次, 计算变异系数, 结果如表 2 所示。

表 2 光源下限值(1000)测试结果
Tab.2 Test result of lower limit of light source(1000)

测试值 Test value/RUL										平均值 Avg	变异系数
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	/RUL	CV
55 213	54 688	54 858	54 705	55 141	54 805	54 887	55 075	55 731	55 612	55 072	0.66%

由表 2 可知变异系数小于 2%, 满足国标要求。

线性回归相关系数按照国标要求进行。已知浓度的标准品测发光值, 依浓度 (取对数) 和发光值 (取对数) 的关系方程可求出标准浓度。把高值标准品稀释出 5 个梯度, 分别测 3 次发光值并取对数值, 用关系方程测算其浓度值, 画出浓度实际值与测算值的线性相关性曲线 (见图 11)。由此, 计算出相关系数 $r = 0.9967$, 满足国标大于 0.99 的要求, 但线性度需要进一步提升改进。

为了更客观地衡量本模块的性能指标, 同等条件下分别测试 PMT 仪器和本模块的本底数值各 10 次, 结果如表 3 所示。

从本底测试情况来看, 本模块的变异系数较小, 仅为 0.66%。虽然 MPPC 模块测得得本底数据是相对

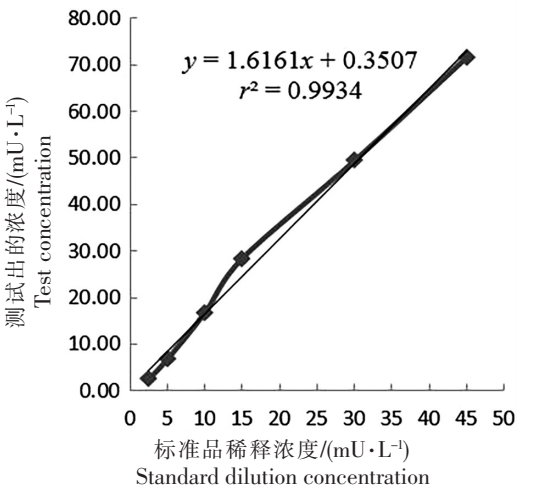


图 11 标准品稀释浓度与测试出的浓度值拟合曲线
Fig.11 Curve fitting of standard dilution concentration and concentration value

光子数，表明 MPPC 的计数灵敏度很高，但是 MPPC 本底整体偏大，这跟它本身暗计数比 PMT 高得多的特性有关^[16]。

表 3 本底测试结果
Tab.3 Background test rresult

模块	测试值 Test value/RUL										平均值	变异系数
Module	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Avg/RUL	CV
PMT	38	48	35	43	32	51	40	45	29	45	40.6	17.50%
MPPC	23 291	22 905	24 048	22 156	23 262	23 312	22 372	22 903	24 193	23 174	23 162	2.76%

5 结论

本文设计了一种用于化学发光分析的单光子探测模块。采用 MPPC 取代传统 PMT 作为光子探测器，设计了 MPPC 高压偏置电路、制冷电路、微弱光电流放大电路、甄别和整形电路，在软件上对暗噪声和脉冲堆积效应进行了分析和误差修正，进一步提高了单光子计数结果的准确性。经测试可以用于实际的化学发光分析仪器对单光子进行计数，关键指标满足国标要求。但是本模块也存在本底偏大和量程高端线性度不够好等问题，后续研究将进一步分析和改善这些性能。

[参 考 文 献]

[1]武星河. 基于光电倍增管的光子计数系统的设计[D]. 重庆:重庆大学,2015.

[2]张国青,张英堂,翟学军,等. 多像素光子计数器的信噪比特性[J]. 光学学报,2013, 33(3): 60-66.

[3]马付平,张广鑫,张高龙,等. 多像素光子计数器(MPPC)的性能测试[J]. 物理与工程,2015, 25(4): 38-41.

[4]高秀秀. MPPC 及其在激光测距中的应用[D]. 西安:西安工程大学,2018.

[5]桑涛,郝晓剑,张根甫. 硅光电倍增管(SiPM)适配电路设计[J]. 光电技术应用,2015, 30(4): 46-50.

[6]司可,吴玲玲,梁海锋. 基于 MPPC 探测器的激光脉冲信号读出电路设计[J]. 自动化与仪表,2021, 36(1): 77-81.

[7]刘建芳. 用于 MPPC 的电流灵敏型前置放大器的研制[D]. 北京:华北电力大学,2016.

[8]赵金平. 单光子计数系统的研究[D]. 长春:长春工业大学,2013.

[9]HAMAMATUS. MPPC Multi-pixel photn counter[EB/OL]. [2021-04-10]. https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/mppc_kapd0006e.pdf.

[10]任致远,仵国锋,刘杰徽,等. 基于多像素光子计数器的弱光可见光通信实验系统[J]. 信号处理,2020, 36(7): 1159-1165.

[11]陈文洋,邹明强,刘峰,等. 化学发光检测光子计数的统计特性[J]. 发光学报,2015, 36(7): 854-859.

[12]倪怀远. 摩擦热致发光测量系统的研究[D]. 杭州:浙江大学,2012.

[13]国家食品药品监督管理局. 半自动化学发光免疫分析仪:YY/T 1174—2010[S]. 北京:中国标准出版社,2012.

[14]杨延丽. 一种测量化学发光免疫分析仪指标的稳定光源研究[J]. 河南科技, 2014(24): 66-67.

[15]王烁. 便携式生物化学发光测量平台的研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2009.

[16]阎珍德. MPPC 简介及其性能测试[J]. 电子测试, 2018(15): 49-50.

(责任编辑 朱雪莲 英文审校 黄振坤)