

文章编号 1004-924X(2012)08-1661-08

SiPM 阵列电子特性建模和三维测深仪 前端电子学优化

聂瑞杰^{1,2*}, 徐智勇¹, 张启衡¹, 王华闯¹, 程 华^{1,2}

(1. 中国科学院 光电技术研究所, 四川 成都 610209; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要:从硅光电倍增管(SiPM)单个微元的微等离子体电子行为模型出发,分析了 SiPM 的电子特性,提出了 SiPM 前端电子学最优设计方案。阐述了 SiPM 的工作机理,给出了 SiPM 的电子行为模型,分析了 SiPM 应用于水下三维测深的优势。根据水下测深信号的回波特性,设计了高速、高带宽的前置放大器,并对前置放大器进行了交流分析和瞬态分析。结果表明,该前置放大电路在带宽内具有很高的增益平坦度,相位裕度大于 60° ,基本保证了信号的完整性,同时保持了激光脉冲的波形。分析和测试结果表明,该探测器和电路设计方案完全能够满足水下三维测深的需要。

关键词:硅光电倍增管(SiPM);微等离子体;电子行为模型;三维测深仪;前置放大电路;最优设计

中图分类号: TN152; P733.33 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122008.1661

Model of electrical characteristics of SiPM array and optimization of front-end design for three-dimensional depth sounder

NIE Rui-jie^{1,2*}, XU Zhi-yong¹, ZHANG Qi-heng¹, WANG Hua-chuang¹, CHENG Hua^{1,2}

(1. Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

* Corresponding author, E-mail: niruiji08@mails.gucas.ac.cn

Abstract: The electrical characteristics of Silicon Photomultipliers(SiPMs) were analyzed on the basis of the behavior model of a micro plasma electron in the SiPMs, and an optimum design scheme for the SiPM front was proposed. The working principles of SiPM arrays were introduced, the electrical behavior model of a SiPM was given, and the advantage of SiPM for the underwater three-dimensional depth sounder was discussed. Based on the echoing characteristics of the underwater depth sounder, a high speed, high bandwidth preamplifier was designed, and an alternating current analysis and a transient analysis were performed. Results show that the preamplifier circuit has much high gain flatness in the bandwidth and the phase margin is more than 60° , which ensures the integrity of signals and the waveforms of laser pulse signals. Analysis and test results indicate that the SiPM arrays and the circuit design can satisfy the requirement of underwater three-dimensional depth sounder, and can improve the target acquisition performance of the laser underwater imaging systems.

收稿日期:2011-12-22;修订日期:2012-03-15.

基金项目:中科院科技创新基金资助项目(No. A08K001)

Key words: silicon photomultiplier(SiPM); microplasma; electrical behavior model; depth sounder; front preamplifier design; optimum design

1 引言

硅光电倍增管(Silicon Photomultiplier, SiPM), 又称 MPPC(Multi-pixel Photon Counter), 是近年来迅速发展起来的一种新型探测器, 它的优异性能使其已成为光电倍增管的一种替代选择。与其他光子计数探测器相比, SiPM 体积小、工作电压低, 且对电场和磁场不敏感, 可以灵活地做成二维阵列。SiPM 采用硅材料制造, PN 结能带宽度限制了 SiPM 的工作波长, 使其低于 1 100 nm, 表面结深限制了 400 nm 以下光子的探测。由于所有微元的结构一致, SiPM 可以采用大规模集成电路制造技术进行批量生产, 极具有成本优势。因此, 各国研究组织都对这种探测器开展了大量研究^[1-9]。

SiPM 可以应用于各种单光子探测和多光子探测领域, 并且表现出优越的性能, 它能够分辨出间隔 2.3 ns 连续到达的 2 个光子^[10], 相当于 430 MHz 的光子计数率。在正电子发射断层扫描(PET)成像中时间分辨能力可以达到 1.4 ns FWHM^[11-12], 此外还可以应用于切伦科夫计数器^[13], 闪烁体光纤探测器, 荧光信号的高灵敏度探测^[14], 多目标测距等^[15]。

SiPM 的核心是一个盖革模式硅光子计数二极管, 即一个微元, 微元增益高达 10^6 以上。单个微元无法探测同时到达的多个光子, 因此将它们做成一组平行线的结构, 每一个硅光电倍增管可以包含几百到几千个这样的微元, 来实现大动态范围的光信号检测。

三维测深仪是机载海洋三维成像 LADAR 的一种, 它采用阵列探测器和阵列照明技术, 结合光机扫描系统接收由系统蓝绿激光器发射并被水下目标或海底反射的回波信号, 获得目标的位置-角度-角度信息, 并结合动态差分 GPS(Dynamic differential GPS, DGPS)技术和惯性测量单元(Inertial Measurement Unit, IMU)来实现水下目标的探测、定位和识别。与以往的单点扫描测

深系统相比, 三维测深仪具有更高的扫描效率, 可以达到与采用 CCD 探测器的机载水下成像系统相同的空间分辨能力, 由于无需考虑后向散射的影响, 且具有背景限探测灵敏度, 能够将系统的作用深度提高数倍。

由于海水及其各组分会对激光脉冲产生强烈的吸收和散射, 目标的精确定位, 要求三维测深系统的回波信号接收探测器必须具有高响应灵敏度、高响应速度和大响应动态范围等特点。本文从 SiPM 单个微元的微等离子体电子行为模型出发, 对 SiPM 的电子特性进行了深入分析和研究, 给出了 SiPM 前端电子学的最优设计方案, 阐述了 SiPM 应用于水下探测的可行性和优势, 并且根据水下测深信号回波特性设计了低噪声、高带宽的前置放大器, 采用仿真软件对前置放大器的瞬态特性和交流特性进行分析。最后, 基于前面的分析结果制作了 SiPM 阵列的前置放大电路板, 并进行了实验测试。

2 SiPM 阵列的响应特性

2.1 SiPM 单个微元的微等离子体模型

Roland H. 在对光子计数二极管微等离子体的研究中, 发现光子计数二极管在雪崩并且发生淬灭时所输出的复杂电流波形可以由雪崩击穿电压和串联电阻 2 个常数决定, 随即建立了光子计数二极管的电子行为模型^[16]。S. Cova 等人对光子计数二极管在主动淬灭和被动淬灭两种工作模式下的工作特性进行了研究, 分析了光子计数二极管的两种输出方式与输出信号特性^[17]。SiPM 的单个微元是一个采用被动淬灭技术的盖革模式光子计数二极管, 本文建立的 SiPM 单个微元的小信号模型如图 1 所示。 V_B 表示光子计数二极管的雪崩击穿电压, V_A 为光子计数二极管的反向偏置电压, R_d 为发生雪崩击穿时的结电阻, C 为结电容, R_L 为被动淬灭电阻。

当二极管未发生雪崩时, 开关 S 处于断开状

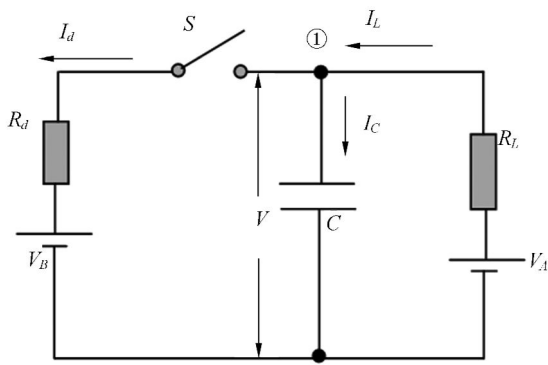


图 1 SiPM 单个微元的微等离子体模型

Fig. 1 Electrical behavior model for single microcell of SiPM

态;而发生雪崩时开关 S 闭合,此时可以列出节点①处的电流方程为:

$$I_L = I_d + I_C. \quad (1)$$

即:

$$\frac{V_A - V}{R_L} = \frac{V - V_B}{R_d} + C \frac{dV}{dt}. \quad (2)$$

由 $V|_{t=0} = V_A$ 和式(2)可以解得 PN 结两端电压为:

$$v = \frac{V_A R_d + V_B R_L}{R_d + R_L} + \frac{R_L}{R_d + R_L} (V_A - V_B) e^{-\frac{1}{\frac{R_d R_L}{R_d + R_L} C} t}. \quad (3)$$

又由 $R_d \ll R_L$, 可得:

$$v \approx V_0 + (V_A - V_B) e^{-\frac{1}{R_d C} t}, \quad (4)$$

其中:

$$V_0 = \frac{V_A R_d + V_B R_L}{R_d + R_L} = V_B + \frac{R_d}{R_d + R_L} (V_A - V_B). \quad (5)$$

电流计算结果分别为:

$$I_C = C \frac{dV}{dt} = -\frac{(V_A - V_B)}{R_d} e^{-\frac{1}{\frac{R_d R_L}{R_d + R_L} C} t} \approx -\frac{(V_A - V_B)}{R_d} e^{-\frac{1}{R_d C} t}, \quad (6)$$

$$I_L = \frac{V_A - V}{R_L} = \frac{1}{R_d + R_L} (V_A - V_B) (1 - e^{-\frac{1}{\frac{R_d R_L}{R_d + R_L} C} t}) \approx \frac{1}{R_d + R_L} (V_A - V_B) (1 - e^{-\frac{1}{R_d C} t}), \quad (7)$$

$$I_d = \frac{V - V_B}{R_d} = \frac{1}{R_d + R_L} (V_A - V_B) + \frac{R_L}{R_d (R_d + R_L)} (V_A - V_B) e^{-\frac{1}{\frac{R_d R_L}{R_d + R_L} C} t} \approx \frac{1}{R_d + R_L} (V_A - V_B) + \frac{(V_A - V_B)}{R_d} e^{-\frac{1}{R_d C} t}. \quad (8)$$

当开关 S 由闭合变为断开时,可列得节点①处的电流方程为:

$$I_L = \frac{V_A - V}{R_L} = C \frac{dV}{dt}. \quad (9)$$

又由 $V|_{t=0} = V_0$, 可解得电流和电压分别为:

$$V = V_A - (V_A - V_0) e^{-\frac{1}{R_L C} t}, \quad (10)$$

$$I_L = \frac{(V_A - V_0)}{R_L} e^{-\frac{1}{R_L C} t}. \quad (11)$$

式(6)和式(11)中的电流就是工作在被动淬灭模式下的盖革模式雪崩光电二极管阳极所输出的电流,显然电流信号的上升时间由 $R_d C$ 决定,下降时间由 $R_L C$ 决定。

2.2 SiPM 的电子行为模型

建立 SiPM 的小信号模型对于 SiPM 前端电子学的最优设计具有重要作用,通常将 SiPM 看作一个信号源以实现最优前端设计^[18-19]。

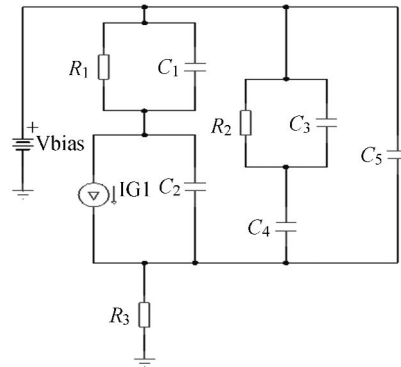


图 2 SiPM 的电子行为模型

Fig. 2 Electrical behavior model for SiPM

SiPM 的电子行为模型如图 2 所示,图中: $R_1 = R_L / N_{\text{fired}}$, $C_1 = C_L N_{\text{fired}}$, $C_2 = C_d / N_{\text{fired}}$, $R_2 = R_L / (N_{\text{tot}} - N_{\text{fired}})$, $C_3 = C_L (N_{\text{tot}} - N_{\text{fired}})$, $C_4 = C_d \cdot (N_{\text{tot}} - N_{\text{fired}})$, C_5 为 SiPM 的分布电容, R_3 为 SiPM 前置放大器的输入阻抗, N_{fired} 为发生雪崩的微元数目, N_{tot} 是总微元数目。

2.3 光子响应特性与动态范围

SiPM 微元的显微照片如图 3 所示^[20]。对于具有 N_{tot} 个微元的 SiPM 探测器,入射光子可能落到任何一个微元内的光敏面或非光敏面上,当入射光子数一定时,发生雪崩的微元数具有泊松统计特性。

当有 N_{ph} 个光子入射至 SiPM 靶面时,只有光子入射至某一微元的光敏区,才有可能引发雪崩,否则不会引发雪崩。落到一个特定微元并被

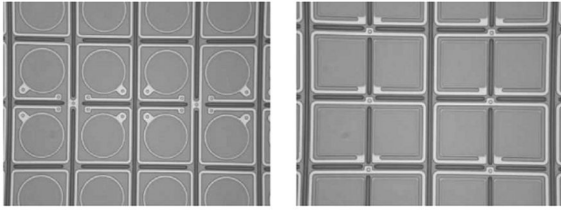


图 3 两种类型的 SiPM 微元显微照片

Fig. 3 Micrographs of design layouts of two SiPMs

探测到的平均光子数为:

$$\bar{N} = \frac{N_{\text{ph}} \cdot \text{PDE}}{N_{\text{tot}}}, \quad (12)$$

其中:PDE 为 SiPM 的光子探测率,PDE 受到入射波长和偏置电压影响,它的大小可由下式给出:

$$\text{PDE}(V, \lambda) = \eta(\lambda) \cdot \epsilon(V) \cdot F, \quad (13)$$

其中: $\eta(\lambda)$ 为硅的量子效率; $\epsilon(V)$ 是雪崩开始概率; F 为 SiPM 的填充因子。

落到某一特定微元并被探测到的光子数为 0 的概率为:

$$P(X=0) = \frac{\left(\frac{N_{\text{ph}} \cdot \text{PDE}}{N_{\text{tot}}}\right)^0}{0!} e^{-\frac{N_{\text{ph}} \cdot \text{PDE}}{N_{\text{tot}}}} = e^{-\frac{N_{\text{ph}} \cdot \text{PDE}}{N_{\text{tot}}}}. \quad (14)$$

因此当有 N_{ph} 个光子入射时,总数为 N_{tot} 的微元中发生雪崩的微元数目为:

$$N_{\text{fired}} = N_{\text{tot}} (1 - P(X=0)) = N_{\text{tot}} \left(1 - e^{-\frac{N_{\text{ph}} \cdot \text{PDE}}{N_{\text{tot}}}}\right). \quad (15)$$

由式(15)可以计算 SiPM 的响应动态范围,以 $N_{\text{tot}} = 3\ 600$, $\text{PDE} = 15\%$ 为例,最小可探测的光子数为 7,最大可探测的光子数大于 20 万,动态范围高达 4 个数量级以上。由此可以看出 SiPM 应用于水下测深回波接收极具优势。

2.4 时间分辨特性

SiPM 的时间分辨特性主要受到 2 个参数的影响,单个微元雪崩电流脉冲的上升时间 t_{onset} 和下降时间 t_{recovery} ,其中 t_{onset} 为:

$$t_{\text{onset}} = 2 \cdot 2R_d(C + C_L). \quad (16)$$

t_{recovery} 由淬灭电阻、寄生电容、二极管结电容、SiPM 分布电容决定,近似为:

$$t_{\text{recovery}} \approx 2 \cdot 2R_L(C + C_L). \quad (17)$$

这两个时间存在一定抖动从而影响 SiPM 的定时特性。

2.5 增益

一个光子可以激发 SiPM 单个微元的光敏区

产生一个电子-空穴对,即 2 个载流子,载流子在运动过程中碰撞产生更多电子空穴对,从而产生雪崩电流,SiPM 的增益可由下式计算:

$$G \approx \frac{(C + C_L)(V_A - V_B)}{q} = \frac{(C + C_L)\Delta V}{q}. \quad (18)$$

2.6 噪声特性

SiPM 的噪声主要为暗计数、串扰和后脉冲。没有光子入射时,SiPM 内部也会由于热激发而产生电子空穴对,并且引发雪崩电流,导致暗计数。探测器的串扰主要分为光学串扰、光谱串扰和电子串扰 3 种。串扰是未接收到光子的微元受到周围发生雪崩的微元影响而产生雪崩电流,串扰的大小受到微元之间间隔的影响,当微元间隔减小时,光学串扰和电子串扰将按照指数关系增加。后脉冲是雪崩电流即将结束时的某个载流子穿越雪崩增益区所引发的雪崩电流。通常实际测得的暗脉冲数是暗计数、串扰和后脉冲数目之和。

3 设计、仿真与实现

SiPM 具有单光子响应灵敏度,响应峰值波长在蓝绿光谱范围内,并且具有很高的时间分辨特性,应用于水下探测非常具有优势,为此本文设计了基于 SiPM 阵列的三维测深仪。系统采用激光作为辐射光源,由 SiPM 阵列作为水下返回信号的全波形接收器,通过获取波形所携带的目标距离、反射强度和表面特征来实现水下目标的探测、定位和识别。其中,SiPM 的前端电子学设计极为重要,它必须在一个很宽的频带范围内对 SiPM 的输出信号进行线性且一致的放大,因此,选用了 SensL 公司的 SPMAarray4 作为系统的三维测深回波接收器。

SPMAarray4 是一款 4×4 的多阳极 SiPM 阵列,阳极输出的雪崩电流上升时间为 $800 \sim 900$ ps,根据 SensL 公司给出的单个微元的单个微元的增益曲线,当 $\Delta V = 2$ V 时,增益为 1×10^6 ,由此可计算得 $C + C_L = 80$ fF, $R_d = 4.8$ k Ω 。其他由 SensL 公司给出的数据如 $R_L = 400$ k Ω , C_s 采用典型值 20 pF。SPMAarray4 每个像素集成了 3 600 个微元,每个像素的响应动态范围高达 4 个数量级,室温下测得的暗计数率为 8 MHz。

根据前面建立的 SiPM 电子行为模型,优化

设计了 SPMArray4 的前置放大器板,并进行了测试。由于水下探测的返回信号频率范围高达几百 MHz,因此选用了电流反馈型放大器 AD8009 来设计第一级放大电路,AD8009 是一款高速电流反馈型放大器,增益为 2 时,小信号带宽为 700 MHz,大信号带宽为 440 MHz,压摆率高达 $5\,500\text{ V}/\mu\text{s}$,非常适用于高频信号的放大。设计的第一级放大电路如图 4 所示。

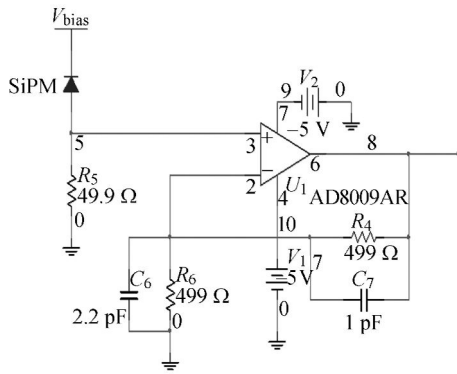


图 4 SiPM 前置放大器示意图

Fig. 4 Circuit drawing for one channel of SiPM pre-amplifier

利用 Multisim 软件建立了 SiPM 的电子行为模型和前置放大电路,并对前置放大电路进行了交流分析和瞬态分析,其中交流分析如图 5 所

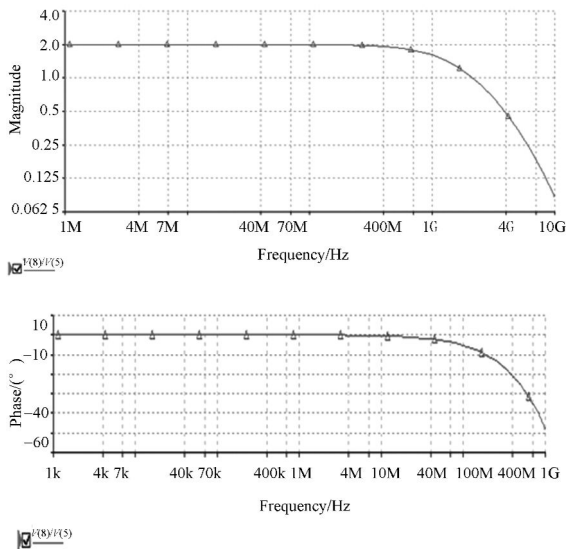


图 5 SiPM 前置电路的交流分析

Fig. 5 AC Analysis of SiPM preamplifier circuit

示。图中, $V(8)$ 表示前置放大电路的输出, $V(5)$ 表示前置放大电路的输入,即 SiPM 的输出。从图中可以看出,该前置放大电路能够在很宽的频带范围内对 SiPM 的输出信号进行放大,相位裕度大于 60° ,可以满足水下回波信号的探测要求,前置放大电路输出信号采用 Balun 转换为差分信号进行传输。

前置放大电路的瞬态分析如图 6 所示,上面的曲线为利用 SiPM 的电子行为模型模拟的 SiPM 输出信号,上面的曲线为前置放大器对 SiPM 信号进行放大后的输出信号,从仿真结果可以看出,该放大电路完全可以满足要求。

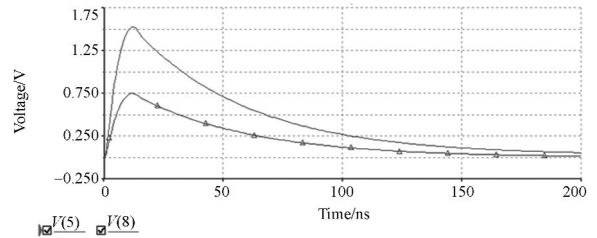


图 6 SiPM 前置电路的瞬态分析

Fig. 6 Transient analysis of SiPM preamplifier circuit

4 实验结果

SiPM 阵列的前置放大电路板如图 7 所示。

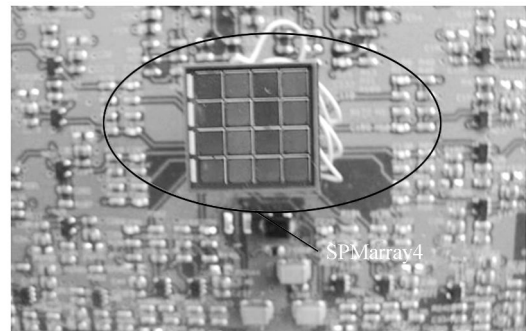


图 7 SiPM 前置放大电路板模块

Fig. 7 Circuit boards of SiPM preamplifier

激光器为闪光灯泵浦倍频 Nd : YAG 激光器,输出波长为 532 nm,脉冲宽度为 8 ns。在夜晚对 SiPM 阵列和前置放大电路板进行测试。采用 TEKTRONIX TDS2024 型数字存储示波器记录输出波形,测试点为 Balun 输出的负端,记录结果如图 8 所示。

TDS2024 存储的波形为两次采样的结果,目标为树叶和墙壁,前面的峰值为树叶所反射的激光脉冲信号,后面的峰值为树叶所遮挡的墙壁反射信号。由两次测得的目标峰峰值间距计算得树叶与墙壁的间距分别为 30 m 和 12 m,与实际间距符合得很好。上面波形前面部分出现的急剧抖动是激光器泵浦源对示波器和电路的干扰,在实际应用中可采用门控或其他方式加以屏蔽。

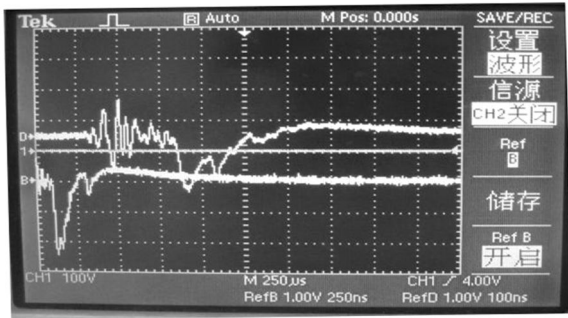


图 8 SiPM 输出信号经前置放大的输出
Fig. 8 Output signals of SiPM preamplifier

5 结 论

SiPM 是一种具有高灵敏度、高增益、高响应速度、高时间分辨能力、低工作电压的新型探测器,且对磁场和电场不敏感,体积小,封装形式多

样,它的并联结构使得它即可单独使用,也可组成各种形式的阵列,例如将各像素自由组合并联在一起,组成不同形式的探测器阵列,使得同一个探测器阵列上可以集成多个测量频道(浅水、深水等),从而简化系统结构。它的响应动态范围高达 4 个数量级,在高光照水平下不会损坏,与真空管光电倍增管相比可以降低系统维护和操作成本。分析和测试结果表明, SiPM 完全能够应用于水下三维测深,且极具优势。SiPM Arrays 的前端电子学设计是三维测深系统接收器的重要组成部分,水下回波信号的高带宽对接收器提出了很高的要求。本文所设计的 SiPM 前置放大电路在很宽的带宽内具有极高的响应一致性和相位裕度,基本保证了信号的完整性,较真实地反映了激光脉冲被障碍物和目标多次反射的特点,并保持了激光脉冲信号的波形。实际系统中在该放大电路之后添加了匹配滤波电路以限制系统带宽,输出信号再经对数放大器放大后送入波形数字化仪转换为数字信号,以待进一步滤波、除噪、数据分析、特征提取和三维重建。

采用激光光电子手段对海洋进行研究是最有效的手段之一, SiPM 的响应波长范围完全覆盖了海洋的光学窗口^[21-22],且成本低廉,完全能够满足海洋探测和研究的需要,必将得到大量应用。

参考文献:

- [1] BUZHAN P, DOLGOSHEIN B. Silicon photomultiplier and its possible applications [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2003, 504: 48-52.
- [2] GOLOVINA V, SAVELIEV V. Novel type of avalanche photo detector with Geiger mode operation [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2004, 518: 560-564.
- [3] STEWART A G, SAVELIEV V. Performance of 1 mm² silicon photomultiplier [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2008, 44(2): 157-164.
- [4] FINOCCHIARO P, PAPPALARDO A. Characterization of a novel 100-channel silicon photomultiplier-part I: noise [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2008, 55(10): 2757-2764.
- [5] FINOCCHIARO P, PAPPALARDO A. Characterization of a novel 100-channel silicon photomultiplier-part II: charge and time [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2008, 55(10): 2765-2773.
- [6] PETASECCA M, ALPAT B. Thermal and electrical characterization of silicon photomultiplier [J]. *IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record*, 2007, 24(124): 1275-1278.
- [7] STEWART A G, GREENE O' SULLIVAN E, et al.. Study of the properties of new SiPM Detectors [J]. *SPIE*, 2006, 6119: 61190A.
- [8] RENKER D. Geiger-mode avalanche photodiodes, history, properties and problems [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2006, A(567): 48-56.

- [9] GEORGIEVSKYA E A, KLEMIN S N. The solid-state silicon photomultiplier for a wide range of applications [J]. *SPIE*, 2003,5126:37-42.
- [10] ERAERDS P, LEGRÉ M. SiPM for fast photon-counting and multi-photon detection [J]. *Optics Express*, 2007,15(22):14539-14549.
- [11] OTTE A N, BARRAL J. A test of silicon photomultipliers as readout for PET [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2003, 504:48-52.
- [12] LLOSÁG, NICOLA B. Energy and timing resolution studies with silicon photomultipliers (SiPMs) and 4-Pixel SiPM matrices for PET [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2009, 56 (3): 543-548.
- [13] PESTOTNIK R, DOLENEC R. Silicon photomultiplier as a detector of cherenkov photons [J]. *IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record*, 2007, N41(3):2093-2096.
- [14] DHULLA V, CHENG L. Silicon photomultiplier: detector for highly sensitive fluorescence signals [C]. *Conference on Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science Conference and Photonic Applications Systems Technologies*, 2008.
- [15] SON K T, LEE C C. Multiple-target laser range finding receivers using silicon photomultiplier arrays [J]. *IEEE Electronic Components and Technology Conference*, 2009:2131-2136.
- [16] HAITZ R H. Model for the electrical behavior of a microplasma [J]. *Journal of Applied Physics*, 1964,35(5):1370-1376.
- [17] COVA S, GHIONI M. Avalanche photodiodes and quenching circuits for single-photon detection [J]. *Applied Optics*, 1996,35(12):1956-1976.
- [18] CORSI F, DRAGONE A. Modeling a silicon photomultiplier (SiPM) as a signal source for optimum front-end design [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2007,572:416-418.
- [19] SEIFERT S, SCHAART D R. High bandwidth preamplifier for SiPM-Based TOF PET scintillation detectors [J]. *IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record*, 2008, NM1 (2): 1616-1619.
- [20] STEWART A G, SAVELIEV V. Performance of 1-mm² silicon photomultiplier [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2008,44(2):157-164.
- [21] DUNTLEY S Q. Light in the sea [J]. *Journal of Optical Society of America*, 1963,53:214-233.
- [22] GILBERT G D. Deep sea light attenuation measurements at 2 000 m depth [J]. *NOTS Technical Publication*, 1965.

作者简介:



聂瑞杰(1985—),男,河南三门峡人,博士研究生,主要从事激光水下三维成像探测技术、信号与信息处理方面的研究。E-mail: niruijie08@mails.gucas.ac.cn



徐智勇(1967—),男,四川崇州人,研究员,硕士生导师,国家 863 计划光束控制重点实验室责任研究员,主要从事信号与信息处理和光电系统的研究。E-mail: xzy158@163.com



王华闯(1966—),男,河南禹州人,副研究员,主要从事光电探测与信号处理的研究。E-mail: wanghuachuang@163.com



程 华(1986—),男,山东新泰人,硕士研究生,主要从事激光雷达回波信号处理技术的研究。E-mail: cheng610a@163.com

导师简介:



张启衡(1950—),男,四川成都人,研究员,博士生导师,国家 863 计划光束控制重点实验室责任研究员,主要从事光电探测,目标跟踪,光电系统的研究工作。E-mail: qhzhang@ioe.ac.cn

●下期预告

光栅耦合的可集成 SPPs 激射装置

朱 君*,李志全

(燕山大学 电气工程学院,河北 秦皇岛 066004)

为了能够更有效地调节和产生表面等离子体(Surface Plasmon Polaritons, SPPs)的激射,设计了一种光栅耦合的可集成 SPPs 激射装置。分析了装置 SPPs 传播的波矢特性,利用某一条件下结构对激射条件和光照波长的分析得出结构具有的一般特性。结果表明:光栅耦合结构的装置产生的 SPPs 激射具有显著的强局域特性,研制的装置可通过控制注射电子束强度有效调节 SPPs 的激射,装置在光照波长 710 nm 左右的可见光范围就能实现有效的 SPPs 传播。这一装置的研制对于构建等离子单元电路和纳米光学装置的研究具有很积极的意义。