

文章编号: 1672-8785(2015)03-0016-05

集成浸没透镜结构碲镉汞光伏器件的研制

乔辉^{1,2} 王仍¹ 焦翠玲¹ 龚玮¹ 李向阳¹

(1. 中国科学院上海技术物理研究所中科院红外成像材料与器件重点实验室, 上海 200083;

2. 中国科学院大学, 北京 100039)

摘要: 采用等温气相外延方法 (Isothermal Vapor Phase Epitaxy, ISOVPE) 在 CdZnTe 衬底上生长出碲镉汞外延材料。在此基础上研制出在近室温条件下工作、具有集成浸没透镜结构的碲镉汞光伏器件, 器件的工作波段为 $2.5 \mu\text{m} \sim 3.2 \mu\text{m}$ 。由于采用 ISOVPE 工艺生长的碲镉汞外延材料的组分梯度较大, 文中采用多次湿法腐蚀 - 透射光谱测试的方法对材料的截止波长进行较精确的定位。在 CdZnTe 衬底上采用单点金刚石工艺得到直径为 1.5 mm 的超半球结构集成浸没透镜, 然后利用激光诱导电流 (LBIC) 测试方法评价加工浸没透镜前后的器件光学响应面积。通过比较透镜加工前后器件的电流 - 电压特性曲线, 对浸没透镜加工过程的影响进行了评价, 发现透镜加工完成后器件的零偏压电阻略有增加, 这与超半球结构会减小器件的辐射入射角相符合。在透镜加工前后对器件的黑体信号和噪声进行了测试, 发现具有浸没透镜的器件的信号比之前增加了 20~30 倍, 其噪声由于零偏压电阻的增加而略有降低。因此器件的黑体探测率实现了最高达 4 倍的增加。

关键词: HgCdTe; ISOVPE; 浸没透镜; 光伏探测器

中图分类号: TN21 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2015.03.003

Development of HgCdTe Photovoltaic Detectors with Integrated Immersion Lens Structure

QIAO Hui^{1,2}, WANG Reng¹, JIAO Cui-ling¹, GONG Wei¹, LI Xiang-yang¹

(1. Key Laboratory of Infrared Imaging Materials and Detectors, Shanghai Institute of Technical Physics,

Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: HgCdTe epitaxial materials are grown on CdZnTe substrates by an Isothermal Vapor Phase Epitaxy (ISOVPE) method. On this base, a HgCdTe photovoltaic detector with an integrated optically immersed lens structure operating in the waveband from $2.5 \mu\text{m}$ to $3.2 \mu\text{m}$ at near room temperature is developed. Because the HgCdTe epitaxial material grown by ISOVPE has a greater composition gradient, its cutoff wavelength is located accurately by a method in which wet etching and transmission spectral measurement are carried out for many times. An integrated optically immersed lens with a diameter of 1.5 mm is made on a CdZnTe substrate by a single point diamond turning method. Then, the optical response area of the device before and after the integrated optically immersed lens is made is evaluated by a Laser Beam Induced Current (LBIC) test method. By comparing the current voltage characteristic curves of the device before and after the integrated optically immersed lens is made, the processing of

收稿日期: 2014-12-25

作者简介: 乔辉 (1979-), 男, 山东莱阳人, 硕士, 主要从事碲镉汞红外器件的器件物理、工艺及可靠性研究。

E-mail: qiaohui@mail.sitp.ac.cn

the lens is evaluated. It is found that the zero biased resistance of the device increases slightly after the lens is made, which coincides with the fact that a hyper-semispherical structure may reduce the incident angle of radiation for the device. The blackbody signal and noise of the device are measured before and after the lens is made. The result shows that the signal of the device with an integrated optically immersed lens is increased by a factor of 20 to 30 and its noise is reduced slightly due to the increase of zero biased resistance.

Key words: HgCdTe; ISOVPE; immersion lens; photovoltaic detector

0 引言

碲镉汞 (HgCdTe) 材料由于在红外波段的吸收系数高和禁带宽度随组分可调, 目前仍然是制备红外尤其是长波红外焦平面光伏探测器的首选材料。传统的红外探测器大多在低温下工作, 需要复杂的制冷设备, 因此增加了设备的体积、重量和成本。随着红外应用范围的不断扩大, 越来越多的红外探测应用都要求探测器在室温或近室温下工作。对于传统的同质结 n-on-p 型光伏器件而言, 器件的暗电流在近室温下以 p 区的扩散电流为主。由于碲镉汞属窄禁带半导体材料, 很小的能量就足以使电子从价带跃迁到导带, 产生本征载流子。因此在近室温条件下, 碲镉汞中热激发本征载流子浓度占主导作用。随着温度的升高, 器件的暗电流会急剧增加, 零偏压电阻较低, 因此器件的性能会明显衰退^[1-5]。

如果要提高器件的零偏压电阻, 需要对热激发载流子的浓度进行抑制。目前国际上的主流方案是采用能对室温时的热激发载流子产生 Auger 抑制的异质结材料结构来制备器件^[6-7]。典型的 Auger 抑制异质结材料及其能带结构如图 1 所示。该异质结材料通常称为 N⁺-p-P⁺ 型结构, 可以看出, 该结构中存在两个 PN 结。若要起到较好的 Auger 抑制效果, 器件工作时需要施加反向偏压。加反向偏压时的 N⁺-p 结称为空穴阻挡层, 该处允许 N⁺ 多子电子通过, 同时阻止 N⁺ 少子空穴通过。p-P⁺ 结称为电子阻挡层, 该处允许 P⁺ 多子空穴通过, 同时阻止 P⁺ 少子电子通过, 这样就可以使吸收层 p 区中的载流子浓度低于平衡状态载流子浓度而处于非平衡状态, 从而在 p 区中产生 Auger 抑制作用。

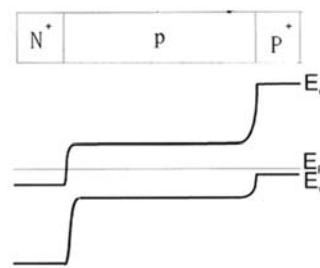


图 1 N⁺-p-P⁺ 型异质材料结构的能带图

由于采用 Auger 抑制结构的器件需要生长相应的异质结结构材料, 会增加器件制备的复杂性和成本。芯片集成浸没透镜结构由于能够大大减少芯片的物理光敏面, 提高结电阻和降低暗电流, 提高器件的探测性能, 因此为室温或近室温下工作的碲镉汞光伏器件提供了一个简便易行的制备工艺方案^[8-9]。

1 材料生长与器件制备

ISOVPE 方法相对熔体法生长温度较低, 可以有效减少由于高温造成的杂质污染、位错和孪晶等缺陷; 由于气相生长是一种缓慢而完整的原子沉积过程, 生长温度低, 生长时不与容器壁接触, 因此利用物理气相外延能生长出高纯度、晶体结构完好、位错密度低的 HgCdTe 材料。HgCdTe 材料的气相生长机理是利用 CdTe 和 HgTe 材料的互扩散形成具有纵向梯度结构的 HgCdTe 薄膜材料。外延材料选用开管气相外延生长技术生长, 生长过程中始终进行氢气气氛保护。图 2 是根据原理自主设计的 HgCdTe 薄膜气相外延设备, 图 3 是利用 ISOVPE 生长方法得到的碲镉汞外延薄膜材料。



图 2 HgCdTe 外延材料的 ISOVPE 生长设备

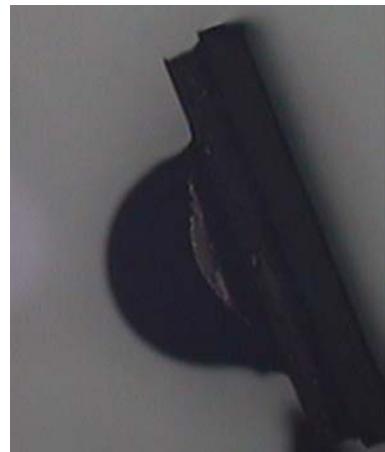


图 5 最终加工得到的碲镉汞器件的照片

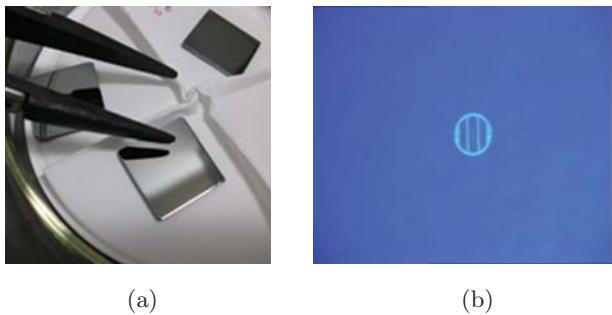


图 3 利用 ISOVPE 工艺生长的 HgCdTe 材料

离子注入、表面钝化和碲锌镉浸没透镜的加工是该光伏器件制备中的关键工艺。采用平面结工艺，利用硼离子注入在 P 型衬底上形成 N 型层，从而形成 n-on-p 平面型光伏器件。硼离子的质量小，可减小注入损伤。由于注入后不退火即可形成 PN 结，可降低工艺的复杂性。同时在注入后采用微腐蚀工艺以及 CdTe/ZnS 双层钝化工艺，有利于降低表面漏电流和空间电荷区的产生复合电流，从而减小暗电流。在碲锌镉衬底上采用单点金刚石工艺加工得到了直径为 1.5 mm 的超半球结构集成浸没透镜，整个碲镉汞器件通过铟柱与宝石片电极板倒焊互联后形成最终的器件，结构如图 4 所示。最终加工得到的器件照片如图 5 所示。

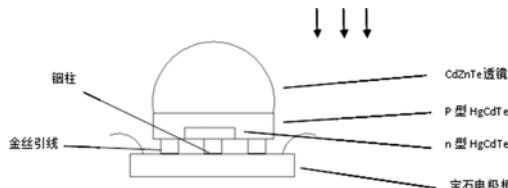


图 4 集成浸没透镜的碲镉汞芯片与宝石电极板进行铟柱倒焊互联后的器件结构示意图

刚生长出的碲镉汞外延材料的截止波长不符合器件制备要求，因此需要对材料的截止波长进行调整。这里采用的方法是进行多次湿法腐蚀 - 透射光谱测试，即在对材料进行一定条件的湿法腐蚀后进行透射光谱测试，确定其截止波长是否合适，然后再进行重复的腐蚀 - 测试操作，一直到材料的截止波长符合要求为止。图 6 是典型的湿法腐蚀 - 透射光谱测试示意图。

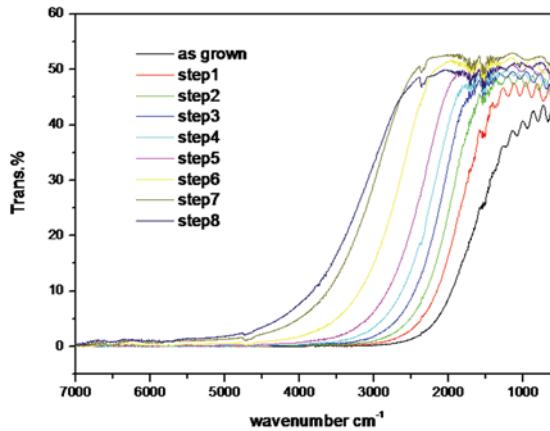


图 6 碲镉汞材料经反复湿法腐蚀后的透射光谱

2 器件测试结果与讨论

制备得到的碲镉汞器件的响应光谱如图 7 所示，器件的响应波段与设计的 $2.5 \mu\text{m} \sim 3.2 \mu\text{m}$ 相符。用 ISOVPE 工艺生长的碲镉汞外延材料具有较大的组分梯度，这使得对碲镉汞器件截止波长的精确控制有一定难度，但这一组分梯度所产生的内建电场有益于光生载流子向结区输

运, 可以提高器件的量子效率, 这一点图 8 有明显表现。图 8 对比了在正照射和背照射条件下碲镉汞光伏器件的响应光谱, 图中的响应光谱都经过了归一化处理。可以看出, 由于组分梯度产生的内建电场的作用, 背照射条件下器件在短波方向的响应明显得到了提高。

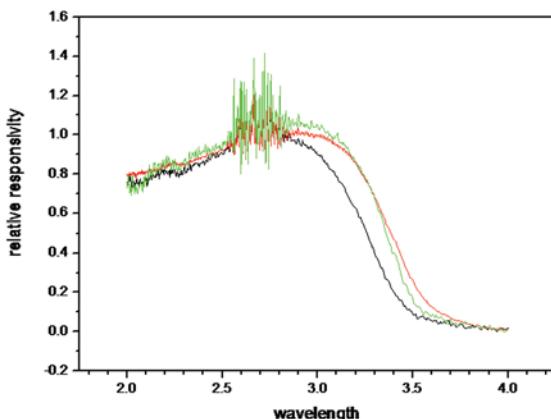


图 7 制备得到的碲镉汞光伏器件的相对响应光谱

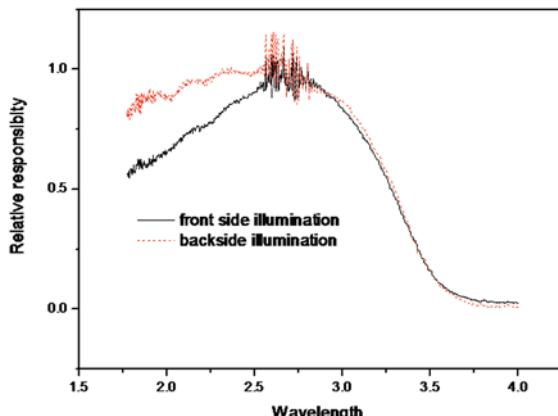


图 8 背照射和正照射条件下器件的相对响应光谱的对比

如前所述, 为了提高器件在室温或近室温条件下的性能, 利用器件的碲锌镉衬底加工了集成浸没透镜结构。浸没透镜的加工是在碲镉汞光伏器件制备完成之后进行的, 加工过程有可能对光伏器件造成损伤, 因此需要评价整个浸没透镜加工过程对碲镉汞光伏器件性能的影响。这里在碲锌镉透镜加工前后分别对器件的电流-电压特性进行测试, 通过对加工前后器件的电流-电压特性以及零偏压电阻来对透镜加工过程进行评价。图 9 给出了透镜加工前后器件的典型电阻-电压特性曲线。可以看出, 透镜加

工对器件的电学特性基本没有影响。图 10 中给出了透镜加工前后几个器件的零偏压电阻和噪声的对比。可以看出, 透镜加工完成后器件的零偏压电阻略有增加, 同时噪声均略有下降。这是由于采用的透镜是超半球结构, 透镜加工前器件的背景辐射入射角为 180° , 而加工完成后则变为 42° , 背景入射的降低导致了零偏压电阻的增加和噪声的下降。

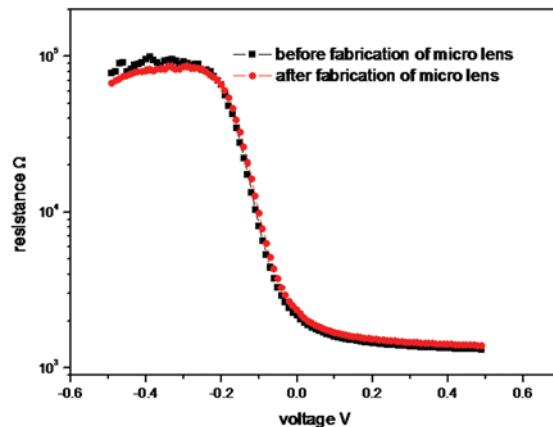


图 9 浸没透镜加工前后器件的电阻-电压特性曲线对比

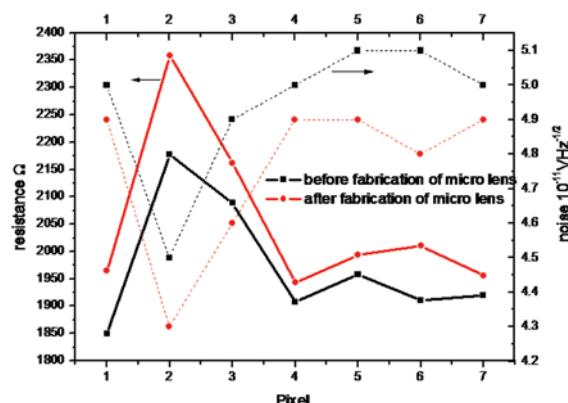


图 10 浸没透镜加工前后器件的零偏压电阻和噪声对比

根据文献 [9], 采用超半球浸没透镜结构, 器件的有效光响应面积将增加到原来的 n^4 倍, 黑体探测率将增加到原来的 n^2 倍 (对碲锌镉材料, n 为 2.7)。表 1 给出了浸没透镜加工前后器件的响应信号以及黑体探测率的对比。可以看出, 器件的黑体响应信号均增加了 20 倍左右, 黑体探测率则增加了 4 倍左右, 这说明超半球结构的浸没透镜确实提高了器件的探测性能。

表1 浸没透镜加工前后器件的光学响应和黑体探测率对比

No.	optical response (10-11V)			Detectivity($\text{cm}^2\text{Hzs}^{-1}$)		
	before	after	Multiply factor	before	after	Multiply factor
VPE114-1	5.4	115	21	2.62×10^8	1.01×10^9	3.85
VPE114-2	12.4	150	12	6.69×10^8	1.53×10^9	2.29
VPE114-3	5.6	150	27	2.78×10^8	1.43×10^9	5.14
VPE114-5	8.7	140	16	4.23×10^8	1.25×10^9	2.96
VPE114-7	6	120	20	3.05×10^8	1.07×10^9	3.51
VPE114-10	7.1	156	22	3.38×10^8	1.42×10^9	4.20
VPE114-15	5.9	134	22	2.87×10^8	1.20×10^9	4.18

碲镉汞光伏器件的pn结设计面积即物理面积为 $180 \mu\text{m} \times 180 \mu\text{m}$ ，若采用超半球浸没透镜结构，将会得到响应区域为 $1300 \mu\text{m} \times 1300 \mu\text{m}$ 的有效光学面积。浸没透镜加工前后，对器件的光学响应进行了LBIC测试扫描，如图11所示。可以看出，加工浸没透镜后器件的光学响应面积得到了明显的增加。对扫描得到的LBIC图进行的对比分析表明超半球浸没透镜结构达到了设计预期的要求，基本实现了光学响应面积 n^4 左右的增加。

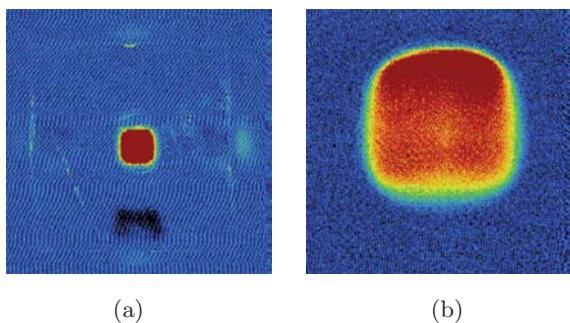


图11 浸没透镜加工前后器件的LBIC扫描图

3 结论

对碲镉汞器件的碲锌镉衬底进行加工，得到了直径为1.5 mm的超半球结构集成浸没透镜。通过在透镜加工前后进行LBIC测试、电流-电压特性测试以及黑体探测率测试，发现透镜加工完成后器件的零偏压电阻略有增加，其噪声则略有降低，这与超半球结构会减小器件的辐射入射角相符合；具有浸没透镜的器件的信号比之前增加了20~30倍，器件的黑体探测率实现了最高达4倍的增加。

参考文献

- [1] Gumenjuk-Sichevskaja J V,Sizov F F,Ovsyuk V N, etc. Charge Transport in HgCdTe-based n⁺-p Photodiodes [J]. Semiconductors, 2001, **35**(7):800–806.
- [2] Angelo G, Bangs J, Gerrish A. Current Voltage Modeling of Current Limiting Mechanisms in HgCdTe Focal Plane Array Photodetectors [J]. Journal of Electronic Materials, 2005, **34**(6): 913–921.
- [3] Vishnu G. A General Relation between Zero-bias Resistance-area Product and Perimeter-to-area Ratio of the Diodes in Variable-area Diode Test Structures [J]. Semicond. Sci. Technol. 1996,**11**: 1070–1076.
- [4] Singh S K ,Gopal V , Bhan R K ,et al. An Analysis of the Dynamic Resistance Variation as a Function of Reverse Bias Voltage in a HgCdTe Diode [J]. Semicond. Sci. Technol. 2000,**15**:752–755.
- [5] Gopal V,Singh S K,Mehra R M. Analysis of Dark Current Contributions in Mercury Cadmium Telluride Junction Diodes [J]. Infrared Phys. Technol. 2002,**43**(6):317–326.
- [6] Elliott C T . Non-equilibrium Modes of Operation of Narrow-gap Semiconductor Devices [J]. Semicond. Sci. Technol. 1990,**5**:S30–S37
- [7] Ashley T and Elliott C T. Operation and Properties of Narrow-gap Semiconductor Devices near Room Temperature Using Non-equilibrium Techniques [J]. Semicond. Sci. Technol. 1991,**6**: C99–C105.
- [8] Piotrowski J,Pawluczyk J, Piotrowski A, et al. Uncooled MWIR and LWIR Photodetectors in Poland [J]. Opto-electronics Review, **18**(3):318–327.
- [9] Piotrowski J, Rogalski A. Uncooled Long Wavelength Infrared Photon Detectors [J]. Infrared Physics & Technology, 2004,**46**:115–131.