文章编号:1001-5078(2019)10-1159-06

·综述与评论·

# HgCdTe 雪崩光电二极管的研究进展

宋淑芳,王小菊,田 震 (华北光电技术研究所,北京100015)

摘 要:碲镉汞红外雪崩光电二极管(APD)阵列作为最近十多年来发展起来的新型探测器, 以其高增益、高灵敏度和高速探测的优点,成为未来微弱信号探测、二维/三维成像、主/被动探 测应用的重要器件。本文重点阐述了雪崩光电二极管的基本原理、以及 HgCdTe 雪崩光电二 极管材料和器件的研究,结合应用方向对其研究进展进行了综述性介绍。 关键词:HgCdTe;雪崩二极管;二维/三维成像

中图分类号:TN214 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2019.10.002

# The theory and research advancement of HgCdTe avalanche photodiode arrays

SONG Shu-fang, WANG Xiao-ju, TIAN Zhen

(North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

Abstract: HgCdTe avalanche photodiode (APD) array, as a new type of detector developed in the last decade, has become an important device for weak signal detection, 2D/3D imaging and active/passive detection in the future, due to its advantages of high gain, high sensitivity and high speed detection. This paper focuses on the basic principle of avalanche photodiode, and the research of HgCdTe avalanche photodiode materials and devices. In addition, the research progress in this field is reviewed.

Keywords: HgCdTe; avalanche photodiode arrays; 2D/3D imaging

## 1 引 言

红外光电探测器是红外探测系统的核心组成部 分,以大规模、小型化、多色、高速探测以及三维成像 等为主要特点的第三代碲镉汞(HgCdTe)红外焦平 面探测器已成为红外光电探测技术的主要发展方 向。其中HgCdTe 红外雪崩光电二极管(APD)阵列 作为最近十多年来发展起来的新型探测器,以其高 增益、高灵敏度和高速探测的优点,成为未来微弱信 号探测、三维主/被动探测应用的重要器件<sup>[1]</sup>。

在可见光波段,硅 APD 的技术已经非常成熟, 基本上取代了传统的光电培增管(PMT),但是硅材 料在红外波段探测效率低。红外短波波段,InGaAs/ InP 雪崩二极管具有优势,其光谱相应在 1100 ~ 1700 nm,吸收层材料为 InGaAs,倍增层材料为 InP。 在红外波段,HgCdTe 雪崩光子探测器(APD)成为 很有潜力的雪崩光子探测器。Hg<sub>1-x</sub> Cd<sub>x</sub> Te 是由 HgTe 和 CdTe 混合的三元化合物,其晶格常数随组 分变化小,与 CdZnTe 衬底可以实现完美晶格匹配。 Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te 是直接带隙半导体材料,红外光的吸收 系数及量子效率比较高;通过改变材料组分,可以使 器件光谱发生变化,响应波段完全囊括了整个红外 光谱范围。另外,与其他红外光电半导体材料相比,

**作者简介:**宋淑芳(1971 - ),女,博士,高级工程师,主要从事Ⅲ - V族半导体光电材料器件的设计,制备和测试工作。 E-mail:sfsong@center.njtu.edu.cn

收稿日期:2019-01-23;修订日期:2019-02-12

HgCdTe 材料的空穴与电子离化率差别很大,工作温 度范围宽,因此增益带宽积比较宽和信噪比比较高, 这些优点使得 HgCdTe APD 在红外雪崩光子探测领 域具有广阔的应用前景<sup>[2]</sup>。

# 2 雪崩光电探测器的基本原理<sup>[1]</sup>

雪崩光电二极管(APD)是一种具有较高频率 响应特性和较高内增益的器件。器件工作在高的反 偏压下,当吸收层吸收入射光产生光生载流子,器件 内部光生载流子在强电场的作用下与晶格碰撞离化 会产生雪崩效应,单个载流子产生的光电流被放大 至宏观上可以被探测的程度,从而实现单光电子探 测,如图1所示为 APD 的工作原理图。APD 的基本 结构是工作于反向偏压下的 pn 结,在理想条件下, 吸收层吸收每个入射光子,激发产生一个电子-空 穴对,电子-空穴对在电场作用下分别向不同方向 漂移形成光电流。随着反向偏置电压趋于反向击穿 电压,在 pn 结的耗尽区形成了强电场,在强电场的 作用下,获得很高的能量光生载流子,与晶格发生碰 撞,将晶格中的原子发生电离产生新的电子 - 空穴 对,新的电子-空穴对在强电场作用下获得很高的 能量形成新的碰撞电离过程,如此重复下去形成显 著的雪崩效应,在此过程中 APD 的载流子数目增加 迅速,入射的光信号不断被放大成电信号,最终向读 出电路输出较强的电信号。



图 1 雪崩光电二极管的工作原理 Fig. 1 The operation principle of APD

雪崩光电二极管分为两种工作模式:线性工作 模式、盖革工作模式。这两种模式工作在不同的工 作电压下,因此内增益存在明显的差别。线性工作 模式,一般低于雪崩电压,内增益通常低于1×10<sup>3</sup> 量级,无法用于单光子的探测。在线性工作模式下 APD 探测器,材料的电子离化率和空穴离化率存在 很大的不同,入射光子数与输出电流成线性关系,可 以实现光子探测。盖革工作模式 APD 的工作偏压 比较高,要高于雪崩电压,反向强电场加速光生载流 子触发雪崩效应,因此在盖革工作模式 APD 增益相 当高的,通常达到 1 × 10<sup>5</sup>,因此用于单光子探测。 其工作特点在于,在无自由载流子时,什么现象也不 会发生;而一旦器件中出现一个自由电子,就将很快 导致雪崩的发生,雪崩发生后,一直持续下去,直到 器件永久损坏,因此需要使用淬灭电路阻止雪崩继 续,并复位偏置电压,使 APD 回到初始态,才能进行 下一次探测。

在研究初期,研究人员致力于实现红外 APD 盖 革模式下工作,并将其应用到激光雷达(LADAR)成 像系统中,但是在应用过程中发现,探测器在盖革模 式下工作,存在无法直接判断光信号的强度、一次雪 崩发生后探测器需要一段时间来复位该时间内没有 探测能力、虚警率高等问题,无法满足 LADAR 系统 灵敏度高、速度快、时间精确性高的要求,而线性模 式下的 APD,具有可以获得多个目标的距离信息、 降低虚警率、探测碎片后的目标、记录信号强度、不 需要复位电路等优点,有利于应用在 LADAR 系统 中,因而线性模式下的 HgCdTe APD 逐步成为了研 究的热点。

#### 3 国内外的研究进展

1993年, Leveque 等人<sup>[3]</sup>发表了关于 HgCdTe 材料中电子和空穴离化系数的理论性文章,如图2 所示, 文中指出, 当 HgCdTe 的截止波长小于 1.9 μm时,空穴的离化系数远大于电子的离化系 数,适合空穴触发型 APD;而当 HgCdTe 的截止波 长大于1.9 μm 时,电子的离化系数远大于空穴的 离化系数,适合电子触发型 APD。由于 HgCdTe 材 料中,两种载流子可以具有差别很大的离化系数, 导致两种载流子的碰撞电离平均自由程具有大的 差异,容易实现单载流子器件,所以雪崩倍增厚度 可以在很宽的范围内变化,而 HgCdTe APD 始终保 持在线性工作模式,即 HgCdTe APD 具有很宽的线 性模式工作偏压范围;在高偏压下,载流子沿着一 个方向移动,噪声低,过剩噪声因子接近1,因此在 倍增过程中,噪声几乎不参与培增,这对于制备具 有高增益因子的 HgCdTe APD 红外成像焦平面探 测器是有益的。





从 20 世纪 80 年代开始,国外多家红外探测器 制造商相继进行 HgCdTe APD 的研究,他们的研究 成果逐步从概念性研究发展到实验室演示成像阶 段,逐步推广到实际应用阶段。主要研究机构包括 DRS、SELEX、Raytheon、CEA/LETI,这些研究机构将 其在 HgCdTe 红外焦平面探测器方面取得的研究经 验与成果,应用到 HgCdTe APD 的研发中,推动了 HgCdTe APD 的发展。

### 3.1 DRS 公司的研究进展<sup>[4-7]</sup>

美国 DRS 公司与英国 SELEX 公司采用的是高 密度垂直集成光电器件结构(HDVIP),HDVIP 器件 是由早期提出的红外焦平面环孔 pn 结器件发展而 成的,该器件不需要使用 In 柱互连技术来制备器 件。如图3所示为 HDVIP 的结构原理,液相外延 (LPE)生长 HgCdTe 材料,利用刻蚀方法将每个像 元刻蚀形成的通路通到衬底,衬底上生长的 p 型掺 杂(掺 Au)HgCdTe 薄膜为 p 型层, p 型材料的掺杂 浓度为8×10<sup>15</sup>~1.6×10<sup>16</sup>之间,Hg 空位或者 Hg 空 位和 Cu 提供空穴,部分材料同时掺杂浓度为 2~ 4×10<sup>14</sup> In 作为施主原子;通过刻蚀及离子注入使 p 型层改性形成 n 型层,在刻蚀过程中,占据间隙位置 的 Hg 原子填充空位,形成 n 层。n 型层环绕在通路 侧面,形成了 n 型层被 p 型层包围着的特殊结构。 pn结的尺寸是可调的,一般通过改变刻蚀的条件来 改变。该结构是横向电流传输,p区为吸收区,n区 为倍增区,载流子在反向强电场作用下从 p 区到 n 区发生雪崩效应。该器件结构的特点主要包括:采 用 CdTe 钝化技术,器件的 1/f 噪声显著降低;器件 不再使用 In 柱互连技术,器件的热稳定性好;二极

管的成结方向与材料生长方向相垂直,位错对器件 性能的影响减小;器件工作在侧入射下,其量子效率 及调制函数性能得到了极大地提高了。



图 3 HDVIP 器件的截面图和顶视图 Fig. 3 Cross section and top view of HDVIP diode

DRS 公司已成功研制了 HDVIP 中波红外焦平 面器件,规格是2×8,每个像元又包括2×2的子像 元,响应光谱为0.35~4.3 µm, -12.9 V 偏压下增 益达到1100,器件交付 NASA GSFC 进行测试,平均 单光子的信噪比超过12,过剩噪声因子为1.2~ 1.3,展示出良好的器件性能,为实用化奠定了基础。 3.2 Leonardo 公司(前 SELEX)的研究进展<sup>[8-11]</sup>

英国的 Leonardo 公司(前 SELEX)和美国的 DRS 公司一样,在研究初期选用了由环孔 pn 器件 发展而来的高密度垂直集成光电器件结构(HD-VIP)作为 HgCdTe APD 的器件结构,但是在研究过 程中发现环孔结构在高反偏压下,漏电流大,器件需 要保持在 40 K 的低温工作,因此 SELEX 于 2004 年 开始研究利用金属有机物气相外延(MOVPE)代替 液相外延(LPE)外延生长方式,在廉价的 GaAs 衬底 上生长 HgCdTe 外延层。MOVPE 和分子束外延 (MBE)类似,可以实现一次生长过程生长不同组分 和掺杂的多层 HgCdTe 材料,能够精确实现材料能 带结构的"裁剪"。采用优化的异质结结构,结构如 图 4 所示,即宽禁带的吸收层和窄禁带的增益区,实 现 APD 器件高量子效率、高增益、响应快、暗电流低 等性能。

2016 年, SELEX 并入 Leonardo, 对器件结构进行了进一步的优化,取消了宽禁带的缓冲层的生长,将响应光谱的短波方向从 1.3 μm 降低到 0.8 μm。截止波长为 2.5 μm, 在 60 K 时, -19 V 偏压下增益为 637, 并成功研制了 320 × 256 短波红外焦平面 APD。

3.3 Raython 公司的研究进展<sup>[12-15]</sup>

Raytheon 公司是最先开始研究 HgCdTe APD 的 公司之一,他们的研究集中在响应波长为 1.4 ~ 1.8 μm,是对人眼安全的波段,该波段的 HgCdTe APD 是 3D 激光主动成像系统中的核心部件。在器件结构设计方面,采用了吸收和倍增分离的 APD 器件结构(SAM-APD),详细的结构如图 5 所示,利用分子束外延(MBE)在 Si 或者 CZT 衬底上生长五层HgCdTe 材料。在结构设计中,使倍增层厚度尽量小,倍增处电场比较均匀,避免不可控制的雪崩击穿;而吸收层厚度尽量大,使入射的光子大部分被吸收,以提高器件的量子效率;在穿通状态下,吸收层和倍增层分开以降低器件的击穿电压。而且异质结的结构设计,可以提高少子的注入效率,提高载流子的迁移率等,同时可以降低 HgCdTe APD 的暗电流。因此异质结 SAM 结构比较适合 HgCdTe APD 的器件要求。



图 4 MOVPE 生长器件结构示意图

Fig. 4 Diode structure of metal organic vapour phase epitaxy(MOVPE)



图 5 SAM-APD 结构示意图 Fig. 5 Diode structure of SAM-APD

Raytheon 公司成功研制了 HgCdTe APD,工作温 度为 300 K,增益为 100 时,过剩噪声因子接近于 1, 暗电流 < 10 nA, NEP 大约为 0.5 nW, 吉赫兹带宽, 展示出良好的器件性能。目前, Raytheon 公司依托 低缺陷密度的 HgCdTe 材料、低噪声高增益的 APD 和高质量的 ROIC 等技术优势,成功制备了四种不 同用途的 HgCdTe APD 探测器:高灵敏度 100 ~ 300 μm大面阵单元 HgCdTe APD,4 × 256 扫描型 LADAR 传感器, 256 × 256 快速接收器以及线性模 式光子计数器。如图 6 所示。



图 6 Raytheon 公司的 LADAR 产品 Fig. 6 LADAR products at Raytheon

3.4 CEA/LETI的研究进展<sup>[16-19]</sup>

与其他公司相比较,CEA/LETI 公司对 HgCdTe APD 研究起步较晚,但是依托原有成熟的 HgCdTe 红外焦平面技术和经验,CEA/LETI 公司的 HgCdTe APD 研究进展较大,在短短几年内,已经相继开展 了超高灵敏高动态范围被动凝视阵列、主动 2D/3D 成像、双模被动-主动成像系统。他们选用典型的 PIN 结构,器件结构如图 7 所示。利用 LPE 或者 MBE 方法在衬底上外延 HgCdTe 薄膜,p 型层的 Hg 空位浓度为 $N_a = 1 \times 10^{15} \sim 1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ , n<sup>+</sup>区域通 过离子刻蚀形成,浓度为 $N_d = 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , n<sup>+</sup>区和 p区的Hg空位发生中和,在p区和 n<sup>+</sup>区之间形成 了  $n^{-}$  区,浓度为  $N_{d} = 1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ ,通过改变  $n^{+}$  区 的厚度来相应的改变 n<sup>-</sup>区的厚度,从而达到改变器 件性能的目标。p 区为吸收层,吸收入射光子后,电 子经过 n<sup>-</sup> 区加速倍增后,到达 n<sup>+</sup> 区,通过电极 In 柱由读出电路读出信号。





CEA/LETI 公司已经成功研制了 320 × 256 中 心距为 30 μm 的 2D/3D 主动成像,距离分辨率低于 15 cm(1 ns)。在 80 K 时,器件的截止波长分别为 2.9 μm 到 5.3 μm,反偏电压在 – 20 V 时,增益达到 600 以上,过剩噪声因子为 1.1~1.3,显示出良好的器件性能。

3.5 中国科学院上海技术物理研究所的研究 进展<sup>[20-21]</sup>

中国科学院上海技术物理研究所是国内首家进行 HgCdTe APD 研究的单位,首先对平面结和台面结 HgCdTe APD 进行了理论研究,并且对暗电流的主要产生机制进行了分析。利用 MBE 生长技术制备了 PIN 结构 HgCdTe APD 器件,77 K时,截止波长为 4.76 µm,反偏电压为 - 10 V时,增益达到了 335。

#### 4 HgCdTe APD 的应用

经过十多年的技术研究与开发,HgCdTe APD 逐步从实验演示走向了实际应用。DRS 公司和美 国航空航天局(NASA)合作,为宇宙飞行中心提供 两种类型 HgCdTe APD, 一种规格为4×4 HgCdTe APD 阵列用于追踪气体测试,另一种规格为2×8 线性模式光子计数 HgCdTe APD 阵列用于大气背散 射测试。HgCdTe APD 波长范围在 0.9~4.3 μm, APD 增益大于 500, 量子效率超过 90 %, 器件噪声 极其低,成为了新型用于星球科学研究的探测器。 Raytheon 公司提供的四种不同规格的 LADAR 接收 器,其中单元器件可用于远距离 3D 成像,是第一代 APD 器件;高速4×256 扫描型 LADAR 传感器是为 美国 NAVAIR 研发,是第二代 APD 器件,用于多模 传感器寻得器(MMSS),海军舰艇的监视与观察,以 及目标识别的 3D 成像;256 × 256 凝视型 LADAR 接 收器是为 NASA Langley 研发,实现自主精确着陆和 危险物避让技术(ALHAT),主要用于月球着陆和航 行的3D成像;而最新研发的超灵敏的光子计数器, 可用于深太空天文研究。



图 8 HgCdTe APD 的应用和核心的传感器技术 Fig. 8 Core sensor technology(HgCdTe APDs and hybrids) and applications

### 5 结 论

综上所述,国外机构在 HgCdTe 雪崩光电二极 管研究方面已经做了大量的工作,但是国内的研究 仍然处于起步阶段,需要突破的关键技术主要包括: 低缺陷碲镉汞材料的生长技术,由于 HgCdTe APD 工作偏压比较高,材料内部的位错会引起器件在高 偏压下性能变差,因此要求碲镉汞外延材料具有低 的位错密度;pn 结成结技术,离子注入和退火技术 是制备平面结 HgCdTe APD 的关键技术之一,离子 注入后,通过退火控制各个区域的位置以及掺杂浓 度,形成理想的 PIN 结构;暗电流抑制技术,暗电流 和材料的截止波长、工作温度以及表面漏电流等因 素有直接的关系,需要分析暗电流的主要因素,设计 出符合应用要就的器件;高偏压低噪声读出电路设 计,HgCdTe APD 要求读出电路满足高注入和高偏 压的工作特点,对读出电路设计是一个重大的挑战; 器件评价和测量技术,HgCdTe APD 的增益因子、过 剩噪声系数、工作带宽的测量与普通焦平面探测器 件完全不同,需要重新搭建新的测量平台和采取新 的测量技术手段。

本文综述了 HgCdTe 雪崩光电二极管的基本工 作原理、以及材料和器件的研究,并且简单介绍了其 应用方向和研究进展。从上面的讨论可知,HgCdTe 雪崩光电二极管无论在民用还是军用方面都有着广 阔的应用前景。但是我国 HgCdTe 雪崩光电二极管 的研究相对于国外来说,仍然存在着巨大的差距,因 此对该方向的研究迫在眉睫。

# 参考文献:

- [1] Junhao Chu, Arden Sher. Device physics of narrow gap semiconductors [M]. Springer, 2000:456 - 479.
- [2] Chen X S, He L, Li Q, et al. Research progress of mid-infrared avalanche photodiode detectors[J]. Infrared Technology, 2018, 40(9):825-836. (in Chinese)
  陈双效,何家乐,李庆,等.中红外波段雪崩光子探测 器研究进展[J]. 红外技术, 2018, 40(9):825-836.
- [3] G Leveque. Ionization energies in Hg<sub>1-x</sub> Cd<sub>x</sub> teavalanche photodiodes[J]. Semicond. Sci. Technol., 1993,8:1371.
- [4] Beck J D, Wan C F, Kinch M A, et al. MWIR HgCdTe avalanche photodiodes [ J ]. Proceedings of SPIE, 2001, 4454:188-197.
- [5] Beck J D, Wan C F, Kinch M A, et al. The HgCdTe elec-

- [6] Beck J D, Woodall M, Scritchfield R, et al. Gated IR imaging with 128 × 128 HgCdTe electron avalanche photodiode FPA[J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6542;654217.
- Beck J D, Scritchfield R, Mitra P, et al. Linear-mode photo counting with the noiseless gain HgCdTe e-APD[J].
   Proceedings of SPIE, 2011, 8033:80330N.
- [8] Ashcroft A, Baker I, Developments in HgCdTe avalanche photodiode technology and application [J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7660:76603C.
- [9] Finger G, Baker I, Alvarez D, et al. SAPHIRA detector for infrared wavefront sensing [J]. Proceedings of SPIE, 2014,9148:914817.
- [10] Baker I, Maxey C, Hipwood L, et al. Leonardo infrared sensors for astronomy- present and future[J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9915:991505.
- [11] Atkinson D, Hall D, Goebel S, et al. Observatory deloyment and charaterization of saphira HgCdTe apd arrays
   [J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10709:107091H.
- [12] Halmos M J, Jack M D, Asbrock J F, et al. 3D flash ladar at Raytheon [J]. Proceedings of SPIE, 2001, 4377: 84-97.
- [13] Jack MD, Asbrock J F, Bailey S, et al. MBE based HgCdTe APDs and 3D LADAR sensors [J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6542:65421A.
- [14] Bailey S, McKeag W, Wang J X, et al. Advance in

HgCdTe APDs and LADAR receivers [J]. Proceedings of SPIE,2010,7660;76603I.

- [15] Jack M D, Chapman G, Edwards J, et al. Advances in LA-DAR components and subsystems at Raytheon [J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8353:83532F.
- [16] Rothman J, Perrais G, Destefanis G, et al. High performance characteristics in pin MW HgCdTe e-APDs[J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6542;654219.
- [17] Rothman J, Borniol E D, Gravrand O, et al. HgCdTe APD focal plane array development at DEFIR[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7834:783400.
- [18] Rothman J, Borniol E D, Gravrand O, et al. MCT APD focal plane arrays for astronomy at CEA-LETI[J]. Proceedings of SPIE,2016,9915:99150B.
- [19] Rothman J, Borniol E D, Abergel J, et al. HgCdTe APDs for low-photo number IR detection [J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10111:1011119.
- [20] GU Renjie. The research on e-type molecular beam epitaxy growth of HgCdTe for avalanche photon diode[D]. Beijing: Chinese Academy of Science, 2012. (in Chinese) 顾人杰. 碲镉汞电子雪崩探测器分子束外延材料基础 研究[D]. 北京:中国科学院, 2012.
- [21] LI Haibin. The fabrication research on e-typeHgCdTe avalanche photon diode [D]. Beijing: Chinese Academy of Science, 2011. (in Chinese)
  李海滨. 碲镉汞电子雪崩光电探测器制备技术研究 [D]. 北京:中国科学院, 2011.

2004,5564:44-53.