

# 碲镉汞 PIN 结构雪崩器件的 I 区材料晶体质量研究

沈川, 张竞, 杨辽, 郭慧君, 谢浩, 周梅华, 陈路\*, 何力  
(中国科学院上海技术物理研究所 红外材料与器件重点实验室, 上海 200083)

**摘要:** 本文对中波红外 PIN 结构的碲镉汞(HgCdTe)雪崩器件关键雪崩区域的材料晶体质量进行研究。通过在实验材料上对 PIN 结构雪崩器件的全过程工艺模拟, 采用微分霍尔、微分少子寿命等测试手段进行材料表征, 评估获得了关键雪崩区域的真实材料晶体质量。研究发现, 现有优化工艺下雪崩区域的晶体质量良好, 拟合材料的 SRH 寿命最好能达到 20.7  $\mu\text{s}$ , 可达到原生材料 SRH 寿命的相当水平, 满足高质量中波碲镉汞雪崩器件的研制要求。同时, 我们以获得的雪崩区域 SRH 寿命为基础, 对 HgCdTe APD 结构器件进行相应 2 维数值模拟, 获得理论最优的暗电流密度  $8.7 \times 10^{-10} \text{ A/cm}^2$ 。

**关键词:** 碲镉汞; 雪崩器件; 少子寿命; 暗电流  
**中图分类号:** O471.5; TN305.3 **文献标识码:** A

## Study on crystal quality of materials in Zone I of APD P-I-N HgCdTe

SHEN Chuan, ZHANG Jing, YANG Liao, GUO Hui-Jun, XIE Hao,  
ZHOU Mei-Hua, CHEN Lu\*, HE Li

(Key Laboratory of Infrared Imaging Materials and Detectors, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

**Abstract:** In this paper, we investigated the crystal quality of Mercury Cadmium Telluride (HgCdTe) materials in the key avalanche region of avalanche photodiode detectors (APDs) with MWIR PIN structure. We simulated the entire process of the PIN APD device on the experimental materials and used differential Hall testing and differential minority lifetime testing to evaluate the material's real crystal quality in the key avalanche area. It is found that the crystal quality of the avalanche region under the optimized process is good. Its Shockley-Read-Hall (SRH) lifetime is 20.7  $\mu\text{s}$ , which can be comparable to that of the primary HgCdTe materials. This meets the development requirements for high-quality MWIR HgCdTe avalanche devices. Additionally, based on the obtained SRH lifetime in the avalanche region, we conducted corresponding two-dimensional numerical simulations on HgCdTe APD structural devices to determine the theoretically optimal dark current density of  $8.7 \times 10^{-10} \text{ A/cm}^2$ .

**Key words:** HgCdTe, APD, lifetime, dark current

## 引言

HgCdTe 材料具有高吸收系数、高量子效率、波段可调等优点, 一直是制作红外光电探测器以及新一代红外焦平面器件的优选材料<sup>[1-4]</sup>。同时, HgCdTe 材料不仅具有可调的响应波长, 更重要的是其电子、空穴离子化系数差异可以非常大, 很适合制

备高性能的 APD, 具备高增益、低噪声、快响应以及几乎没有过剩噪声等特点<sup>[5-7]</sup>。

近二十年来, 国外在 HgCdTe APD 焦平面器件研发和应用方面取得了极大的进展。国内近几年也开始对 HgCdTe APD 投入了相关的研究, 取得了相关进展。中国科学院上海技术物理研究所郭慧

收稿日期: 2023-07-17, 修回日期: 2023-12-28

Received date: 2023-07-17, Revised date: 2023-12-28

基金项目: 上海市自然科学基金资助项目(21ZR1473500); 国家自然科学基金资助项目(62204248); 上海市青年科技英才扬帆计划(22YF1455900)

**Foundation items:** Supported by the Shanghai Natural Science Foundation (21ZR1473500); the National Natural Science Foundation of China (62204248); the Shanghai Sailing Program (22YF1455900)

**作者简介(Biography):** 沈川(1985-), 副研究员, 博士, 主要研究领域为 HgCdTe 材料结构设计、生长和器件工艺. E-mail: shenchuan@mail. sitp. ac. cn

\*通讯作者(Corresponding author): E-mail: chenlu@mail. sitp. ac. cn

君等人报道了中波红外 HgCdTe APD 的最新进展, 10 V 下的增益接近 1 000, 在增益 100 附近其过剩噪声因子为 1.2~1.45, 器件的量子效率为 60%<sup>[8]</sup>。李雄军等人对中波 HgCdTe 雪崩光电二极管的增益特性进行了研究, 采用不同工艺制备器件, 最高器件有效增益提高至 1 000<sup>[9]</sup>。可见, 国内的 HgCdTe APD 在单元器件增益、过剩噪声因子等方面完成了原理性的探索, 对增益特性和暗电流机制进行了相关分析<sup>[10-12]</sup>, 同时开始向着实用化工艺进行迈进。

常规的碲镉汞 PIN 结构雪崩器件一般采用 n-on-p 结构, 其中最为关键的雪崩 I 区采用离子注入及推结退火的后成结工艺。这些工艺步骤将改变原材料的性质, 前期理论模拟研究表明, 雪崩 I 区的质量对 APD 器件的暗电流至关重要。因此, 对于雪崩 I 区真实材料性能的研究将对后续 APD 器件的工艺优化提供有效基础支撑。

本文通过单项实验对比与分析, 选取原生 HgCdTe 材料, 对其进行 PIN 结构雪崩器件的全过程工艺模拟, 形成大面积的雪崩 I 区。采用微分霍尔、微分少数寿命等测试手段进行材料表征, 评估获得了关键雪崩区域的真实材料晶体质量。研究发现, 现有优化工艺下雪崩区域的晶体质量良好, 拟合材料的 SRH 寿命最好能达到 20  $\mu$ s。最后, 结合器件理论模拟, 调整工艺优化, 为后续碲镉汞雪崩焦平面器件的研发提供基础。

## 1 实验过程

本文在 CdZnTe 衬底上采用 LPE 方法生长 Hg 空位掺杂的 P 型 HgCdTe 外延材料, 经过 B<sup>+</sup> 离子注入以及退火工艺后, 由于 Hg 原子的填隙扩散, 形成 P-I-N 结构的平面结雪崩器件。图 1 为其器件结构示意图, 其中 N<sup>-</sup> 区域即为由后成结工艺形成的雪崩 I 区。

单项实验中, 我们先选取外延后的材料切片成边长为 1 cm 的正方形样品, 样品组分为 0.3254, HgCdTe 层厚度为 15.5  $\mu$ m。成结工艺开始前, 对实验材料进行表面缺陷以及 XRD 检测, 确保材料初始质量性状满足并接近实际雪崩器件状态。接着, 通过常规的 PIN 成结工艺对实验材料进行相同的器件全过程工艺模拟。实验材料经过表面清洗、腐蚀、P 型退火、阻挡层生长、离子注入以及推结退火等工艺过程。整个实验过程几乎完全模拟常规的器件工艺, 以求能最大限度地模拟真实器件的 I 区, 获得最接近真实器件的 I 区材料状态。其中, 唯一的区别为离子注入时是材料全面积的注入过程。

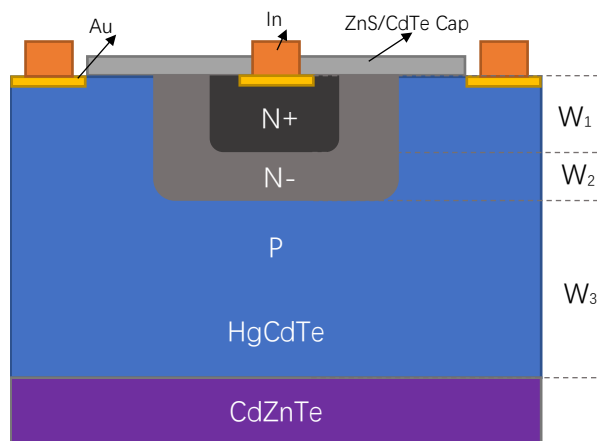


图1 HgCdTe APD 的二维结构模型

Fig. 1 2-D structural model of HgCdTe APD

雪崩 I 区成型后, 我们对实验材料进行纵向的微分剥层, 剥层精度控制在 0.3~1  $\mu$ m 之间, 测试温度为 80 K。每次的微分剥层中进行霍尔浓度以及少数寿命的测量。整个纵向剥层从 N<sup>+</sup> 区经过 I 区, 一直到达最后的 P 区, 覆盖整个 PIN 雪崩结构, 从而获得了整个 PIN 结的材料霍尔浓度和少数寿命的分布情况。

## 2 结果分析

从前期的理论模拟以及暗电流研究可知<sup>[10-12]</sup>, 关键雪崩 I 区的有效控制, 是高性能 HgCdTe 雪崩焦平面器件制备的第一要素, 包括 I 区的轮廓参数和材料质量性质。因为是后成结工艺, 且离子注入以及退火都会显著地改变原材料性状, 所以真实的 I 区表征是考量后续工艺的关键因素。

本文我们对 I 区的材料质量进行了量化的研究。

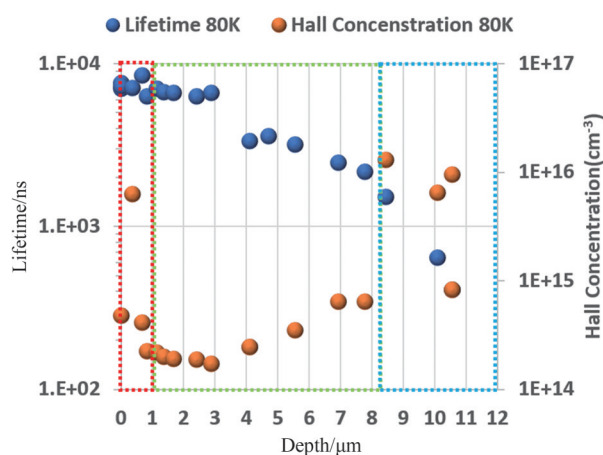


图2 整个PIN结的材料霍尔浓度和总少数寿命的分布曲线图  
Fig. 2 Hall concentration and total minority lifetime distribution for the entire PIN junction

图2为整个PIN结的材料霍尔浓度和总少子寿命的分布曲线。其中,横坐标为微分剥层的深度,0  $\mu\text{m}$ 处即为材料的表层位置。三角形点为各层的材料总少子寿命随着深度的分布变化,圆形点为各层的材料霍尔浓度随着深度的分布变化。图2中,按照材料霍尔浓度的分布变化曲线,我们可以看到,其霍尔浓度在整个纵向有两个大的跳变,分别是深度1  $\mu\text{m}$ 左右和深度8  $\mu\text{m}$ 左右。结合PIN结构的成结特性,可以分析获得材料表层0~0.9  $\mu\text{m}$ 为N+区域,P区在深度8.5  $\mu\text{m}$ 以上,而我们最关键的雪崩I区在0.9~8.5  $\mu\text{m}$ 之间。由此,从图中我们分析I区的少子寿命可以看到,随着深度的增加,I区的少子寿命呈现先有一段稳定区然后慢慢降低的过程。结合霍尔浓度分布变化,可以确认3~8  $\mu\text{m}$ 处的分布变化是由于穿透深度的原因。当剥层表面到材料内部P区界面的距离小于穿透深度时,测试值会受到P区影响,造成测试获得的少子寿命值偏小,从而呈现随着深度下降的现象。而大于穿透深度时,因为未受到P区影响,所以认为是准确值。由此可见,图中1~3  $\mu\text{m}$ 段的少子寿命表征的是真实I区内材料的少子寿命值,其均值约6.6  $\mu\text{s}$ 。

对于HgCdTe红外探测器,少子寿命是决定探测器性能的重要参数,其由三种机制代表的三种少子寿命组成,分别为辐射寿命、俄歇寿命和SRH (Shockley-Read-Hall)寿命。

辐射机制是一个导带非平衡电子和一个价带非平衡空穴直接复合,产生的能量(大约等于禁带宽度)以声子的形式释放。其公式如下,

$$\tau_n = \tau_p = \frac{1}{B(n_0 + p_0 + \delta n)} \quad (1)$$

其中,

$$B = 5.8 \times 10^{-13} \varepsilon_\infty^{1/2} \left( \frac{m_0}{m_e^* + m_h^*} \right)^3 \left( 1 + \frac{m_0}{m_e^*} + \frac{m_0}{m_h^*} \right) \left( \frac{300}{T} \right)^{3/2} E_g^2 \quad ,$$

$m_e^*$ 、 $m_h^*$ 、 $m_0$ 分别为电子有效质量、空穴有效质量和静态电子质量, $E_g$ 为禁带宽度, $\varepsilon_\infty$ 为高频介电常数。

俄歇机制是一种带带间的直接复合机制,一般分为俄歇1和俄歇7两种,而俄歇1是n型半导体中的主要机制。其公式如下,

$$\tau_{A1} = \frac{2n_i^2}{(n_0 + p_0)n_0} \tau_{A1}^{(i)} \quad , \quad (2)$$

其中,

$$\tau_{A1}^{(i)} = \frac{3.8 \times 10^{-18} \varepsilon_\infty^2 (1 + \mu)^{1/2} (1 + 2\mu)}{(m_e^*/m_0) |F_1 F_2|^2} \frac{E_g^{3/2}}{k_B T} \times \exp \left( \frac{1 + 2\mu}{1 + \mu} \frac{E_g}{k_B T} \right) \quad .$$

SRH机制是非平衡载流子通过禁带中的复合中心能级复合的过程。SRH过程分两步进行:第一步是少子被复合中心俘获,第二步是俘获的少子和多子再结合,产生的能量以光子或声子的形式释放。SRH机制中的复合中心(简称为SRH复合中心)一般是由晶体的不完整性形成。所以,我们一般认为SRH寿命的大小能用来表征材料的质量。其公式如下,

$$\tau_{SR} = \frac{(n_0 + n_1)\tau_{p0} + (p_0 + p_1)\tau_{n0}}{p_0 + n_0} \quad , \quad (3)$$

其中,

$$\tau_{p0} = \frac{1}{V_p \sigma_p N_r}, \tau_{n0} = \frac{1}{V_n \sigma_n N_r} \quad .$$

这三种机制组成材料的总少子寿命,而且从公式可见,其随着材料的温度而变化。所以我们可以采用变温少子寿命的方式,测量不同温度下材料少子寿命的分布变化,然后拟合获得相应的SHR寿命,表征雪崩I区的真实材料性能。

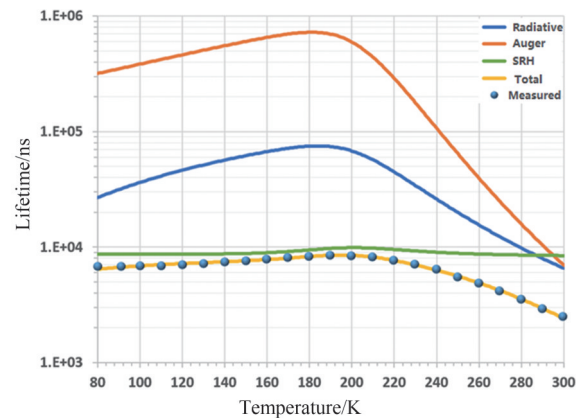


图3 实验材料剥层厚度1.68  $\mu\text{m}$ 处实验值和理论值曲线

Fig. 3 Experimental and theoretical curves of the minority lifetime at 1.68  $\mu\text{m}$

图3为实验材料剥层厚度为1.68  $\mu\text{m}$ 处的少子寿命测量值随温度变化和各个机制下理论计算曲线。从80~280 K之间的温度范围内,辐射寿命和俄歇寿命都远大于SRH寿命,因此,SRH寿命占主导地位。我们拟合获得APD器件工作温度80 K下SRH寿命大小为8 664 ns。同样地,对图3中深度1~3  $\mu\text{m}$ 内的所有测试数据点都进行变温少子寿命拟合,得到其80 K下都为SRH寿命占主导,且拟合



获得的 SRH 寿命的波动范围为 8 212~8 822 ns。由此,我们可以判断采用此材料下的 PIN 结构成结工艺形成的雪崩 I 区的 SRH 寿命平均值为 8 556 ns。

基于此 SRH 寿命值,代入 APD 器件的暗电流拟合模型,此模型在前期研究中已经被证实与实验实测暗电流数据吻合度良好<sup>[10-12]</sup>。经过模型拟合计算获得如图 4 的 PIN 结构 HgCdTe APD 器件的理论暗电流  $I_V$  曲线,工作温度为 80 K,光敏元大小为 20  $\mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$ ,其中 I 区的 SRH 寿命值即为 8 556 ns。由前期研究表明,APD 器件的暗电流在小偏压下主要由 SRH 复合机制主导。图中可以看到,小偏压 0~3 V 下此材料能获得的理论暗电流大小约为  $1 \times 10^{-14}$  A。

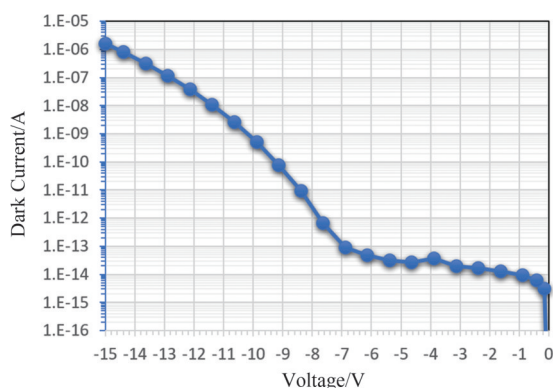


图 4 基于 8556 ns 的 I 区的 APD 暗电流拟合结果

Fig. 4 Theoretical results of APD dark current as region I based on the SRH lifetime of 8 556 ns

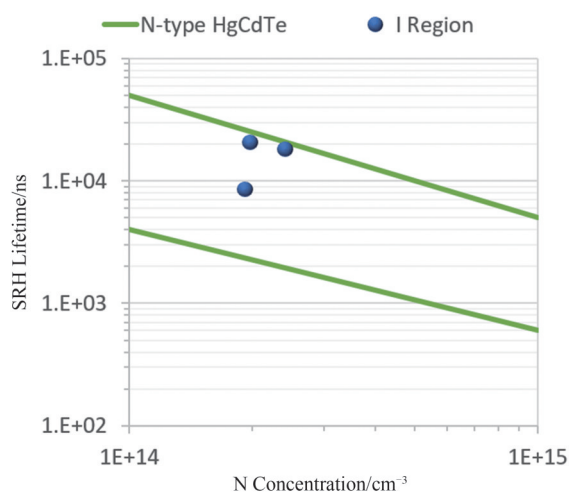


图 5 多个 HgCdTe 材料的雪崩 I 区的 SRH 寿命测试结果

Fig. 5 SRH lifetime results for Avalanche region I of several HgCdTe materials

进一步地,基于上述相同的研究方法,评估了多个材料的雪崩 I 区的 SRH 寿命,如图 5 所示。图

中可以看到,其范围值约在 8~20  $\mu\text{s}$  之间,这个范围值依然在我们原生 N 型 HgCdTe 材料的 SRH 寿命相当水平。相应的拟合小偏压下的理论暗电流最佳值为  $3.5 \times 10^{-15}$  A,换算暗电流密度为  $8.7 \times 10^{-10}$  A/ $\text{cm}^2$ ,满足高质量中波碲镉汞雪崩器件的研制要求。当然,最终决定实际 APD 器件的暗电流的因素中材料质量是最基础的,其他如 PIN 结的结构参数、器件工艺(包括钝化,接触等)都是十分重要的。

### 3 结论

通过对 PIN 结构雪崩 I 区的材料少子寿命进行表征,评估获得了关键雪崩区域的真实材料的晶体质量。研究发现,现有优化工艺下雪崩区域的晶体质量良好,拟合材料的 SRH 寿命最好能达到约 20.7  $\mu\text{s}$ ,能达到原材料 SRH 寿命的相当水平,理论最优的暗电流密度达到  $8.7 \times 10^{-10}$  A/ $\text{cm}^2$ ,满足高质量中波碲镉汞雪崩器件的研制要求,为后续新型焦平面器件的研发提供基础。

### References

- [1] Rogalski A. Recent progress in infrared detector technologies [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2011, **54** (3): 136-154.
- [2] Gopal V, Qiu W C, Hu W D. Modelling of illuminated current - voltage characteristics to evaluate leakage currents in long wavelength infrared mercury cadmium telluride photovoltaic detectors [J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, **116**: 184503.
- [3] HU Wei-Da, YE Zhen-Hua, LIAO Lei, et al. 128×128 long-wavelength / mid-wavelength two-color HgCdTe infrared focal plane array detector with ultralow spectral cross talk [J]. *Optics Letters*, 2014, **39**: 5130-5133.
- [4] HU W D, CHEN X S, YE Z H, et al. A hybrid surface passivation on HgCdTe long wave infrared detector with in-situ CdTe deposition and high-density Hydrogen plasma modification [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, **99**: 091101.
- [5] Baker I, Duncan S, Copley J. A low noise, laser-gated imaging system for long range target identification [J], *Proc. SPIE*, 2004, **5406**: 113-144.
- [6] Reine M B, Marciniec J W, Wong K K, et al. HgCdTe MWIR back-illuminated electron-initiated avalanche photodiode arrays [J]. *J. Electron. Mater.*, 2007, **36** (8): 1059-1067.
- [7] Finger G, Baker I, Downing, et al. Development of HgCdTe large format MBE arrays and noise-free high speed MOVPE EAPD arrays for ground based NIR astronomy [J]. *Proc. SPIE*, 2014, **10563**: 1056311.
- [8] GUO Hui-Jun, CHENG Yu-Shun, CHEN Lu, et al. The performance of Mid-wave Infrared HgCdTe e-avalanche Photodiodes at SITP [J]. *Proc. of SPIE*, 2019, Vol. 11170: 111702M.
- [9] LI Xiong-Jun, HAN Fu-Zhang, LI Li-Hua, et al. Gain

- characteristics of MW HgCdTe avalanche photodiodes [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (李雄军, 韩福忠, 李立华, 等. 中波碲镉汞雪崩光电二极管(APD)的增益特性[J]. *红外与毫米波学报*), 2019, **38**(2): 175–181.
- [10] SHEN Chuan, YANG Liao, LIU Yang-Rong, *et al.* Numerical simulation of high-operating-temperature MWIR HgCdTe APD detector [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (沈川, 杨辽, 刘仰融, 等. 中波PIN结构碲镉汞雪崩器件变温特性的数值模拟研究[J]. *红外与毫米波学报*), 2021, **40**(5): 576–581.
- [11] LI Q, HE J L, HU W D, *et al.* Influencing sources for dark current transport and avalanche mechanisms in planar and mesa HgCdTe p-i-n electron-avalanche photodiodes [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2018, **65**: 572–576.
- [12] YANG Liao, GUO Hui-Jun, SHEN Chuan, *et al.* Modeling and characteristics of MWIR HgCdTe APD at different post-annealing processes [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2022, **127**: 104413.