

文章编号: 1672-8785(2021)02-0015-06

碲镉汞材料中 Hg 空位、Au、As 掺杂的研究进展

郝 斐 曹鹏飞 杨海燕 吴 卿

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘 要: 碲镉汞材料是制造红外探测器的基础, 高性能红外探测器对碲镉汞材料的要求越来越高。为了提升器件性能, 必须提高碲镉汞材料的电学性能。而掺杂是一个很好的选择。碲镉汞材料掺杂可以分为 n 型和 p 型两种。对于 n 型掺杂来说, In 是一种理想的掺杂剂, 其掺杂研究目前已比较成熟。相对而言, p 型掺杂研究还不是那么深入。Hg 空位、Au、As 掺杂均为碲镉汞材料中常见的 p 型掺杂手段。通过分析和总结近些年的部分相关文献, 介绍了碲镉汞材料中 Hg 空位、Au、As 掺杂的研究进展。

关键词: 碲镉汞; Hg 空位掺杂; Au 掺杂; As 掺杂

中图分类号: TN305 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2021.02.003

Research Development of Hg Vacancy, Au and As Doping in HgCdTe Materials

HAO Fei, CAO Peng-fei, YANG Hai-yan, WU Qing

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

Abstract: Mercury cadmium telluride materials are the basis for the manufacture of infrared detectors. High-performance detectors have increasingly higher requirements for mercury cadmium telluride materials. In order to improve the performance of the device, the electrical performance of the mercury cadmium telluride materials must be improved. Doping is a good choice. The doping of mercury cadmium telluride materials is divided into n-type and p-type doping. For n-type doping, In is an ideal dopant, and the current research on In doping is relatively mature. In comparison, the research on p-type doping is not so in-depth. Hg vacancy, Au and As doping are common p-type doping methods in mercury cadmium telluride materials. By analyzing and summarizing some relevant documents in recent years, the research progress of Hg vacancy, Au and As doping in HgCdTe materials is introduced.

Key words: HgCdTe; Hg vacancy doping; Au doping; As doping

收稿日期: 2020-09-21

作者简介: 郝斐(1994-), 男, 山西忻州人, 助理工程师, 主要从事液相外延碲镉汞薄膜材料研究。

E-mail: haofei20008@163.com

0 引言

19 世纪早期,英国天文学家赫歇尔用棱镜折射太阳光,并通过温度计记录各色光的加热效果,由此发现了红外热辐射^[1]。该方法的具体原理是,当分子旋转或振动运动发生改变时,就会发射或吸收红外辐射,即任何具有 0 K 以上温度的物体都会向外发射红外辐射。这些辐射都会被大气吸收。从大气的透射光谱中可以发现,在 1~3 μm 、3~5 μm 、8~14 μm 这三个波段内,大气对红外热辐射的透过率较高。因此,大多数红外探测器都利用这三个大气窗口来接收红外辐射^[2]。

碲镉汞($\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, MCT)是一种由碲化汞(HgTe)和碲化镉(CdTe)混合而成的化合物,其生长方法主要有体材料生长(Bulk Crystal Growth, BCG)、液相外延(Liquid Phase Epitaxy, LPE)、分子束外延(Molecular Beam Epitaxy, MBE)和气相外延(Vapour Phase Epitaxy, VPE)等^[3]。 CdTe 是一种在 77 K 下带隙约为 1.5 eV 的正禁带半导体; HgTe 是一种半金属,其带隙能量为负值。通过混合这两种物质可以获得从 HgTe 的负带隙到 1.5 eV 正带隙之间的任何带隙^[4]。通过调整 Cd 组分 x , MCT 材料的响应波段可以跨越短波红外到甚长波红外区域。因此该材料被广泛应用于红外探测器。

目前,用 MCT 材料制备的红外焦平面探测器已经发展到了第三代。为了满足其高性能要求,需用到组分异质结材料。 $n\text{-on-p}$ 和 $p\text{-on-n}$ 异质结是 MCT 材料最常用的两种技术。为了成结,需对 MCT 材料进行掺杂处理,包括本征掺杂和非本征掺杂。其中,本征掺杂是在 MCT 中掺入 Hg、Cd、Te 元素,主要为 Hg 空位掺杂;而非本征掺杂则是掺入这三种元素以外的元素,主要为 Au、As 掺杂。本文根据近些年的部分文献来介绍这三种掺杂研究。

1 Hg 空位掺杂

在 MCT 材料的生长过程中, Hg 原子比较活泼,容易从原有位置跑出,从而产生 Hg 空位。这是不可避免的,同时 Hg 空位也是该材料的主要缺陷之一^[5-6]。这种缺陷掺杂形式即为本征掺杂。Hg 空位在材料中表现出两种作用形态:它既可以形成 p 型材料,也可以在 n 型材料中起到补偿作用^[7]。作为一种简单且普遍的掺杂技术, Hg 空位掺杂得到了广泛使用和研究。

Ciani A J 等人^[8]设计了一种含有 64 个原子的超电池模型,并通过密度泛函理论和平面波基组模拟了 MCT 材料中的 Hg 空位。他们发现,随着 Hg 空位浓度的增加, Hg 空位可以具有中性、(1-)态和(2-)态这三种状态;而且在不同温度下, Hg 空位具有不同状态。

Jozwikowski K 等人^[9]通过构建一个具有理想二极管扩散、产生复合、带间隧穿、陷阱辅助隧穿和碰撞电离等潜在限制机制的光电二极管模型,求解了载流子的非线性连续性方程组和泊松方程。研究发现,不含 Hg 空位的 p 型材料具有更长的少数寿命,且 Hg 空位掺杂仍集中在扩散限制模型的趋势线上,如图 1 所示。

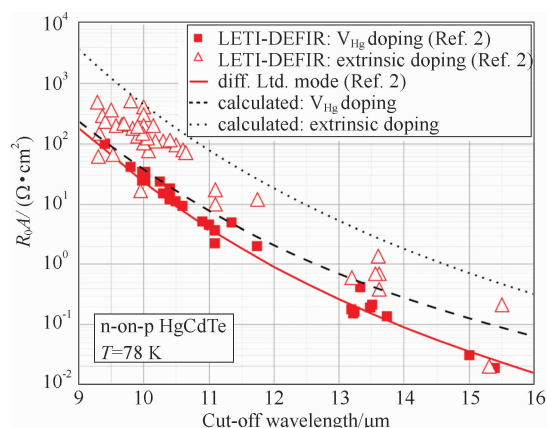


图 1 77 K 下 $n\text{-on-p}$ 长波 MCT 光电二极管的 R_0A 模拟^[9]

孙立忠等人^[10]采用基于第一性原理的全电子势线性缀加平面波方法分析了 Hg 空位在 MCT 材料中引起的弛豫现象以及对周围原子成键机制的影响。研究表明, Hg 空位会造成

价带底的 Te 原子能级发生改变, 从而导致 MCT 材料的等效带隙变小、响应波长变长。

由于 Hg 空位掺杂 p 型材料的少子寿命较短, 其器件的暗电流比外部掺杂时更高^[9]。此外, 对于极低浓度掺杂(低于 10^{15} cm^{-3})来说, 空穴寿命受 Shockley-Read 限制, 不依赖于掺杂浓度^[11]。

2 Au 掺杂

在元素周期表中, Au 属于 IB 族元素, 与其相邻的 IIB 族元素为 Hg 和 Cd, 如图 2 所示。Au 主要代替 Hg, 起到一个受主作用^[12]。近些年来, Au 掺杂 p 型材料得到了普遍应用。常见的掺杂方法有 LPE 法和 MBE 法, 同时也有少量关于 VPE 掺杂的报道。

Sivananthan S 等人^[13]报道称, 在中波 MCT 材料中, Au 掺杂层的载流子寿命通常是空位掺杂层的 2~3 倍。Chu M 等人^[14]通过在 LPE 过程中掺入 Au 来形成 p 型材料, 并利用变温霍尔测试(见图 3)等手段将其与未掺 Au 的 Hg 空位掺杂 p 型材料进行了对比。结果表明, Hg 空位掺杂的 MCT 外延层中存在空位复合物, 而 Au 掺杂的外延层中则没有空位复合物。因此, 很有可能是空位复合物的存在造成了 Au 和 Hg 空位掺杂材料的载流子寿命差异。

I 族		III 族		V 族		VII 族	
H		B		N		F	
Li		Al		P		Cl	
Rb		In		As		Br	
Cu		施主		受主		Te	I
Ag	Cd					VI 族	施主
Au	Hg						
受主 II 族							

图 2 Hg、Cd、Te 在元素周期表中的位置^[11]

胡尚正等人^[15]在富 Te 条件下采用水平 LPE 技术实现了 Au 原位掺杂。通过双晶衍射半峰宽测试发现, Au 的引入并未对 MCT 晶体的质量产生影响。结合二次质谱仪的分析结果可知, 250 °C、20 h 的退火条件更有利于材料中 Au 原子的分布。Au 掺杂器件也表现出了优异性能, 其 R_0A 值最高可达 $215 \Omega \cdot \text{cm}^2$, 是常规材料的 5 倍; 有效像元率为 99.2%, 响应非均匀性为 2.85%。

Selamet Y 等人^[16-17]采用 MBE 方法制备了 Au 掺杂的 MCT 材料。具体的制备过程是, 先对 MCT 样品进行清洗腐蚀, 然后将样品放到高真空环境下的腔室内, 再以每秒小于 1 \AA 的沉积速度用电子束工艺把超高纯 Au 沉积到样品上, 最后在不同条件下对获得的掺杂 Au

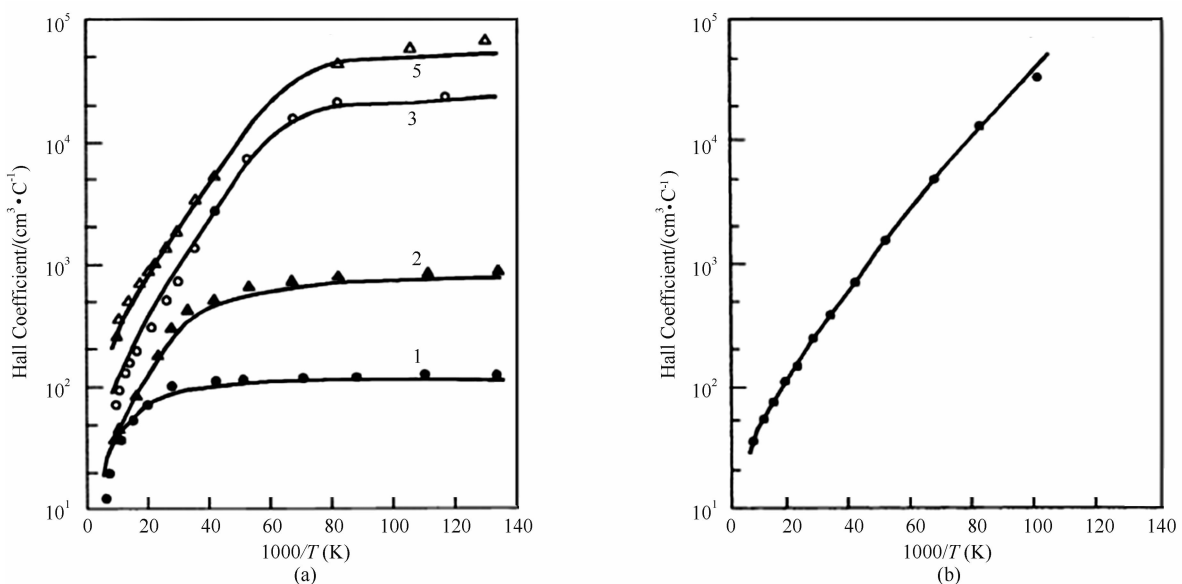


图 3 (a) LPE p 型空位掺杂 HgCdTe 的霍尔系数; (b) LPE Au 掺杂 HgCdTe 的霍尔系数^[14]

样品进行退火处理。霍尔测试和少子寿命测试结果表明,用该方法获得的材料表层实现了 p 型掺杂。他们还在 MCT 材料的生长过程中进行了原位 Au 掺杂实验。霍尔测试结果表明,用该方法获得的材料导电类型不稳定。

王仍等人^[18]采用 VPE 法生长了 Au 掺杂的 MCT 材料,并通过退火工艺获得了 Au 掺杂的 p 型 MCT 材料。具体条件如下:生长温度为 500 °C,生长时间为 5 h;退火温度为 220 °C,退火时间为 23~25 h,汞分压为 0.1 atm。通过变温霍尔测试可得,77 K 下典型 Au 掺杂材料的霍尔浓度为 $5.6 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$,属于受主掺杂行为。二次离子质谱测试结果表明,Au 原子浓度从表层到衬底呈现纵向梯度分布,如图 4 所示。这是该生长方式不可避免的现象。

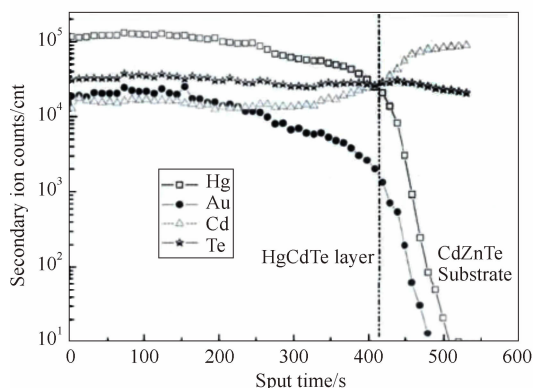


图 4 用 VPE 法制备的 HgCdTe 薄膜的二次离子质谱图^[17]

孙雪丽等人^[19]基于第一性原理计算,系统地研究了 Au 的引入对 MCT 材料结构和电子性质的影响。结果表明,Au 与主原子保持较强的键合。研究还发现,随着 Cd 含量的增加,Te 原子向内弛豫,Au-Te 键呈现出减弱的趋势。算得的能带结构表明,原位 Au 作为受主,产生了三个杂质能级。 $\text{Hg}_{0.75}\text{Cd}_{0.25}\text{Te}$ 和 $\text{Hg}_{0.5}\text{Cd}_{0.5}\text{Te}$ 比 $\text{Hg}_{0.25}\text{Cd}_{0.75}\text{Te}$ 更适合 p 型掺杂。

3 As 掺杂

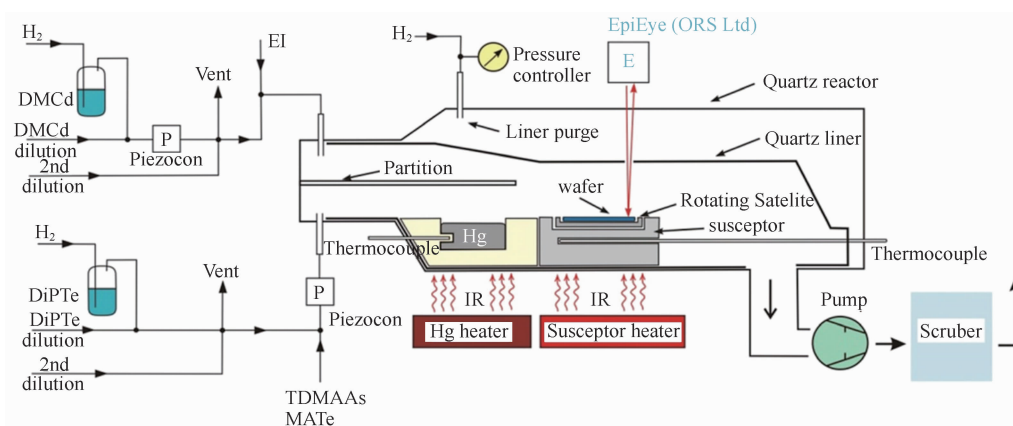
As 在 MCT 材料中具有低扩散系数,且在 MCT 晶体中性质稳定、活化能低、少子寿命较高、掺杂浓度范围较广($10^{15} \sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)^[20-21]。

因此,As 被广泛用于 MCT 材料的 p 型掺杂中。常见的掺杂手段有 LPE、MBE、金属有机化合物化学气相沉积(Metal-Organic Chemical Vapour Deposition, MOCVD)以及离子注入技术(Ion Implantation Technology, IIT)。

富 Hg 条件下的垂直 LPE 技术是一种用原位生长的方法来实现 As 掺杂的技术^[22]。宋淑芳等人利用垂直 LPE 方法生长了 As 掺杂 MCT 材料。霍尔测试表明,该材料呈 p 型,其载流子浓度在 $1 \times 10^{17} \sim 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 之间,迁移率在 $1 \times 10^2 \sim 1 \times 10^3 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ 之间。他们成功地用原位生长的方式实现了掺杂并完成了直接激活^[23]。Wang J 等人对用垂直 LPE 法所获 As 掺杂 MCT 材料制备的探测器的暗电流机理进行了研究^[24]。他们通过测量探测器在 59~92 K 下的 R-V 曲线,并结合同步模式下的非线性拟合,给出了该器件的暗电流特性:随着温度的升高,在最大动态电阻范围内,暗电流的主导因素由陷阱辅助隧穿电流和扩散电流转变为产生-复合效应。这种变化表明,暗电流可能主要由产生-复合电流引起。

MBE 法是一种用于制备高质量 MCT 红外焦平面阵列的可靠生长方法。通过适当校准可以在一次运行中很好地控制生长速率、成分和掺杂水平。Chen A C 等人利用 As 源 MBE 技术进行了原位掺杂实验^[25]。在 175 °C 下生长的掺杂材料的腐蚀坑密度低至 $7 \times 10^4 \text{ cm}^{-2}$,但是该温度下的 As 并不活跃,材料表现出 n 型导电。Edwall D 等人对 175 °C 下用 MBE 法生长的 As 掺杂 MCT 材料中的 As 激活进行了研究^[26]。他们在 Hg 气氛的开管式炉体内利用不同温度条件来激活 As 掺杂材料。研究表明,当掺杂量小于 10^{18} cm^{-3} 时,激活效率可高达 100%。激活效率随退火温度的升高、退火时间的延长和汞压的升高而增大,且在 400 °C 以上时达到最佳值。

MOCVD 法具有材料生长快、结晶度高、无需生长后退火的优点,是一种常用的 As 掺

图 5 AIX 200 MOCVD HgCdTe 材料生长系统^[27]

杂方法。Madejczyk P 等人使用 MOCVD 法成功制备了 As 掺杂的 MCT 材料^[27-28]。图 5 为该材料的生长系统示意图。将 HgCdTe 材料生长在 GaAs 衬底上, 同时将生长的 3~4 μm 厚的 CdTe 作为缓冲层, 并将三甲基氨基砷 (TDMAAs) 作为掺杂前驱体。经研究发现, MCT 薄膜的结晶质量与生长系统、衬底以及生长条件有关。霍尔测试表明, 掺杂浓度与 TDMAAs 浓度成正比, 但是这种关系受饱和效应限制; 掺杂效率与晶体取向密切相关, 对于同样的 TDMAAs 计量, (100)HgCdTe 中的空穴浓度比(111)HgCdTe 的高一个数量级。

MCT IIT 是红外器件制备中的一种非常成熟的方法。As 注入会对材料造成损伤, 并会引入缺陷, 如位错环和位错。这些缺陷会直接影响 MCT 材料的电学性能。人们通常使用透射电子显微镜 (Transmission Electron Microscope, TEM) 和电学测试手段来研究这些缺陷。Izhnin I I 等人通过霍尔效应/电导率测量和迁移率谱分析 (Mobility Spectrum Analysis, MSA) 研究了 As 离子注入 MCT 薄膜中所产生不同电子态的分布以及相应的缺陷^[29]。经研究发现, HgCdTe 晶格中存在两种缺陷, 其中每一种都与注入材料中的电子种类有关。特别是由 As 注入引起的损伤会导致注入厚度为 400 nm 的材料层中产生结构缺陷, 使其迁移率 (77 K) 低至 $5000 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ 。Bonchuk O Y 等人利用 TEM 观察并发现, 在 HgCdTe 材料

中直接注入 As 后, 形成了三种纳米尺寸的缺陷层, 包括空位和间隙型位错环、单个位错以及晶格变形。经退火处理后, 大多数缺陷消失, 但是不同组分 MCT 材料的缺陷消失程度不同^[30]。

4 总结

作为一种本征缺陷, Hg 空位容易变成 Shockley-Read 复合中心, 使器件的少数寿命减少。后续还需深入研究 Hg 空位浓度控制。Au 引入后, Au 原子浓度与 Hg 空位浓度的关系以及相互作用仍需进一步研究。Au 器件性能的研究不仅要从材料入手, 而且其他的器件制作流程也至关重要。作为一种常见的 p 型掺杂手段, As 掺杂的激活机理仍需作深层次研究。

参考文献

- [1] Shorter R. Night Vision: Exploring the Infrared Universe, by Michael Rowan-Robinson [J]. *Contemporary Physics*, 2013, **54**(6): 304-305.
- [2] 唐冬华, 薛林, 孙立忠, 等. B 在 HgCdTe 中掺杂效应的第一性原理研究 [J]. *物理学报*, 2012, **61**(2): 027102.
- [3] 杨建荣. 碲镉汞材料物理与技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
- [4] Norton P. HgCdTe Infrared Detectors [J]. *Opto-Electronics Review*, 2002, **10**(3): 159-174.
- [5] Berding M A. Defects in ZnTe, CdTe, and HgTe: Total Energy Calculations [J]. *Journal of Vacuum Ence & Technology*, 1990, **8**(2): 1103-1107.

- [6] Berding M A, Schilfgaard M V, Sher A. Hg_{0.8}Cd_{0.2}-Te Native Defects: Densities and Dopant Properties [J]. *Journal of Electronic Materials*, 1993, **22**(8): 1005–1010.
- [7] Berding M A, Schilfgaard M V, Sher A. First-principles Calculation of Native Defect Densities in Hg_{0.8}-Cd_{0.2}Te [J]. *Physical Review B*, 1994, **50**(3): 1519.
- [8] Ciani A J, Ogut S, Batra I P. Concentrations of Native and Gold Defects in HgCdTe from First Principles Calculations [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2004, **33**(6): 737–741.
- [9] Jozwikowski K, Kopytko M, Rogalski A, et al. Enhanced Numerical Analysis of Current-Voltage Characteristics of Long Wavelength Infrared n-on-p HgCdTe Photodiodes [J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, **108**(7): 880.
- [10] 孙立忠, 陈效双, 周孝好, 等. 碲镉汞材料中 Hg 空位缺陷的第一性原理研究 [J]. *物理学报*, 2005, **54**(4): 1756–1761.
- [11] Kinch M A, Aqariden F, Chandra D, et al. Minority Carrier Lifetime in p-HgCdTe [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2005, **34**(6): 880–884.
- [12] 王忆锋, 刘黎明, 余连杰, 等. 碲镉汞材料非本征掺杂研究的发展 [J]. *红外*, 2012, **33**(1): 1–16.
- [13] Sivanathan S, Dhar N K, Anter Y, et al. 2009 U.S. Workshop on the Physics and Chemistry of II-VI Materials - Foreword [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2010, **39**(7): 831–832.
- [14] Chu M, Terterian S, Wang P C, et al. Au-doped HgCdTe for Infrared Detectors and Focal Plane Arrays [C]. *SPIE*, 2001, **4454**: 116.
- [15] 胡尚正, 郭明珠, 刘铭, 等. 液相外延原位 Au 掺杂碲镉汞薄膜材料的研究 [J]. *激光与红外*, 2017, **47**(7): 838–841.
- [16] Selamet Y, Ciani A, Grein C H, et al. Extrinsic p-type Doping and Analysis of HgCdTe Grown by Molecular Beam Epitaxy [C]. *SPIE*, 2002, **4795**: 8–16.
- [17] Selamet Y, Singh R, Zhao J, et al. Gold Diffusion in Mercury Cadmium Telluride Grown by Molecular Beam Epitaxy [C]. *SPIE*, 2003, **5209**: 67–74.
- [18] 王仍, 焦翠灵, 张莉萍, 等. 金掺杂 HgCdTe 气相外延生长及二次离子质谱研究 [J]. *红外*, 2016, **37**(10): 1–6.
- [19] 孙雪丽, 钟兆根, 张亚周. Au 掺杂碲镉汞的第一性原理计算 [J]. *中国科技论文*, 2018, **13**(6): 679–685.
- [20] Rogalski A, Antoszewski J, Faraone L. Third-generation Infrared Photodetector Arrays [J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, **105**(9): 344–348.
- [21] Destefanis G, Chamonal J P. Large Improvement in HgCdTe Photovoltaic Detector Performances at LETI [J]. *Journal of Electronic Materials*, 1993, **22**(8): 1027–1032.
- [22] 褚君浩. *窄禁带半导体物理* [M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [23] 宋淑芳, 田震. 原位 As 掺杂 p 型碲镉汞薄膜的制备研究 [J]. *激光与红外*, 2018, **48**(12): 1500–1502.
- [24] Wang J, Chen X, Hu W, et al. Temperature Dependence Characteristics of Dark Current for Arsenic Doped LWIR HgCdTe Detectors [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2013, **61**(5): 157–161.
- [25] Chen A C, Zandian M, Edwall D D, et al. MBE Growth and Characterization of in Situ Arsenic Doped HgCdTe [J]. *Journal of Electronic Materials*, 1998, **27**(6): 595–599.
- [26] Edwall D, Piquette E, Ellsworth J, et al. Molecular Beam Epitaxy Growth of High-quality Arsenic-doped HgCdTe [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2004, **33**(6): 752–756.
- [27] Madejczyk P, Gawron W, Martyniuk P, et al. MOCVD Grown HgCdTe Device Structure for Ambient Temperature LWIR Detectors [J]. *Semiconductor Science & Technology*, 2013, **28**(10): 105017.
- [28] Madejczyk P, Gawron W, Kbowski A, et al. Higher Operating Temperature IR Detectors of the MOCVD Grown HgCdTe Heterostructures [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2020, **49**(11): 6908–6917.

(下转第 28 页)

- [7] White A M. In of Surface-Properties on Minority Carrier Lifetime and Sheet Conductance in Semiconductors [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1981, **14**(1): L1-L3.
- [8] Nemirovsky Y, Burstein L. Anodic Sulfide on $Hg_{1-x}Cd_xTe$ [J]. *Applied Physics Letter*, 1984, **44**(4): 443.
- [9] Mainzer N, Weiss E, Laser D, Shaanan M. Effects of Anodic Fluorine-Oxide on the Thermal-Stability of $Hg_{1-x}Cd_xTe$ Photoconductive Arrays [J]. *Journal of Vacuum Science and Technology A*, 1989, **7**(2): 460.
- [10] Deng Y, Ying F, Cheng X G, et al. Vacuum-baking Effects on the I-V Characteristics of LWIR $HgCdTe$ Photodiodes With Different Passivation [C]. *SPIE*, 2009, **7158**: 715808.
- [11] Sun T, Li Y, Chen X, et al. The Dark Current Mechanism of MCT Photovoltaic Detector Passivated by Different Structure [C]. *SPIE*, 2005, **5640**: 26-33.
- [12] 孙涛, 陈国兴, 胡晓宁, 等. MCT 长波光伏探测器的表面漏电流及 $1/f$ 噪声研究 [J]. *物理学报*, 2005, **54**(7): 3357-3362.
- [13] 杨朝臣, 张冰洁, 杜宁, 等. $CdTe/ZnS$ 双层钝化碲镉汞长波探测器的制备与研究 [J]. *激光与红外*, 2018, **48**(9): 1118-1122.
- [14] Zhang X C, Zheng G Z, Guo S L, et al. Interface Electrical Characteristics of Passivation Films on MCT [C]. *SPIE*, 1998, **3175**: 31750H.
- [15] Licausi N, Rao S, Bhat I. Low-Pressure Chemical Vapor Deposition of CdS and Atomic Layer Deposition of CdTe Films for MCT Surface Passivation [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2011, **40**(8): 1668-1673.
- [16] Zhang J, Umana-membreno G A, Gu R, et al. Investigation of ICPECVD Silicon Nitride Films for MCT Surface Passivation [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2015, **44**(9): 2990-3001.
- [17] Ovsyuk V N, Yartsev A V. Analysis of Voltage-capacitance Curve of MIS-structure Based on n-and p-MBE MCT [C]. *SPIE*, 2007, **6636**: 663617.
- [18] Voitsekhovskii A V, Nesmelov S N, Dzyadukh S M. Hysteresis Phenomena in MIS Structure Based on Graded-gap MBE MCT With a Two-layer Plasma-chemical Insulator SiO_2/Si_3N_4 [J]. *Russian Physics Journal*, 2015, **58**: 540-551.
- [19] Singh R, Gupta A K, Chhabra K C. Surface Passivation of Mercury-Cadmium-Telluride Infrared Detectors [J]. *Defence Science Journal*, 1991, **41**(3): 205-239.
- [20] Voitsekhovskii A V, Nesmelov S N, Dzyadukh S M, et al. Electrical Characterization of Insulator-semiconductor Systems Based on Graded Gap MBE MCT with Atomic Layer Deposited Al_2O_3 Films for Infrared Detector Passivation [J]. *Vacuum*, 2018, **158**: 136-140.
- [21] Fu R, Pattison J, Chen A, et al. Mercury Cadmium Telluride (MCT) Passivation by Advanced Thin-Conformal Al_2O_3 Films [C]. *SPIE*, 2012, **8353**: 83532I.

(上接第 20 页)

- [29] Izhnin I I, Mynbaev K D, Voitsekhovsky A V, et al. Arsenic Implantation-induced Defects in $HgCdTe$ Films Studied with Hall-effect Measurements and Mobility Spectrum Analysis [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2019, **98**: 230-235.
- [30] Bonchuk O Y, Savytskyi H V, Izhnin I I, et al. Nano-size Defect Layers in Arsenic-Implanted and Annealed $HgCdTe$ Epitaxial Films Studied with Transmission Electron Microscopy [J]. *Applied Nanoence*, 2020, **10**: 4971-4976.