

InGaAs 探测器偏振响应特性的实验研究

唐恒敬 李永富 李 雪 龚海梅

(中国科学院上海技术物理研究所传感技术联合国家重点实验室, 上海 200083)
中国科学院红外成像材料与器件重点实验室, 上海 200083

摘要 分析了光电探测器偏振响应产生的原因, 定义了探测器偏振敏感度的公式, 制备了测试用 InGaAs 探测器。为了测试器件的偏振敏感度, 搭建了测试系统, 并对器件的偏振敏感特性进行了测试。结果表明, 测试系统具有较好的稳定性; 器件响应存在明显的偏振特性, 正入射时器件的偏振敏感响应为 0.27 dB, 斜入射时器件偏振敏感有所增加, 入射角度为 10° 时达到 0.41 dB。

关键词 探测器; 半导体器件物理; 光电探测器; InGaAs; 偏振响应; 敏感度

中图分类号 TB96 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.040401

Experimental Study on Polarization-Dependent Response of InGaAs Photodetector

Tang Hengjing Li Yongfu Li Xue Gong Haimei

(State Key Laboratories of Transducer Technology, Shanghai Institute of Technical Physics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China
Key Laboratories of Infrared Imaging Materials and Detectors, Chinese Academy of Sciences,
Shanghai 200083, China)

Abstract Response characteristic of photodetector, which is caused by polarization state of incident light, is analyzed. The calculation formula of polarization-dependent sensitivity is deduced, and an InGaAs detector is fabricated for the experimental test. In order to test the polarization-dependent sensitivity of photodetector, an experimental system is established, and the polarization-dependent sensitivity of the InGaAs detector is measured. The results indicate that the experimental system has a good stability and the polarization-dependent sensitivity of the InGaAs detector is 0.27 dB under normal incidence, while 0.41 dB under 10° oblique incidence.

Key words detectors; semiconductor device physics; photo-detector; InGaAs; polarization response; sensitivity

OCIS codes 040.5160; 230.5440; 060.3738; 300.6470

1 引言

在偏振成像和激光功率测量技术领域, 凡涉及偏振光的定量测量, 会由于光束的偏振态对探测器的影响而产生显著的误差^[1~4]。这种现象主要是由许多类型的光探测器存在偏振敏感响应引起的。探测器的响应度还会受到光偏振状态的影响, 也就是说探测器的响应度随入射光偏振方向或偏振态的变化也是影响探测器测量准确度的因素之一。即使入射光功率相同, 如果偏振方向不同, 探测器的响应也会有差异, 甚至在一些情况下会有很大的差异。另外, 在以自然光为光源的光学系统中, 在经过几个光学元件的透反射后, 光束已经是部分偏振光了, 此时探测器偏振响应的效果就会表现出来。

近年来, 由于其卓越的性能和高可靠性, 在光通信等领域已得到了广泛应用的 InGaA 探测器在航天、医学成像、产业测温、安全防范等民用和国防科技领域有广泛的应用前景^[5~10]。采用与 InP 晶格匹配的 $\text{In}_{0.53}$

收稿日期: 2010-08-23; **收到修改稿日期**: 2010-11-24

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(61007067)和上海市科技人才计划项目(09XD1404500)资助课题。

作者简介: 唐恒敬(1981—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事短波红外探测器及其相关技术方面的研究。

E-mail: hengjingtang@163.com

* 通信联系人。E-mail: hmgong@mail.sitp.ac.cn

Ga_{0.47}As 材料制备的室温工作的 InGaAs 探测器,其截止波长约为 1.7 μm。本文制备了 InGaAs 探测器,搭建了探测器偏振敏感响应测试系统,并对器件的偏振敏感响应进行了测试与分析。

2 理论分析

在光正入射情况下,器件偏振敏感度主要是由以下原因产生的^[11]:1)长波长吸收长度的增加,使得由衬底反射到探测器表面的光增加;2)探测器材料的每一层之间不是严格平行的;3)由于外延层和衬底热扩散系数不同而在晶体结构中产生的机械应力。正入射情况下 InGaAs 探测器的偏振响应可由实验得到。在光斜入射情况下,入射光线中 P 分量和 S 分量反射率的差异会导致器件偏振敏感度的差异,而且一般来说,这个因素对器件偏振敏感度的影响大于材料本身的影响。

目前,对探测器的偏振敏感度还没有统一的定义^[12]。本文用偏振相关损耗来定义探测器的偏振敏感度,光电器件偏振相关损耗(PDL)的表达式为

$$I_{\text{PDL}} = 10\lg(P_{\text{max}}/P_{\text{min}}), \quad (1)$$

式中 P_{max} 和 P_{min} 分别对应线偏振光响应的极大和极小值。光斜入射时,假定 P 光和 S 光在器件内的光电转换效率一致,并且认为除反射外,光全部被吸收,这意味着 P 光和 S 光透射率的变化,可以反映响应的变化。设入射角为 α ,进入探测器帽层材料后的折射角为 β ,那么 P 和 S 光的透射率分别为

$$T_{\text{S}} = \frac{n_2 \cos \beta}{n_1 \cos \alpha} \cdot \frac{4 \sin^2 \beta \cos^2 \alpha}{\sin^2(\alpha + \beta)}, \quad (2)$$

$$T_{\text{P}} = \frac{n_2 \cos \beta}{n_1 \cos \alpha} \cdot \frac{4 \sin^2 \beta \cos^2 \alpha}{\sin^2(\alpha + \beta) \cos^2(\alpha - \beta)}, \quad (3)$$

光电器件的偏振相关损耗为

$$I_{\text{PDL}} = 10\lg(T_{\text{P}}/T_{\text{S}}). \quad (4)$$

3 实验

3.1 器件制备

由于微聚焦透镜会影响入射光的偏振态,因此本系统不采用聚焦透镜,制备较大光敏元的测试专用器件是一种可行的办法。图 1 为探测器芯片的光刻版设计图,光敏元大小为 5 mm,P,N 电极均采用环形,以确保面响应的均匀性。采用 p-InP/n-InGaAs/n-InP 外延材料制备器件,材料是在 InP 半绝缘衬底上依次生长厚度为 1 μm 掺 Si 的 n-InP 缓冲层,掺杂浓度 $n > 2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$;厚度为 2.5 μm 并且与 InP 晶格匹配掺 Si 的 n-In_{0.53}Ga_{0.47}As 吸收层,掺杂浓度 $n \approx 3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$;厚度为 0.5 μm 掺 Zn 的 p-InP 窗口层,掺杂浓度 $p > 2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 。清洗干净的外延片经过台面制作、钝化和电极生长等工艺,表面和侧面有 SiN_x 钝化层,p 型接触电极都为 Ti/Pt/Au,n 型接触电极为 CrAu。图 2 为器件的 I-V 特性曲线,器件性能正常,优值因子 R_0A 为 $7.3 \times 10^3 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。

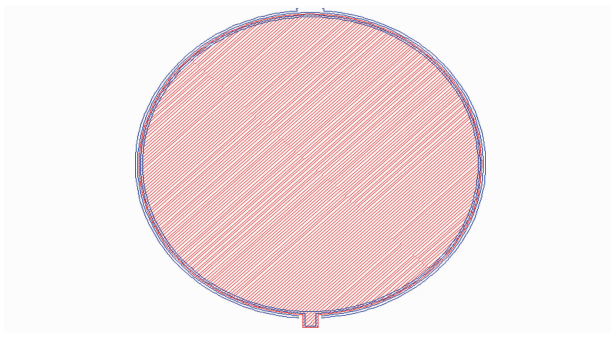


图 1 探测器芯片的光刻版图
Fig. 1 Design pattern of detector chip

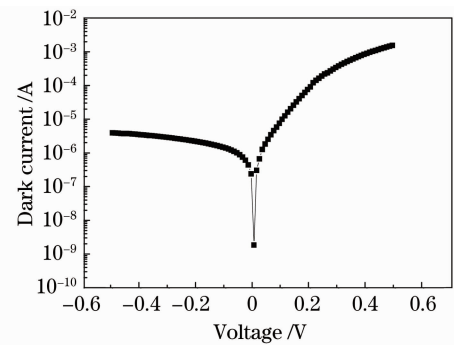


图 2 室温下探测器芯片的 I-V 特性曲线
Fig. 2 I-V curve of InGaAs detector at room temperature

图3为采用激光诱导电流(LBIC)技术测得器件的面响应分布图,激光光斑大小为 $5\ \mu\text{m}$ [如图形3(a)].从LBIC测试结果可以看出,器件的面响应是比较均匀的,若把光斑大小 $5\ \mu\text{m}$ 看成一个小光敏元,则响应非均匀性约在1%.在2 mm范围内对图3(b)中的水平方向的响应求和,可得到任意2 mm范围内的相对响应,2 mm范围内器件的响应非均匀性也在1%左右。

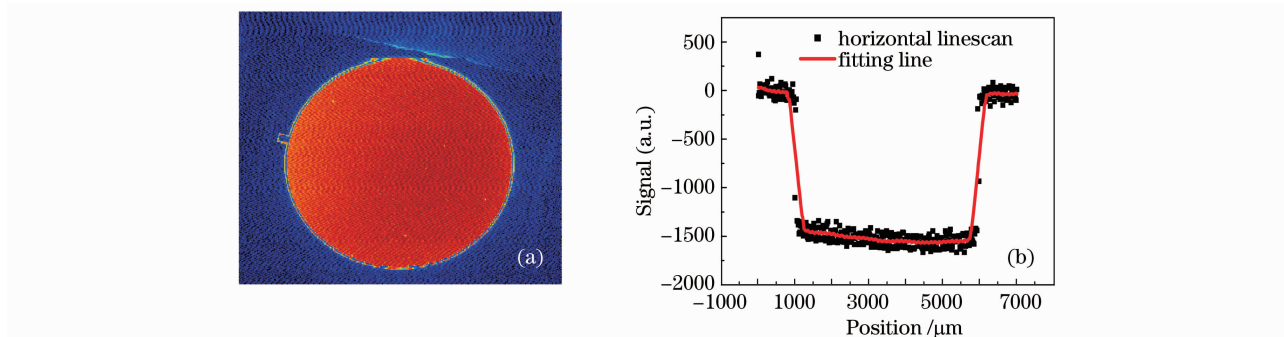


图3 探测器芯片照片及其LBIC测试图

Fig. 3 Photograph and distribution of laser beam induced current (LBIC) scan signals

3.2 测试系统搭建

图4为测试系统设计图,其中光源系统,1342 nm 半导体激光器,出射光斑约为2 mm;2为偏振态控制系统;3为光阑;4为待测 InGaAs 探测器;5为电流放大器;6为示波器;7为 Glan-Thomson 棱镜,消光比大于45 dB;8为 Glan-Thomson 棱镜;9为待测器件。坐标轴方向定义如下:以入射光方向为 x 轴,在纸面内垂直于 x 轴方向为 y 轴,垂直于纸面方向为 z 轴。

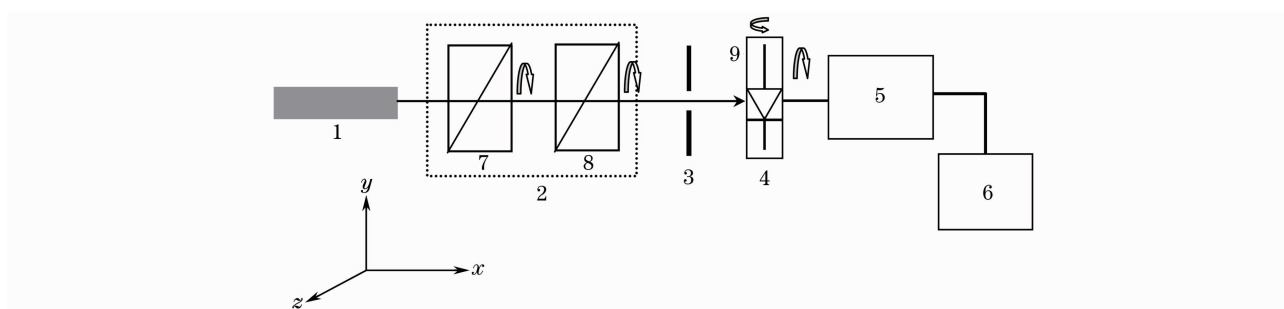


图4 测试系统设计图

Fig. 4 Design of measurement system

在测试系统中采用了两只偏振棱镜,这样可以提高入射到器件上光束的偏振度,同时可以起到调节光强的作用。另外,在本文中采用的是旋转探测器的方式使不同振动方向的线偏振光入射到器件光敏元上,从而得到器件的偏振敏感响应。器件的面响应均匀性会影响测试精度,因为旋转探测器可能会造成光入射到光敏元位置上的微小偏移,引起测试误差。器件的面响应均匀可以有效减小甚至消除此测试误差。

4 结果与讨论

4.1 响应信号随入射角度的变化关系

在系统调试过程中,通过将待测器件置于科伐合金管壳中的方法解决了电磁干扰问题;通过在偏振控制系统中的第二只棱镜后加孔径约为1 mm的光阑,解决了杂散光的问题;利用可见光激光器,调节使得两棱镜、光阑和待测探测器的中心共轴。解决上述问题后,系统的稳定性较好,表现为器件响应信号在10 min 之内的最大

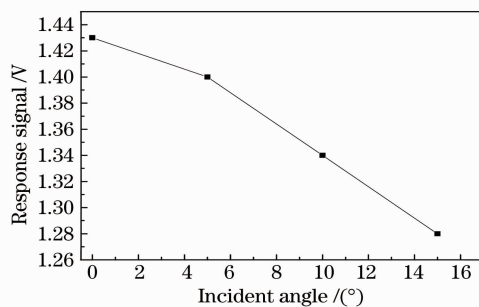


图5 响应信号随入射角度变化的测试结果曲线
Fig. 5 Measurement result of response signal at different incident angles

波动小于1%，约为0.7%。

将器件在 xz 平面内旋转，可得到不同入射角度下器件的响应信号。线偏振光入射时，待测器件的偏振响应信号随入射角度的变化如图5所示。由图5可以看出，斜入射角度越大，待测器件的信号越小。

在激光器波长为1342 nm，根据(2)，(3)式，当只有S方向的线偏振光入射到探测器上时，光的透射率随入射角度的关系如图6(a)所示；当只有P方向的线偏振光入射到探测器上时，光的透射率随入射角度的关系如图6(b)所示。在同入射角度下S光和P光的透射率及器件的响应信号值的变化如表1所示，可以看出入射角度变化时，响应信号的变化值明显大于S或P光透射率的变化。

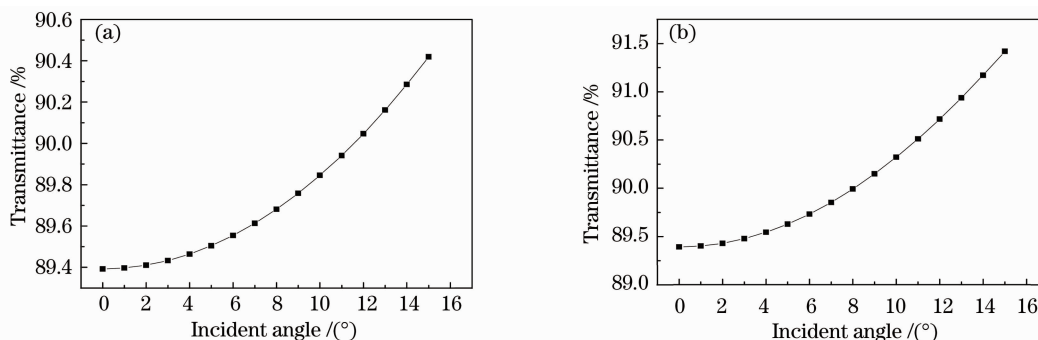


图6 S方向(a)和P方向(b)线偏振光的透射率随入射角度变化关系的理论曲线

Fig. 6 Transmittance of S polarization (a) and P polarization (b) light at different incident angles

表1 不同入射角度下S光和P光的透射率及器件的响应信号值

Table 1 Transmittance of P and S polarization light and response signal of the detector

	0°	15°	Relative variation
Transmittance of S polarization light / %	89.39	90.42	+1.15
Transmittance of P polarization light / %	89.39	91.42	+2.27
Response signal / V	1.43	1.28	-10.49

根据理论分析可知，入射角度越大，光的透射率越大，假设透射的这部分光会被器件的吸收层吸收转化为器件的响应信号，那么入射角度大，响应信号也会大，但测试结果并非如此。测试结果表明，入射角度越大，待测器件的信号越小，这是由于器件的结构设计有关，对进入器件内的光来说，正入射时，其在器件内部可能会发生多次反射、折射后仍能被吸收层吸收，对光响应有贡献，而斜入射时，光在器件内部多次反射、折射后可能会损耗掉了，对光响应没有贡献。

4.2 探测器偏振敏感响应

将器件在 yz 平面内旋转，可得到正入射和斜入射情况下器件的偏振敏感响应。正入射时响应信号随旋转角度的变化关系如图7(a)所示，电流放大器置于 10^{-4} 档。从图7(a)可以看出， 360° 与 0° 位置是重合的，而两位置处的信号也相当，在稳定性误差范围内，说明测试结果可信；响应信号的极小值在 $20^\circ \sim 100^\circ$ 旋转角度区域，响应信号的极大值在 $22^\circ \sim 300^\circ$ 旋转角度区域。计算器件的偏振敏感响应，用偏振相关损耗表示，为

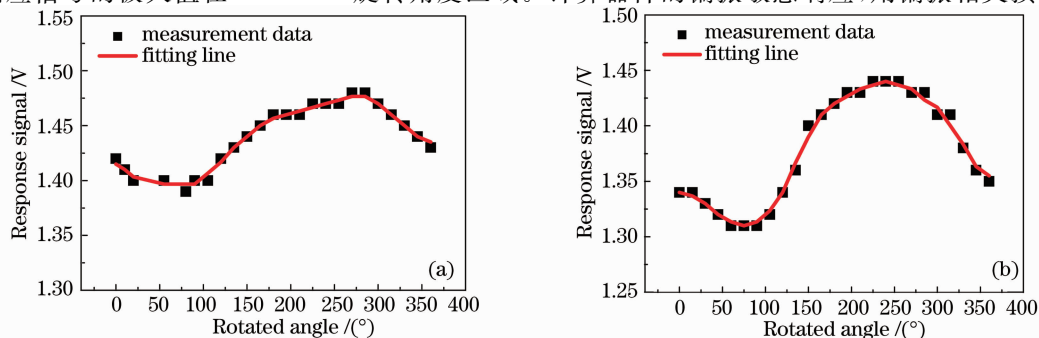


图7 正入射(a)和斜入射(b)时响应信号随旋转角的变化关系

Fig. 7 Relationship between response signal and rotated angle at normal incidence (a) and oblique incidence (b)

0.27 dB。入射角为 10° 时,响应信号随旋转角度的变化关系如图 7(b) 所示,电流放大器置于 10^{-4} 档。从图 7(b) 可以看出, 360° 与 0° 位置是重合的,而两位置处的信号也相当,在稳定性误差范围内,说明测试结果可信;响应信号的极小值在 $45^\circ \sim 105^\circ$ 旋转角度区域,极大值在 $195^\circ \sim 285^\circ$ 旋转角度区域。计算器件的偏振敏感响应,用偏振相关损耗表示,为 0.41 dB。正入射偏振相关损耗为 0.27 dB,入射角为 10° 时为 0.41 dB,说明在斜入射时偏振敏感响应增加。

5 结 论

分析了光电探测器偏振敏感度产生的原因,定义了偏振敏感度的公式,制备了测试用 InGaAs 探测器,搭建了器件偏振敏感度测试系统,并对器件的偏振敏感特性进行了测试。结果表明:测试系统的稳定性为 0.7%;器件响应存在偏振特性,正入射时器件的偏振敏感响应为 0.27 dB,斜入射时器件偏振敏感有所增加,入射角度为 10° 时为 0.41 dB。这些研究工作可为近红外偏振探测或测量提供有价值的参考。

参 考 文 献

- 1 Zhao Qingliang, Wei Huajiang, Guo Zhouyi *et al.*. Application of polarized reflectance spectroscopy in biomedical photonics [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(10): 78~87
赵庆亮, 魏华江, 郭周义 等. 偏振反射光谱在生物医学光子学中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2009, **46**(10): 78~87
- 2 Shi Zhihua. Technology of imaging polarization measurements and its applications [J]. *Infrared*, 2002, (4): 1~5
施志华. 成像偏振测量技术及其应用[J]. 红外, 2002, (4): 1~5
- 3 Luo Ruizhi, Qiao Yanli, Hao Peiming *et al.*. Polarization analysis of optical system in airborne multi-band polarization CCD camera system [J]. *Chinese J. Quantum Electronics*, 2004, **21**(3): 396~400
罗睿智, 乔延利, 郝沛明 等. 偏振 CCD 相机光学系统的偏振特性分析[J]. 量子电子学报, 2004, **21**(3): 396~400
- 4 Lin Yandong, Yao Hejun, Lü Zheng. Polarization dependency characterization of the responsivity of trap detector [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2004, **25**(1): 23~26
林延东, 姚和军, 吕正. 陷光探测器偏振响应特性的研究[J]. 计量学报, 2004, **25**(1): 23~26
- 5 R. W. M Hoogeveen, R. J. vander A, Albert P. H. Goede. Extended wavelength InGaAs infrared (1.0-2.4 μm) detector arrays on SCIAMACHY for space-based spectrometry of the earth atmosphere [J]. *Infrared Phys. Technol.*, 2001, **42**(1): 1~16
- 6 J. P. Moy, J. J. Chabbal, S. Chaussat *et al.*. Buttable arrays of 3000 multiplexed InGaAs photodiodes for SWIR imaging [C]. *SPIE*, 1986, **686**: 93~95
- 7 G. Olsen, A. Joshi, M. Lange. A 128×128 InGaAs detector array for 1.0-1.7 microns [C]. *SPIE*, 1990, **1341**: 432~437
- 8 J. P. Moy, X. Hugon, J. Chabbal *et al.*. 3000 InGaAs photodiode multiplexed linear array for SPOT4 SWIR channel [C]. *SPIE*, 1989, **1107**: 137~151
- 9 Himanshu Dave, Chirag Dewan, Sandip Paul *et al.*. AWiFS Camera For Resourcesat [C]. *SPIE*, 2006, **6405**: 64050x1
- 10 A. M. Joshi, V. S. Ban, S. Mason *et al.*. 512 and 1024 Element Linear InGaAs detector arrays for Near Infrared (1-3 μm) Environmental sensing [C]. *SPIE*, 1992, **1735**: 287~295
- 11 Julio César Quintero, Pierre Tremblay, Marc Breton *et al.*. Polarization-dependent responsivity: a study of germanium and indium gallium arsenide photodetector [J]. *Metrologia*, 2005, **42**(2): 159~167
- 12 Li Guohua, Yu Dehong, Xu Fuyun *et al.*. Polarization effects of grating monochromator and photomultiplier tubes [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 1990, **10**(5): 53~55
李国华, 于德洪, 许福运 等. 光栅单色仪和光电倍增管的偏振效应[J]. 光谱学与光谱分析, 1990, **10**(5): 53~55