

用于光子计数的 InGaAs/InP SPAD 设计

纪应军,石柱,覃文治,代千,冯万鹏,胡俊杰

(西南技术物理研究所,四川 成都 610041)

摘要:重点研究了 InGaAs/InP SPAD 的隧道贯穿电场、雪崩击穿电场、雪崩宽度与过偏电压的关系,提出了过偏电压的计算方法。分析了 InGaAs/InP SPAD 的基本特性即探测效率、暗计数率与其过偏电压、工作温度、量子效率、电场分布的依赖关系,提出了一种单光子 InGaAs 雪崩二极管的设计方法。设计制作了 InGaAs/InP SPAD,并在门控淬灭模式下进行了单光子探测实验。结果表明:对于 $\phi 200 \mu\text{m}$ 的 SPAD,在过偏 2 V、温度 $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件下,探测效率(PDE) $>20\%$ (1 550 nm)、暗计数率(DCR) $\phi 20 \text{ kHz}$;对于 $\phi 50 \mu\text{m}$ 的 SPAD,在过偏 2.5 V、温度 $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件下,探测效率(PDE) $>23\%$ (1 550 nm)、暗计数率(DCR) 2 kHz 。最后对实验结果进行了分析和讨论。

关键词: InGaAs/InP 单光子雪崩二极管; 雪崩宽度; 工作温度; 电场分布

中图分类号: TN36 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)03-0934-07

Design and characterization of InGaAs/InP single-photon avalanche diodes for photon counting

Ji Yingjun, Shi Zhu, Qin Wenzhi, Dai Qian, Feng Wanpeng, Hu Junjie

(South-West Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China)

Abstract: The tunneling breakdown electric field, avalanche breakdown electric field, multiplication region width depend on exceed breakdown voltage of InGaAs/InP SPAD was researched as a key point. The calculated method of exceed breakdown voltage was presented. The basic performance of single photon avalanche diode (SPAD) depends on their excess bias, multiplication region width, working temperature, electric-field distribution and quantum efficiency has been analyzed. According to these analysis, a designed solution of InGaAs/InP SPAD has been presented, and then the device was manufactured later. Under the conditions of $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ and exceed breakdown voltage over 2 V, the InGaAs/InP SPAD of $\phi 200 \mu\text{m}$ diameter exhibits dark count rates (DCR) below 20 kHz and photon detection efficiency (PDE) of 20%(1 550 nm). Under the conditions of $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ and exceed breakdown voltage over 2.5 V, the InGaAs/InP SPAD of $\phi 50 \mu\text{m}$ diameter exhibits dark count rates (DCR)below 2 kHz and photon detection efficiency (PDE) of 23%(1 550 nm). Finally, the experimental results were analyzed.

Key words: InGaAs/InP single photon avalanche diodes; multiplication region width; working temperature; electric-field distribution

收稿日期:2014-07-10; 修订日期:2014-08-15

作者简介:纪应军(1989-),男,硕士生,主要从事光学工程方面的工作。Email: jiyingjun0608@gmail.com

导师简介:石柱(1960-),男,高级工程师,硕士,主要从事近红外光电探测器的研制工作。Email: hx333666@163.com

0 引言

单光子探测被认为是光电探测技术的极限。作为其核心的光电探测器,特别是半导体雪崩光电二极管(APDs)具有典型的固态器件优势,如小尺寸、低偏压、低功耗、高重复性和可靠性,因而在单光子探测应用中 APDs 提供了实用的解决方案^[1]。在盖革模式下实现单光子探测的雪崩光电二极管称为单光子雪崩二极管(Single-Photon Avalanche Diode, SPAD)。InGaAs/InP SPAD 在 1 310 nm 和 1 550 nm 两个通信波段上探测效率高,无需液氮制冷,半导体制冷即可工作,是目前单光子探测领域典型的探测器,具有广泛的应用前景^[2-3]。

目前很多实验者利用商用 InGaAs/InP APD 进行单光子探测^[4],结果发现暗计数率随过偏电压增加太快,可用过偏电压空间极小,探测效率与暗计数率随过偏折中困难,实验者多采用筛选的方式,即使这样能用于单光子探测的 APD 也是很有限的。其原因在于商用 InGaAs/InP APD 是按线性工作模式设计的,对工作偏压超过击穿电压后的行为并没有给予关注。

这篇文章重点关注影响 SPAD 基本特性的相关因素,分析了 InGaAs/InP SPAD 的基本特性与其过偏电压、工作温度、量子效率、电场分布的依赖关系。按照这样的依赖关系,提出了一种 InGaAs/InP SPAD 的设计方法,并且设计和制备出了两种不同光敏面的器件,达到了比较理想的单光子探测效果。

1 InGaAs APD 的盖革工作模式

APD 工作在一种偏压短暂高于其雪崩击穿电压的模式,称为盖革模式。在这个短暂的时间内 APD 处于雪崩自维持状态,在滚动雪崩效应下产生极大的雪崩增益,以至于单个载流子将触发 $10^5 \sim 10^7$ 个电子输出,在皮秒量级时间内输出的雪崩电流呈指数增长,同时 APD 内部自发击穿倍增(如热激发)发生的可能性很小。如果一个光子到达 APD 它将触发宏观可检测的电流,实现单光子探测。

当然为了探测下一个光子,必须将 APD 的工作偏压降低到雪崩击穿电压以下,来清除所有的自由载流子,然后再激发 APD 的工作电压到雪崩击穿电压以上开始新的探测^[5]。工作在盖革模式下的 APD,信号按脉冲方式输出,以计数方式完成单光子测量。

对于少量的脉冲输出无法区分是信号还是暗载流子触发的,所以必须进行多次测量,并采用对脉冲计数进行时间相关统计的方式将二者区分,因此 SPAD 的基本特性主要由暗计数率和探测效率来表征。

APD 过偏电压越大,电场越强,电离系数越大,雪崩可能性越高,探测效率越高,同时暗计数产生的可能性越大。因此在实际使用中,暗计数率和探测效率必须通过合理的过偏电压进行有效折中。

1.1 影响 SPAD 基本特性的物理因素分析

1.1.1 电场、温度和过偏电压对暗计数率的影响

暗计数是 SPAD 中暗载流子触发雪崩产生的脉冲计数,代表了 SPAD 的噪声水平,暗载流子浓度是影响暗计数率和单光子探测效率的主要因素^[6]。暗载流子的产生机制主要有温度和电场,前者联系到热载流子激发,后者联系到隧道效应,如图 1 所示。

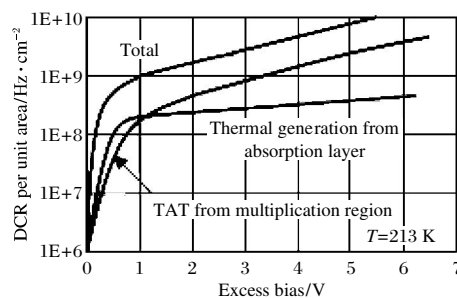


图 1 暗计数率与过偏的关系

Fig.1 Overbias dependence of DCR

目前 InGaAs/InP SPAD 主要采用分离吸收区和倍增区结构(SAGM),如图 2 所示。雪崩高电场集中在宽能隙的 InP 材料中($E_g=1.35$ eV),同时在窄能隙的 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ ($E_g=0.73$ eV,下文简称 InGaAs)吸收区仅保持载流子饱和和漂移的低电场。理论和实验证明,

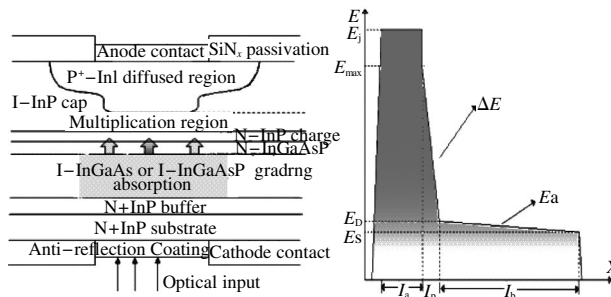


图 2 InGaAs/InP SAGCM 拉通型结构与电场分布

Fig.2 Structure of InGaAs/InP SAGCM-SPAD and electric-field distribution

窄能隙 InGaAs 吸收区的电场在低于 1.5×10^5 V/cm 时,其隧道效应几乎忽略不计^[7],暗载流子主要通过热激发产生,利用降温可以有效的控制暗计数。InP 倍增区的能隙较宽,在线性工作模式下具有相对较低的电场,其隧道效应可以忽略不计。但在盖革模式下,电场随过偏电压增大到一定程度,载流子在非常高的电场下会发生由能带到能带的直接渡越,即使一个非常小的隧道效应也会造成暗计数呈指数增加,如图 3(b)所示。在这种情况下 DCR 已经不能通过降温来控制,称为隧道贯穿,此时的电场称为隧道贯穿电场。

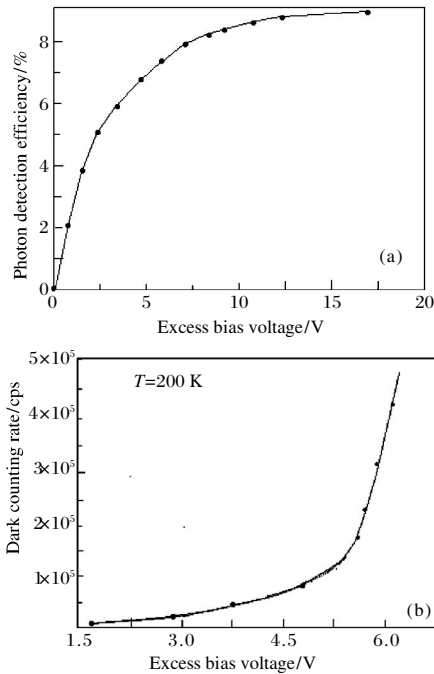


图 3 探测效率和暗计数率随过偏变化关系

Fig.3 Overbias dependence of PDE and DCR

1.1.2 过偏电压和温度对探测效率的影响

探测效率是光子触发雪崩的可能性与探测器量子效率的乘积。APD 在过偏的条件下进入雪崩自维持状态,在此过程中随着过偏电压提高结电场增大,在同样的电荷数下,雪崩信号被触发的概率也会提高。但是随着过偏增大到一定程度,电场增大到接近倍增区材料隧道贯通时,再提高偏压对结电场几乎没有贡献,反而 DCR 随偏压增加非常快,因此探测效率 PDE 首先随过偏增加而线性增大,然后随着过偏增大趋于饱和,如图 3(a)所示。

理论和实验证明温度很低时量子效率和暗计数

率都很低,随着温度升高,量子效率增大,到一定程度后量子效率随温度升高而减小。因此在实际应用中,量子效率和暗计数率需要与温度进行折中,一般情况下 InGaAs/InP SPAD 需要工作在 $-40 \sim -50$ °C。

综上所述分析,InGaAs/InP SPAD 的性能实际上与电场分布、温度和过偏电压直接有关,InGaAs/InP SPAD 的设计就是基于这三个因素进行的。

2 SPAD 最大过偏电压分析

首先说明 InGaAs/InP SPAD 的两个关键电场的概念:一是雪崩击穿电场(E_{\max}),它是指工作偏压达到雪崩击穿($V=V_B$)时 APD 内部的最大电场,这个电场的大小由雪崩宽度 l_a 决定,随雪崩宽度增加而降低;二是倍增区 InP 材料的隧道贯穿电场(E_j),对于理想的半导体材料,它是由禁带宽度决定,理想本征 InP 材料 $E_j \approx 7 \times 10^5$ V/cm^[8]。由于材料存在缺陷势阱的隧道效应(TAT),实际隧道贯穿电场低于 7×10^5 V/cm,主要依赖于探测器材料的制备水平。对于实际的 SPAD 很难准确测出其隧道贯穿电场,往往根据 DCR 随过偏电压增加出现迅速增大趋势,达到不能接受的水平,此时的电场称为有效隧道贯穿电场(E_{jd})。SPAD 就是工作在 E_{\max} 与 E_{jd} 之间。

最大可能过偏电压可近似表示为(图 2 所示):

$$\Delta V_{\max} = (E_j - E_{\max}) l_a \quad (1)$$

SPAD 实际最大过偏电压可近似表示为:

$$\Delta V_m = (E_{jd} - E_{\max}) l_a \quad (2)$$

式中: l_a 为雪崩区宽度。

为了实现探测效率与暗计数率的有效折中,SPAD 应具备足够的过偏余量。

2.1 雪崩击穿电场与雪崩宽度的关系

雪崩倍增因子 $M(x)$ 与载流子激发或注入位置有关,可表述为:

$$M(x) = \frac{\exp \left[\int_0^x (\beta - \alpha) dx' \right]}{1 - \int_0^{l_a} \exp \left[\int_0^x (\beta - \alpha) dx' \right] dx} \quad (3)$$

式中: l_a 为雪崩宽度; x 为载流子注入位置; α 、 β 分别为倍增区(InP)电子和空穴的电离系数。

在雪崩击穿电压下 $M = \infty$,

$$\int_0^{l_a} \beta \exp \left[\int_0^x (\beta - \alpha) dx' \right] dx = 1 \quad (4)$$

器件真实的电场随距离的分布相当复杂,为使感兴趣的重要参数电场及雪崩击穿电压的设计简化,在

电荷区 l_p (图 2)很薄的条件下(实际的电荷区厚度不超过 $0.4 \mu\text{m}$),可近似认为雪崩区电场强度是常数,公式(4)可简化为:

$$\ln k/(k-1)=\beta l_a \quad (5)$$

其中 $k=\alpha/\beta$, $\ln P\langle 100 \rangle$ 的有效离化系数之比 $K_{\text{eff}}=0.43$ (室温)^[8],在室温下 $\ln P\langle 100 \rangle$ 的离化系数^[9]见表 1。 E_{max} 与 l_a 变化关系如图 4 所示。

表 1 离化系数与电场强度的关系

Tab.1 Relationship between coefficient and electric field

Electric-field/ $10^5 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1}$	α/cm^{-1}	β/cm^{-1}
3.6-5.6	$2.9 \times 10^6 \exp(-2.64 \times 10^6/E)$	$1.62 \times 10^6 \exp(-2.11 \times 10^6/E)$
5.3-7.7	$2.3 \times 10^5 \exp(-7.16 \times 10^{11}/E)$	$2.48 \times 10^5 \exp(-6.23 \times 10^{11}/E^2)$

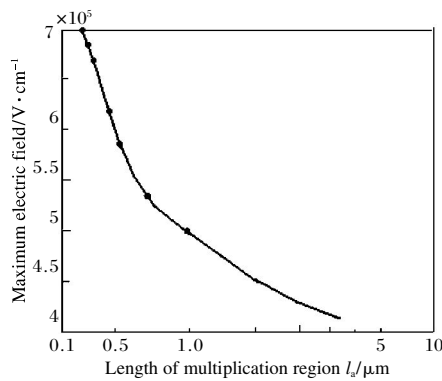


图 4 雪崩击穿电场 E_{max} 随雪崩长度 l_a 的变化关系

Fig.4 E_{max} electric field of l_a avalanche based on width of multiplication

2.2 最大可能过偏电压

由公式(2)和(5),得到最大过偏电压 ΔV_{max} 和 ΔV_m ,部分计算数据见表 2。

表 2 最大过偏电压余量的计算值

Tab.2 Calculation of maximum exceed breakdown voltage

$E_{\text{max}}/\text{V} \cdot \text{cm}^{-1}$	$l_a/\mu\text{m}$	$E_f/\text{V}/\text{cm}^{-1}$	$(E_{\text{max}}-E_{fd})l_a/\text{V}$	$\Delta V_{\text{max}}/\text{V}$
4.5×10^5	0.99	7×10^5	$(4.5-E_{fd}) \times 0.99$	24.75
4.8×10^5	0.74	7×10^5	$(4.8-E_{fd}) \times 0.74$	16.28
5.3×10^5	0.55	7×10^5	$(5.3-E_{fd}) \times 0.55$	9.35
5.5×10^5	0.47	7×10^5	$(5.5-E_{fd}) \times 0.47$	7.05
5.7×10^5	0.41	7×10^5	$(5.7-E_{fd}) \times 0.41$	5.33
6.3×10^5	0.29	7×10^5	$(6.3-E_{fd}) \times 0.29$	2.03
6.9×10^5	0.22	7×10^5	$(6.9-E_{fd}) \times 0.22$	0.22
7.0×10^5	0.21	7×10^5	$(7.0-E_{fd}) \times 0.21$	0

3 InGaAs/InP SPAD 设计判据

3.1 过偏电压设计

首先保证 SPAD 在击穿点具有稳定的雪崩倍增,在过偏下才能处于稳定的雪崩自维持状态,同时要具有适当的过偏电压,保证探测效率与暗计数率随过偏电压实现有效折中。由表 2 可知,过偏电压范围越大,雪崩击穿电场越低,雪崩宽度越大。研究表明,当电场小于 $4.5 \times 10^5 \text{ V/cm}$ 时将不会出现雪崩^[9],有些设计者将雪崩击穿电场设计为稍大于 $4.5 \times 10^5 \text{ V/cm}$,对应的雪崩宽度设计为 $1 \mu\text{m}$,他们认为雪崩宽度越大载流子电离碰撞的可能性越大,同时倍增区可能的隧道效应越小^[10]。按制备 InGaAs/InP SPAD 经验,当雪崩击穿电场大于 $5 \times 10^5 \text{ V/cm}$ 时才能获得稳定的雪崩增益,同时发现雪崩击穿电场设计在小于 $5 \times 10^5 \text{ V/cm}$ 时,SPAD 的击穿电压太高($>90 \text{ V}$),这将会使器件出现一些意想不到的问题。

建议雪崩击穿电场选择 $5.5 \times 10^5 \text{ V/cm}$ 左右,雪崩宽度在 $0.47 \mu\text{m}$ 左右,可能的最大过偏 7 V 左右。按照这样的设计,制备的 InGaAs/InP SPAD 实际有效过偏仅在 $2 \sim 2.5 \text{ V}$ (过偏再提高将导致 DCR 迅速增大),说明外延材料中存在比较明显的 TAT 效应,导致隧道贯穿电场降低,但由于在设计时预留了过偏余量空间,仍然能实现 PDE 与 DCR 的有效折中。当然,工程师们应根据制备外延材料的实际水平设计合适的过偏电压。

3.2 电场分布设计

SPAD 的雪崩电场由过偏电压提升的电场 E_t 和雪崩击穿电场 E_{max} 组成,即 $E=E_t+E_{\text{max}}$, E_t 随过偏电压增大而增大, E_{max} 由雪崩宽度决定。如图 2 所示, E_{max} 主要由 APD 的电场控制区提供的电场 ΔE 、吸收区提供电场 E_a 和衬底提供电场 E_s 三部分组成,即 $E_{\text{max}}=\Delta E+E_a+E_s$ 。

雪崩宽度 l_a 设计确定,雪崩击穿电场 E_{max} 也就确定,最大可能过偏电压 $\Delta V_{\text{max}}(\Delta V_m)$ 也就确定。需要合理分配 ΔE 、 E_a 、 E_s 三者的比例,分配应按如下原则进行:窄能隙吸收区的最大电场 $E_D=E_a+E_s < 1.5 \times 10^5 \text{ V/cm}$,有效控制载流子的隧道效应;衬底提供电场 $E_s > 1.0 \times 10^5 \text{ V/cm}$,保证光生载流子具有足够的漂移速度;雪崩击穿电场 $E_{\text{max}} > 5.0 \times 10^5 \text{ V/cm}$,保证 APD 在击穿点具有稳定的雪崩倍增。

建议吸收区的电场 $E_D = E_a + E_s$ 控制在 $(1.0 \sim 1.5) \times 10^5 \text{ V/cm}$, 电荷区提供电场 ΔE 控制在 $4.0 \times 10^5 \sim 4.5 \times 10^5 \text{ V/cm}$, 保证 $E_{\max} \approx 5.5 \times 10^5 \text{ V/cm}$ 。

3.3 低温正常工作设计

InGaAs/InP SPAD 在工作时,其耗尽区宽度随偏压增加而增大,当耗尽区扩展到 InGaAs 吸收区时,此时的偏压为达通电压 V_p 。当偏压增加到雪崩击穿时,此时的偏压为雪崩击穿电压 V_B 。理论和实验证明,击穿电压随温度降低而降低(对于 InGaAs/InP SPAD,温漂系数 $\approx 0.2 \text{ V/}^\circ\text{C}$),达通电压几乎与温度无关。为了有效抑制热激发,降低暗计数,SPAD 需要在低温工作($T \leq -40 \text{ }^\circ\text{C}$),因此雪崩击穿电压 V_B 与达通电压 V_p 差值应大于 30 V ,保证在低温下正常工作。按照图 2 可计算出:

$$V_B = l_a E_{\max} + (E_{\max} + E_a + E_s) l_p / 2 + (E_s + E_a / 2) l_b \quad (6)$$

$$V_p = (l_a + l_p / 2) (E_{\max} - E_s - E_a) \quad (7)$$

$$V_B - V_p = (l_a + l_b + l_p) E_s + E_a (l_b / 2 + l_a + l_p) \quad (8)$$

式中: l_a 、 l_p 、 l_b 分别为雪崩宽度、电场控制区宽度和吸收区宽度。

SPAD 的电场按 $E = E_i + E_{\max}$ 、 $E_{\max} = \Delta E + E_a + E_s$ 的合理分配,是通过外延材料结构参数的设计来实现的(即各外延层厚度和掺杂量),并且利用高斯定理定量计算,在这里不再详细计算。

设计了一种结构参数,见表 3,使 InGaAs/InP SPAD 在满足低温正常工作的同时,具有合理的电场分布、适当的过偏余量,以及具有大于 80% 的量子

表 3 实验设计的 InGaAs/InP SPAD 结构参数

Tab.3 Structural parameters of InGaAs/InP SPAD from experimental design

Item	Material	Width / μm	Doping amount ($\times 10^{16}$)	Surface doping amount	Type
p+ region	InP	3.0		$\geq 5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	p+
Multiplication region	InP	0.47	<0.1		n-
Charge region	InP	0.4	6.65-7.5		n
Grading region	$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ $x(0.85-0.89)$, $y(0.33-0.89)$	0.12	<0.1		n-
Absorption region	$\text{In}_{0.55}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$	2.0	<0.1		n-
Substrate	InP	150	300-500		n+

效率和低于 90 V 的击穿电压。另外,通过能带过度区设计($\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$),有效克服了异质结能带的不连续造成的载流子堆积对响应时间抖动(time jitter)的影响。电压与电场分布见表 4。

表 4 实验设计的 InGaAs/InP SPAD 电压与电场分布(室温)

Tab.4 Electric field distribution and voltage of InGaAs/InP SPAD by experimental design

E_{\max} / $(\times 10^5 \text{ V/cm})$	E_s / $(\times 10^5 \text{ V/cm})$	ΔE / $(\times 10^5 \text{ V/cm})$	$V_B(\text{RT})$ /V	V_p /V	$V_B - V_p$ /V	ΔV_{\max} /V	l_a / μm
5.5	1.0-1.5	4.0-4.5	71.8-83.8	27-30	42-57	7.05	0.47

4 测试与分析

4.1 按表 3 设计参数的测试与分析

按照表 3 设计,利用传统的半导体器件制造工艺制备了 InGaAs/InP SPAD,在门控模式下进行了单光子探测实验,对探测效率和暗计数率进行了测试。为了避免后脉冲对 DCR 的影响,驱动门宽选择 10 ns ,门控驱动频率 1 MHz ,激光驱动频率采用 1 MHz ,并相对延时使激光脉冲与门控脉冲同步。入射光通量为 0.1 光子/脉冲,波长 1550 nm ,鉴别电压 15 mV 。为了降低热激发载流子产生率,采用了两级半导体制冷。分别在 $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ 下,测试了 $\phi = 200 \mu\text{m}$ 和 $\phi = 50 \mu\text{m}$ SPAD,其 PDE 和 DCR 随过偏电压变化曲线见图 5(a)、(b)和图 6(a)、(b),图中 DCR 的计算由公式(9)给出,其中 P_d 是每脉冲内的暗计数, t_g 是脉冲门宽。

$$\text{DCR} = P_d / t_g \quad (9)$$

测试结果讨论:(1)在 $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ 下,DCR 随过偏出现迅速增长的趋势几乎一致,说明隧道贯穿电场主要依赖于过偏电压,由此引起的暗计数不能通过降温来控制;温度越高 DCR 随过偏增加越快,说明热载流子激发随温度增加。(2)制备的 InGaAs/InP SPAD 的实际可用过偏电压(以 DCR 出现迅速增长为判据)小于计算的最大过偏电压,这是由于在实际情况下,材料中存在较大的 TAT 效应,其隧道贯穿电场较理想值偏低。(3)按公式(2)估算倍增区的有效隧道贯穿电场 E_{td} , $\phi = 200 \mu\text{m}$ 和 $\phi = 50 \mu\text{m}$ 分别为 $5.93 \times 10^5 \text{ V/cm}$ 、 $6.0 \times 10^5 \text{ V/cm}$ 。从图 5 中可以看出制

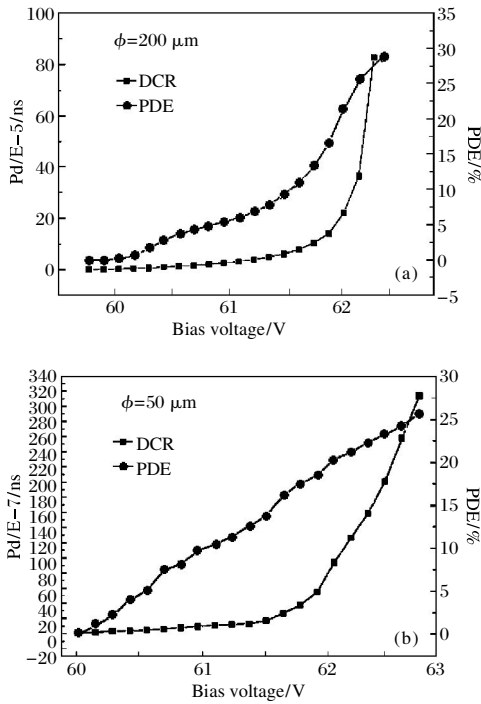


图 5 -40 °C 下探测效率与暗计数随过偏变化曲线
Fig.5 Dependence of PDE and DCR on excess bias at -40 °C

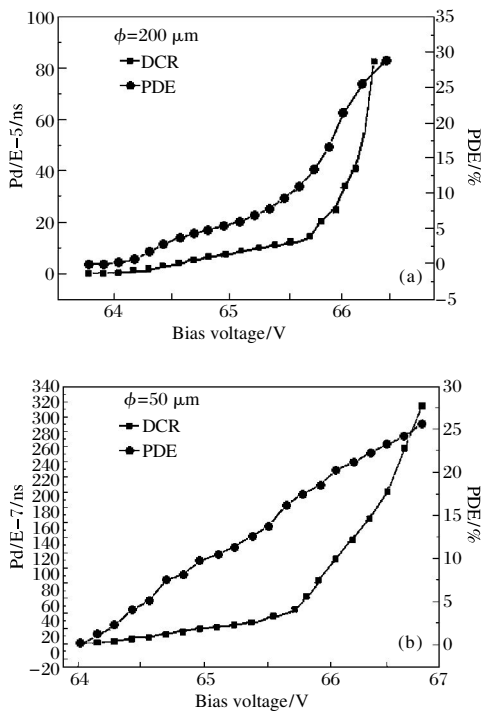


图 6 -20 °C 下探测效率与暗计数随过偏变化曲线
Fig.6 Dependence of PDE and DCR on excess bias at -20 °C

备的 $\phi=50 \mu\text{m}$ SPAD 出现了 PDE 随过偏增大到饱和的趋势,而 $\phi=200 \mu\text{m}$ SPAD 在 PDE 还未达到饱和之前 DCR 已出现急剧增大,同时也可以看出在隧道贯

穿之前, $\phi=200 \mu\text{m}$ SPAD 的 $\text{DCR} > \phi=50 \mu\text{m}$ DCR 一个数量级。说明 SPAD 的体积越大 TAT 效应越明显,热激发自由载流子的数量越多,产生暗计数的可能性越大,暗计数随偏压增加越快。(4)暗计数率越大,有效过偏电压越低,探测效率越低。(5)在 -40 °C 下,设计的 $\phi=200 \mu\text{m}$ SPAD 过偏 2 V, $\text{PDE} > 20\%$, $\text{DCR} < 20 \text{ kHz}$; $\phi=50 \mu\text{m}$ SPAD 过偏 2.5 V, $\text{PDE} > 23\%$, $\text{DCR} < 2 \text{ kHz}$,表明这样的设计方法是可行的,能够实现单光子探测。

4.2 选取一般商用 APD 的测试与分析

一般商用 InGaAs/InP APD 通常是按线模式应用来设计的,侧重于追求增益-带宽积。在不影响信噪比的前提下,尽可能提高雪崩击穿电场,有效减小雪崩宽度,使 APD 达到快响应。然而这类商用 APD 在盖革工作模式下,由于其雪崩击穿电场与隧道贯穿电场差值小,因而过偏电压范围窄,造成 DCR 随过偏电压急剧增大与 PDE 折中困难,难以实现单光子探测。

选用了 $\phi=50 \mu\text{m}$ 的商用 APD,在与 4.1 小节相同的条件下进行了测试,测试结果见图 7。其中,图 7(a)所示为探测效率与光通量的关系,可见光通量小于 0.5 个光子/脉冲时,探测效率极低。为了有效

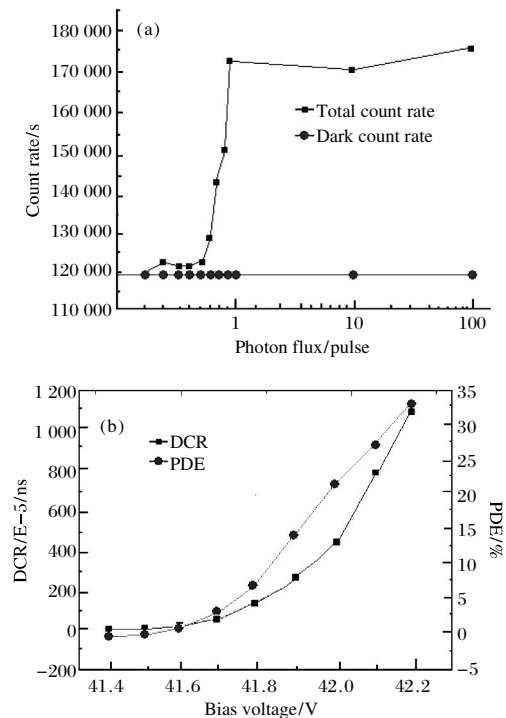


图 7 商用 InGaAs/InP APD 的测试结果
Fig.7 Test results of commercial InGaAs/InP APD

表征探测效率与过偏的关系,选取 10 个光子/脉冲进行了实验,结果见图 7(b),可见暗计数随偏压的增加而急剧增加,在 DCR 达到 800 kHz 时,PDE 仅为 2.5%左右。

由此可见,采用一般商用 InGaAs/InP APD 用于单光子探测是很困难的。

5 结 论

讨论了 InGaAs/InP SPAD 的雪崩击穿电场和雪崩宽度的关系,在盖革模式下的隧道贯穿电场与暗计数率的关系,提出了一种过偏电压的计算方法。分析了影响 SPAD 的基本特性的相关物理因素(过偏、温度、电场分布等),提出了一种 InGaAs/InP SPAD 的设计方法。按照这种设计方法制备了 InGaAs/InP SPAD,并在门控淬灭模式下进行了单光子探测实验,结果表明这样的设计是可以实现单光子探测的。

参 考 文 献:

- [1] Zappa F, Tisa S, Tosi A, et al. Principles and features of single-photon avalanche diode arrays [J]. *Sensors and Actuators A*, 2007, 140: 103–112.
- [2] Nicolas Gisin, Gregoire Ribordy, Wolfgang Tittel, et al. Quantum cryptography[J]. *Review of Modern Physics*, 2002, 74(1): 145–151.
- [3] Richard M Marino, William R Davis, Jr. A foliage – penetrating 3D imaging laser radar system [J]. *Lincoln Laboratory Journal*, 2005, 15(1): 23–36.
- [4] Ribordy, Gisin, Nicolas, et al. Photon counting at telecom wavelengths with commercial InGaAs/InP avalanche photodiodes: current performance [J]. *Journal of Modern Optics*, 2004, 51(9–10): 1381–1398.
- [5] Tian Yuzhen, Zhao Shuai, Guo Jin. Analysis of non2Cooperative target photon counting laser ranging [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, 31(5): 138–145. (in Chinese) 田玉珍, 赵帅, 郭劲. 非合作目标光子计数激光测距技术研究[J]. 光子学报, 2011, 31(5): 138–145.
- [6] Akihisa Tomita, Kazuo Nakamura. Balanced, gated –mode photon detector for Qubit discrimination at 1 550 nm [J]. *Optics Letters*, 2002, 27(20): 1827–1829.
- [7] K A McIntosh, J P Donnelly, D C Oakley, et al. InGaAs/InP avalanche photodiodes for photon counting at 1.06 μm [J]. *Applied Physics Letters*, 2002, 81(14): 2505–2507.
- [8] W T Tsang. 半导体光检测器 [M]. 杜宝勋, 等译. 北京: 电子工业出版社、清华大学出版社, 1992: 1–332.
- [9] Cook L W, Bulman G E, Stiuman G E. Electron and hole impact ionization coefficients in InP determined by photomultiplication measurements [J]. *Applied Physics Letters*, 1982, 40(7): 589–591.
- [10] Wang Shuling, Ma Feng, Li Xiaowei, et al. Analysis of breakdown probabilities in avalanche photodiodes using a history –dependent analytical model [J]. *Applied Physics Letters*, 2003, 82(12): 1971–1973.