

基于国产 InGaAs/InP APD 的高速单光子探测

白郭敏 梁 焰 曾和平

(上海理工大学光电信息与计算机工程学院 上海 200093)

摘要: InGaAs/InP 雪崩光电二极管 (InGaAs/InP APD) 是近红外单光子探测器的核心器件之一, 其国产化已成为趋势。InGaAs/InP APD 工作于 1.25 GHz 门控盖革模式下, 由于 APD 本身的电容特性, 单光子触发产生的雪崩电信号被尖峰噪声所湮没, 采用低通滤波的方法可以将有效雪崩信号从尖峰噪声提取出来。为了探讨国产 APD 的参数水平, 对不同温度不同探测效率下国产 InGaAs/InP APD 的暗计数及后脉冲概率, 时间抖动性等相关性能参数进行了测量, 并与国外数据进行了对比。当国产 InGaAs/InP APD 工作于 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$, 探测效率 10% 时, 暗计数可低至 $9.9 \times 10^{-7}/\text{gate}$, 后脉冲仅为 1.5%, 这表明在 InGaAs/InP APD 这一领域, 我国已接近国外水平, 但仍有一定的进步空间。

关键词: 单光子探测; 正弦门; 暗计数; 后脉冲

中图分类号: TN247 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.20

High-speed single-photon detection based on domestic InGaAs/InP APD

Bai Guomin Liang Yan Zeng Heping

(School of Optical Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: The InGaAs/InP avalanche photodiode (InGaAs/InP APD) has been one of the core devices for single-photon detection at the near-infrared wavelengths. The localization of the single-photon detection has become a trend. The 1.25 GHz sine wave as the gating pulse was applied to the InGaAs/InP APD in Geiger model. Due to the capacitive response of the APD itself, The generated avalanche signal triggered by the single-photon was buried in the spike noise. By using the low-pass filter method, we can extract the effective avalanche signal from the peak noise. In order to explore the performances of the domestic InGaAs/InP APD, we measured the related parameters of the domestic at different temperatures and different detection efficiencies, such as dark count rates, afterpulse probability, timing jitter, and we compared the parameters with the imported APDs'. When the domestic InGaAs/InP APD worked in $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ and the detection efficiency at 10%, the dark count can be as low as $9.9 \times 10^{-7}/\text{gate}$, the afterpulse is only 1.5%. From this, we could conclude that the research of the domestic InGaAs/InP APD is close to the foreign level, but there is still room for the improvement.

Keywords: single-photon detection; sine-gate; dark count rate; afterpulse

1 引言

量子信息是二十一世纪重点研究学科, 其核心主要包括对量子载体的编码、通信、操控及测量、计算等。量子载体相对于经典载体更具有安全性, 且计算速度更快, 根据“海森堡测不准”原理, 在一定条件下, 可以有效解决信息被泄漏窃听等问题^[1]。其中, 量子探测, 即单光子探测是检测量子载体的唯一手段。除此之外, 在生物发光、激光雷达、光时域反射等越来越多的领域, 单光子探测也得到非常广泛的应用^[2]。目前, 比较成熟的单光子探测技术主要有: 光电倍增管、雪崩光电二极管 (APD)、频率上转换技术、电荷积

分探测器、超导单光子探测器等^[3], 它们工作于不同的波长, 适用于不同场合, 且性能参数也不同, 各有优劣。主要研究的热点基于 InGaAs/InP APD 近红外单光子探测, InGaAs/InP APD 具有体积小、功耗低、易集成、制冷温度易达到、探测重复频率高等优点, 越来越成为科学界的研究热点^[4]。

2 单光子探测方案

2.1 单光子探测方案原理

本文所要研究的是国产 GD65211 型 InGaAs/InP 雪崩光电二极管, 该型号 APD 是由中国电子科技集团重庆四十四所研制。如图 1 所示, 采用 TO-8 封装, 内部集成了

三级热电制冷器及温敏传感器并耦合了尾纤。最低制冷温度为 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$,制冷电流最大为 1 A ,制冷电压最大为 5 V 。温敏传感器为电流型温敏传感器,其温度调制系数为 $1\text{ }\mu\text{A/K}$,即电路中流过的电流每变化 $1\text{ }\mu\text{A}$ 时,温度变化 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[5]。 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,流过温敏传感器的电流为 $298.2\text{ }\mu\text{A}$,该型号APD工作于线性模式和盖革模式,对 1550 nm 波长的光信号响应灵敏。

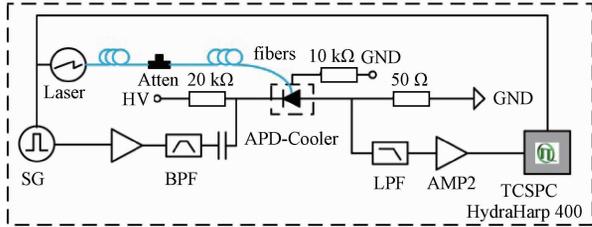


图1 单光子探测方案原理

图1中,AMP1为功率放大器模块;BPF为带通滤波器;LPF低通滤波器;Atten为衰减器;AMP2为射频放大器模块;Laser为激光器模块;TCSPC为时间相关单光子计数器。

光电探测器是将光信号转化为电信号的器件。在传统半导体探测器中,在外加偏压形成的电场中,当有光子入射发出大量的光生载流子,形成电流信号,通过相关电路对其进行计数,从而完成对单光子信号的检测^[6]。而APD作为光电探测器其对单光子信号的探测原理也大致如此。通常APD有两种工作模式,盖革模式和线性模式。所谓的盖革模式就是给雪崩光电二极管加载反向偏置电压,使其工作在一种特殊的状态,当有光子入射时,这种状态下的雪崩光电二极管受到激发产生光生载流子,即产生一对电子-空穴对。而高速运动的光生载流子,在外部所加高压形成的场强的作用下,使得该电子跃迁到导带,处于导带的电子高速运动与其它电子碰撞,从而电离产生新的电子-空穴对^[7]。这些新生成的电子-空穴对又会碰撞其它电子,从而产生更多的电子-空穴对,就这样周而复始,最终形成雪崩效应,产生雪崩电流信号从而被探测^[8]。使得雪崩光电二极管产生雪崩效应的电压,称为雪崩电压。当所加反向电压低于雪崩电压时,雪崩光电二极管内碰撞的电子-空穴对数量有限,不能很好的探测光子信号,此时的雪崩光电二极管工作于线性模式^[9]。故用雪崩光电二极管进行单光子探测时,使其工作于盖革模式。

本次探测过程中采用正弦门控和低通滤波相结合的方案,其原理如图1所示,采用 1.25 GHz 正弦门控方案,除了能保证高速单光子探测,还可以使APD快速恢复,大大的提高了其工作效率。然而,正弦门控方案也会带来一个比较严重的问题,即尖峰噪声。由于APD本身的电容特性,当 1.25 GHz 正弦交流信号加载到APD两端时,APD不断的充放电,形成幅度较大的尖峰噪声,把有效信号湮没^[10]。而低通滤波器可以把有效雪崩信号从尖峰噪声中

提取出来,这也是本探测选用正弦门控方案和低通滤波方案相结合的原因。在图1中所加载到APD阴极的电压,由两部分组成:重复频率为 1.25 GHz 的正弦交流电压和直流偏置电压(HV)。在本探测过程中正弦交流电压的幅值为固定值,直流偏置电压可根据实际情况进行调整;当APD阴极所加载的电压大于雪崩电压时,光子入射到APD的光敏面,形成的电流被 $50\text{ }\Omega$ 对地电阻所提取,转换成可后续处理的电压模拟信号。在上图1中 1.25 GHz 正弦门控信号是由射频信号发生器(SG)产生一个 1.25 GHz 信号,经过 1.25 GHz 放大模块AMP1的放大获得的。产生的 1.25 GHz 正弦门控信号在加载到APD阴极之前,要通过一个中心频率为 1.25 GHz ,带宽 30 M ,带外抑制比大于 30 dB 的带通滤波器(BPF),滤除放大模块AMP1本身产生的增益噪声及边带噪声,同时也提高了系统的信噪比。通常,产生的尖峰噪声频谱主要分布在 1.25 GHz 正弦门控重复频率基频的整数倍以上,而有效雪崩信号集中在门重复频率基频以下。经过多次实验,选用上限截止频率为 700 MHz ,带外抑制比大于 35 dB 的低通滤波器滤波效果最好,经滤波后的有效雪崩信号幅值较低,其峰峰值为 20 mV 左右,且不易观察研究,故需通过放大器模块AMP2对其进行进一步放大。图1中所用的放大器模块AMP2为射频放大器器模块,该模块是由Mini-circuit公司生产,其型号为ZKL-1R5+。放大后的雪崩信号经过安捷伦数字示波器DSO9404A的观测,可以观测到,雪崩的幅度在 180 mV 左右。

2.2 衡量单光子探测性能的参数

1)探测效率,即光子入射到APD光敏面被探测到的概率,一般用探测到的光子数与入射的光子总数比值来表示^[11]。比如用 10 MHz 脉冲激光器,每脉冲含有 0.1 个光子入射到APD,最后探测到的单光子计数频率为 100 kHz ,则探测效率为 10% 。

2)暗计数,在没有光子入射时,单光子探测输出的计数率,其大小主要与APD工作时的制冷温度以及所加的反向直流偏压的大小有关。

3)后脉冲,其形成与雪崩光电二极管本身的材料缺陷有关,是由于被俘获的载流子再释放引起的。发生雪崩时产生的光生载流子流经雪崩光电二极管时,一部分载流子会被材料中的杂质和缺陷所形成的俘获中心捕获,如果这些载流子没有被完全释放,就会在雪崩光电二极管中积存下来。当APD再次进入盖革模式时,这些积存的载流子就可能再次触发雪崩,产生与有光子入射时一样的雪崩脉冲信号,从而引起误计数^[12]。

4)时间抖动性,指从单光子信号输入到产生的电信号输出的延时的不确定范围。通常采用时间相关单光子计数器(time-correlated single-photon counting, TCSPC)对相同时间的入射光子多次测量计数,根据获得的计数-时间分布图,取其高斯分布的半高宽(full width at half-maximum,

FWHM),作为时间抖动^[13]。该值越小说明单光子探测的时间分辨能力越高,该项参数对一些应用至关重要,例如,激光测距中,它直接决定了测距的表面分辨率及精度^[14]。

5)饱和计数率,在 APD 两端加载直流电压和门脉冲电压使其发生雪崩时,随着入射光子数目的增多,单光子探测的计数频率不再增加的计数值,反映了该探测器的最大探测能力。

2.3 测试过程

研究过程中所用半导体激光器的中心波长为 1 550 nm,重复频率为 10 MHz,脉宽为 50 ps,通过衰减器(Atten)对激光脉冲信号的衰减,使得每脉冲的平均光子数为 0.1,以此作为单光子探测的准单光子源。图 1 中的信号发生器(SG),不仅是为了触发 10 MHz 脉冲激光器,还使得脉冲光信号和 1.25 GHz 正弦信号达到同步,同时信号发生器,还为 TCSPC 提供 10 MHz 外部参考信号,用来对各个参数进行测量。此探测过程中所用的 TCSPC 型号为 HydraHarp 400,由 Picoquant 公司所产,该型号 TCSPC 通过 USB3.0 数据线,与 PC 进行通信,并将计数值以直方图的形式在 PC(图 1 中 PC 没有画出来)中显示出来,直方图的最大计数值为 65 536,且其最小分辨率为 1 ps,即每隔 1 ps 采集一个数据点。

InGaAs/InP APD 工作时,由于内部电子-空穴对的不断碰撞,极易发热,形成热噪声,而热噪声是单光子探测的一个重要来源,为了减小暗计数,同时使得单光子探测能达到较好的性能,一般其工作时都会其进行制冷。研究中所用的 GD6521 型雪崩光电二极管由于内部集成了三级制冷和温敏传感器,大大的减少了外围电路的设计,但流过热敏传感器的电流只有 μA 级别,其变化不易测得,故选用一个阻值较大的 R_1 的对地电阻与热敏传感器串联,通过对图 1 中 R_1 两端电压值的测量,很容易推断出 APD 工作时的内部温度。在推断 APD 内部工作温度时,要先对温敏传感器温度调制系数进行标定,其标定过程如下:分别测定室温为 23 $^{\circ}\text{C}$ 、24 $^{\circ}\text{C}$ 、25 $^{\circ}\text{C}$ 、26 $^{\circ}\text{C}$ 、27 $^{\circ}\text{C}$ 时对地电阻 R_1 两端的电压值,并根据电压的变化量和温度变化量来计算出该温度传感器的温度调制系数,即温度每变化 1 $^{\circ}\text{C}$ 时的电压变化值,最后通过多次计算标定,确定其温度调制系数为 1。该型号 APD 工作时,可以通过调节其制冷端电压(制冷电压端在图 1 中没有标识出)来改变其工作温度。

当 APD 工作于盖革模式,且其内部温度达到稳定,并有光子入射时,通过调节信号发生器和信号的延时使得计数频率达到最大值;由于探测过程中加载到 APD 上的正弦门控信号为定值,可通过调节所加直流偏压(HV),来改变其计数频率,也即是 APD 的探测效率。为了研究在不同温度和不同探测效率下 APD 的性能参数变化,实验中对工作在 -25 ~ 25 $^{\circ}\text{C}$,探测效率 2% ~ 20% 范围内的 APD 相关参数进行了测试。通过调节延时和直流偏压(此时有光子入射),当 APD 稳定工作在某一探测效率时,将经过图 1 中

AMP2 放大后的雪崩信号接入 TCSPC,对相关信号进行采集,并将采集的数据在 PC 中保存下来,并通过相关计算可以得到 C_{total} , C_{incident} ,采集的过程中所用 TCSPC 时间分辨率设置为 2 ps。关闭光脉冲信号时,可测得暗计数频率值 C_{dark} ,将上述所测数据分别代入式(1)、(2),就得出单光子探测的暗计数率和后脉冲概率。论文中采用以下公式对暗计数率和后脉冲进行计算,公式如下:

$$P_{\text{dark}} = \frac{C_{\text{dark}}}{f_{\text{gate}}} \quad (1)$$

$$P_A = \frac{C_{\text{total}} - C_{\text{incident}} - C_{\text{dark}}}{C_{\text{incident}}} \quad (2)$$

P_{dark} 为暗计数率, P_A 为后脉冲概率,用后脉冲产生的误计数频率与正弦门控信号内有光子入射时的计数频率相比来对后脉冲进行衡量。 C_{dark} 为无光子入射时,测得的计数频率值, f_{gate} 为所采用的正弦门控信号重复频率;脉冲光信号打开时,即在有光子入射条件下, C_{total} 为单光子探测到的总计数频率值, C_{incident} 为正弦门控信号内有光子入射时的计数频率值。

3 测量结果

3.1 暗计数与后脉冲

从图 2 可以看出在同一探测效率下,随着温度的升高,暗计数随之增大;在同一温度下,随着探测效率的增大,暗计数随之增大,也说明温度对暗计数的影响比较大。在 -25 ~ 0 $^{\circ}\text{C}$,同一探测效率下,相邻温度下的暗计数变化不大,当温度大于 0 $^{\circ}\text{C}$ 时,相邻温度下的暗计数有明显的差别。由图 2 还可以看出在 -25 $^{\circ}\text{C}$,探测效率 20% 时,暗计数率比较小仅为 2.34×10^{-6} /gate,在 25 $^{\circ}\text{C}$,探测效率 20% 时,暗计数率较大为 3.77×10^{-5} /gate。

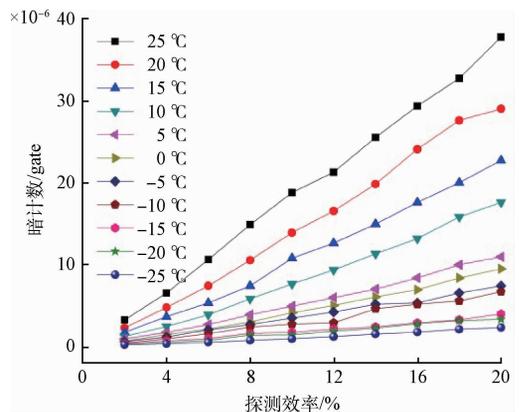


图 2 不同温度不同探测效率下的暗计数

图 3、图 4 为在不同温度不同探测效率下单光子探测的后脉冲概率。由于在各个温度下,后脉冲概率变化范围不太大,为了能清晰的观测各个温度下后脉冲变化规律,故我们采用了两幅图对其变化进行了描述。由图 3 和图 4 可

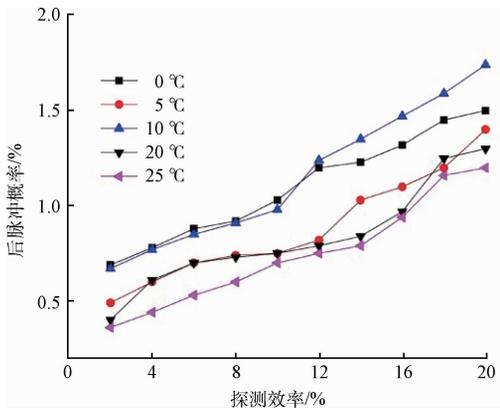


图 3 0~25 °C 时不同探测效率下的后脉冲概率

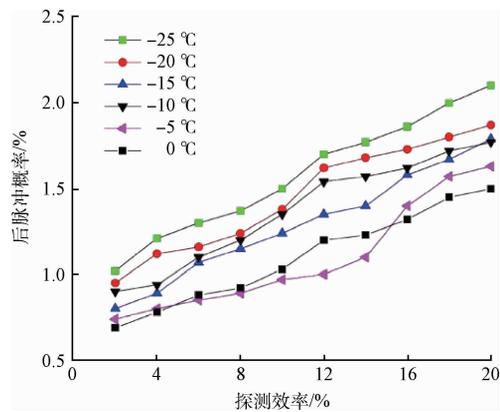


图 4 -25~0 °C 不同探测效率下的后脉冲概率

可以看出:在同一温度下,随着探测效率的增加,后脉冲概率随之增加;在同一探测效率下,随着温度的升高,后脉冲概率总体趋势是降低的。另外,在-25 °C 时,探测效率 20% 时的后脉冲概率值最大,但其值仅为 2.1%;在 0 °C 时,探测效率分别为 10% 和 20%,后脉冲概率分别为 1.03% 和 1.5%;在 25 °C 时,探测效率 20% 时的后脉冲概率为 1.2%,在其它温度及探测下的后脉冲概率将更小。这也说明在-25~25 °C 范围内,探测效率不超过 20% 时,该型号 APD 的后脉冲概率参数较佳。

为了能更进一步观测在不同探测效率下单光子探测的暗计数与后脉冲变化规律,并与国外的 APD 指标进行对比,故对工作在-25 °C 时的国产 APD 参数进行了详细测试。图 5 为在不同探测效率下时所加载的直流偏置电压,从图中可以看出随着探测效率的增大,所加直流偏置电压随之增大,基本呈正相关关系,探测效率 10% 时,所加直流电压为 61.6 V。图 6 为-25 °C 时,不同探测效率下的暗计数与后脉冲变化,随着探测效率的增大,各个探测效率相邻点,后脉冲概率变化缓慢,且后脉冲概率都较小;在探测效率 1%~20% 的范围内,后脉冲概率最小为 0.6%,最大为 2.1%。从图 6 还可以看出随着探测效率增大,暗计数也随

之增大,基本呈线性关系,说明所加直流偏置电压大小也是影响暗计数的一个原因。

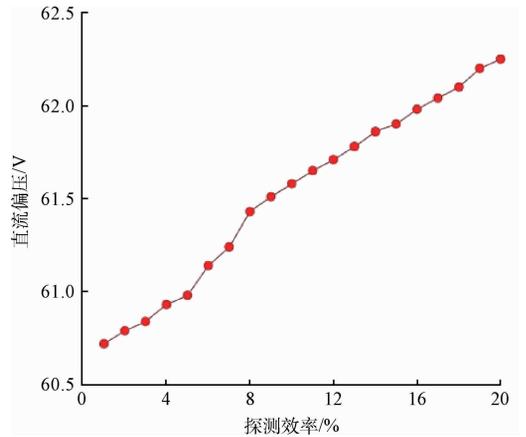


图 5 -25 °C 时不同探测效率下所加载的直流偏压

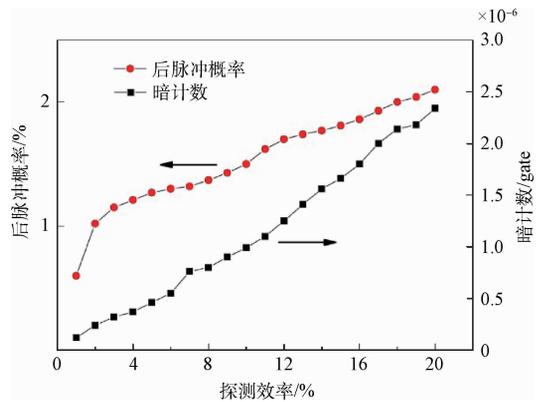


图 6 -25 °C 时不同探测效率下的暗计数和后脉冲

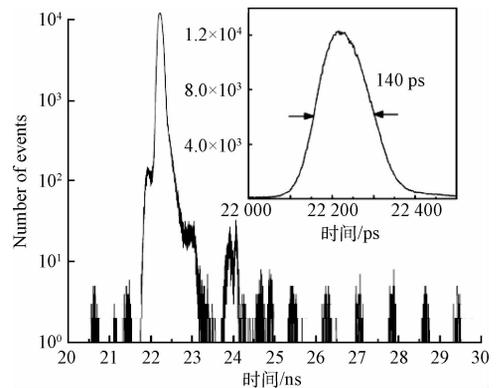


图 7 -25 °C 探测效率为 10% 时的时间抖动

3.2 时间抖动性

时间抖动性是衡量单光子探测的一个重要参数,图 7 是用时间单光子计数 TCSPC 采集到的雪崩信号的时间分布直方图。图 7 中的右上图为最高峰的放大图,一般用其半高宽来衡量单光子探测的时间抖动性。从图中可以清晰看出该峰值的半高宽,也就是时间抖动性为 140 ps。另外

从图上也可以看出各个峰值之间的时间间隔为 0.8 ns,也间接说明所使用的正弦门脉冲的重复频率为 1.25 GHz。

3.3 饱和计数率

图 8 为工作于 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,所测 APD 饱和计数率在该参数进行测试时,通过相关的模数转换电路,将雪崩信号转换为数字信号。由于激光脉冲信号的光较弱,故选用 1 550 nm 的连续光对该参数进行测试。测试过程中通过不断调节衰减器使入射的光子数目不断增多,当调节衰减器 (Atten) 至单光子探测计数频率不再增加时,测得的饱和计数率值如图 8 所示,其值为 25.7 MHz。

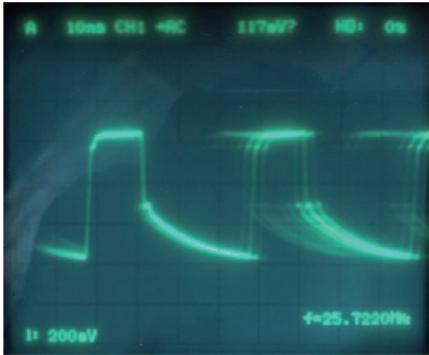


图 8 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时单光子探测的饱和计数

3.4 国内外参数对比

当 GD6521 工作在 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,由于受到散热等方面的影响,使得 InGaAs/InP APD 本身比较热,热量难以耗散出去,导致 InGaAs/InP APD 工作不稳定,故对比的时候选取了工作在 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的单光子探测。表中选取与 1.25 GHz 门重复频率比较接近的 1.244 GHz 国外单光子探测参数与国产 InGaAs/InP APD 参数进行了一个简单的对比。所选用的国外 InGaAs/InP APD 型号为 PGA 300,由 Princeton Lightwave 公司生产。对比结果如表 1 所示,从表中可以看出,在探测效率为 10% 时,国产 InGaAs/InP APD 暗计数仅比国外 InGaAs/InP APD 高了 0.28 个数量级,后脉冲概率仅与国外相差 0.89%,探测效率同为 20% 时,国产 InGaAs/InP APD 暗计数参数比国外更好一点,比国外低了 0.66 个数量级;后脉冲概率仅与国外相差 0.6%,且温度是影响暗计数的一个重要参数,如果工作在同一温度下,国产 InGaAs/InP APD 暗计数参数将更佳。然而表中饱和计数率国内与国外相比有明显的差距,相差 25 MHz,而该参数决定了单光子探测中的最大计数频率,也决定了能探测识别的光信号的最大重复频率。另外国产 InGaAs/InP APD 时间抖动性比国外均值大 80 ps,这也是国产 InGaAs/InP APD 不足的地方。

表 1 国产 InGaAs/InP APD 与国外 InGaAs/InP APD 参数对比

APD 型号	温度/ $^{\circ}\text{C}$	重复频率/ GHz	探测效率 10%		探测效率 20%		饱和计数 率/MHz	时间抖 动性/ps
			暗计数 /($\times 10^{-7}$ /gate)	后脉冲/%	暗计数 /($\times 10^{-6}$ /gate)	后脉冲/%		
GD6521	-25	1.250	9.9	1.50	2.34	2.1	25.7	140
PGA300 ^[15]	-50	1.244	7.1	0.61	3.00	1.5	50.0	40~80 ^[1]

4 结 论

本探测运用 1.25 GHz 正弦门脉冲和低通滤波相结合的方案,实现了基于国产 InGaAs/InP APD 的高速单光子探测。通过对国产 InGaAs/InP APD 相关参数的测试以及与国外 InGaAs/InP APD 参数的一个对比,可以得出:在暗计数和后脉冲方面国产 InGaAs/InP APD 表现较佳,基本与国外处于同一水平,在同一温度下,国产 InGaAs/InP APD 暗计数将更佳,但在时间抖动性和最大饱和计数率方面有待提高,且存在高速正弦门信号对温敏传感器干扰的问题,这也是该型号国产 InGaAs/InP APD 亟需改进的地方。

参考文献

- [1] 梁焰. 基于 InGaAs/InP APD 高速单光子探测方法及应用[D]. 上海:华东师范大学,2013.
- [2] 杨皓,王超,孙志斌,等. 高速近红外 1 550 nm 单光子

探测器[J]. 红外与激光工程,2012,41(2):325-329.

- [3] 齐兰. 基于 InGaAs/InP 雪崩光电二极管的单光子探测关键技术研究[D]. 天津:天津大学,2011.
- [4] 黄建华. 基于 InGaAs/InP APD 的单光子激光测距研究[D]. 上海:华东师范大学,2014.
- [5] GD6521 型 InGaAs/Inp 雪崩光电二极管 V3.3[R]. 中国电子科技集团四十四研究所.
- [6] 黄建华,吴光,曾和平. 基于 1.5 GHz 多次谐波超短脉冲门控 InGaAs/InP 雪崩光电二极管的近红外单光子探测技术研究[J]. 光学学报,2014,34(2):0204001-5
- [7] 梁晓磊,蒋文浩,刘建宏,等. 用于高速量子密码系统的 1.25 GHz InGaAs/InP 单光子探测器的研制[J]. 中国激光,2012,39(8):0818001.
- [8] 高家利,汪科,盘虹霞. 近红外 1 550 nm 单光子探测器硬件电路设计[J]. 光电技术与系统,2015,45(6):674-677.

(下转第 196 页)