光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022052501

$In_{0.53}Ga_{0.47}As$ 雪崩光电二极管单光子探测器的温度特性研究

敖天宏*，赵江林，童启夏，柳　聪，崔大健，张　承

（重庆光电技术研究所，重庆 400060）

摘　要： $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ 雪崩光电二极管单光子探测器(SPAD)的响应覆盖短波 950～1 700 nm，具有体积小、灵敏度高等特点，在量子通信、激光测距、激光雷达等应用有广泛前景。工作温度是影响 $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ SPAD 性能的重要因素，温度越高暗计数率越大，导致器件的噪声也越大。研究器件温度特性是实现暗计数抑制的重要途径。建立了数学模型来提取器件光电性能参数，通过分析吸收层、倍增层中载流子对温度的影响，获得最优器件结构参数。最后，制作了光敏面直径达到 70 μm 的 $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ SPAD 芯片，并进行了封装测试。结果显示，70 μm $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ SPAD 在室温下的探测效率为 14.2%，暗计数率为 88.6 kHz，噪声等效功率为 3.82×10^{-16} W·$Hz^{-1/2}$，仿真结果与测试结果的拟合曲线一致。

关键词： InGaAs SPAD；温度特性；短波红外探测器；激光雷达

中图分类号： TN958.98　**文章编号：** 1001－5868(2022)04－0765－05

A Study of Temperature Characteristics in $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ Single Photon Avalanche Diodes Detector

AO Tianhong, ZHAO Jianglin, TONG Qixia, LIU Cong, CUI Dajian, ZHANG Cheng

(Chongqing Optoelectronics Research Institute, Chongqing 400060, CHN)

Abstract: $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ single photon avalanche diodes (SPAD) response wavelength of 950～1 700 nm. With the advantages of small size and high sensitivity, $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ SPADs are widely used in quantum communication, laser ranging and Lidar. Operating temperature is an important factor affecting the performance of $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ SPAD. The higher the temperature is, the greater the dark count rate will be, which leads to the greater noise of the device. So the study of temperature characteristics of device can provide important way to suppress dark count. This paper built a mathematical model to extract photoelectric parameters. By analyzing the influence of charge carriers in absorber layer and multiplication layer, optimized structure parameters were obtained. Finally, an $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ SPAD chip with a photosensitive surface diameter of 70 μm was fabricated, packaged and tested. The results show that the detection efficiency reaches 14.2%, the dark counting 88.6 kHz and the NEP 3.82×10^{-16} W·$Hz^{-1/2}$. The test results agree with the simulation.

Key words: InGaAs SPAD; temperature characteristics; SWIR detector; lidar

0　引言

单光子探测器是一类具有检测单个光子能量(约 10^{-19} J)的超高灵敏度器件，在高增益下实现光信号到电信号的转换，广泛应用于量子通信[1-2]、激光测距[3]、三维激光成像雷达[4]等场景。在量子通信应用中，单光子探测器用于检测光量子的多维信息，在特定协议下进行保密通信[5]。在激光测距及

收稿日期：2022－05－25.

*通信作者：敖天宏　E-mail：at.hong.cn@163.com

三维激光成像雷达应用中，采用单光子探测器可在不增加激光器负载情况下，实现百千米、甚至千千米的成像探测[6]。目前，按工作原理不同，单光子探测器可以分为光电倍增管(PMT)[7]、超导纳米线探测器(SSPD)[8-9]和雪崩光电二极管单光子探测器(SPAD)[10-12]。其中，SPAD 通过雪崩倍增效应实现高探测效率，具有体积小、半导体工艺兼容性好等特点，是目前规模化应用前景最好的单光子探测器。

$In_{0.53}Ga_{0.47}As$ SPAD 的响应波段为短波 950～1 700 nm，覆盖量子通信使用的 1 550 nm 波长和激光探测的 1 064 nm 波段，是主流短波红外单光子探测器技术方案。为了获得更好性能，通常采用制冷(−30～−100 ℃)方式来降低暗计数率。然而，制冷装置如半导体制冷器(TEC)、热声制冷机等，会明显增加探测系统的体积和功耗，增加系统复杂度。因此，研究 $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ SPAD 的温度特性，是实现暗计数抑制的重要途径。本文针对温度对 $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ SPAD 暗计数的影响，对暗计数的组成进行了详细分析，研究了各结构层中载流子在强电场下的温度特性，并进行了结构优化。最后，研制了光敏面直径为 70 μm 的 $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ SPAD 芯片，并进行了性能测试。

1 器件结构与仿真结果分析

1.1 器件结构

$In_{0.53}Ga_{0.47}As$ SPAD 采用 SAGCM 结构，即分离的吸收层、渐变层、电荷层和倍增层，如图 1 所示。从下往上依次为 n^+-InP 缓冲层、i-InGaAs 吸收层、n-InGaAsP 渐变层、n-InP 电荷层、i-InP 倍增层和 p^+-InP 扩散层。

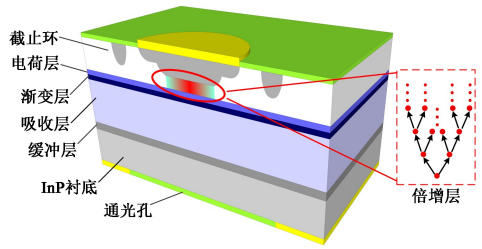


图 1 $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ SPAD 器件结构

吸收层 $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ 材料(禁带宽度 0.73 eV)与 InP 材料晶格匹配，吸收截止波长为 1.7 μm，吸收光信号后产生电子-空穴对。InGaAsP 渐变层将突变异质结大的价带势垒渐变，消除原生空穴跨越异质结的积累效应。电荷层调节 InGaAs 吸收层与 InP 倍增层的电场分布，维持吸收层内低电场，从而抑制由于隧穿引起的暗载流子。吸收层产生的空穴输运到高电场的宽带隙 InP 倍增层(禁带宽度 1.35 eV)，在高电场的作用下发生自持雪崩倍增，形成宏观可测电流。通常，在检测雪崩信号后，还需要对器件进行淬灭来恢复待工作状态[13]。

1.2 仿真计算

单光子探测效率(PDE)和暗计数率(DCR)是 $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ SPAD 的两个最重要的技术指标。PDE 指器件检测到单个光子的概率，与工作过偏压(V_{ob})有关。DCR 指无光条件下器件产生雪崩计数的概率，是器件自身产生的误计数，用于评价噪声水平。二者共同决定了器件的噪声等效功率(NEP)：

$$NEP = h\nu \times \frac{\sqrt{2 \times DCR}}{PDE} \tag{1}$$

NEP 是评价器件性能的优质因子(FOM)，NEP 越小则表示器件输出信噪比越高。PDE 和 DCR 均与雪崩击穿概率相关，过偏压越大，雪崩击穿概率越大，则 PDE 和 DCR 同时增大。因此，在 PDE 约束前提下，尽量减小暗计数率 DCR 值，是降低 NEP 的关键。

在内部电场作用下，空穴或电子输运到高电场(可达 5×10^5 V/cm)的倍增区，发生碰撞离化倍增，形成可被检测的宏观电流。在这个过程中，由非平衡载流子复合过程(又叫 Shockley-Read-Hall，SRH)、带间隧穿过程(Band-band Tunneling，BBT)和缺陷辅助隧穿过程(Trap-assisted Tunneling，TAT)产生的暗载流子也可能进入倍增区发生雪崩倍增，形成暗计数。热激发与温度和材料本征特性有关，主要发生在较厚的吸收层中。

基于半物理仿真模型(Quasi-Physical Model)进行 PDE 和 DCR 的数值仿真计算。得到 273 K 时不同过偏压 V_{ob} 工作条件下单位面积 DCR 的仿真结果，如图 2 所示。仿真参数中，吸收层掺杂浓度为 1×10^4 cm^{-3}，吸收层厚度为 1.5 μm，倍增层掺杂浓度为 2×10^{17} cm^{-3}，倍增层厚度为 1.2 μm。从图可以看出，$In_{0.53}Ga_{0.47}As$ SPAD 的 DCR 主要来源于 InP 倍增区的 TAT 隧穿载流子、BBT 隧穿载流子和 InGaAs 吸收层的 SRH 热生载流子。在低过偏压下，DCR 主要由 SRH 热生载流子决定。随着偏压增大，内部电场增大，隧穿过程占主导。

下面分别对 DCR 的三个主要来源的温度特性进行分析。仿真了不同温度下(295，273，263K)的

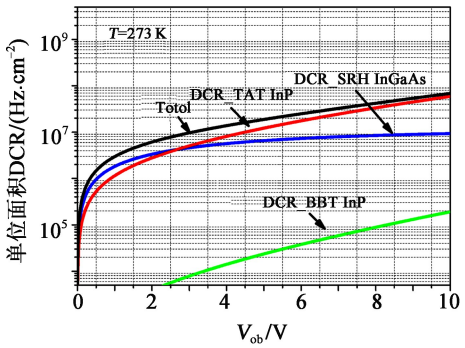


图 2　暗计数主要来源

暗计数情况，如图 3～5 所示。

(1)SRH 暗计数的温度特性

SRH 暗计数与非平衡载流子寿命 τ_{SRH} 直接关联，$In_{0.53}Ga_{0.47}As$ SPAD 为空穴雪崩器件，单位体积的热激发概率 N_{th} 可以描述为

$$N_{th}=n_i/\tau_{SRH} \tag{2}$$

式中，n_i 为材料的本征载流子浓度，τ_{SRH} 为非平衡载流子寿命。温度越低，载流子寿命变长，热激发概率降低。从图 3 可以看出，当过偏压为 2 V 时，温度从 295 K 下降到 273 K 时，SRH 单位面积暗计数率从 1.4×10^7 Hz/cm^2 下降到 3.3×10^6 Hz/cm^2，计算得到平均每下降 10 ℃，SRH 单位面积暗计数率下降 5.35×10^6 Hz/cm^2。

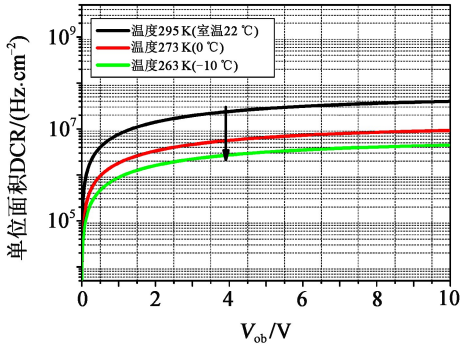


图 3　DCR_SRH InGaAs 温度特性仿真结果

(2)TAT 和 BBT 暗计数温度特性

带间隧穿 BBT 和缺陷辅助隧穿 TAT 导致的暗计数较为复杂，与能级宽度、缺陷密度、电场强度有关，主要发生在较低温度下或高电场的倍增区域。温度越低，倍增层 InP 禁带宽度增大，载流子浓度降低，隧穿电流变小。从图 4 可以看出，当过偏压为 2 V 时，温度从 295 K 下降到 273 K 时，TAT 单位面积暗计数率从 6.3×10^6 Hz/cm^2 下降到 2.8×10^6 Hz/cm^2，计算得到平均每下降 10 ℃，TAT 单位面积暗计数率下降 1.75×10^6 Hz/cm^2。BBT 单位面积暗计数率从 1.5×10^4 Hz/cm^2 下降到 3.9×10^3 Hz/cm^2，计算得到平均每下降 10 ℃，TAT 单位面积暗计数率下降 5.55×10^3 Hz/cm^2。通过分析可知，在 295～263 K 范围内，SRH 暗计数受温度的影响最大。

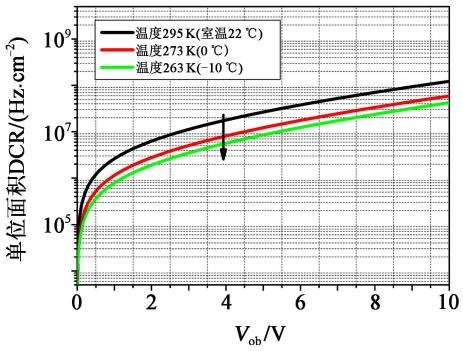


图 4　DCR_TAT InP 温度特性仿真结果

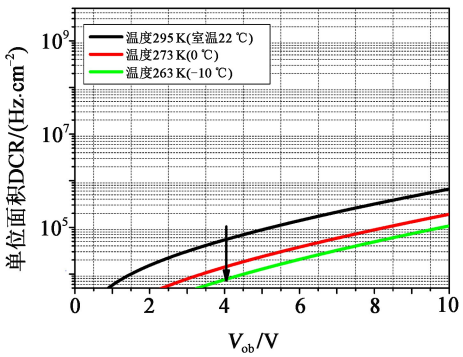


图 5　DCR_BBT InP 温度特性仿真结果

2　芯片制备

根据 InGaAs SPAD 的温度特性，对器件结构和材料制备工艺进行了优化，将本征吸收区的掺杂浓度控制在 1×10^4 cm^{-3} 以下，并通过调节电荷层使吸收区的电场强度低于 20 kV/cm，以此减小 DCR_SRH 暗计数率。利用我所的化合物半导体工艺线制备出光敏面直径为 70 μm 的 $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ SPAD 芯片，芯片为背照结构。通过刻蚀隔离出光敏区，使得芯片的p，n电极在同一侧。共电极设计

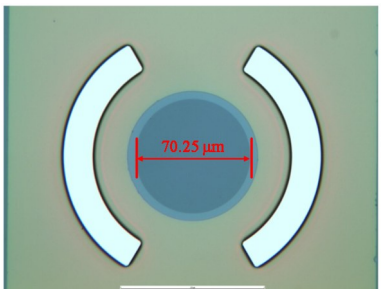


图 6　$In_{0.53}Ga_{0.47}As$ SPAD 芯片实物照片

使得后续封装更加方便，器件采用 TO 封装、光纤耦合方式。芯片实物图如图 6 所示。

3 测试结果分析

分别测试了 70 μm $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ SPAD 的直流参数和单光子响应特性。

3.1 InGaAs SPAD 直流参数

图 7 为不同温度下 70 μm $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ SPAD 的 *I-V* 曲线。测试采用平均功率为 1 μW 的 1 550 nm 激光光源。从测试结果可以看出，随着温度从 295 K 下降到 273 K，$In_{0.53}Ga_{0.47}As$ SPAD 的击穿电压从 66.4 V 下降到 64.1 V，温度系数为 0.105 V/K。同时，反偏电压为 20 V 时的暗电流从 5.8×10^{-11} 下降到 1.9×10^{-11}，说明室温下热激发载流子是暗电流的主要来源。

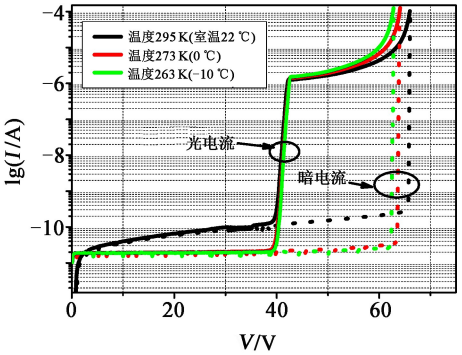


图 7 *I-V* 测试曲线

3.2 InGaAs SPAD 单光子响应特性

搭建了门控模式单光子探测器测试系统，门控工作频率为 1.25 GHz，激光器波长为 1 550 nm，通过衰减器获得平均能量约为 0.1 个光子的单脉冲信号。测试了不同温度下光敏面直径为 70 μm 的 $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ SPAD 的 PDE 和 DCR，如图 8 所示。

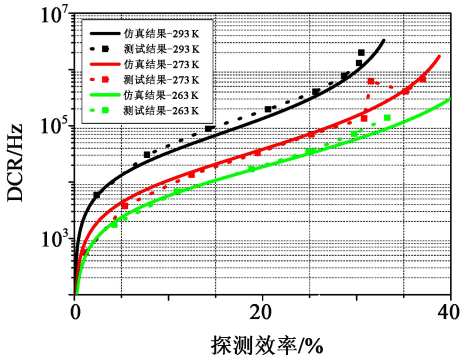


图 8 70 μm 光敏面直径 $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ SPAD 测试结果与仿真结果对比

从仿真值和测试结果可以看出，数据拟合得很好。增加器件两端过偏压，PDE 增大，DCR 也随之增大。室温下 PDE 为 14.2%，DCR 为 88.6 kHz，NEP 值为 3.82×10^{-16} W·$Hz^{-1/2}$。根据测试结果，提取了不同工作偏压下的激活能参数，如图 9 所示。可知，在 295～243 K 温度范围内，70 μm $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ SPAD 的激活能拟合值为 0.167～0.175 eV。激活能越大，说明 SPAD 暗计数受温度的影响越大。

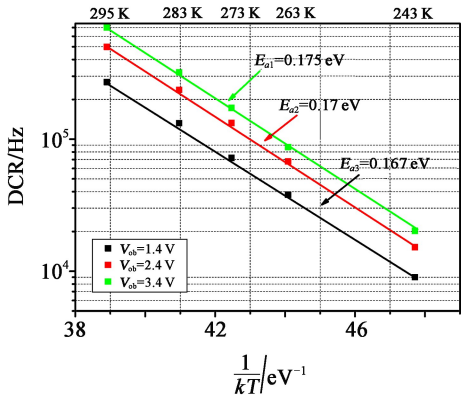


图 9 70 μm 光敏面直径 $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ SPAD 的激活能

4 结论

本文通过仿真计算，分析了 $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ SPAD 器件中暗计数的主要来源，研究了 SRH 非平衡载流子复合过程、BBT 带间隧穿过程和 TAT 缺陷辅助隧穿过程中温度对暗计数的影响。仿真结果表明，在近室温下，SRH 暗计数受温度的影响最大。在分析基础上，对器件进行了优化，并研制了光敏面直径达 70 μm 的 InGaAs SPAD 器件。测试结果显示，70 μm $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ SPAD 在室温下的探测效率 PDE 为 14.2%，暗计数率 DCR 为 88.6 kHz，仿真结果与测试结果的拟合曲线一致。同时，估算了 NEP 值为 3.82×10^{-16} W·$Hz^{-1/2}$，激活能拟合值为 0.167～0.175 eV。

参考文献：

[1] Villoresi P, Jennewein T, et al. Experimental verification of the feasibility of a quantum channel between space and earth [J]. New J. of Physics, 2008, 10: 033038.

[2] Bienfang J C, Restelli A, Migdall A. SPAD electronics for high-speed quantum communications [J]. Proc. of SPIE, 2011, 7945: 79452N. 1-79452N. 5.

[3] Bellisai S, Ferretti L, Villa F, et al. Low-power 20-meter 3D ranging SPAD camera based on continuous-wave indirect time-of-flight[C]// SPIE Conf. on Defense, Security, and Sensing, 2012.

[4] Albota M A, Heinrichs R M, Kocher D G. Three dimensional imaging laser radar with a photoncounting avalanche photodiode array and microchip laser[J]. Appl. Opt., 2002, 41(36): 7671-7678.

[5] Karami M A, Pil-Ali A, Safaee M R. Multistable defect characterization in proton irradiated single-photon avalanche diodes[J]. Optical & Quantum Electronics, 2015, 47(7): 2155-2160.

[6] Li Zhengping, Ye Juntian, Huang Xin, et al. Single-photon imaging over 200 km[J]. Optica, 2021, 8: 344-349.

[7] Donati S, Tambosso T. Single-photon detectors: From traditional PMT to solid-state SPAD-based technology[J]. IEEE J. of Sel. Top. in Quantum Electronics, 2014, 20(6): 1-8.

[8] Peacock A, Verhoeve P, Rando N, et al. Single optical photon detection with a superconducting tunnel junction[J]. Nature, 1996, 381: 135-137.

[9] Goltsman G N, Okunev O, Chulkova G, et al. Picosecond superconducting single-photon optical detector[J]. Appl. Phys. Lett., 2001, 79(6): 705-707.

[10] Wu G, Xu L, Chen J, et al. Fiber-coupled near-infrared single-photon spectrum analyzer based on a InGaAs/InP avalanche photodiode single-photon detector[J]. J. Mod. Opt., 2009, 56(2): 296-298.

[11] Jiang X. InGaAsP-InP avalanche photodiodes for single photon detection[J]. IEEE J. of Sel. Top. in Quantum Electronics, 2007, 13(4): 895-905.

[12] Itzler M A, Ben-Michael R, Hsu C-F, et al. Single photon avalanche diodes (SPADs) for 1.5 μm photon counting applications[J]. J. Mod. Opt., 2007, 54(2): 283-304.

[13] Thew R T, Stucki D. Free-running InGaAs/InP avalanche photodiode with active quenching for single photon counting at telecom wavelengths[J]. Appl. Phys. Lett., 2007, 91(20): 201114.1-201114.3.

作者简介：

敖天宏(1988—)，男，博士，主要从事光电子器件的研究。