

近红外单光子探测器*

孙志斌† 马海强 雷 鸣 杨捍东 吴令安 翟光杰 冯 稷

(中国科学院物理研究所,北京 100080)

(2007 年 1 月 8 日收到,2007 年 2 月 7 日收到修改稿)

该单光子探测器在实验中使用半导体制冷器制冷,雪崩二极管工作于盖革模式下,使用交流耦合方式提供门脉冲信号,通过延迟补偿和采样门控消除尖脉冲干扰,采用反馈门控减小后脉冲影响,优化电路参数减小暗计数.经实验测试与分析,温度在 -62.5°C ,门脉冲宽度为 50 ns,采样门控为 10 ns 的条件下,最佳工作点的暗计数率小于 $4 \times 10^{-6} \text{ ns}^{-1}$,量子效率约 18%,噪声等效功率为 $2.4 \times 10^{-19} \text{ W/Hz}^{1/2}$.

关键词:单光子探测,半导体制冷,雪崩二极管,盖革模式

PACC:4250,2970,2970F,2940S

1. 引 言

单光子探测是一种极微弱光探测技术,在高分辨率光谱测量、高速现象检测、精密分析、非破坏性物质分析、大气测污、生物发光、放射探测、高能物理、天文测光、光时域反射、地球科学、空间科学、量子信息等领域有着极其广泛的应用^[1-9].尤其是量子密码通讯技术由海森伯不确定性原理决定的完全保密的特点,是传统密码通讯技术不可比拟的,也是能抵挡住未来量子计算机攻击的一种密码通讯技术^[10-13].自从 1984 年 Bennett 和 Brassard^[14,15]提出第一个量子密码术方案并于 1989 年成功地完成量子密码通讯实验的演示之后,世界各国掀起了量子密码通讯实验的高潮.而作为量子密码通信技术的关键技术之一的单光子探测技术,也逐渐在量子光学的微弱光探测领域中显示出诱人的前景.而日新月异的半导体技术为单光子探测技术的发展提供了强大的动力^[16].目前应用于单光子探测器的光电转换器件主要有光电倍增管和雪崩二极管.光电倍增管对可见光和 UV 有较高的增益,从而得到了广泛的应用和研究,但在红外通讯波长范围内,光电倍增管较低的量子效率限制了在该波长的应用,取而代之的是基于半导体工艺的雪崩光电二极管.由于雪崩光电二极管在红外通讯波长量子效率高、功耗低、体积

小、工作频谱范围大、工作电压低等优点使基于雪崩光电二极管的单光子探测技术获得了迅猛的发展.用于红外通讯波长的光电器件根据波长范围的不同主要有:400—1100 nm 波长的硅雪崩二极管(Si-APD);800 nm—1550 nm 波长的锗雪崩二极管(Ge-APD);900—1700 nm 波长的铟镓砷雪崩二极管(InGaAs-APD).在远距离通讯的 1310 nm 和 1550 nm 两个重要波长的单光子探测中,InGaAs-APD 的量子探测效率比 Ge-APD 高,并且无需液氮,仅半导体制冷就可正常工作,因此 InGaAs-APD 被广泛应用于这两个波长上^[13,17-19].在实际应用中,为了提高雪崩二极管的增益,APD 要工作在盖革(Geiger mode)模式下,即反向偏置电压高于雪崩电压的工作方式.在偏置电压高于雪崩电压期间,有效光子将触发 APD 产生雪崩信号,为了探测下一个光子信号,必须将偏置电压降低到雪崩电压以下,使雪崩二极管恢复到初始状态.基于这种机理,必须有相适应的外围驱动电路来实现该过程.目前有以下几种驱动方式:无源抑制、有源抑制、混合抑制和门控抑制^[17,20-23].在无源抑制、有源抑制和混合抑制方式中,由于光子信号到达时间随机的,雪崩二极管就要处于接受准备状态,即偏置电压大于雪崩电压状态,直到光子信号到达,这样就会影响雪崩二极管的寿命,同时也会使暗计数增加,这几种方式一般应用于连续单光子信号探测场合中.而在脉冲单光子信号探测中,门控模式

* 国家重点基础研究专项基金(批准号 2001CB309301)和国家自然科学基金(批准号 60578029)资助的课题.

† E-mail: wula@aphy.iphys.ac.cn

以其低暗计数,雪崩二极管寿命长,易于控制等优点而被广泛地应用于(InGaAs-APD)。

本文主要研究了铟镓砷雪崩二极管在门控模式下的单光子探测技术,主要解决了以下几个问题:采用半导体制冷使雪崩二极管(APD)工作在较低的温度,以提高量子探测效率和降低暗噪声;通过合理延迟及采样时间控制消除雪崩二极管的寄生电容效应在门控脉冲的上升沿与下降沿期间造成的尖脉冲对单光子雪崩信号甄别的影响;采用反馈信号减小门控脉宽可以减少雪崩发生后流过雪崩二极管的电荷来达到减少后脉冲噪声;另外采用较低的门控电压和较大的限流电阻来进一步减小后脉冲噪声;在电路上采用数字与模拟分开,加宽和缩短地线等电磁兼容技术来降低电噪声对雪崩信号的影响。

2. 实验设计

2.1. 半导体制冷

在单光子探测过程中,暗计数是影响单光子探测性能的重要因素之一。暗计数是对雪崩二极管的内部噪声源的一种反映,主要来源于热激发、隧道贯穿和掺杂缺陷处的势阱。热激发会使电子从满带跃迁到空带,同时会在满带中产生空穴,这些电子空穴经雪崩倍增后,会产生伪计数,这些伪计数称之为暗计数。对于热激发产生的暗计数可以通过降低温度来减小暗计数。隧道贯穿指吸收区载流子通过隧道效应进入倍增区,在高电场作用下可能触发雪崩信号,增加暗计数。降低温度也能相应降低崩电压减小电场强度降低暗计数。基于上述原理,根据文献[20, 22]的报道,InGaAs-APD工作在180—220 K温度范

围内暗噪声较低,因此需要将APD冷却到该温度范围内,在该实验装置中采用了半导体致冷技术^[24]来实现。图1右下部示出半导体致冷的珀尔帖(Peltier)效应原理:由金属导体把N型和P型半导体串联起来组成半导体致冷器,当电流从N型半导体流向P型半导体时,在N型半导体与P型半导体接触端吸热称为冷端,而在N型半导体和P型半导体分别与金属电极相接触的一端放热,称之为热端。半导体致冷器的最大致冷温差由式(1)决定

$$\Delta T_{\max} = \frac{1}{2} Z T_c^2, \quad (1)$$

Z 是材料的优质系数,由材料性质决定; T_c 是冷端温度。在热端处于常温下时,最大的极限致冷温差是80℃。在实验中,如图1右上部分所示:将半导体致冷器的热端置于水冷腔表面,可以使热端处于较低的温度环境中,进而可以使冷端的温度更低,在冷端面放置有效载荷APD。为了防止APD在低温环境中结霜,保证APD正常工作,需将半导体致冷器、温度传感器和APD置于真空腔中,减少周围环境与APD所处环境之间的热传导。为了提高冷端温度的控制精度,该实验采用了PID控制器,并使用Pt101铂电阻的A级元件作为温度传感器。另外实验中设计了专用的制冷电源以提高致冷速度。具体电路如图1左半部所示。温度传感器将APD所处环境的温度值通过变送器送给PID控制器作为反馈信号,PID控制器将设定温度与反馈温度相比较,通过PID计算出调节量调制冷电源,使半导体致冷器将冷端温度降低到所设定的温度值。经实验测定控制精度小于 $\pm 0.1^\circ\text{C}$,最低冷却温度可以达到 -65°C ,真空度小于0.1大气压。

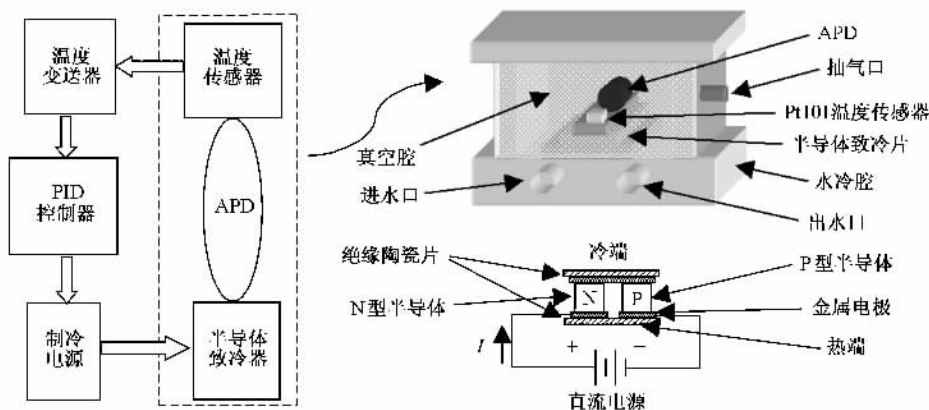


图1 半导体致冷系统示意图

2.2. 反馈式门控和延迟采样门控捕获电路

2.2.1. 交流门控模式的耦合电容大小的选择

在交流耦合时,耦合电容的参数对耦合到 APD 的门脉冲信号的幅值影响很大,图 2(a)是门控模式下的交流耦合的等效电路图.在图 2(a)中,虚线框内电路是雪崩二极管的等效电路图,开关 S 的作用相当于有雪崩信号时处于关闭状态,雪崩信号熄灭时处于打开状态; R_d 是雪崩二极管的体电阻,阻值与雪崩二极管的具体设计参数有关,一般在几百欧姆到几千欧姆; V_b 是雪崩电压; C_d 是雪崩二极管的结电容,其值小于 0.3 pF; C_s 是寄生电容,其值小于 1 pF;另外 R_L 是稳流电阻,一般为几百千欧姆; R_s

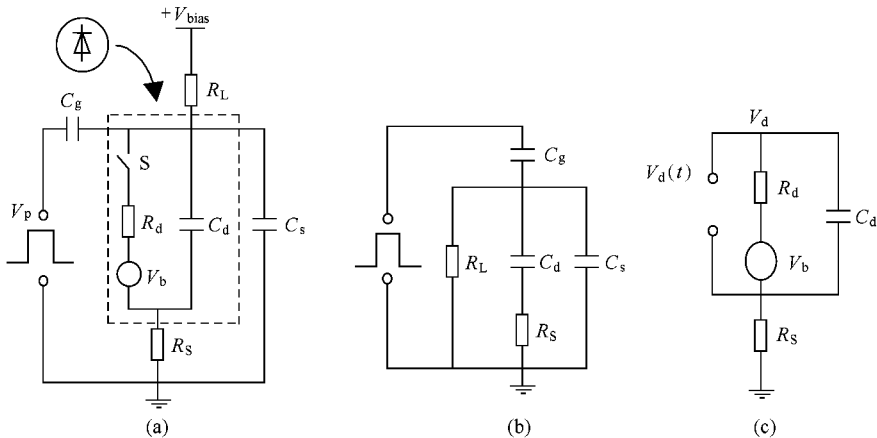


图 2 APD 等效电路图

2.2.2. 反馈式门控减少后脉冲

由于雪崩二极管中的掺杂缺陷处形成势阱,在雪崩信号期间势阱捕获的载流子在后续时间内被释放出来,在下一个门脉冲信号到来时可能触发雪崩信号,由于这种原因产生的伪计数称之为后脉冲计数.被势阱捕获后的载流子被释放完需要几微秒(称之为载流子的寿命),在探测过程中将降低单光子探测器的探测速率^[25].在文献[25]中,Owens 和 Townsend 等人在理论和实验上阐明了潜藏电荷的数目与雪崩期间通过的电荷量成正比,被捕获后的载流子寿命与温度相关,温度越低寿命越长.基于上述原理,在实验设计中,为了减小载流子的寿命就需要雪崩二极管的工作温度较高,但较高的温度又会增加由热激发产生的暗计数,因此就出现了文献[20,22]所述的最佳温度范围.为了减少后脉冲产生概率,就需要在电路设计中尽量降低雪崩信号的幅值,减小雪崩信号的宽度.但是幅值过低的雪崩信号

是采样电阻(典型值为 50 Ω), C_g 是耦合电容.图 2(b)是交流耦合等效电路图,在几 kHz—几百 kHz 的门脉冲信号下,电阻 R_L 远远大于 C_d 与 C_s 的阻抗,在图示的并联情况下相当于断路;电阻 R_s 远远小于 C_d 的阻抗,在图示的串联情况下相当于短路.因此脉冲信号耦合到雪崩二极管上的电压幅值可以由下式(2)计算:

$$V_d = V_p \times \frac{C_g}{C_g + C_s + C_d}, \quad (2)$$

根据(2)式,门脉冲信号要充分耦合到雪崩二极管上的条件为 $C_g \gg C_d + C_s$.在实验中, C_g 的值取为 50 pF,雪崩二极管上的耦合脉冲电压幅值就可以达到门脉冲电压幅值的 97% 以上.

在鉴别时又会受到电噪声的影响,因此就出现了最佳幅值高度范围,并需要在电路设计中降低电噪声.

图 3 示意了交流耦合的门控模式.该实验设计主要由门控调节、死区时间调节、与门和反相器构成反馈式门控模式来有效减小雪崩信号的宽度.具体工作原理如下:触发信号经门控调节到所设定的宽度,经与门通过耦合电容 C_g 耦合到 APD,处于偏压下的 APD 在门脉冲信号期间捕获到外来的光子就触发雪崩信号,比较器将雪崩信号与鉴别电压比较后输出一个鉴别信号,该信号的上升沿在采样门信号期间触发脉冲整形电路输出一个窄脉冲信号,死区时间调节单元将窄脉冲信号的宽度调节到所设定的宽度,经反向器反相后通过与门迅速关闭门控信号,从而熄灭雪崩信号.如图 3 的右半部分的时序信号,经反馈后的雪崩信号比未加反馈的雪崩信号的宽度小,这样就能有效地减少后脉冲.

雪崩信号的幅值大小影响后脉冲的多少,雪崩

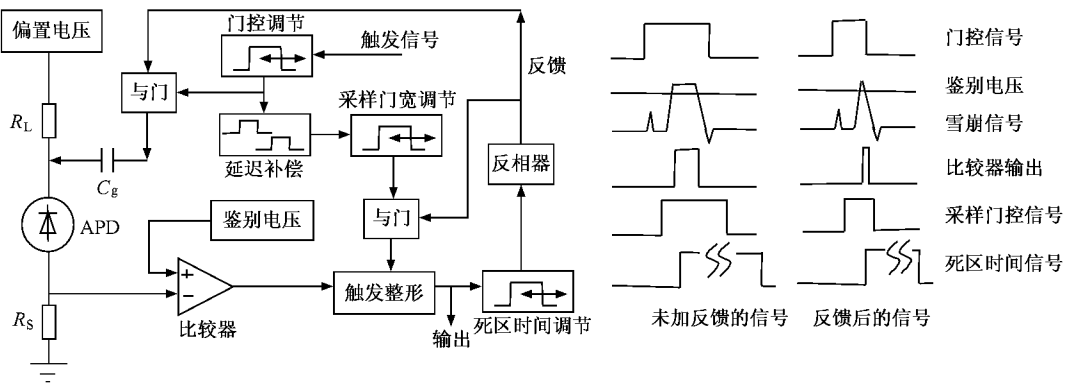


图3 雪崩信号提取电路

信号幅值越大,流过雪崩二极管的电荷越多,后脉冲就越多.要减少后脉冲就要在实验中尽可能降低雪崩信号幅值.图2(c)示意了雪崩信号产生的等效电路图,在图中 C_d 的阻抗 $Z_c \ll R_d$,在计算雪崩信号电流时可以忽略不计,因此发生雪崩时的电流强度可由(3)式计算,即

$$I_d(t) = \frac{V_d(t) - V_b}{R_d} = \frac{V_{ex}(t)}{R_d}, \quad (3)$$

依据上式,取 R_d 为 $1\text{ k}\Omega$,过电压 $V_{ex}(t)$ 为 2 V 时,雪崩电流大小可以通过上式计算得出为 2 mA ,在 $50\ \Omega$ 的取样电阻 R_s 的取样电压为 100 mV .在实验中,由于雪崩二极管的内电阻阻值没有提供,只能通过调节偏置电压的大小后测量取样电阻上电压值来间接获得雪崩电流的大小.在取样电阻为 $50\ \Omega$,电路的电噪声不大于 25 mV 的情况下,可鉴别的最小取样电压为 50 mV 时,最小雪崩电流 1 mA .通过这样的设计,来达到最大程度减小后脉冲的目的.

2.2.3. 延迟补偿和反馈式采样门控抑制尖脉冲噪声

雪崩二极管本身的结电容和寄生电容会在门脉冲信号的边沿处产生尖脉冲信号,尖脉冲信号会影响雪崩信号的提取,国际上的研究小组提出了各种不同的方法来避免尖脉冲的影响.其中IBM研究小组提出在APD的阴极接开路同轴电缆,在阳极接短路同轴电缆的方法消除尖脉冲信号^[19].这种方法主要是通过平衡差分的方法来减小尖脉冲干扰信号的幅值,当尖脉冲干扰信号的幅值减小到与电噪声相当时,这种方法就无能为力了.瑞士的id Quantique研究小组^[17]提出了符合门的方法避免尖脉冲信号的干扰.该方法是在正向尖脉冲信号和反向尖脉冲信号期间将雪崩信号与一个门信号相与来提取雪崩

信号.如果符合门太窄,将会丢失在尖脉冲信号期间的雪崩信号,另外上述两种方法没有考虑雪崩信号的峰值抖动与鉴别电压产生多次相交时的伪计数.

在实验中为了避免正向尖脉冲的干扰,如图3所示,在延迟补偿单元中,将门控信号延迟了一个固定时间长度,这个时间长度是正向尖脉冲的半高宽、APD和比较器的延迟之和,再减去采样门宽延迟的时间长度,经过这个固定时间的延迟,采样门信号就能避开正向尖脉冲的干扰.而反向尖脉冲是不会影响雪崩信号的鉴别.同时在该实验中,通过采样门宽调节单元和反馈信号的控制来减小采样门宽信号的宽度来抑制在没有雪崩信号时的电噪声的干扰;另外在触发整形单元采用单次触发设计来避免雪崩信号峰值抖动带来的干扰.采用上述这些方法,最大程度的减小了尖脉冲干扰信号、电噪声和雪崩信号峰值抖动对雪崩信号提取时的影响.

另外,在单光子探测过程中为了减小电噪声干扰,采用功能模块化设计方法.这种方法首先将数字电路和模拟电路分开,其次按功能将系统分为偏置电压源、鉴别电压源、电源电路、数字控制电路和雪崩信号提取电路模块,可以减少各模块在电路布线上的构成耦合回路;在电源设计中采用变压器和整流电路,并对电源模块采用屏蔽层减少电源对各模块电路的空间耦合干扰,同时在各功能电路的电源接口处使用去耦电容减少电源对各功能电路的干扰;在各功能电路的数控接口处采用光隔离减少数字电路对模拟电路的电干扰;在各模块电路内部将数字部分与模拟部分的电源地分开,并在数字地与模拟地之间接一个低阻值的电阻,并采用电路板铺铜,加宽地线,在布线过程中减小耦合回路的形成等

电磁兼容技术,减小电路内部的干扰。

最后该单光子探测器为了便于操作,前面板采用了由键盘和液晶组成的友好人机交互界面,构成独立仪器。

3. 实验结果

在单光子探测器的性能测试中,所用单光子源为衰减激光光脉冲式的,激光器为(PiLas, Advanced Laser Diode Systems PIL131DFB-SM),工作的中心波长是 1310 nm,线宽为 0.1 nm,光脉冲宽度约为 20 ps,重复频率 1 MHz,平均功率约为 980 nW,1310 nm 单光子的能量是 1.5×10^{-19} J,经衰减衰减约 81.8 dB,达到平均每脉冲光子数 $n = 0.1$ 。单光子探测器管芯是 JDS Uniphase EPM 239BA 的 InGaAs 雪崩二极管,然后将单光子信号直接输入到单光子探测器的尾纤。为了降低暗噪声,探测器的管芯通常工作在低温下,实验表明一般在 -65°C 至 -55°C 有最佳的噪声等效功率。在工作温度 -62.5°C 时,此时的偏置电压是 40.7 V,超出雪崩电压的值 $V_{\text{ex}} = 2$ V,可观察到雪崩信号,也即此温度下的雪崩电压约是 42.7 V。门脉冲宽度是 50 ns,采样门控为 10 ns。测试到的暗计数率和量子效率随增量电压的关系如图 4 所示。其次根据图 4 中的数据计算噪声等效功率,噪声等效功率的数学表示如下:

$$N_{\text{EP}} = h\nu \frac{(2R)^2}{\eta}, (\text{W/Hz}^{1/2}) \quad (4)$$

其中普朗克常数 $h = 6.626 \times 10^{-34}$ J·s, ν 是光的频率, R 是暗计数率, η 是量子效率。由此获得如图 5 所示的噪声等效功率随增量电压之间的关系。

从图 4 可以看出,随着增量电压的增加暗计数率和量子效率都在增加,在 0 V 至 0.8 V 之间,量子效率的增加幅度超过了暗计数率,再继续增加增量电压暗计数率的增长幅度明显的超过量子效率,且暗计数率呈非线性增长而量子效率的增长趋于平缓,为保护雪崩管,增量电压没有继续增加。从图 5 上可以明显地看出,随着增量电压的增加,噪声等效功率逐渐下降,直到 0.8—0.9 V 降到低谷,然后又逐渐上升(在 0.5—1.0 V 的放大图中)。从上面的实验数据可得到,单光子探测器在工作温度 -62.5°C 时,最佳工作点的暗计数率小于 $4 \times 10^{-6} \text{ ns}^{-1}$,量子

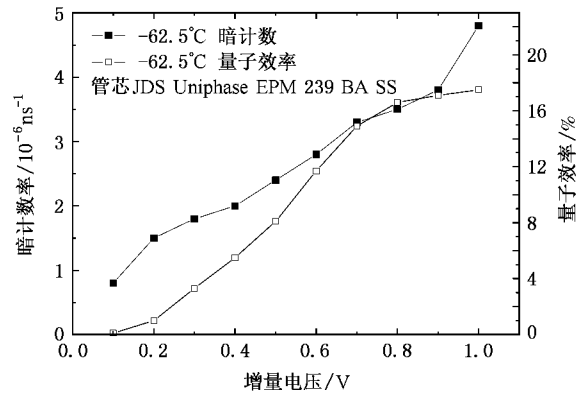


图 4 暗计数率、量子效率与增量偏压之间的关系

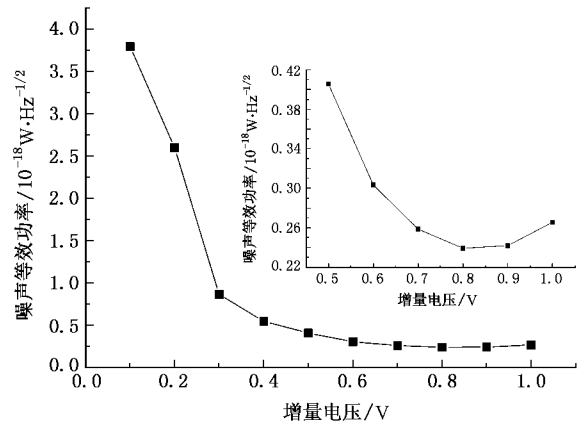


图 5 噪声等效功率与增量偏压之间的关系 工作温度: -62.5°C

效率为约 18%,探测灵敏度为 $2.4 \times 10^{-19} \text{ W/Hz}^{1/2}$ 。

4. 结 论

该单光子探测器在实验设计中,主要采用了半导体制冷技术和水冷相结合的方法给雪崩二极管提供最佳工作温度;电路上采用雪崩二极管的盖革运行模式,通过交流耦合给偏置的雪崩二极管提供门脉冲信号,由于雪崩二极管内部电容的影响,使用延迟补偿和采样门控方法消除尖脉冲对信号提取的干扰,最后使用反馈门控方法和优化电路参数来减小暗计数率。通过实验测试和噪声等效功率分析,找到了该单光子探测器的最佳性能指标。测试分析表明上述实验设计是合理有效的。



- [1] Li L Q , Davis L M 1993 *Rev. Sci. Instrum.* **64** 1524
- [2] Levine B F , Bethea C G , Campbell J C 1985 *Appl. Phys. Lett.* **46** 333
- [3] Sun X L , Krainak M A , Abshire J B , Spinhirne J D , Trotter C , Davies M , Dauter H , Allan G R , Lukemire A T , Vandiver J C 2004 *J. Mod. Opt.* **51** 1333
- [4] Hu J T , Li L S , Yang W D , Manna L , Wang L W , Alivisatos A P 2001 *Science* **292** 2060
- [5] Levine B F , Bethea C G , Campbell J 1985 *Electron. Lett.* **21** 194
- [6] Risk W P , Bethune D S 2002 *Opt. Photon. News* **13** 26
- [7] Stellari F , Zappa F , Cova S , Porta C , Tsang J C 2001 *IEEE Trans. Electron Devices* **48** 2830
- [8] Comelli D , D 'Andrea C , Valentini G , Cubeddu R , Casiraghi R , Cantarelli D 2005 *Optics Express* **13** 10075
- [9] Gallivanoni A , Rech I , Resnati D , Ghioni M , Cova S 2006 *Optics Express* **14** 5021
- [10] Chiangga S , Zarda P , Jennewein T , Weinfurter H 1999 *Appl. Phys. B* **69** 389
- [11] Ribordy G , Gautier J D , Gisin N , Guinnard O , Zbinden H 1998 *Electron. Lett.* **34** 2116
- [12] Gisin N , Ribordy G , Tittel W , Zbinden H 2002 *Rev. Mod. Phys.* **74** 145
- [13] Trifonov A , Subacius D , Berzanskis A , Zavriyev A 2004 *J. Mod. Opt.* **51** 1399
- [14] Bennett C H , Brassard G 1984 *Proc. IEEE Int. Conf. Computers , Systems and Signal Processing* (Bangalore , India , New York : IEEE) p175
- [15] Bennett C H , Brassard G 1992 *J. Cryptol.* **5** 3
- [16] Sugihara K , Yagyu E , Tokuda Y 2006 *J. Appl. Phys.* **99** 124502
- [17] Ribordy G , Gisin N , Guinnard O , Stucki D , Wegmuller M , Zbinden H 2004 *J. Mod. Opt.* **51** 1381
- [18] Voss P L , Köprülü K G , Choi S K , Dugan S , Kumar P 2004 *J. Mod. Opt.* **51** 1369
- [19] Bethune D S , Risk W P , Pabst G W 2004 *J. Mod. Opt.* **51** 1359
- [20] Rarity J G , Wall T E , Ridley K D , Owens P C M , Tapster P R 2000 *Appl. Opt.* **39** 6746
- [21] Prochazka I 2001 *Appl. Opt.* **40** 6012
- [22] Ribordy G , Gautier J D , Zbinden H , Gisin N 1998 *Appl. Opt.* **37** 2272
- [23] Tomita A , Nakamura K 2002 *Appl. Opt.* **27** 1827
- [24] Feng J Y , Chen H J , Li L X , Gong W 2006 *Optical Technique* **32** 237 (in Chinese) [冯金垣、陈红娟、李丽秀、龚 雯 2006 光学技术 **32** 237]
- [25] Owens P C M , Rarity J G , Tapster P R , Knight D , Townsend P D 1994 *Appl. Opt.* **33** 6895
- [26] Cova S , Ghioni M , Laciata A 1996 *Appl. Opt.* **35** 1956

A single-photon detector in the near-infrared range *

Sun Zhi-Bin[†] Ma Hai-Qiang Lei Ming Yang Han-Dong Wu Ling-An Zhai Guang-Jie Feng Ji

(Institute of Physics , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100080 , China)

(Received 8 January 2007 ; revised manuscript received 7 February 2007)

Abstract

A single photon detector operating in the Geiger mode is cooled to a moderate temperature by using Peltier cooling , and a gate pulse is coupled to the avalanche diode through capacitance . It uses a moderate delay and sampling gate modulation to prevent the positive and the negative transient pulses from influencing the detection of true photon avalanches , a dead time modulation feedback control circuit to suppress the afterpulsing , and an optimized circuit to reduce the dark counts . The performance test shows that at the optimum operation point the quantum efficiency is about 18% , the dark count rate is less than $4 \times 10^{-6} \text{ ns}^{-1}$ and the noise-equivalent power is $2.4 \times 10^{-19} \text{ W/Hz}^{1/2}$.

Keywords : single-photon detection , Peltier cooling , avalanche photodiode , geiger mode

PACC : 4250 , 2970 , 2970F , 2940S

* Project supported by the State Key Basic Research Program of China (Grant No. 2001CB309301) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60578029).

[†] E-mail : wula@aphy. iphy. ac. cn