

(20) 1142-1147

硅雪崩光电二极管单光子探测器

梁 创 廖 静 梁 冰 吴 令 安

(中国科学院物理研究所光物理开放实验室, 北京 603-15 信箱 100080)

Email: qo@aphy. iphy. ac. cn

TN 312.7
TN 364.2

摘 要 将硅雪崩光电二极管应用于盖革模式下, 制作出高量子效率、低噪音、短死时间的单光子探测器. 设计并制作了雪崩抑制电路, 获得探测器特性参量为无源抑制方式下死时间 $1\mu\text{s}$, 有源抑制下 $60\sim 80\text{ns}$, 输出脉冲宽度 $15\sim 20\text{ns}$. 并详细检测了探测器直到液氮温度下的特性. 观察到一些新现象.

关键词 雪崩光电二极管; 雪崩抑制; 盖革模式; 单光子探测器

APD

0 引言

在量子通信等量子光学实验中, 需要高效、低噪音的单光子探测器. 通常使用的光电倍增管 (PMT) 在近红外波段的量子效率太低, 而硅雪崩光电二极管 (APD) 在此波段的量子效率高、增益大, 同时也能覆盖可见区. 通常 APD 是应用在工作电压低于雪崩电压的情况下; 本文报道的 APD 应用方式则是在工作电压高于雪崩电压的情况下, 即所谓盖革模式. 国外现已有 APD 这种应用方式的商品, 但价格昂贵. 我们自己研制有关设备, 并首次进行液氮温度下的实验, 在国内首次制作了近红外单光子探测器.

某一瞬间, pn 结内没有任何电子或空穴, 雪崩就会被抑制. 根据抑制方式的不同 APD 盖革模式下的应用类型分为两种: 无源抑制^{2~4}和有源抑制^{5~7}. 在计数率要求不高的情况下采用无源抑制, 在量子通信等计数率要求高的实验中需采用有源抑制.

当 APD 的工作电压逐渐逼近雪崩电压时, 理论上雪崩因子 M 将趋于无穷大¹; 实际上, 当工作电压小于雪崩值时, M 到 1000 左右就会饱和. 只有在盖革模式下, 即工作电压高于雪崩击穿电压时, M 才能大到足以捕捉单光子. 在盖革模式下, 噪音也变得很大, 因此必须降低工作温度, 以减少噪音. 另外, 还必须在一个光子触发了雪崩后停止它, 否则雪崩继续下去, 探测器无法接收下一个光子. 因此, 尽量缩短死时间, 才能提高光子探测率. 在很大的 M 下, 只要 pn 结里存在一个电子-空穴对, 雪崩就会继续存在. 若要抑灭雪崩, 必须限制通过 pn 结的电流. 当电流小于一个阈值时, 由于电流随时间也有一个分布, 必定存在

本文描述了硅 APD 无源、有源抑制条件下作单光子探测器的行为. 可以看出盖革模式下工作的硅 APD 替代庞大、脆弱、贵重的 PMT 的优势, 它不仅在量子光学、光谱学、光学传感器等实验研究方面而且在通信、军工等方面有重要应用前景. 本文介绍的探测系统是作者为“量子密钥分发”实验而研制的, 运转良好. 限于篇幅, 将基本理论分析略去, 主要报道实验工作.

1 无源抑制方式

如图 1 所示, 无源熄灭电路是由一个大电阻 R_1 与 APD 简单串联构成, 单光子产生的雪崩电脉冲信号从一个 50Ω 阻抗 R_0 上引出. 它的等效电路图在右边. APD 可以看作一个理想的光控开关 K 与一个电压源 V_0 的串联构成, 有光子入射时 K 闭合, 而 V_0 就是 APD 的雪崩电压值. 图中还画出 APD 等效内阻 R_d 和结电容 C_d . 我们还应注意到实际存在的分布电容 C_g , 它的值一般只

有 pF 量级, 但它在电路中却扮演着极为重要的角色.

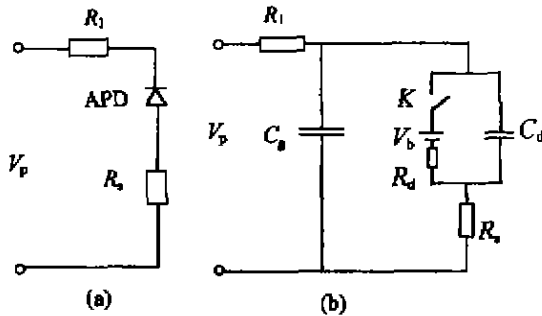


图 1 (a)无源抑制电路原理图, (b)该电路等效电路图 (V_p 为负高压源)

Fig. 1 (a)Schematic diagram of a passively quenched APD circuit, (b)Equivalent circuit

单光子电脉冲信号的产生分为三个阶段: 等待就绪阶段、雪崩阶段和恢复阶段.

1) 等待就绪阶段

这是探测器大部分时间所处的状态, 此时没有光子到达, 在 C_g 及 APD 上加一负偏置电压 V_p . 实际加在 APD 上的工作电压 V_d 比雪崩电压 V_b 高 ΔV , R_L 上的电压为 0.

2) 雪崩阶段

一个光子被处于就绪态的 APD 接收到时, APD 两端的电压在几个 fs 的时间内降为比雪崩电压值低一些, 电容 C_g 开始通过电阻 R_L 放电, R_L 上产生一个脉冲信号. 经过约 $R_L C_g$ 的时间, C_g 上的电压降到与 APD 两端的电压一致, 流经 APD 的电流小于 APD 的熄灭阈值, 雪崩停止.

3) 恢复阶段

雪崩停止后, 负偏压电源开始通过大电阻 R_1 给 APD 和电容 C_g 充电, 充电时间常量由 $C_g R_1$ 给出. 在恢复过程中, R_L 上也会有一个充电信号, 但是比雪崩信号要小 2 或 3 个量级. 当恢复阶段结束后, 电路回到了初始的等待就绪阶段. 如果 APD 在恢复期间又有一个光子到达, 也会有一个雪崩信号产生, 但信号高度要小一些, 这与前面的恢复时间有关, 恢复的时间越充分, 信号高度越大, 后脉冲几率越小 (所谓后脉冲是: 雪崩过程中被结区杂质捕陷的载流子在光探测脉冲结束后被释放出来产生的非光子探测脉冲).

通过前面的讨论, 可以看出, APD 单光子探测器的几个主要特性, 如脉冲信号高度、信号脉宽 $R_L C_g$ 以及死时间 (恢复时间) $C_g R_1$, 都与分布电容 C_g 有关. C_g 越大, 雪崩信号高度也越大, 信号脉

宽加宽, 死时间加长, 每秒钟能捕捉到的光子数就要减少. 在实际应用中, C_g 的选择是一个折中的问题. 某些场合对探测器速度的要求不高而且没有好的前置放大器的话, 可以有意识地加大电容 C_g . 我们曾经并上一个 200pF 的电容, 看到的雪崩脉冲宽度为 100ns, 脉冲高度在 1V 左右, 但此时恢复时间变长, 大约为 10 μ s 量级, 每秒最多能记录 10⁵ 个光子. 在另外一些需要精确记录光子到达时间的场合, 我们可以精心地设计电路板, 最大限度地减少分布电容 C_g . 如果想要得到性能更好的光子计数器, 可采用有源抑制的方法.

在室温下 APD 虽然也能进行单光子探测, 但暗计数 (即无光条件下由于噪音产生的计数) 较大. 降低暗计数需要冷却 APD, 国外报道的均为室温或半导体制冷温度下. 我们将 APD 置于液氮温度下工作, 以期获得新的或更好的特性.

我们曾经试用过国产的硅 APD 但是其增益太小等性能不适于制作单光子探测器. 最终选用的 EG&G 公司 C30902S 型 APD⁵, 光敏面直径为 0.5mm, 阈值电流为 50 μ A. 实验用的单光子探测装置示意图如图 2.

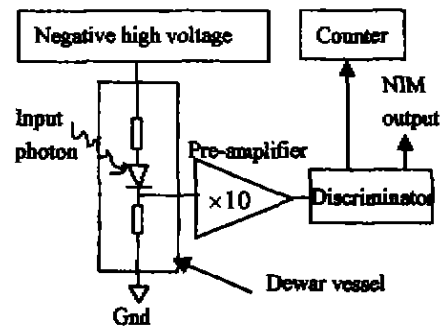


图 2 APD 无源抑制方式单光子探测装置示意图
Fig. 2 Block diagram of the passively quenched single photon APD detector

实验所用 APD 在 22 $^{\circ}$ C 条件下的雪崩电压值为 239V, 在液氮温度下雪崩电压值降到 110V 左右. 液氮温度下观测到的雪崩信号宽度为 20ns, 恢复时间为 1 μ s. 脉冲高度以及暗计数与所加电压有关, 如图 3~5 所示. 雪崩信号随工作电压的提高而增大, 整体幅度与 C_g 有关. 图 3 是 C_g 为 1pF 时的情形; 偏压超过雪崩电压 6V 时, 信号在 100mV 左右. 当 C_g 为 100pF 时, 在相同的偏压下信号可达 0.6V, 如图 4 所示. 与理论相符合, 当进一步提高工作电压时, 随着增益增大, 噪音也呈指数上升, 如图 5 所示. 实际使用时可以选取一个噪音和增益的最佳工作点.

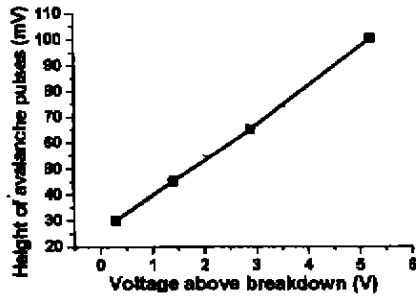


图3 APD雪崩信号与工作电压的关系($C_g=1\text{pF}$)

Fig. 3 Height of avalanche pulses v. voltage above breakdown ($C_g=1\text{pF}$)

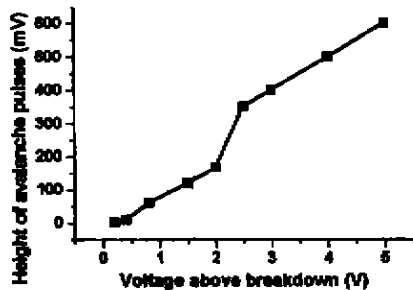


图4 APD雪崩信号与工作电压的关系($C_g=100\text{pF}$)

Fig. 4 Height of avalanche pulses v. voltage above breakdown ($C_g=100\text{pF}$)

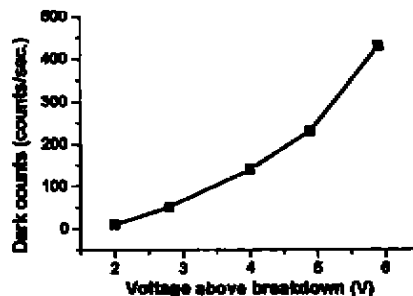


图5 APD暗计数与工作电压的关系

Fig. 5 Dark counts v. voltage above breakdown

从图6(使用了具有鉴别窗的EG&G PARC 1112型鉴别计数器)可看出在鉴别电平典型值以上,暗计数为100~500次/秒,与PMT的典型暗计数20~100次/秒相比较较大.但APD的特性曲线的谷底的相对高度比PMT的对应部分低很多.如图所示,取鉴别电平为8mV时,绝大部分噪声引起的计数率能被排除.这一点未见报道. APD的噪声大反而存在一个相对很低的谷底,其理论解释可以描述如下.雪崩管中的噪声主要分两种:不参与倍增的暗电流和因倍增而产生的倍增噪声.倍增噪声又有两种情况,其一是器件内部的部分暗电流参与倍增,其二是由于雪崩倍增过程的随机起伏而造成的倍增噪声.在APD探测光子时存在两个随机过程,一是由光子激励出光

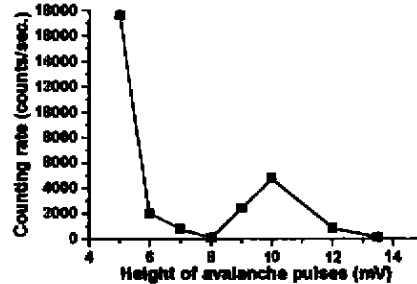


图6 雪崩信号高度分析图($\Delta V=1.4\text{V}$)

Fig. 6 Distribution of avalanche pulse height ($\Delta V=1.4\text{V}$)

生载流子的随机过程,另一是每一个光生载流子碰撞电离产生二次载流子的随机过程.每个载流子具有不同的雪崩增益,这就产生了附加噪声.用过剩噪声因子 F 表示倍增噪声,它取决于雪崩增益、注入或产生光电流的部位以及空穴电离系数 α_p 与电子电离系数 α_n 之比: $k=\alpha_p/\alpha_n$.电离系数的定义是:一个载流子在电场作用下漂移单位距离所碰撞电离产生的电子-空穴对数目.

用 M 表示雪崩增益, I_{ph} 为无倍增光电流(信号), I 为噪声电流,可写出⁹

$$\langle I^2 \rangle = 2eI_{ph} \langle M \rangle^2 F \tag{1}$$

$$F = \langle M^2 \rangle / \langle M \rangle^2 = 1 + \sigma^2 / \langle M \rangle^2 \tag{2}$$

式中 σ^2 为增益的均方差,即

$$\sigma^2 = \langle M^2 \rangle - \langle M \rangle^2 \tag{3}$$

于是电子碰撞电离决定的过剩噪声因子为

$$F_n = M_n \{ 1 - [(1-k)(M_n-1)^2 / M_n^2] \} \tag{4}$$

空穴碰撞电离决定的过剩噪声因子为

$$F_p = M_p \{ 1 - [(1-1/k)(M_p-1)^2 / M_p^2] \} \tag{5}$$

式中 M_n 和 M_p 分别为电子和空穴的倍增因子.

对于高增益的情况(M 很大),当有两种载流子等同的参与倍增时 $k=1, F=M$ (其中 $F=F_n$ 或 $F_p, M=M_n$ 或 M_p).而只有一种载流子参加时 α_n 或 α_p 等于0,相应的 $F=2$.而通常光电倍增管的噪声因子约为1,所以APD的噪声通常大于PMT的噪声,这与实验结果相符合.目前已提出噪声小于PMT的阶梯带隙结构的APD¹⁰.

虽然APD的平均噪声大于PMT,但是图6却显示APD的大部分噪声峰远低于光子探测峰.这是因为:APD是光伏型探测器,利用的是内光电效应中的光伏效应;而PMT是光电发射型探测器,利用的是外光电效应中的光电发射效应. APD中的暗电流、热激发等噪声载流子在其能量低于电离阈值时就不能引起雪崩效应,所以不会被放大,图6中谷底处对应的便是这种情况.

而 PMT 中的噪音电子通常能在下一级打拿极上产生一个或多个电子,即噪音被放大,所以 PMT 对应的特性曲线中的谷底远高于图 6 的.这一特性的实际应用价值在于能用鉴别器将 APD 的大部分噪音和光子信号清晰地区分开.可以预见,利用阶梯带隙结构的 APD 加上这一特性,其单光子探测性能就会远优于 PMT,并且 PMT 还有由光电发射效应决定的探测波长范围窄的缺陷.

实验选用的 EG&G C30902S 型 APD 是一种低噪音、拉通型结构的 APD,因而观测到了与上述理论相符合的现象.总之,我们用硅 APD 制作了性能可靠的单光子探测装置.它的单光子脉冲宽度为 20ns,死时间为 1 μ s,最大计数率可以达到 1MHz,暗计数为 100~500 次/秒.

2 有源抑制

我们将无源抑制扩展为有源抑制,获得了更短的死时间、更小的暗计数和更高的计数率.有源抑制方式中 APD 产生电脉冲信号的过程与无源抑制相同,所不同的是在有源抑制电路中通过外围电路迅速抑制雪崩并将 APD 恢复到等待状态以使其能探测下一个光子,从而大大降低了死时间.我们所用的有源抑制电路如图 7 所示.

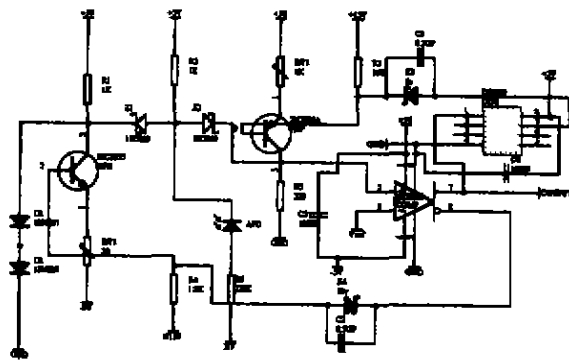


图 7 有源抑制电路原理图

Fig. 7 Schematic diagram of an actively quenched APD circuit

雪崩发生时比较器的正输入端电压下降,当这个电压低于设定的 V_{ref} 时比较器的负输出端翻转(由低电平转为高电平)导通抑制晶体管 2SC3355 使得 APD 上的电压降低以抑制雪崩.这时 Z_2 反向截止将 APD 与比较器的正输入端隔离开来.比较器的正输出端电平的负跳变通过一个延时片 DS1000 导通晶体管 2N2907A 使得比较器的正输入端电平回升到雪崩发生前的水平,两个晶体管回路截止.雪崩抑制过程完成,电路

准备好进行下一次光子探测.比较器的参考电压 V_{ref} 就相当于前面无源抑制中的鉴别电平,比较器的输出即可作为输出信号(TTL).这个电路的死时间由比较器、延时片子等器件决定.抑制时间由延时片延时与比较器正负输出端延时差决定,它越短通过 APD 雪崩区的载流子个数越少,被杂质捕陷的个数就越少.如同无源抑制时一样,我们将电路板置于杜瓦瓶真空夹层外壁内侧,APD 固定在冷端上,制成了有源抑制光子探测器.

我们在 -13.7~+21.1 $^{\circ}$ C 以及液氮温度下分别检测了所制作的有源抑制光探测器的死时间、暗计数、雪崩电压等特性.

图 8 为 Tektronix TDS520A 型 500MHz 数字示波器上记录的雪崩脉冲波形.一个雪崩脉冲过后约 60ns 出现很多雪崩脉冲.可以看出,我们所制作的有源抑制单光子探测脉冲宽度为 20ns,死时间大约为 75~80ns.在以上所述实验中电路板处温度约为 0 $^{\circ}$ C,我们还曾将电路板置于 22 $^{\circ}$ C 下进行单光子探测,发现脉宽大大增加达到 60ns,死时间也相应增大为 150ns,所以实际应用时,适当降低有源抑制电路工作温度对提高整个探测器性能大有帮助.进一步观测暗计数与温度、 ΔV 的关系,发现液氮温度下工作电压 V_a 刚刚等于雪崩电压 V_b 的情况下(液氮温度下 V_b 为 111.2V, -12 $^{\circ}$ C 时为 211.3V, 18 $^{\circ}$ C 下为 233.2V)暗计数约为 1~20counts/s, -12 $^{\circ}$ C 时暗计数为 50 左右, 18 $^{\circ}$ C 下暗计数为 250 左右,比无源抑制方式下要小.同无源抑制方式一样,暗计数随工作电压超过雪崩电压值的增加而很快加大,随 APD 工作温度的降低而大幅度减少,所以实际选取工作点应兼顾到这两种关系.

图 9 为 APD 在不同工作环境温度条件下我

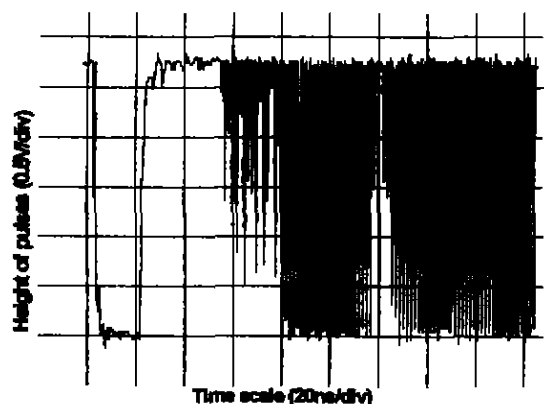


图 8 光探测输出脉冲波形 ($\Delta V = 27V$)

Fig. 8 Waveforms at the detector output ($\Delta V = 2V$)

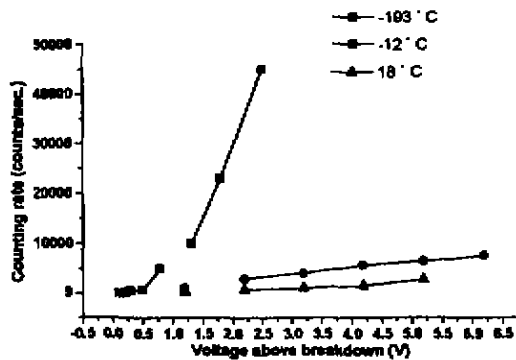


图9 各种温度下计数率与 ΔV 的关系

Fig. 9 Counting rate v. voltage above breakdown at various temperatures

们所制作的有源抑制探测器的工作情况. 三条曲线分别为液氮温度、 -12°C 、 18°C 情况下计数率(非完全暗室条件)与 ΔV 的关系曲线. 可以看出, 温度越低, 在相同的增益下计数率越大, 即量子效率越高.

与无源抑制方式相比, 有源抑制提高了探测器的反应速度和量子效率, 同时减少了暗噪声. 使用更高性能的电子元器件, 会获得更好的性能参量. 同时改变电路结构设计也可以进一步改善功能和特性.

另外, 给 APD 加门限电平也是一种有源抑制方式. 在需要控制探测器探测时间的情况下, 这种方式更为有用. 如图 10 所示, 抑制延迟时间为 10ns . 这样便可以通过计算机程序来控制 S_1 的值使模拟开关 74HC4053 选择 APD 两端的电压差: 当希望探测器响应光信号的时刻, 增大 APD 两端的电压差, 使之超过雪崩电压值; 而不希望探测器探测光子时, 减小 APD 两端的电压差, 使之低于雪崩电压值.

全部选用贴片元件, 制成的 Gate 方式有源抑

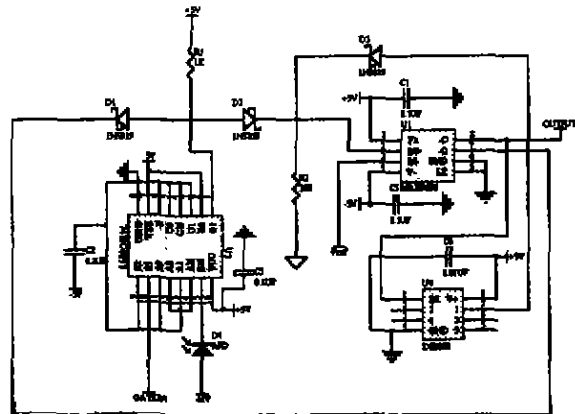


图 10 Gate 方式有源抑制电路原理

Fig. 10 Schematic of gated active quenching circuit

制 APD 单光子探测器的参量为: 半导体制冷 -50°C 时, 死时间 60ns , 脉冲宽度 15ns , 暗噪声 200counts/s 左右, 抑制脉冲幅度为 1V 左右. 暗噪声偏大的原因是为了我们量子密码通信实验的方便使用了普通的带尾纤 APD (EG&G C30902EQC-02), 且电路元器件工作在室温下.

3 结论

我们分别制作了无源、有源抑制的雪崩光电二极管单光子探测器, 并检测了它在不同温度下的工作特性. 针对所观测到的新现象作出了合理的理论分析, 获得(工作于液氮温度)的 APD 探测器典型参数为: 无源抑制情况下死时间为 $1\mu\text{s}$, 暗计数为几百每秒; 有源抑制情况下死时间为 $60\sim 80\text{ns}$, 平均暗计数为 100 次/秒. APD 在近红外波段量子效率远高于 PMT, 并且它的工作电压远低于 PMT, 工作稳定、响应快. 这项研究对于量子光学等需要单光子检测的实验具有较重要意义, 填补了国内近红外波段单光子探测器的空白.

参考文献

- [美] Tsang W T 编, 杜宝勋等译, 江剑平校. 半导体光探测器. 北京: 电子工业出版社、清华大学出版社, 1992: 1~332
- Brown R G W, Ridley K D, Rarity J G. Characterization of silicon avalanche photodiodes for photon correlation measurements 1: Passive quenching. Applied Optics, 1986, 25(22): 4122~4126
- Grayson T P, Wang L J. 400ps time resolution with a passively quenched avalanche photodiode. Applied Optics, 1993, 32(16): 2907~2910
- Owens P C M, Rarity J G, Tapster P R, Knight D, Townsend P D. Photon counting with passively quenched germanium avalanche diodes. Applied Optics, 1994, 33(30): 6895~6901
- Cova S, Longoni A, Andreoni A. Towards picosecond resolution with single-photon avalanche diodes. Rev Sci Instrum, 1981, 52(3): 408~412

- 6 Cova S, Longoni A, Ripamonti G. Active-quenching and gating circuits for single-photon avalanche diodes (SPADs). *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1982, NS-29(1): 599~601
- 7 Brown R G W, Jones R, Rarity J G, Ridley K D. Characterization of silicon avalanche photodiodes for photon correlation measurements 2: Active quenching. *Applied Optics*, 1987, 26(12): 2383~2389
- 8 RCA Data Sheet, C30902S Silicon Avalanche Photodiodes, January 1991
- 9 McIntyre R J. Multiplication noise in uniform avalanche diodes. *IEEE Trans. Electron Devices*, 1966, ED-13(1): 164~168
- 10 Capasson F. New device applications of bandedge discontinuities in multilayer heterojunction structures. *Surface Sciences*, 1983, 132(2): 527~539

PERFORMANCE OF A SILICON AVALANCHE DIODE AS A SINGLE PHOTON DETECTOR

Liang Chuang, Liao Jing, Liang Bing, Wu Lingan

Laboratory of Optical Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080

Received date: 2000-04-10

Abstract Silicon avalanche photodiodes operating in the Geiger mode are capable of detecting single photon in the near infrared regime. It is designed and tested two types of quenching circuit, with a dead time of about $1\mu\text{s}$ in the passive quenching mode and $60\sim 80\text{ns}$ in the active quenching mode. The output pulse width is about 20ns . The performance of the detector under various operating temperatures has been investigated down to liquid nitrogen temperatures, and a new observation is reported.

Keywords Avalanche photodiode; Quenching; Geiger mode; Single photon detection



Liang Chuang was born in Anhui, China, 1976. He received the B. S. Degree at Tsinghua University in 1993, and is currently studying for the M. S. degree. His research project is quantum key distribution, and involves quantum optics, cryptography, electronics, optronics and fiber optics.