

# 高响应度 GaAs-MSM 光电自混频面阵器件

张立臣<sup>1,2</sup>, 汪 韬<sup>1</sup>, 尹 飞<sup>1</sup>, 杨 瑾<sup>1,2</sup>, 胡雅楠<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学技术国家重点实验室, 陕西 西安 710119; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:**采用 LP-MOCVD 方法生长并制作了 GaAs 基底肖特基势垒的 MSM 光电自混频器件。器件为面阵式结构, 象元数目为  $32 \times 32$ 。对器件的光电参数进行测试分析, 器件的响应度在偏压为 3 V 时, 达到  $8.25 \text{ A/W}$ , 暗电流小于  $18 \text{ nA}$ , 对应的光电流密度为  $59.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ , 单点饱和输入光功率为  $1 \mu\text{W}$ 。测试瞬态响应, 器件响应峰值上升沿为  $212 \text{ ps}$ , 半峰宽  $372 \text{ ps}$ , 对应响应频率大于  $1.65 \text{ GHz}$ , 具有很好的应用前景。

**关键词:**光电集成; 光电自混频器; 金属有机气象外延; GaAs-MSM

**中图分类号:** TN362 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2011.08.021

## Facture of high responsivity GaAs-MSM optoelectronic self-mixing array

ZHANG Li-chen<sup>1,2</sup>, WANG Tao<sup>1</sup>, YIN Fei<sup>1</sup>, YANG Jin<sup>1,2</sup>, HU Ya-nan<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China;

2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** This paper reports a metal-semiconductor-metal (MSM) Schottky photodiode (MSM-PD) array as an optoelectronic self-mixer factured on the extension layer which is grown on GaAs by using low pressure metal organic chemical vapor deposition (LP-MOCVD) method. There are  $32 \times 32$  pixels in the device. Measured at 3 V biasing voltage, the responsivity of the device is  $8.25 \text{ A/W}$ , the dark current is under  $18 \text{ nA}$ , the consistency of photocurrent is  $59.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  and the input saturated power of light is  $1 \mu\text{W}$ . Measuring the response to pulses, the risetime is  $212 \text{ ps}$  and the Full Wave at Half Maximum (FWHM) is  $372 \text{ ps}$ , so the corresponding 3-dB bandwidth is  $1.65 \text{ GHz}$ .

**Key words:** OEIC; optoelectronic self-mixer; MOCVD; GaAs-MSM

### 1 引言

MSM 光电自混频器件 (MSM-OEM) 是光电集成电路 (OEIC) 技术的重要组成部分, 也是当今研究的热门领域之一。与传统的光电混频器件相比, MSM 光电自混频器将光信号接收和电学混频完美的结合到了一起, 其不仅具有功能强大、体积小、质量轻、功耗小、稳定度高、可大规模集成等特点, 还具有响应速度快、频带宽、光并行性好等光波器件特点。

混频器件作为电路设计中经常使用的器件, 在硅基半导体器件设计制作中已有了较为成熟的工艺和技术。光电混频是将调制的光信号与电信号进行

混频, 也是光电探测实践中经常遇到的问题, 早先的光电混频器件一般采用雪崩二极管 APD 完成光信号的采集、读出、放大等工作, 将光信号转化为电信号, 然后在硅基半导体器件中实现光信号与电信号的混频, 其电路复杂。而 MSM 光电自混频器件可以实现大规模集成, 可用于光电集成电路 (OEIC) 的设

**基金项目:** 国家自然科学基金 (No. 60707018); 西部之光 (No. 2005ZD01) 资助。

**作者简介:** 张立臣 (1982 -), 男, 硕士研究生, 主要从事半导体光电探测器和太阳能电池方面的研究。E-mail: zhanglichen02051055@126.com

**收稿日期:** 2011-03-20; **修订日期:** 2011-06-09

计和实现。利用 MSM 高速探测器实现光电混频是现在国内外研究的热点,美国现在已经研制出线阵式和面阵式的 MSM 光电自混频器件<sup>[1-2]</sup>,器件可以用于制导、测绘、夜视等领域。此外,国外多家研究机构正在对高速、高灵敏度和高信噪比,基于 MSM-PD 的光电自混频器件进行研制<sup>[3]</sup>,其研制过程中主要问题是在获得高灵敏度同时,保证工作带宽。

本文通过 LP-MOCVD 的方法,在 GaAs 半绝缘衬底上生长一层 GaAs 光电响应层,再通过多次套刻和蒸镀金属等工艺制作了高性能的 GaAs 光电混频器件,所制得的样品器件光电响应度高,响应性能可近似达到同材质的雪崩二极管 (GaAs-APD) 的探测性能,而响应频率可达到 1.65 GHz 以上,可用于对频率调制连续光波 (FM/cw) 的探测和解调。

## 2 光电自混频器件的制作

实验首先在半绝缘 GaAs 衬底上,生长一层 GaAs 光信号响应层。使用设备为自制的 XG2-1 型 MOCVD 机,此设备有较好的生长稳定性和重复性。生长所使用的源为砷烷 ( $\text{AsH}_3$ )、三甲基镓 ( $\text{Ga}(\text{CH}_3)_3$ ) 源,采用优化的条件生长,反应室气体总流量为 4 L/min, GaAs 生长速率约为 10 nm/min。

器件单位光敏区大小为  $100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$ ,探测器芯片大小为  $4.8\ \text{mm}^2$ 。制作好的光电自混频探测芯片,通过减薄、切割等工艺封装,经过金丝热压键和引出探测器电极,成为最终器件样品,如图 1 所示。

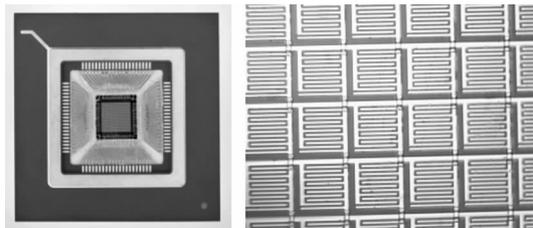


图1 封装后的器件外形和200倍下器件结构

## 3 GaAs 基光电自混频器件的材料结构设计,外延工艺的研究

基于 III-V 族化合物半导体材料的 MOCVD 生长技术,优化生长参数,提高材料结构和界面的生长控制,提高 GaAs 等材料薄膜的单晶质量,降低杂质能级和缺陷引起载流子复合,提高探测器的内量子效率,并降低器件的噪声。优化界面参数,降低载流子界面复合几率,降低光生载流子的界面复合损耗,提高器件外量子效率。势垒增强型异质结的生长和参数优化。通过测量 IV 特性,对器件的载流子输运模型进行表征和修正。采用 PL 谱对器件材料的光谱响应作为测试反馈手段。以反应离子刻蚀方法作

为探测器沟道的刻蚀手段。以扫描电镜 SEM 对刻蚀效果的监测表征。

## 4 器件测试

### 4.1 直流特性

直流测试包括不同偏压有光照、无光照条件下,器件的响应电流,从而计算出器件在不同偏压下的响应度变化曲线;不同光照条件下,器件响应光生电流随偏压变化曲线;固定偏压下,器件输入饱和光功率大小。所用测试设备包括自制 808 nm 可调制激光器系统、电压取样系统、800 nm 飞秒激光器、光功率计和高速示波器等仪器设备。自制测试平台原理如图 2 所示。

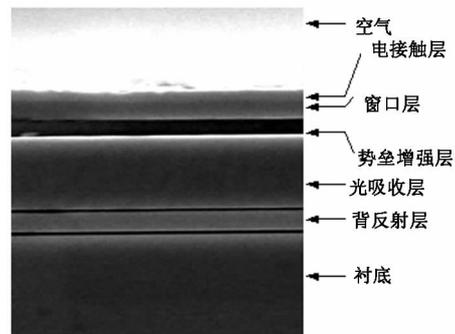


图2 探测器外延片断面的扫描电镜照片

将器件固定在测试平台上,对制作好的探测器件进行直流信号输入下的光响应测试。器件通过对固定光强下多个偏压下明场电流、暗场电流的测量,测试结果如图 3 所示。器件在 3 V 偏压下,响应度达到  $8.25\ \text{A/W}$ ,暗场电流小于 18 nA。输入光功率测量使用光功率计测量,结合器件光敏区大小,计算出单个像元面积下光功率为 71.6 nW。如图 3 所示,器件光电响应度在 1V 偏压以下,随电压的减少而成指数衰减。器件采用面阵行输入、列读出式,通过输入端通断来实现像元定位,探测器件的这个特点,有利于探测单元的隔离和集成。

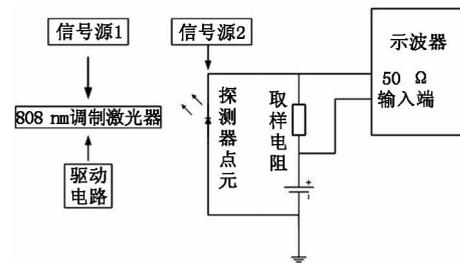


图3 测试平台原理图

将器件置于不同光功率照射 ( $71.6\ \text{nW}$ ,  $24.8\ \text{nW}$ ,  $9.2\ \text{nW}$ ,  $3.5\ \text{nW}$  和  $1.95\ \text{nW}$ ) 照射条件下,测量光生电流随偏置电压变化曲线,测试结果如图 4 所示。由图可以看出,器件在 1 V 偏压以上光

生电流随偏置电压增加而线性增加,在 1 V 偏压以下,光生电流随光强减弱和偏置电压减少而迅速降低。

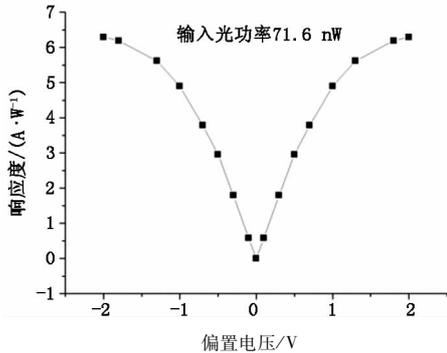


图4 固定入射光功率下,响应度随偏置电压变化曲线

将器件置于 3 V 偏压条件下,测量响应光电流随光功率增加的响应曲线,光功率测量通过光功率计并结合单位象元面积计算得出。测量结果如图 5 所示。由图我们可以看到,随着光功率的不断增加,0 ~ 1000 nW 输入光功率下,响应光电流随光功率的增加线性增长;1000 nW 以上时,光电流增加趋势变缓,光响应趋于饱和。计算 1000 nW 光功率下,光生电流密度约为 600  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。

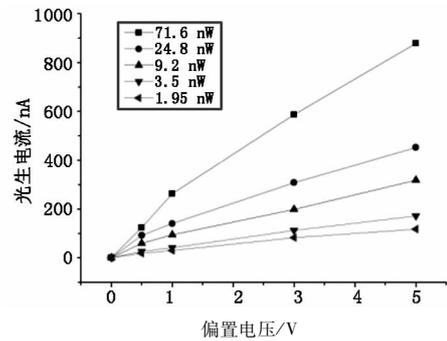


图5 不同光强照射下,光生电流随偏置电压变化曲线

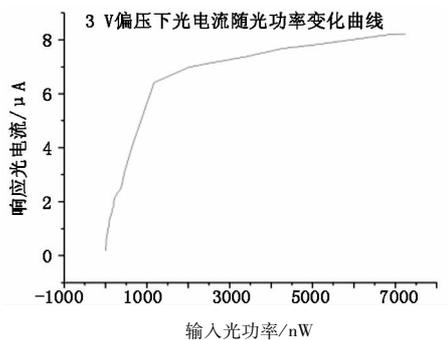


图6 3V 偏压下光生电流随入射光功率变化曲线

4.2 瞬态响应

采用高速 I-V 测试系统对 GaAs 基探测器像元进行测试,如图 7 所示系统测量原理图,MSM-PD 和采样电阻串行接入电路,采样电阻两端通过隔直电容接入高频示波器 50  $\Omega$  探头。使用的短脉冲飞秒激光,中心波长为 800 nm,激光半峰宽为 100 ~

120 fs。

测量结果如图 8 所示,示波器上读取的响应时间  $t$ ,受光照时间和光电探测器响应时间共同影响。由于激光器作用时间很短,可以忽略不计。因此,示波器中读取的响应时间,可以认为是探测像元的自身响应时间。由图我们可以读出,响应半峰宽为 372 ps,上升沿宽度为 212 ps。

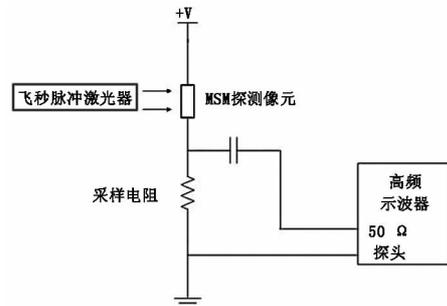


图7 瞬态特性测量原理图

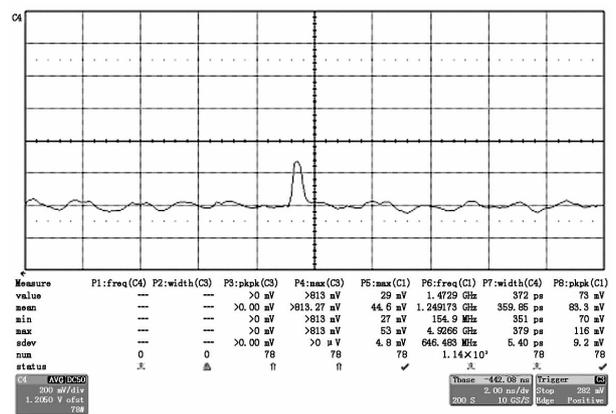


图8 测量结果截图

由经验公式,响应信号最高频率的 3 dB 带宽为:

$$f_{3\text{dB带宽}} = \frac{0.35}{t_{\text{上升沿时间}}}$$

计算响应频率达到 1.65 GHz 以上。

4.3 探测器自混频测试

使用探测器测试平台,对探测器的自混频性能进行测试。激光器采用 808 nm 近红外可调制半导体激光器,输出总功率小于 1 mW,光斑大小约为 50  $\text{mm}^2$ ,探测器象元大小为 0.01  $\text{m}^2$ ,单像元接收功率小于 0.2 nW。调频信号源通过驱动电路,控制激光器工作,产生调制激光信号,光信号直接照射入自混频光电探测器,激光器调制频率为 1 kHz;电信号采用零偏置,正弦波输入探测器,电信号频率与光信号相近。在探测器上光电信号混频,形成如图 9 所示混频信号,通过微调电信号频率,混频信号频率也随之改变。

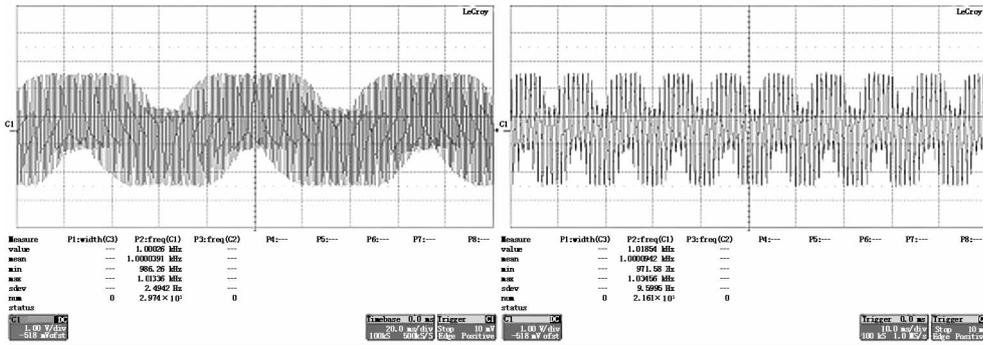


图9 光电混频波形截图

试验中,电信号为零偏置,这样做有几个好处,一是使电路设计简单化,振荡电路不需要增加直流分量直接接入探测器;二是对于背景光噪声,探测器的平均电压响应大大降低,有利于后端电路的信号提取;三是采用零偏压后,混频信号变为等幅调频信号,读取、滤波电路的设计相对简单。

## 5 结论

采用 LP-MOCVD 方法在 Fe-GaAs 衬底表面生长 GaAs 光响应层,然后在基底表面制作肖特基势垒电极阵列,制作出了响应度 8.25 A/W (3 V 偏置),较低暗电流(小于 18 nA)的光电混频探测阵列。通过  $I-V$  测试平台对器件的直流响应、瞬态响应和混频特性等一系列参数进行了测试。器件的响应度、暗电流和频率特性都达到了预期设计的目的。

本器件为面阵式探测器件,集测量和混频等多功能于一身,可广泛用于激光制导、红外夜视、三维测距等多个领域,具有很好的发展前景。

## 参考文献:

- [1] W Ruff, et al. Self-mixing detector candidates for an FM/cw LADAR architecture [J]. Proc. SPIE, 2000, 4035: 152 - 162.
- [2] W Ruff, K Aliberti, J Dammann, et al. Performance of an FM/cw prototype ladar using a 32-element linear self-mixing detector array [J]. Proc. of SPIE Laser Radar Technology and Applications VIII, 2003, 5086: 58 - 69.
- [3] H Shen, K Aliberti, B Stann, et al. Analysis of InGaAs metal-semiconductor-metal OE mixers [J]. Physics and Simulation of Optoelectronic Devices XII, Proceedings of SPIE, 2004, 5349.
- [4] Gao Jianjun, Gao Baoxin, Liang Chunguang. Equivalent circuit model of metal-semiconductor-metal photodiode [J]. Journal of Electronics and Information Technology, 1999, 21(4): 543 - 547. (in Chinese)  
高建军,高葆新,梁春广. 一个金属-半导体-金属光电探测器等效电路模型[J]. 电子科学学刊, 1999, 21(4): 543 - 547.
- [5] Wu Shu, Lin Shiming, Liu Wenkai. An equivalent circuit model of a metal-semiconductor-metal photodetector [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2001, 12(6): 552 - 555. (in Chinese)  
武术,林世鸣,刘文楷. MSM 光探测器的等效电路模型[J]. 光子·激光, 2001, 12(6): 552 - 555.
- [6] Ruan Chi, Zhao Wei, Chen Guofu, et al. The characteristics of GaAs and InP photoconductive semiconductor switch [J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36(3): 405 - 411. (in Chinese)  
阮驰,赵卫,陈果夫,等. GaAs 与 InP 半导体光导开关特性实验研究[J]. 光子学报, 2007, 36(3): 405 - 411.
- [7] Li Xiaoting, Wang Yiding, Wang Tao, et al. The Study of  $\text{InAs}_x\text{Sb}_{1-x}$  on GaSb Substrate Grown by LP-MOCVD [J]. Acta Photonica Sinica, 2005, 34(9): 1363 - 1366. (in Chinese)  
李晓婷,王一丁,汪韬,等. GaSb 衬底上外延  $\text{InAs}_x\text{Sb}_{1-x}$  材料的 LP-MOCVD 研究[J]. 光子学报, 2005, 34(9): 1363 - 1366.
- [8] Fay P, Caneau C, Adesida I. High-speed MSM/HEMT and P-I-N/HEMT monolithic photoreceivers [J]. IEEE TransMicrow Theory Technol, 2002, 50(1): 62 - 67.
- [9] Gregory B Tait, David B Ameen. Barrier-enhanced InGaAs/InAlAs photodetectors using quantum-well intermixing [J]. Solid-State Electronics, 2004, 48: 1783 - 1790.
- [10] H Momose, H Okai, H Deguchi, et al. Impurity cyclotron resonance in InGaAs/GaAs superlattice and InGaAs/AlAs superlattice grown on GaAs substrates [J]. Physica E, 2006, 32: 309 - 312.
- [11] R Melkadze, N Khuchua, Z Tchakhnakhia, et al. Investigation of MBE grown GaAs:AlGaAs:InGaAs heterostructures [J]. Materials Science and Engineering B, 2001, 80: 262 - 265.
- [12] J B D Soole, H Schumacher. InGaAs metal-semiconductor-metal photo-detectors for long wavelength optical communications [J]. IEEE J. Quantum Electron, 1991, 27(5): 737 - 752.
- [13] M A Martin, K C Song, B J Robinson, et al. Very low dark current InGaP/GaAs MSM photodetector using semi-transparent and opaque contacts [J]. Electron. Lett., 1996, 32: 766 - 767.
- [14] R G DeCorby, R I McDonald, R Sharma, et al. Frequency domain demonstration of transit time limited, large area InGaP-InP-InGaAs MSM photodetectors [J]. IEEE Photon. Technol., 1997, 9(7): 985 - 987.