

文章编号: 1672-8785(2009)11-0007-05

InGaAs 短波红外探测器的偏振响应特性分析

唐恒敬^{1,2} 李永富^{1,2} 朱耀明^{1,2} 李 淘^{1,2} 李 雪^{1,2} 龚海梅^{1,2}

(1. 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 ;

2. 中国科学院红外成像材料与器件重点实验室, 上海 200083)

摘 要: 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, 都会由于光束的偏振态对探测器的影响而产生显著的误差。这种现象主要是由于许多类型的光探测器存在偏振敏感响应引起的。本文对光电探测器的偏振响应进行了分析, 推导了光电探测器偏振相关损耗的斯托克斯模型。分析了 SiN_x 钝化膜对 InGaAs 探测器偏振响应的影响。结果表明, 无 SiN_x 钝化膜时, 随着入射角度的增加, 偏振响应损耗明显增加, 而随着波长的增加, 偏振响应损耗明显降低; 采用 SiN_x 钝化膜时, 随着波长的增加, 偏振响应损耗先减小后增加。由于设计的 SiN_x 薄膜的增透中心波长为 1550nm, 1310nm 波长处的偏振响应损耗大于 1550nm 处的偏振响应损耗。

关键词: 光电探测器; InGaAs; 偏振; 响应; SiN_x

中图分类号: TB96 **文献标识码:** A

Polarization-dependent Responsivity of InGaAs SWIR Photodetector

TANG Heng-jing^{1,2}, LI Yong-fu^{1,2}, ZHU Yao-ming^{1,2}, LI Tao^{1,2}, Li Xue^{1,2}, Gong Haimei^{1,2}(1. State Key Laboratory of Transducer Technology, Shanghai Institute of Technical
Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;2. Key Laboratory of Infrared Imaging Materials and Detectors, Chinese Academy
of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: In the field of polarization imaging and laser power measurement, an obvious error can be produced due to the effect of light polarization state on a photodetector in any polarization-dependent quantitative measurement. This phenomenon is mainly caused by the fact that many kinds of photodetectors are sensitive to light polarization. In this paper, the polarization-dependent responsivity (PDR) of a photodetector is analyzed, the stokes model of polarization-dependent loss (PDL) is deduced and the effect of a SiN_x passivation film on the PDR of an InGaAs photodetector is analyzed. The analysis result shows that when the SiN_x passivation film is not used, the PDL increases with the increasing of an incident angle and decreases with the increasing of wavelength; and when the SiN_x passivation film is used, the PDL firstly decreases and then increases with the increasing of wavelength. Because the central anti-reflection wavelength of the designed SiN_x passivation film is at 1550nm, the PDL at the wavelength of 1310nm is greater than that at the wavelength of 1550nm.

Key words: photodetector; InGaAs; polarization; responsivity; SiN_x

收稿日期: 2009-06-25

基金项目: 中国科学院知识创新工程青年人才领域前沿项目资助 (C2-32)

作者简介: 唐恒敬 (1981-), 男, 山东郯城人, 博士, 主要从事短波红外探测器及其相关技术的研究。 E-mail: hengjingtang@163.com

1 引言

近年来, InGaAs/InP 双异质结体系广泛用于先进的光电子和电子技术。由于其卓越的性能和高可靠性, InGaAs 探测器被大量用于 $1\mu\text{m} \sim 3\mu\text{m}$ 近红外波段^[4]。采用与 InP 晶格匹配的 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 材料制备的室温 InGaAs 探测器的截止波长约为 $1.7\mu\text{m}$, 它们在光通信等领域已得到了广泛应用, 并已充分显示出了它们的优异性能。InGaAs 探测器在航天、医学成像、工业测温、安全防范等民用领域和精确武器制导、红外报警与识别、侦察与监视等军事领域具有广泛的应用。

光电探测器的响应度是探测器的输出电流与入射的光辐射功率之比。InGaAs 探测器的响应度与多个因素有关, 其中包括材料参数、入射光波长等。除此之外, InGaAs 探测器的响应度还会受到光偏振的影响, 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, 甚至在有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射、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。因此, 在高精度辐射功率测量或成像应用中, InGaAs 探测器的响应度与入射光偏振方向的关系十分重要。

在本文中, 我们推导了光电探测器偏振响应的斯托克斯模型, 并推导了斜入射情况下 InGaAs 探测器的偏振响应, 为实验测量提供了理论基础。

2 用斯托克斯模型表征光电探测器的偏振响应

目前, 对探测器的偏振敏感度还没有统一的定义。在本文中, 我们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

$$PDL = 10 \log \left(\frac{P_{max}}{P_{min}} \right) \quad (1)$$

式中, P_{max} 和 P_{min} 分别对应的是线偏振光响应的极大值和极小值。

在斯托克斯空间中, 光矢量可用一个 4×1 的 Muller 实数矩阵表示:

$$S = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (2)$$

经过光学传输系统后, 入射光和出射光的斯托克斯矢量可通过下式联系起来:

$$S_{out} = M S_{in} \quad (3)$$

式中, M 为光学传输系统的 Muller 矩阵。对于 InGaAs 探测器而言, 它可被看作是一个具有 PDL 的光学传输器件, 那么其琼斯矩阵可表示为

$$J = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \sqrt{P_{min}/P_{max}} \end{bmatrix} \quad (4)$$

令 $\alpha = \sqrt{P_{min}/P_{max}}$, 为了简化问题的复杂性, 不考虑光电器件中的偏振无关损耗以及其它偏振相关效应, 并且认为器件的内量子效率是与偏振无关的。这样, 式 (1) 可表示为

$$PDL_{dB} = -20 \log \alpha \quad (5)$$

有 PDL 的器件的 Muller 矩阵与琼斯矩阵的关系为

$$M = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(1+\alpha^2) & \frac{1}{2}(1-\alpha^2) & 0 & 0 \\ \frac{1}{2}(1-\alpha^2) & \frac{1}{2}(1+\alpha^2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \alpha \end{bmatrix} \quad (6)$$

将式 (6) 代入式 (3), 可得到以下关系式:

$$\begin{aligned} S_{0,out} &= \frac{1+\alpha^2}{2} S_{0,in} + \frac{1-\alpha^2}{2} S_{1,in} \\ S_{1,out} &= \frac{1-\alpha^2}{2} S_{0,in} + \frac{1+\alpha^2}{2} S_{1,in} \\ S_{2,out} &= \alpha S_{2,in} \\ S_{3,out} &= \alpha S_{3,in} \end{aligned} \quad (7)$$

式中, $S_{0,in}$ 、 $S_{1,in}$ 、 $S_{2,in}$ 和 $S_{3,in}$ 分别是入射光的斯托克斯分量, $S_{0,out}$ 、 $S_{1,out}$ 、 $S_{2,out}$ 和 $S_{3,out}$ 分别为出射光的斯托克斯分量。式 (5) 即为斯托

克斯模型表示的光电器件的 PDL 表达式。

3 InGaAs 探测器偏振响应特性的理论分析

在光正入射的情况下, 器件偏振敏感度主要是由以下原因产生的: 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探测器的每一层材料之间不是严格平行的; ③由于外延层和衬底的热扩散系数不同, 晶体结构中产生了机械应力。在正入射情况下, InGaAs 探测器的偏振响应可由实验得到。

在斜入射的情况下, 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对材料本身的影响。InGaAs 探测器一般采用 SiN_x 作为钝化膜。 SiN_x 钝化膜不但起钝化的作用, 而且也是探测器的增透窗口层。在本节中, 我们从理论上分析了在光斜入射的情况下 SiN_x 薄膜对器件偏振敏感度损耗的影响。

3.1 无 SiN_x 钝化膜时器件偏振敏感度的损耗

在理论计算时, 我们认为 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。图 1 为探测器的结构示意图, 设入射角为 α , 进入 InP 后的折射角为 β , 那么 P 和 S 光的透射率分别为

$$T_s = \frac{n_2 \cos \beta}{n_1 \cos \alpha} \frac{4 \sin^2 \beta \cos^2 \alpha}{\sin^2(\alpha + \beta)} \quad (8)$$

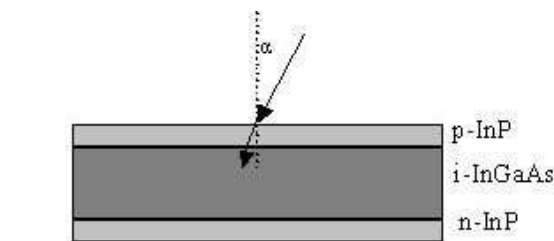
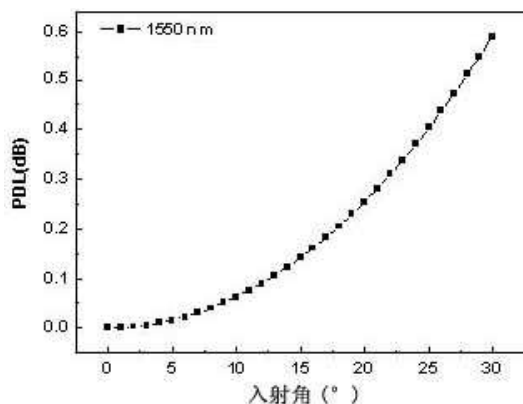


图 1 InGaAs 探测器的结构图

光电器件的偏振相关损耗为

$$PDL = 10 \log \left(\frac{T_p}{T_s} \right) \quad (10)$$

图 2 为不同入射角下器件的偏振响应损耗。随着入射角度的增加, 偏振响应损耗明显增加, 在入射角为 30° 时达到了 0.6dB; 图 3 为不同波长下器件的偏振响应损耗。随着波长的增加, 偏振响应损耗明显降低了。

3.2 存在 SiN_x 钝化膜时器件偏振敏感度的损耗

图 4 为采用 SiN_x 钝化膜的 InGaAs 探测器的结构示意图。 SiN_x 钝化膜不但起钝化的作用, 而且也起到了增透的作用。在器件制备中, 我们采用了 630nm 厚的 SiN_x 薄膜。为了检验厚度为 630 nm 的 SiN_x 薄膜的增透性能, 我们首先对 InP 材料进行了抛光, 抛光后的材料厚度约为 $280\mu\text{m}$ 。然后在其单面生长了 SiN_x 薄膜, 并且以 $1.55\mu\text{m}$

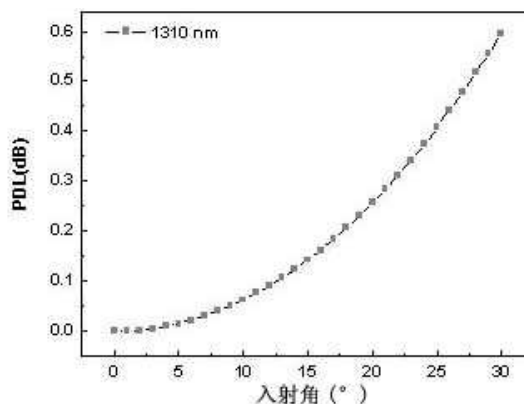


图 2 不同入射角度下器件的偏振响应损耗

为中心波长, 利用 Film Wizard 薄膜设计软件模拟了理论情况下的透射曲线。理论及测试曲线如图 5 所示, 其中 $\blacktriangle$ 为理论情况下的透射曲线, $\blacksquare$ 为双面抛光的 p-InP 的透射曲线, $\bullet$ 为生长 SiN_x 薄膜后的 p-InP 的透射曲线。由图中的曲线可以看出, 生长 SiN_x 薄膜后, 样品的透射率

有了明显增加, 在中心波长附近, 透射率增加了大约 20%。

图 6 为不同入射角度下器件的偏振响应损耗。随着入射角度的增加, 偏振响应损耗明显增加, 但在不同的波长下, 偏振响应损耗变化的趋势会发生变化, 而且 1310nm 波长处的偏振响应

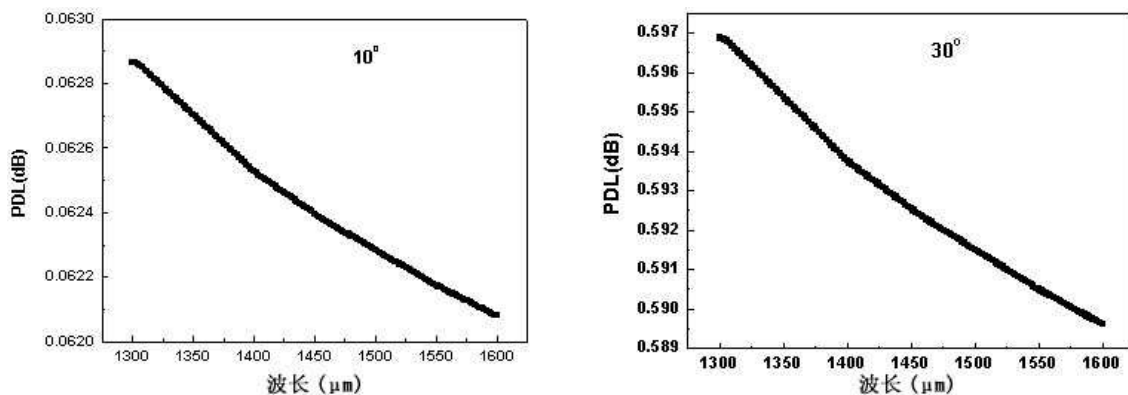


图 3 不同波长下器件的偏振响应损耗

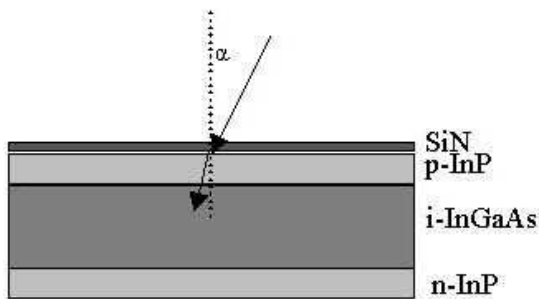


图 4 SiN_x 钝化 InGaAs 探测器的结构图

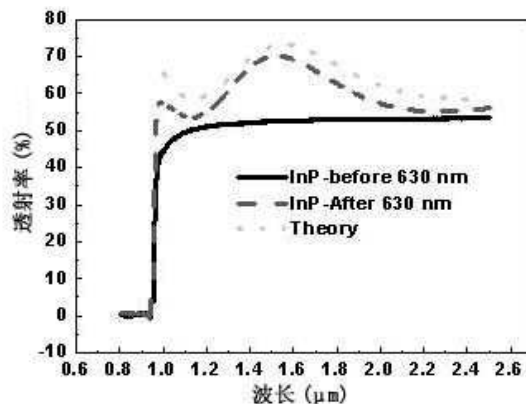


图 5 InP 材料的透射光谱曲线

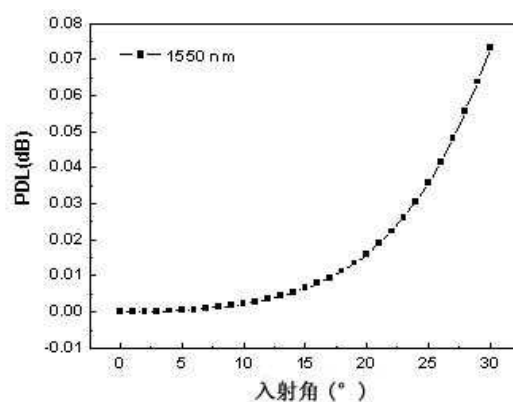
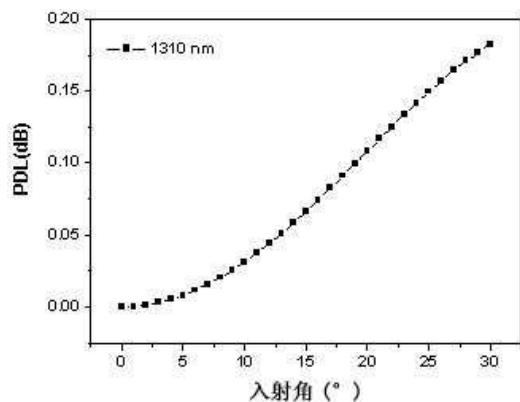


图 6 不同入射角度下 SiN_x 钝化器件的偏振响应损耗

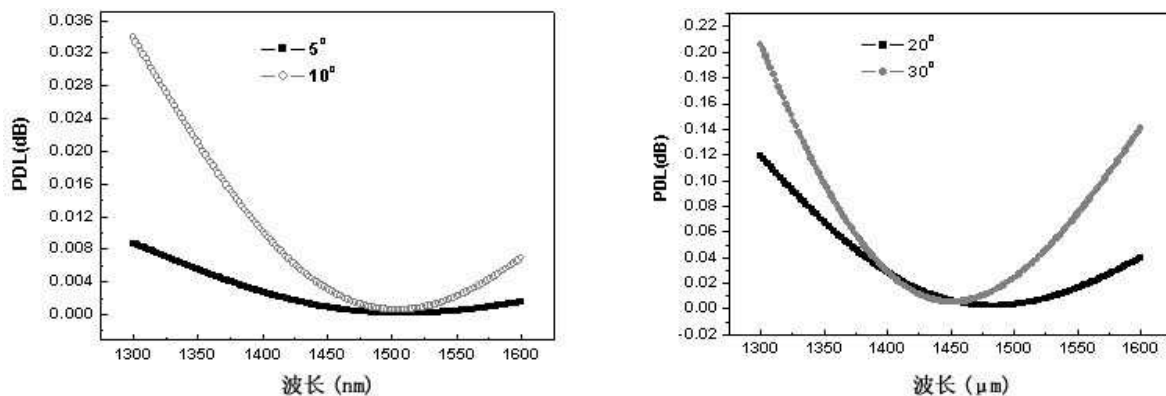


图 7 不同波长下 SiN_x 钝化器件的偏振响应损耗

损耗大于 1550nm 处的偏振响应损耗, 这是因为我们设计的增透膜的中心波长为 1550nm。

图 7 为不同波长下 SiN_x 钝化器件的偏振响应损耗。随着波长的增加, 偏振响应损耗先减小后增加, 在设计中心波长附近达到最小值。而且随着入射角度的增加, 偏振响应损耗最小值处的波长向短波方向移动。这说明在设计增透膜的中心波长附近, 器件的偏振相关响应可达到极小值。

4 结论

本文对光电探测器的偏振响应进行了分析, 提出可用光电探测器的偏振相关损耗来描述光电探测器的偏振响应, 并推导了光电探测器偏振相关损耗的斯托克斯模型。然后, 根据 InGaAs 探测器的制备工艺, 推导了 SiN_x 钝化膜对器件偏振响应的影响。结果表明, 在光斜入射的情况下, 当无 SiN_x 钝化膜时, 随着入射角度的增加, 偏振响应损耗会明显增加, 而随着波长的增加, 偏振响应损耗会明显降低; 当采用 SiN_x 钝化膜时, 随着波长的增加, 偏振响应损耗先减小后增加。由于设计的增透膜的中心波长为 1550nm, 1310nm 波长处的偏振响应损耗大于 1550nm 处的偏振响应损耗。这些工作可为 InGaAs 探测

器偏振响应特性的测量提供理论基础。

参考文献

- [1] Ruud W M Hoogeveen, Ronald J van der A, Albert P H Goede. Extended wavelength InGaAs infrared (1.0-2.4μm) detector arrays on SCIAMACHY for space-based spectrometry of the earth atmosphere [J]. *Infrared Phys. Tech.*, 2001, **42**: 1-16.
- [2] 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.
- [3] Olsen G, Joshi A, Lange M, et al. A 128×128 InGaAs detector array for 1.0-1.7 microns [C]. *SPIE*, 1990, **1341**: 432-437.
- [4] Alan H, Todds, Joseph R, et al. Megapixel InGaAs Arrays for Low Background Applications [C]. *SPIE*, 2005, **5783**: 32-28.
- [5] 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.
- [6] Himanshu Dave, Chirag Dewan, Sandip Paul, et al. AWiFS Camera For Resourcesat [C]. *SPIE*, 2006, **6405**: 64050x1-11.
- [7] A M Joshi, V S Ban, S Mason, et al. 512 and 1024 Element Linear InGaAs detector arrays for Near Infrared (1 ~ 3μm) Environmental sensing [C]. *SPIE*, 1992, **1735**: 287-295.