

〈材料与器件〉

雪崩光电二极管过剩噪声的测量和抑制方法

李再波^{1,2}, 李云雪^{1,2}, 马旭^{1,2}, 田亚芳³, 史衍丽^{1,2}

(1. 云南大学 物理与天文学院, 云南 昆明 650091; 2. 云南大学 量子信息重点实验室, 云南 昆明 650091;
3. 昆明理工大学 理学院, 云南 昆明 650093)

摘要: 雪崩光电二极管 (APD) 因为其高灵敏度和高增益带宽的优势已被广泛应用在高比特率、远程光纤通信系统中, 而雪崩过程中产生的过剩噪声直接影响到 APD 的信噪比, 因此, 研究过剩噪声对 APD 性能的提升具有重要意义。目前, 国内外测试雪崩光电二极管过剩噪声的方法主要有直接功率测量法和相敏探测法, 本文对这两种测试方法和其优缺点进行了分析, 并介绍了最新的改进测试思路。同时, 还总结了降低过剩噪声的 3 种方法: 选择低碰撞电离系数比的材料, 降低倍增层厚度和采用 APD 碰撞电离工程来降低噪声。

关键词: 雪崩光电二极管; 过剩噪声因子; 相敏探测法; 碰撞电离工程

中图分类号: TN215 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2022)04-0343-08

Measurement and Suppression Method for Excess Noise in Avalanche Photodiodes

LI Zaibo^{1,2}, LI Yunxue^{1,2}, MA Xu^{1,2}, TIAN Yafang³, SHI Yanli^{1,2}

(1. School of Physics and Astronomy, Yunnan University, Kunming 650091, China;

2. Key Laboratory of Quantum Information, Yunnan University, Kunming 650091, China;

3. Faculty of Science, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: Avalanche photodiodes (APDs) have been widely used in high bit rate, long-distance optical fiber communication systems because of their high sensitivity and gain bandwidth. The excess noise generated in the avalanche process has a significant impact on the sensitivity of APD. Therefore, the study of excess noise is crucial for the improvement of APD performance. The existing methods for testing excess noise of avalanche photodiodes primarily include direct power measurement and phase-sensitive detection. This article briefly introduces these testing methods, analyzes their advantages and disadvantages, and summarizes the state-of-the-art testing methods. Additionally, three methods to reduce excess noise are summarized: choosing materials with low impact ionization coefficient, using relaxation space to change the thickness of the multiplier layer to reduce the number of impact ionization of carriers and engineering the APD for appropriately heterogeneous impact ionization.

Key words: avalanche photodiodes, excess noise factor, phase-sensitive detection method, impact ionization engineering

0 引言

近年来, 雪崩光电二极管 (avalanche photodiodes, APD) 被广泛应用在商业和军事领域, 包括光通信、雷达成像和单光子检测^[1]等方向。在通信领域, 相对于 PIN 光电二极管, APD 的内部增益提供了更高的

灵敏度和信噪比。APD 的增益来源于倍增层载流子的碰撞电离, 这是个随机过程, 由这种碰撞电离的随机性产生的噪声称为 APD 的过剩噪声^[2]。过剩噪声会影响 APD 的信噪比 (signal-to-noise, SNR), 因此, 减小过剩噪声一直是 APD 研发的热点。

APD 的重要性能参数有增益、增益带宽积和过剩

收稿日期: 2021-07-12; 修订日期: 2021-07-29.

作者简介: 李再波 (1997-), 男, 湖南永州人, 硕士研究生, 研究方向为半导体光电探测器研究。E-mail: zaiboli_yun@163.com.

通信作者: 史衍丽 (1969-), 女, 山东郓城人, 研究员, 博士生导师, 研究方向为半导体光电器件物理与器件研究。E-mail: ylshikm@hotmail.com.

通信作者: 田亚芳 (1978-), 女, 湖北赤壁人, 实验师, 研究方向为半导体光电材料与器件。E-mail: xntyf@sohu.com.

基金项目: 云南大学研究生科研创新基金项目 (2020290), 云南省重大科技项目 (2018Z1002)。

噪声等,过剩噪声是表征增益不稳定性的参量,通常采用过剩噪声因子(F)来量化表征过剩噪声的大小。目前,国内外研究 APD 过剩噪声因子的实验方法主要有两种:相敏探测法和直接功率测量法。相敏探测法利用锁相放大器提取出参考信号的光电流噪声,通过与标准 PIN 器件进行对比从而获得 APD 的过剩噪声^[3]。直接功率测量法则利用噪声分析仪直接测量 APD 的噪声,从而计算出 APD 的过剩噪声^[4]。国内研究 APD 过剩噪声因子 F 起步比较晚,2013 年,华中科技大学李奕键等人利用噪声系数分析仪通过偏置器来测试 APD 过剩噪声因子 F ^[5],2015 年,工业和信息化部制定了 PIN、雪崩光电二极管测试的电子行业标准,利用锁相放大器来测试过剩噪声因子 F ^[6],2019 年,暨南大学李永亮等人利用电子频谱分析仪测试 Si APD 的过剩噪声因子 F ^[7]。本文对比了相敏探测法和直接功率测量法两种测试方法的优缺点,并总结了每种测试系统最新的优化方案。

1 过剩噪声测试方法

1.1 相敏探测法

相敏探测法的实验测试系统如图 1 所示,该系统采用跨阻放大器(transimpedance amplifier, TIA)作为前端^[3],电压源为 APD 提供偏置电压,使其处于工作状态。激光通过斩波器调制一定的频率后照射在 APD 的光敏面上,光电流信号接入跨阻放大器后转变为电压信号。跨阻放大器一端连接锁相放大器测量 APD 的雪崩增益,另一端通过带通滤波器除去光电流信号,只留下与噪声相关的信息,噪声信号经过放大器后进入功率计,功率计的输出端连接第二个锁相放大器进行噪声功率测量。为了精确测量过剩噪声因子 F ,测试前必须通过测量商用硅 PIN 光电二极管来校准噪声测量系统并检查系统其他噪声的影响^[8]。

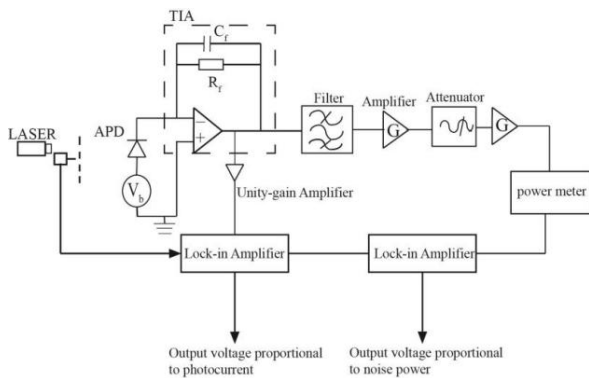


Fig.1 Phase-sensitive detection method noise test system

图 2 是该系统测量 GaAs PIN 二极管的过剩噪声的测试结果^[3]。在测量的雪崩增益范围内,测量结果与 Anselm 等人^[9]和 Li 等人^[10]的结果相似,表明该系统能够可靠地测量过剩噪声因子 F 。该系统的优点是可以直接提取出光电流的过剩噪声,不需要考虑背景环境和器件暗电流的影响,但是在使用锁相放大器来测量时,测量的频点少,耗时长,还需要进一步改进方案。

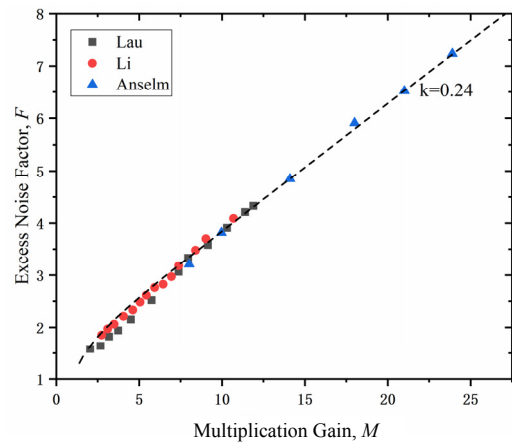


图 2 GaAs PIN 二极管的 M - F 曲线^[3]

Fig.2 M - F curves of GaAs PIN diode^[3]

Green 等人^[11]通过设计一种由两个相似的晶体管构成的新跨阻放大器来改善相敏探测法系统。该系统使用基于双极晶体管的跨阻放大器作为前端,可以在高暗电流、电容高达 5 nF 的雪崩二极管条件下进行精确测量过剩噪声。该系统已被用于测量厚度薄、面积大的硅 APD,测试结果与用不同噪声测量系统获得的结果一致。测试了不同厚度的 Si PIN APDs 的过剩噪声因子,测试结果如图 3 所示。

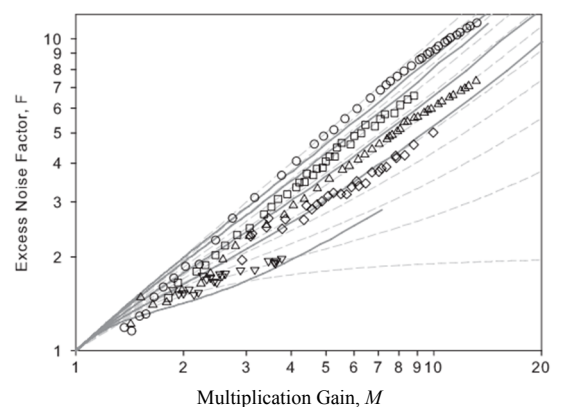


图 3 不同厚度 Si PIN APDs 的 M - F 曲线^[11]

Fig.3 M - F curves of Si PIN APD with different thicknesses^[11]

谢菲尔德大学 Liang Qiao^[12]基于 Lau^[3]等人的测量系统,通过增加反馈电阻值和降低运算放大器带宽来测量在低光电流的情况下雪崩光电二极管增益和

过剩噪声。使用以前的测量系统的过量噪声至少需要 $0.22 \mu\text{A}$ 光电流, 而该系统现在只需要 10 nA , 灵敏度提高了 22 倍以上, 光电流比文献[3,10]低两个数量级。光功率衰减 $10^{-2.3}$ 的 AllnP 雪崩二极管的过剩噪声因子与 Liang 等人^[13]的数据非常一致, 结果如图 4 所示^[12]。

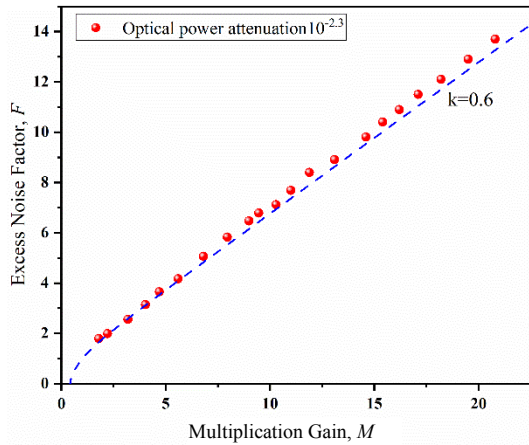


图4 光功率衰减 $10^{-2.3}$ 的 AllnP 雪崩二极管的 M - F 曲线^[12]

Fig.4 M - F curve of the AllnP avalanche diode under optical power attenuates by $10^{-2.3}$ ^[12]

1.2 直接功率测量法

直接功率测量系统大多数使用噪声系数分析仪^[4]来测量过剩噪声, 后来也有使用动态信号分析仪^[14]、频谱分析仪^[15]等, 实验测试系统^[4]如图 5 所示, 由于激光带来的相对强度噪声 (relative intensity noise, RIN) 影响过剩噪声测试, 因此, 使用发光二极管 LED 来代替激光作为光源, 其发射峰值接近 $1.3 \mu\text{m}$ 。入射光通过一个空间滤波器与一个直径为 $10 \mu\text{m}$ 的针孔耦合, 以确保照明面积比 APD 的光敏面积要小得多, 从而消除了边缘效应, 并减少了增益剖面中不均匀性的影响。用噪声系数分析仪记录在 $30 \text{ MHz} \sim 1.4 \text{ GHz}$ 频率下的噪声功率。该仪器首先用商业噪声源进行校准, 以消除放大器的噪声影响, 然后测量标准 PIN 的散粒噪声, 在每个测量频率下进行校准。APD 的噪声功率在光照下和无光条件下作为偏置电压的函数进行测量, 并从每个偏置电压的光电流中计算出增益。

该系统测试方法操作相对简单, 直接测量的频点多, 最大可覆盖 $10 \text{ MHz} \sim 26 \text{ GHz}$ 。华中科技大学文柯等人^[16]提出测量雪崩光电二极管过剩噪声的平衡光学系统, 该系统通过分束器使得标准 PIN 光电二极管与样品 APD 建立平衡电路, 可以有效地抑制来自激光器光源的相对强度噪声, 提高雪崩光电二极管过剩噪声因子的测量精度。测量 APD 的噪声功率谱密度 $S(f)$ 和在不同偏置电压下的增益 M , 可以得到拟合曲线,

从而能准确地得到样品 APD 的空穴与电子碰撞电离系数比 k 。如图 6 所示, 通过使用测量系统的系统阻抗、APD 的光电流、APD 的增益和光电流的噪声功率谱密度, 计算出样品 APD 的 k 值为 0.6。该方法可以直接抵消相对强度噪声, 而图 5 中的直接功率法则还需要计算出 RIN, 这种方法测试也更加精确。

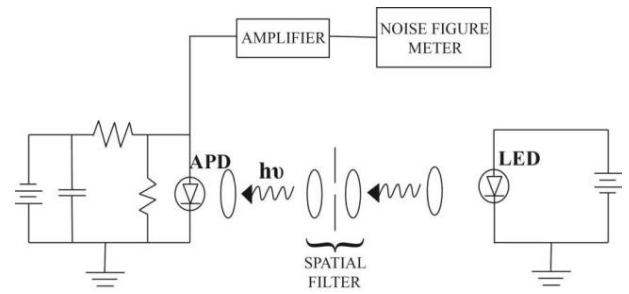


图5 直接功率测量噪声系统^[4]

Fig.5 Direct power measurement noise system^[4]

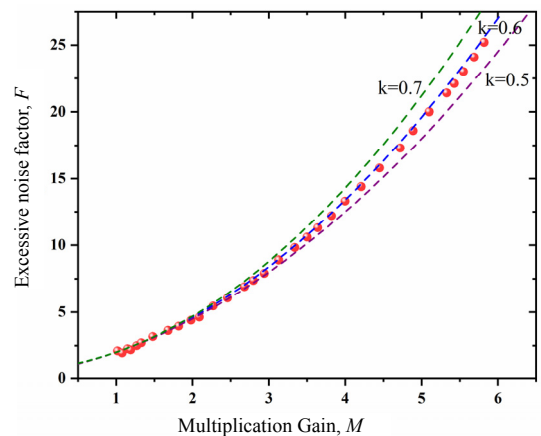


图6 APD 的 F 与增益的关系^[16]

Fig.6 The relationship between F and gain of APD^[16]

1.3 两种测试方法的对比

相敏探测法用一台锁相放大器来测量 APD 光电流的过剩噪声, 另一台锁相放大器直接提取出光电流, 而直接功率测量法测试系统测试光电流时包含 APD 的暗电流。背景噪声对噪声系数分析仪的影响也较大, 需要在屏蔽间里测试, 排除其他背景环境噪声对实验的影响。相敏探测法测试系统能够同时测量增益和噪声, 灵敏度也比较高, 而直接功率测量法不能同时测量增益和噪声, 增益需要 I - V 特性测试得到, 噪声需要分别在有光、无光条件下测量得到, 测量步骤相对比较繁琐。相敏探测法测量系统不足的地方是测量的频点低, 耗时比较长, 而直接功率测量法测量的频点比较多, 最大可覆盖到 $10 \text{ MHz} \sim 26 \text{ GHz}$, 测量时间比相敏探测法要短很多, 有效地提高了测量效率。

2 降低 APD 过剩噪声的 3 种方法

2.1 低碰撞电离系数比材料

硅 (Si) 由于其低碰撞电离系数比^[17], 对雪崩击穿的温度依赖性非常低, 是 APD 的最佳选择材料之一。Y. Kang 等人^[18]设计了在硅基底上生长的锗/硅雪崩光电二极管, Ge/Si APD 基于传统的分离、吸收、电荷和倍增 (SACM) APD 结构, 光吸收和载流子倍增发生在 Ge 和 Si 内部, 台面型 Ge/Si APD 的横截面示意图如图 7 所示, 通过化学气相沉积, 在 Si 倍增层 (0.5 μm) 上生长了一个 1 μm 厚的 Ge 吸收层, 利用硅电荷层来维持硅锗界面的低电场。

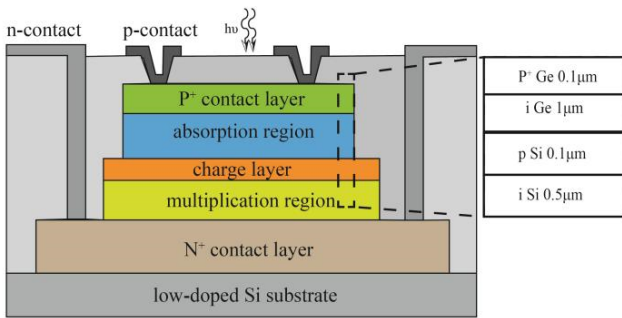


图 7 Ge/Si SACM APD 的平面示意图和横截面图^[18]

Fig.7 Schematic cross section of Ge on Si SACM APD^[18]

在 1310 nm 波长下, 这个直径为 30 μm 的 APD 的增益带宽积最大可达到 153 GHz, 在 130 MHz 频率下测量总噪声功率密度, 在增益达到 15 时, Ge/Si APD 的有效 k 值 ~ 0.1 , 测试结果如图 8^[18]所示。

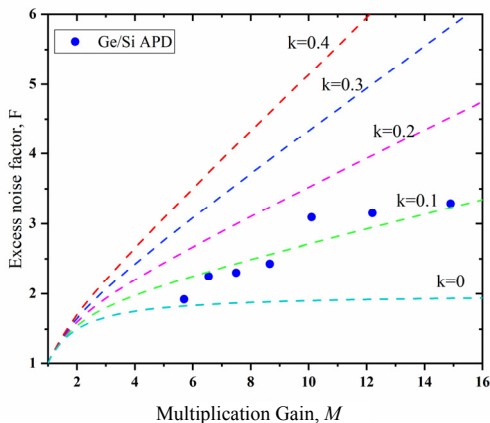


图 8 Ge/Si APD 的碰撞电离系数比 k ^[18]

Fig.8 Collision ionization coefficient ratio k of Ge/Si APD^[18]

Min Ren 等^[19]人报告了一种工作在短波红外的 $\text{Al}_{0.7}\text{In}_{0.3}\text{As}_{0.3}\text{Sb}_{0.7}$ (separate absorption, grading, charge, multiplication) SAGCM APD, 利用固源分子束外延在 n 型掺杂 GaSb 基底上生长外延层, $\text{Al}_{0.7}\text{In}_{0.3}\text{As}_{0.3}\text{Sb}_{0.7}$ 的能带为 1.16 eV, $\text{Al}_{0.7}\text{In}_{0.3}\text{As}_{0.3}\text{Sb}_{0.7}$ APD 的横截面示

意图和电场分布如图 9 所示^[19], 该结构顶部是 GaSb 接触层, $\text{Al}_{0.6}\text{In}_{0.4}\text{As}_{0.4}\text{Sb}_{0.6}$ 吸收层在两个渐变带隙层中间, 渐变层和倍增层分别是 0.15 μm 和 1 μm 的 P 型 $\text{Al}_{0.7}\text{In}_{0.3}\text{As}_{0.3}\text{Sb}_{0.7}$ 材料。

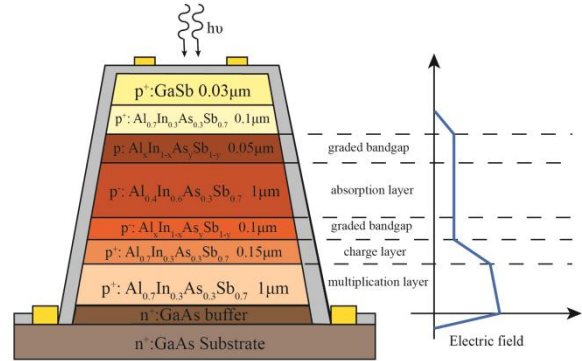


图 9 $\text{Al}_{0.7}\text{In}_{0.3}\text{As}_{0.3}\text{Sb}_{0.7}$ SAGCM APD 的横截面示意图和电场分布^[19]

Fig.9 Schematic diagram of the cross-section and electric field distribution of the $\text{Al}_{0.7}\text{In}_{0.3}\text{As}_{0.3}\text{Sb}_{0.7}$ SAGCM APD^[19]

当反向偏置电压为 50 V 时, 模拟表明吸收层和倍增层的平均电场强度分别为 $< 100 \text{ kV/cm}$ 和 $\sim 800 \text{ kV/cm}$, 在 95% 击穿电压处的暗电流 $\sim 120 \text{ nA}$, 约为 Ge/Si APD 的暗电流的 1%。用 HP8970B 噪声系数仪测量 $\text{Al}_{0.7}\text{In}_{0.3}\text{As}_{0.3}\text{Sb}_{0.7}$ SACM APD 的过剩噪声, 测量出来的有效 k 值在 0.01 左右, 比 Si/Ge 材料 APD 的碰撞电离系数比还小, 测试结果如图 10 所示^[19]。

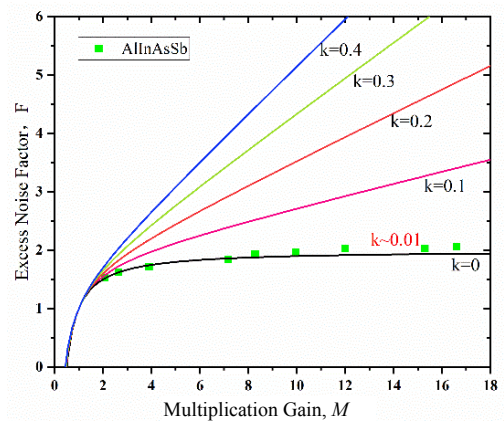


图 10 AllInAsSb APD 的碰撞电离系数比 k ^[19]

Fig.10 Collision ionization coefficient ratio k of AllInAsSb APD^[19]

J. C. Campbell 测量了 InP 材料的 InP/InGaAsP/InGaAs SAGCM APD 的过剩噪声^[4], 在低增益时噪声被抑制, 有效 k 值在 0.4 左右, 在高增益时, k 值接近 0.6, 现在大部分的 InGaAs/InP APD 的 k 值范围在 0.4~0.6 之间。Watanabe 等人^[20]测量了 InAlAs 的碰撞电离系数比, 发现电场在 400~650 kV/cm 范围内

的 k 值为 $0.2 \sim 0.35$ 。研究人员还采用了不同的方法来获得其他材料的碰撞电离系数比,不同材料的碰撞电离系数比 k 值范围^[21]如图 11 所示。Si 是低过剩噪声 APD 的首选材料,因为它具有非常低的 k 值,在所有增益下过剩噪声都非常低,选择低碰撞电离系数比的材料有利于降低 APD 的过剩噪声因子。

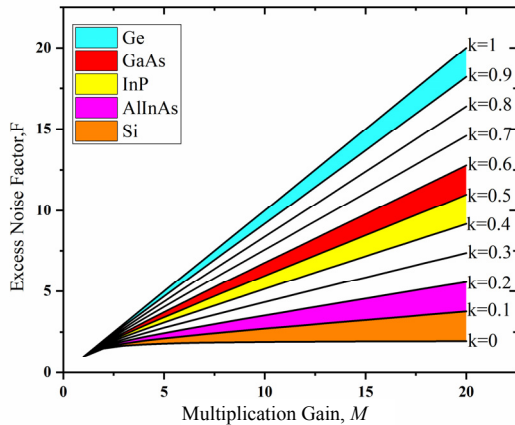


图 11 常用半导体材料的碰撞电离系数比 k ^[21]

Fig.11 Collision ionization coefficient ratio k of common semiconductor materials^[21]

2.2 优化倍增层厚度

McIntyre 的局域场模型在厚倍增层、电场均匀器件的模拟中,模拟结果与实验测量数据保持一致,但是在薄倍增层器件中,实验结果却相反,测量出具有更好的低噪声特性,McIntyre 理论在薄倍增层器件高估了噪声值,已经不适用器件倍增层逐渐变小的情况。载流子在电场的加速下,必须经过一段距离,才能获得足够的能量来发生碰撞电离,这个距离称为弛豫空间 (dead space),其表达式为: $d_e = E_{th}/qE$, 式中: E_{th} 为电离阈值能量; E 为电场强度。一般 d_e 的数量级在几个到几十纳米,在厚倍增层器件中, d_e 相对于倍增层厚度 ω 很小,可以忽略不计,随着倍增层达到超薄的时候, d_e/ω 变大,碰撞电离路径长度的分布函数开始收缩,使碰撞电离的随机性变小,从而改善了噪声特性。

Hu 等人对不同倍增层厚度的 GaAs APD 的噪声特性进行了研究^[22],采用 PIN 结构,制造了倍增层厚度为 0.1 、 0.2 、 0.5 和 $0.8 \mu\text{m}$ 的 APD,其中 0.1 、 0.2 和 $0.5 \mu\text{m}$ 倍增层载流子浓度掺杂为 $2 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$, $0.8 \mu\text{m}$ 倍增层掺杂浓度为 $1 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$,击穿时倍增层的电场强度随着厚度的增加而减小,测量结果如图 12 所示,倍增层的厚度从 $0.8 \mu\text{m}$ 减小到 $0.1 \mu\text{m}$,有效 k 值从 0.5 减小到 0.25 , $0.8 \mu\text{m}$ 和 $0.5 \mu\text{m}$ 倍增层还是符合

GaAs 材料的理论有效 k 值 $0.4 \sim 0.5$,当倍增层厚度低于 $0.5 \mu\text{m}$ 时, APD 的过剩噪声降低很多^[22]。

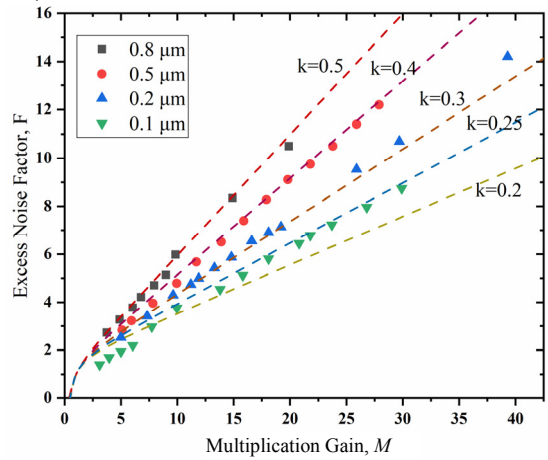


图 12 GaAs APD 不同倍增层厚度的 k 值^[22]

Fig.12 Collision ionization coefficient ratio k of GaAs APD with different multiplication layer thicknesses^[22]

Ong 等人^[23]使用一个简单的随机生成的电离路径长度 (randomly-generated ionization path length, RPL) 和硬阈值弛豫空间模型,定量研究了 GaAs p^+i-n^+ APD 的过剩噪声,改变倍增层的厚度分别为 $1 \mu\text{m}$ 、 $0.5 \mu\text{m}$ 、 $0.1 \mu\text{m}$ 和 $0.05 \mu\text{m}$,用 RPL 模型模拟出来的结果与蒙特卡洛 (Monte Carlo, M-C) 模型进行比较,发现相同倍增层厚度 APD 的增益完全一致,对于过剩噪声, RPL 模型要比相对复杂的 M-C 模型略低,这是因为 RPL 模型的碰撞电离路径长度的分布概率要低和更长的弛豫空间导致的,两种方法的模拟结果如图 13 所示,不管是 RPL 模型还是 M-C 模型,随着倍增层厚度的降低, APD 的碰撞电离系数比 k 值也降低,因此,在一定的倍增层范围内可以通过降低倍增层厚度利用弛豫空间来降低 APD 的过剩噪声。

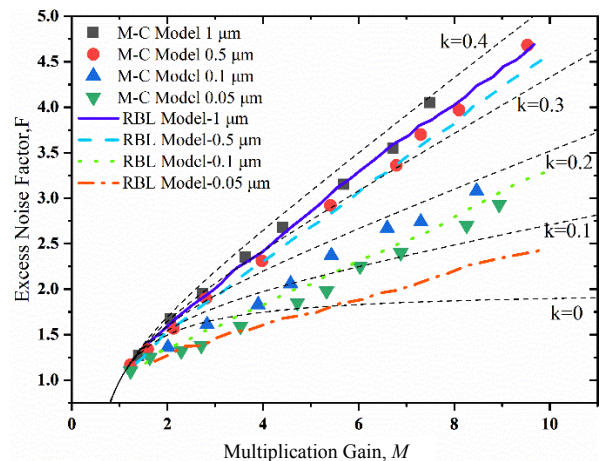


图 13 两种模型模拟不同倍增层厚度的 k 值^[23]

Fig.13 Two models to simulate the k value of different multiplication layer thicknesses^[23]

2.3 碰撞电离工程

为了实现器件的更高性能可以利用碰撞电离工程 (impact-ionization-engineered, I²E), I²E 器件的载流子从宽带隙的材料过渡到窄带隙的材料时, 通过碰撞电离阈值能量的突变以降低碰撞电离来实现低噪声, 载流子从宽带隙材料中的电场获得能量, 并在进入窄带隙层时迅速发生碰撞电离。这种方法最初是用于 GaAs/Al_xGa_{1-x}As 材料^[24], 设计新的倍增层结构, 它通过碰撞电离工程 I²E 实现非常低的倍增噪声。Ning Duan 等^[25]人设计了 In_{0.52}Al_{0.48}As/ In_{0.53}Ga_{0.17}Al_{0.3}As I²E 倍增层区域 SACMAPD, 实现了高增益带宽积达到 160 GHz, 低噪声的有效 k 值在 0.1 附近。H. R. Burris^[26]制作了直径 350 μm 的碰撞电离工程 InGaAs APD, 探测器的灵敏度在 51 Mbps 时为 -51 dBm, APD 由于具有高灵敏度和宽视场被用于小型无人载平台的自由空间激光通信终端中。Mike S. 通过分子束外延生长^[27], 在保持与 InP 晶格匹配的前提下实现了分区功能设计的倍增层: 一个 0.5 μm 非故意掺杂 InAlAs 的空穴释放层; 一个 100 nm p 型掺杂 InAlAs 电场层; 一个 200 nm InAlAs 的载流子加速层; 一个 10 nm n 型掺杂的 InAlAs 的电场降低层和 100 nm 非故意掺杂 InAlGaAs 能隙约为 0.92 eV 的电子碰撞电离层, 器件结构示意图如图 14 所示^[27]。

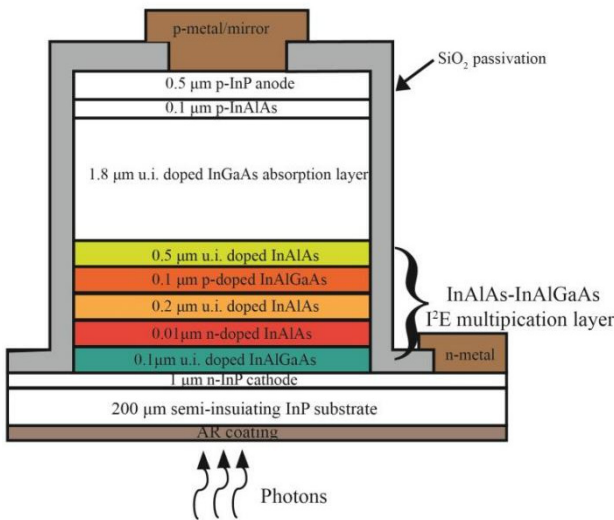


图 14 制造的 InAlAs/InGaAs I²E APD 的示意图^[27]

Fig.14 Schematic diagram of the fabricated InAlAs/InGaAs I²E APD^[27]

相对于之前的设计, 该结构的主要区别是倍增层的弛豫层厚度从 100 nm 增加到 500 nm, 结果表明, 通过增加倍增层的空穴释放层厚度, 从更低的场区域注入空穴, 降低空穴碰撞电离的概率, 进一步降低过剩噪声的产生。500 nm 弛豫层厚度在空穴碰撞电离减

少和带宽性能降低之间提供了足够的平衡, 在 $M \approx 15$ 和 $M \approx 25$ 处测得的载流子碰撞电离系数比近似于 $k = 0.05$ 和 $k = 0.1$, 在 1550 nm 处测量了大约 84% 的器件量子效率, 同时增益带宽积超过 80 GHz。

为了抑制空穴引发的电离, Sun 等人^[28]使用蒙特卡罗模拟表明, 将倍增层中弛豫层的厚度从 100 nm 增加到 500 nm 有利于空穴在进入 InAlGaAs 倍增层之前减速。模拟的外延层能带图如图 15 所示。

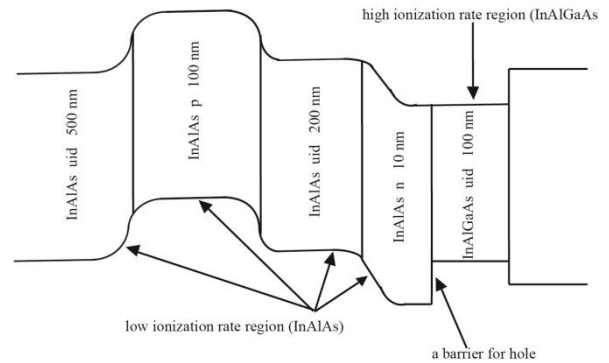


图 15 串联 I²E InAlAs/InGaAs APD 能带图^[28]

Fig.15 Series I²E InAlAs/InGaAs APD band diagram^[28]

对以上串联 I²E InAlAs/InGaAs APD 结构的过剩噪声特性进行了理论模拟, 计算结果显示, 厚度从 100 nm 增加到 500 nm, 当增益值高达 30 时, 产生的碰撞电离系数比 k 小于 0.05, 模拟结果如图 16^[28]所示。仿真结果还表明, 当空穴遇到新的平衡势垒时, 其平均能量为 < 0.12 eV, 有效地降低了空穴引起的碰撞电离。

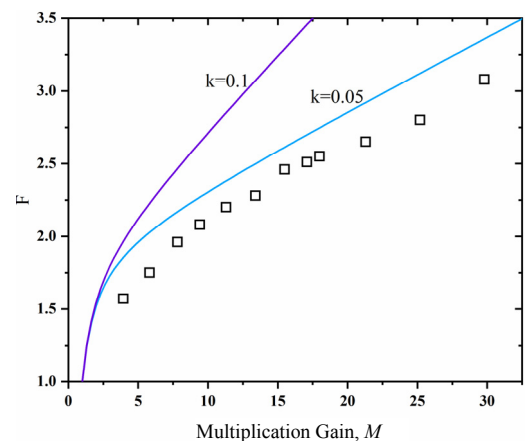


图 16 模拟串联 I²E InAlAs/InGaAs APD 的 k 值^[28]

Fig.16 Simulation of k value of series I²E InAlAs/InGaAs^[28]

串联 APD 的复合倍增区域在产生非常低的过剩噪声的同时, 也会降低增益带宽积, 随着弛豫层厚度增加, 以及空穴能量的减少, 空穴将需要更长的时间才能使空穴越过价带障碍。图 17 显示了单级 I²E

APD 和三级串联 APD 的模拟带宽与增益的关系, 增益带宽积减少到原来的 $1/N$, 其中 N 是串联 APD 中的级数^[28]。

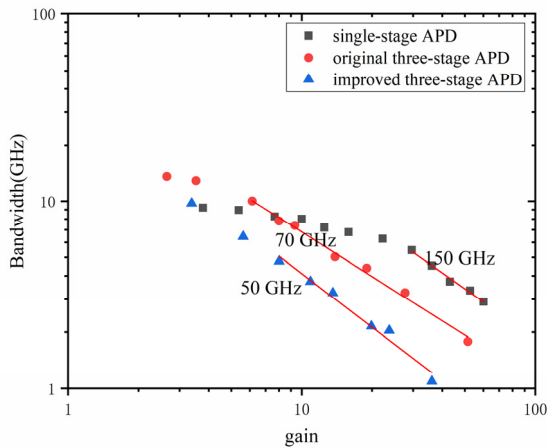


图 17 单级 APD 和串联 APD 的模拟增益带宽积^[28]

Fig.17 Simulated gain-bandwidth product of single-stage APD and series APD^[28]

3 结论

雪崩光电二极管的过剩噪声限制了器件工作时的性能释放, 因此精准地测量过剩噪声并研究抑制过剩噪声的方法对制作低噪声 APD 具有重要意义。本文介绍了两种测试 APD 过剩噪声因子的方法: 相敏探测法和直接功率测量法, 这两种测量方法都存在一定的优势和缺陷, 需要对测试系统进行不断地优化。最后, 总结了 3 种降低过剩噪声的方法: 开发类似 Sb 化物低碰撞电离系数比的材料、降低倍增层厚度、采用碰撞电离工程设计多种材料组成的倍增层。选择适合的材料和倍增厚度对 APD 的过剩噪声降低具有明显的效果, 碰撞电离工程可以提高 APD 的灵敏度和降低噪声, 厚弛豫倍增层的多级串联会导致较低的增益带宽积。

参考文献:

[1] Tosi A, Calandri N, Sanzaro M, et al. Low-noise, low-jitter, high detection efficiency InGaAs/InP single-photon avalanche diode[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, **20**(6): 192-197.

[2] Emmons R B. Avalanche photodiode frequency response[J]. *Journal of Applied Physics*, 1967, **38**(9): 3705-3714.

[3] Lau K S, Tan C H, Ng B K, et al. Excess noise measurement in avalanche photodiodes using a transimpedance amplifier front-end[J]. *Measurement Science and Technology*, 2006, **17**(7): 1941-1946.

[4] Campbell J C, Chandrasekhar S, Tsang W T, et al. Multiplication noise of wide-bandwidth InP/InGaAsP/InGaAs avalanche photodiodes[J]. *Journal*

of Lightwave Technology, 1989, **7**(3):473-478.

[5] 李奕健. APD 电路模拟与过剩噪声因子实验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.

LI Yijian. Experimental study on APD Circuit Simulation and excess Noise factor[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013.

[6] 郭萍, 崔大健, 王波. PIN、雪崩光电二极管测试方法: SJ/T 2354-2015[S]. [2015-09-26] 北京: 中国电子技术标准化研究院.

GUO Ping, CUI Dajian, WANG Bo.SJ/T 2354-2015 PIN, avalanche photodiode test method[S] [2015-09-26]. Beijing: China National Institute of Electronic Technology Standardization.

[7] 李永亮, 余健辉, 张军. APD 探测器模块性能及噪声检测[J]. *应用光学*, 2019, **40**(6): 1115-1119.

LI Yonliang, YU Jianhui, ZHANG Jun. APD detector module performance and noise detection[J]. *Applied Optics*, 2019, **40**(6): 1115-1119.

[8] Bulman G E, Robbins V M, Stillman G E. The determination of impact ionization coefficients in (100) gallium arsenide using avalanche noise and photocurrent multiplication measurements[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2005, **32**(11): 2454-2466.

[9] Anselm K A, Yuan P, Hu C, et al. Characteristics of GaAs and AlGaAs homojunction avalanche photodiodes with thin multiplication regions[J]. *Applied Physics Letters*, 1997, **71**(26): 3883-3885.

[10] LI K F, ONG D S, David J, et al. Avalanche multiplication noise characteristics in thin GaAs p⁺-i-n⁺ diodes[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1998, **45**(10): 2102-2107.

[11] Green J E, David J P R, Tozer R C. A transimpedance amplifier for excess noise measurements of high junction capacitance avalanche photodiodes[J]. *Measurement Science & Technology*, 2012, **23**(12): 125901-125913.

[12] LIANG Q, Dimler S D, Baharuddin N A P, et al. An excess noise measurement system for weak responsivity avalanche photodiodes[J]. *Measurement Science and Technology*, 2018, **29**(6): 065015-065021.

[13] LIANG Q, Cheong J S L, Ong J S, et al. Avalanche noise in Al_{0.52}In_{0.48}P diodes[J]. *IEEE Photonics Technology Lett*, 2016, **28**(4): 481-484.

[14] CHOU F P, Hsieh Y C, HUANG C A, et al. Excess noise of 850-nm silicon avalanche photodiodes fabricated using CMOS process[C]//2014 International Symposium on Next-Generation Electronics (ISNE) of IEEE, 2014, **978**(1): 1-3.

[15] Lee M J, Rucker H, Choi W Y. Optical-power dependence of gain, noise, and bandwidth characteristics for 850-nm CMOS silicon avalanche photodetectors[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, **20**(6): 211-217.

[16] WEN K, TU J J, ZHAO Y L. A balanced optical system for excess noise factor measurement of avalanche photodiode[C]//Asia Communications and Photonics Conference, 2016: DOI: 10.1364/ACPC.2016.AF2A.67.

[17] Webb R P, McIntyre R J, Conradi J, et al. Properties of avalanche

- photodiodes[J]. *R. C. A. Review*, 1974, **35**(2): 234-278.
- [18] KANG Y, Zadka M, Litski S, et al. Epitaxially-grown Ge/Si avalanche photodiodes for 1.3 mm light detection[J]. *Optics Express*, 2008, **16**(13): 9365-9371.
- [19] Min R, Maddox S J, Woodson M E, et al. AlInAsSb separate absorption, charge, and multiplication avalanche photodiodes[J]. *Applied Physics Letters*, 2016, **108**(191108): 1-4.
- [20] Watanabe I, Torikai T, Makita K, et al. Impact Ionization Rates in (100) Al_{0.48}In_{0.52}As[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 1990, **11**(10): 437-438.
- [21] BAI X G, YUAN P, McDonald P, et al. Development of low excess noise SWIR APDs[C]// *Infrared Technology & Applications XXXVIII*, 2012, **8353**: 83532H.
- [22] HU C, Anselm K A, Streetman B G, et al. Noise characteristics of thin multiplication region GaAs avalanche photodiodes[J]. *Applied Physics Letters*, 1996, **69**(24): 3734-3736.
- [23] Ong D S, LI K F, Rees G J, et al. A simple model to determine multiplication and noise in avalanche photodiodes[J]. *Journal of Applied Physics*, 1998, **83**(6): 3426-3428.
- [24] YUAN P, WANG S, SUN X, et al. Avalanche photodiodes with an impact-ionization-engineered multiplication region[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2000, **12**(10): 1370-1372.
- [25] DUAN N, WANG S L, MA F, et al. High-speed and low-noise SACM avalanche photodiodes with an impact-ionization-engineered multiplication region[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, **17**(8): 1719-1721.
- [26] Burriss H R, Ferraro M S, Freeman W T, et al. Development of a large area InGaAs APD receiver based on an impact ionization engineered detector for free-space lasercomm applications[J]. *Atmospheric Propagation IX*, 2012, **10**(12): 1370-1372.
- [27] Ferraro M S, Rabinovich W S, Mahon R, et al. Position Sensing and High Bandwidth Data Communication Using Impact Ionization Engineered APD Arrays[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, **31**(1): 58-61.
- [28] SUN W L, ZHENG X G, LU Z W, et al. Numerical simulation of InAlAs/InAlGaAs tandem avalanche photodiodes[C]// *IEEE Photonic Society 24th Annual Meeting*, 2011: DOI: 10.1109/PHO.2011.6110535.