

文章编号:1672-6413(2011)06-0203-03

硅光电探测器的发展与应用

黄敏敏, 朱兴龙

(扬州大学机械工程学院, 江苏 扬州 225127)

摘要: 半导体光电探测器由于体积小、灵敏度高、响应速度快、易于集成, 是最理想的光电探测器, 典型的包括 PIN 光电二极管、雪崩二极管以及硅光电倍增管。论述了它们的工作原理, 以及在光纤通信、传感系统、高能物理、核医学等领域的广泛应用。

关键词: 硅光电倍增管; 雪崩二极管; PIN 光电二极管; 光探测器

中图分类号: TN364. +1; TN382 **文献标识码:**

0 引言

光探测器是一种用来探测光或其他电磁辐射能量的装置, 它把辐射能量转换成电流或电压, 并从外部电路测量这些电流、电压值。通过测量这些输出响应, 反过来可以测定相应的人射光强度或辐射强度。典型的光电探测器有光真空管(光电倍增管)、半导体光电二极管、半导体光导器件、热电偶等等。20世纪30年代时, 人们对光的探测与研究用的是光电倍增真空管(PMT), 真空管内部机械结构部分制造复杂, 体积大而且对电磁干扰非常敏感。硅光电倍增管不仅在辐射测量领域应用广泛, 在医学领域也受到了人们的广泛关注, 如正电子发射计算机断层扫描装置(Positron Emission Tomography, PET)。PET是目前惟一可在活体上显示生物分子代谢、受体及神经介质活动的新型影像技术, 但它缺乏对各断面之间的扫描, 而核磁共振成像(Magnet Resonance Imaging, MRI)正好可以满足这一要求, 它可以直接做出各种体层图像, 不会产生CT检测中的伪影, 无电离辐射, 对机体没有不良影响。如果能把PET和MRI结合起来将会对医学研究和发展具有深远的意义。但是一直以来PET所使用的光探测器是PMT, PMT并不能在强磁场中工作, 从而限制了MRI的发展, 硅光电倍增管正好解决了这个问题, 使得PET和MRI的结合成为可能。本文将介绍几种典型的硅光电探测器以及它们的应用。

1 PIN 光电二极管

图1为PIN光电二极管的工作原理图。它是一个在p-n二极管之间加入一个轻掺杂的本征区的探测器。图1(c)显示了跨越两端的内部电场, 电场强度随着离二极管表面距离的变化而变化。PIN光电二极管在本征区中的电场很强, 当一个光子在这一区域被吸收时, 光子能量转换给新的载流子(电子和空穴对), 这些新产生的载流子根据自身极性, 在电场作用下, 向不同方向漂移(电子朝向n区、空穴朝向p区)。如果外部电路再进行相连, 此时就有光电流产生。

由于PIN光电二极管有很宽的本征区域, 因此有了一个较长的光波吸收区域和较快的时间响应。它有很多应用, 如衰减器、射频交换机和光纤系统中的探测器。其噪声主要是暗电流和光的离散光子产生的散粒噪声。

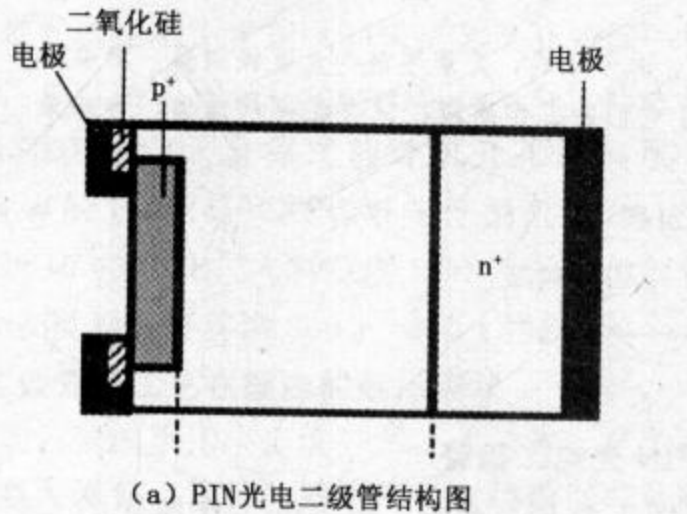
2 雪崩二极管(APD)

图2为雪崩二极管的工作原理图。其中, h 为普朗克常量, ν 为辐射电磁波频率, E_g 为能带宽度。它本质上也是一个p-n二极管, 与PIN光电二极管相比, 它具有内部增益, 增益一般为 $10^5 \sim 10^6$, 可以在吸收少量光子的情况下产生成百万的光电子。它对光子的吸收原理跟PIN光电二极管相似, 但分两个步骤: ①光子在吸收区域被吸收, 受内电场的作用, 电子飘向 n^+ 区, 空穴飘向 p^+ 区; ②电子在到达 n^+

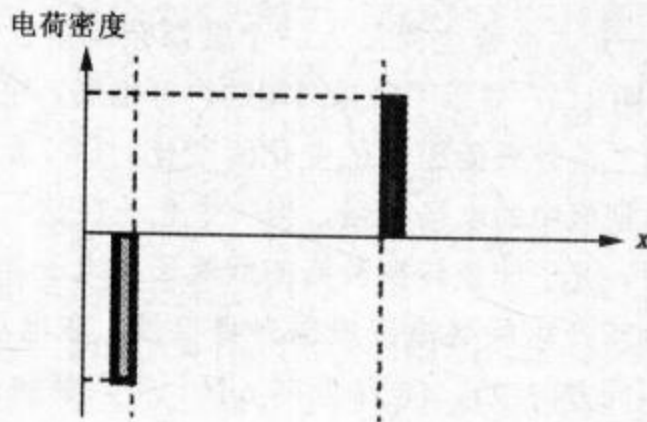
收稿日期: 2011-05-03; 修回日期: 2011-06-20

作者简介: 黄敏敏(1986-), 男, 江苏苏州人, 在读硕士研究生, 主要从事半导体器件的研究。

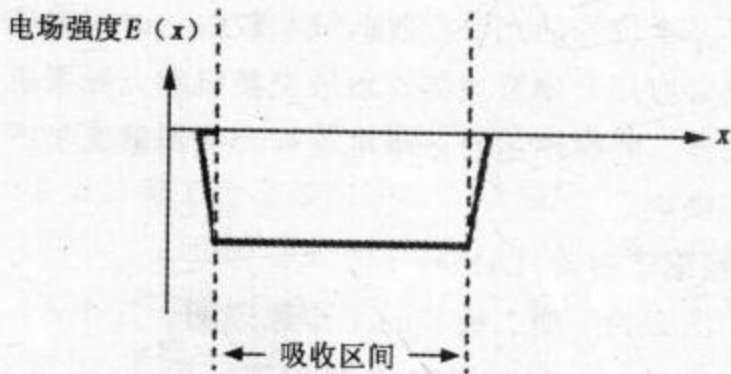
区之前，必须要通过雪崩区间（倍增区域），此区间的电场更强，其电场强度与所用材料及掺杂浓度有关。在此区域，电子被进一步加速，当电子具有足够高的能量并同材料内部共价键上的电子相撞时，根据康普顿原理，它传递了一部分能量，并使共价键上的电子离子化，产生了新的电子空穴对，这些新产生的粒子，反过来继续被强电场加速，当它们也拥有足够高的能量并发生碰撞时，进一步的离子化也就产生了，最后成百万的新载流子就形成了雪崩效应。



(a) PIN光电二极管结构图



(b) PIN光电二极管的空间电荷密度分布图



(c) PIN光电二极管的电场分布图

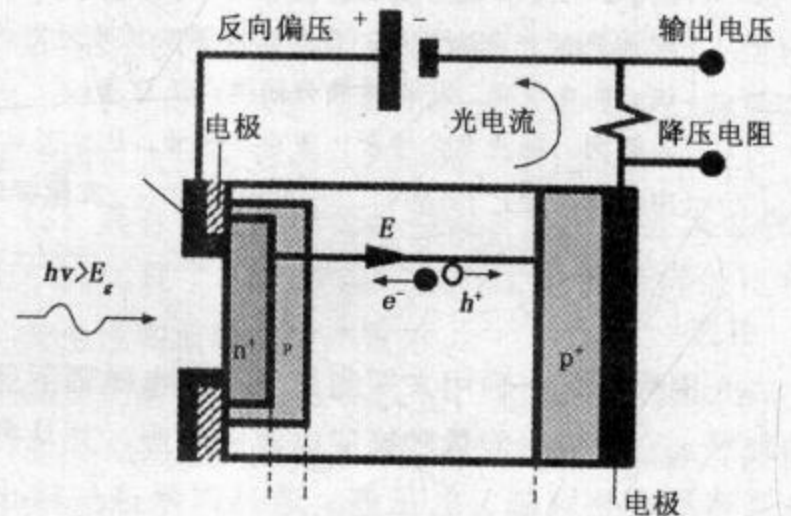
图1 PIN光电二极管的工作原理图

雪崩二极管的增益与加载电压和温度的变化有着很明显的关系，一般操作时要求有稳定的电压源和恒定的温度。在光照下，雪崩二极管的噪声为探测器本身的暗电流噪声、光子散粒噪声、热噪声和外电路噪声。

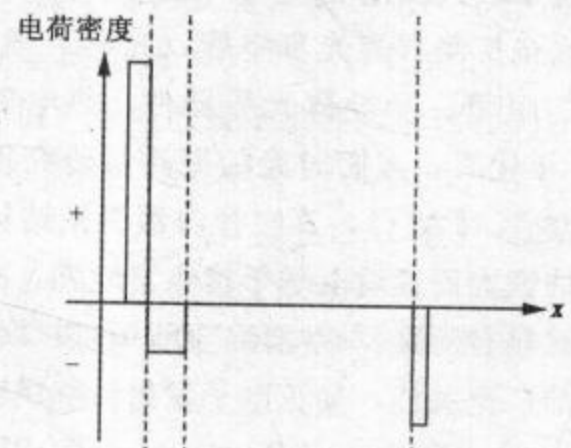
3 硅光电倍增管 (SiPM)

图3为硅光电倍增管结构图，它是20世纪90年代由莫斯科工程物理研究院首先发明的，现在很多公司都

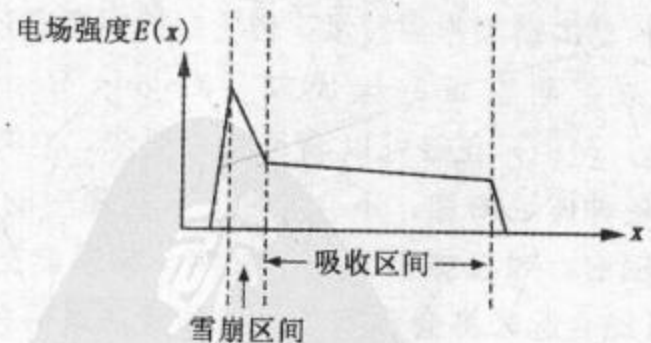
在运用此技术。它同样是基于p-n结二极管原理的探测器，它将每个小尺寸的雪崩二极管即一个像素点组合和固定在同一块硅衬底上，而且都工作在比普通雪崩二极管更高的反向偏压下（盖革模式，盖革模式所加载的偏压一般比击穿电压高10%~20%），因此其内部将会有有一个很大的传导电流。当电流小于雪崩二极管的闭锁电流时，在倍增区域的电流波动将趋于零，即SiPM处于关闭状态，直到由于热效应或者光子产生的载流子触发雪崩效应时，SiPM才处于工作状态。为减少不必要的热影响，最好使SiPM工作在低温状态。



(a) 雪崩二极管的结构



(b) 雪崩二极管的空间电荷密度分布图



(c) 雪崩二极管的电场分布图

图2 雪崩二极管的工作原理图

SiPM与APD最本质的区别在于它们的加载电压。SiPM采用更高的电压，内部也将产生更高的电场，更多的载流子会在电场中吸收足够的能量，然后通过离子化来触发雪崩效应。由于空穴有着比电子更高的电离化系数，因此当空穴在APD中不能大规模地触发雪崩时，在SiPM中就可以了。

当雪崩效应触发后,电流流过与每个像素点相连的降压电阻(一般为 $100\text{ k}\Omega\sim 200\text{ k}\Omega$),因此每个像素点两端的电压就会下降到比击穿电压更低的水平,雪崩无法继续也就随之而停止。雪崩效应停止之后,每个像素点需要一定的时间来恢复,为下一次的雪崩触发做准备。由于所有的像素点都是连接在共同的输出线路上,因此 SiPM 的输出是所有像素点输出的总和。虽然每个像素点是以数字开关的形式工作,但从总的输出来讲 SiPM 是个模拟元件。硅光电倍增管的噪声主要包括寄生脉冲和光学串扰。寄生脉冲是由于一些载流子在能带的空隙中被捕获,之后再随机地被释放,触发雪崩效应,产生一个伪脉冲,它与倍增过程中的载流子数目以及载流子的活动寿命有关;光学串扰是由在电离化过程中产生的光子所导致的,这些产生的光子传递到临近的像素点,在临近的像素点触发另一个雪崩,光学串扰的直接结果就是输出幅值的增大。

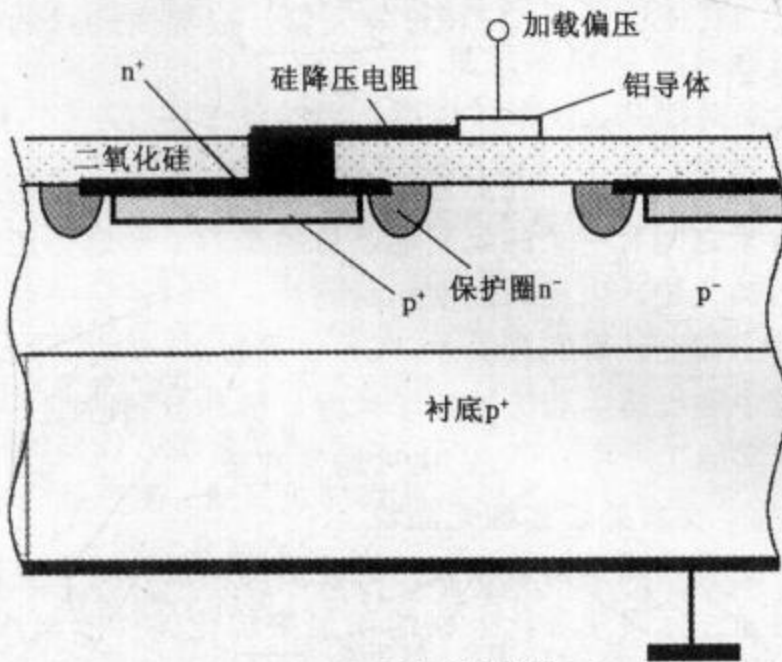


图3 硅光电倍增管结构图

4 结语

3种光电探测器都有很好的动态特性(时间响应性能),它们都可以用于探测极其微弱的光。

PIN光电二极管具有很好的光电特性(即线性),其结构简单,易于生产加工。与APD和SiPM相比,它没有内部增益,也是因为如此,它具有较小的暗电流。PIN光

电二极管长期工作稳定,而且只需加载较低的偏置电压。

雪崩二极管对于给定光波长光以及弱光强有较高的灵敏性,源于它的高内部增益,但此随机的倍增效应也会产生过量噪声。雪崩二极管需要较高的加载电压(几十伏到几百伏),同时需要维持稳定的电压和温度,结构复杂,制造成本高。

硅光电倍增管在弱光照时具有光计数能力强、内部增益高、时间响应快、加载偏压低、能量损耗低的特点。与雪崩二极管相比它可以在室温条件下工作,但它的暗计数以及光学串扰问题需要进一步降低。相信在不久的将来,硅光电探测器一定会得到更大的发展。

参考文献:

- [1] Renker D. New trends on photodetectors[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2007, 571:1-6.
- [2] Buzhana P, Dolgosheina B, Filatov L. Silicon photomultiplier and its possible applications[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2003, 504: 48-52.
- [3] Dolgosheina B, Balagurab V, Buzhan P. Status report on silicon photomultiplier development and its applications [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2006, 563:368-376.
- [4] Yuri Musienko. Advances in multipixel Geiger-mode avalanche photodiodes [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2009, 598:213-216.
- [5] Lionel Jacobowicz, Jean-Francois Roch, Jean-Philipp, et al. Teaching photodetection noise sources in laboratory [M]. [s. l.]:[s. n.], 1997.
- [6] Buzhan P, Dolgosheina B, Ilyin A, et al. An advanced study of silicon photomultiplier [M]. [s. l.]: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2002.
- [7] Joëlle Barral. Study of silicon photomultipliers [D]. Germany: Werner-Heisenberg Institut München, 2004:5-43.
- [8] Jelena Ninkovic. Recent developments in silicon photomultipliers [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2007, 580:1020-1022.

Development and Application of Silicon Photodetectors

HUANG Min-min, ZHU Xing-long

(School of Mechanical Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China)

Abstract: Semiconductor photodetectors have small size, high sensitivity, fast response and they are easy to integrate with other electronic devices, typically semiconductor photodetectors like silicon PIN photodiodes avalanche diodes and silicon photomultipliers. This paper introduced the working principle of the typically semiconductor photodetectors, as well as their wide application in optical fiber communication, sensing system, high-energy physics and nuclear medicine and so on.

Key words: silicon photomultiplier; avalanche photodiode; silicon PIN photodiode; photodetectors