

doi: 10.3788/gzxb20164501.0104004

p-i-n InP/In_{0.53}Ga_{0.47}As/InP 探测器结构优化

朱敏¹, 陈俊¹, 吕加兵¹, 唐恒敬², 李雪²

(1 苏州大学 电子信息学院, 江苏 苏州 215006)

(2 中国科学院上海技术物理研究所 红外成像材料和器件重点实验室, 上海 200083)

摘 要: 利用半导体仿真工具 Silvaco 对 p-i-n InP/In_{0.53}Ga_{0.47}As/InP 近红外光探测器进行优化仿真. 参考实际器件对红外探测器进行建模, 并将其暗电流、光谱响应仿真结果与实验结果进行拟合, 保证仿真结果的有效性. 以减小探测器的暗电流为目的, 优化其结构. 针对探测器吸收层厚度和吸收层掺杂浓度对暗电流、光响应的影响进行研究, 发现当吸收层厚度大于 0.3 μm 后, 暗电流不再上升, 但光响应随着吸收层厚度的增加而增大; 当吸收层掺杂浓度不断上升时, 器件暗电流不断降低, 当掺杂浓度上升到 2×10¹⁷/cm³ 时, 暗电流达到最低值. 本文还研究了 p-i-n 型探测器的瞬态响应, 探究了响应速度与反偏电压之间的关系, 发现提高反偏电压能减小探测器响应时间.

关键词: InGaAs/InP; 近红外光探测器; 暗电流; 光响应; 瞬态响应

中图分类号: TN362; TN215

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)01-0104004-5

Optimization of p-i-n InP/In_{0.53}Ga_{0.47}As/InP Photodetector

ZHU Min¹, CHEN Jun¹, LÜ Jia-bing¹, TANG Heng-jing², LI Xue²

(1 School of Electronic and Information Engineering, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China)

(2 Key Laboratory of Infrared Imaging Materials and Detectors, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: The two-dimensional (2-D) simulations of p-i-n type InP/In_{0.53}Ga_{0.47}As/InP photodetector at low bias were presented. The modeling results fit the experimental results well, verifying the validity of our model and the desirability of the simulated results. In order to further optimize the detector structure, the effects of thickness and doping concentration of the absorption layer on the dark current and photoresponse were both simulated and discussed. One can find that the dark current doesn't increase when the thickness of the absorption layer is over 0.3 μm. However, the photo-response increases as the thickness of the absorption layer increases. The dark current decreases monotonously as the doping concentration of the absorption layer increases, and when the doping concentration increases to 2×10¹⁷/cm³, the dark current reaches the lowest value. Finally, the transient time of photodetector is also simulated under different reverse bias, one can find that the response time can be decreased with the increase of the reverse voltage.

Key words: InGaAs/InP; Infrared photodetector; Dark current; Photoresponse; Transient response

OCIS Codes: 040.3060; 040.5160; 060.2330; 110.3080

0 引言

作为红外系统的关键部分, 红外探测器已经成为

红外物理和技术发展的中心. 红外探测器是一种能量转换器, 它能够将肉眼看不见的红外辐射转换成容易被测量的能量形式. 目前, 大量半导体材料被用来制作

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61307044), 江苏省自然科学基金(No. BK20130321), 教育部高等学校博士学科点专项科研基金(No. 20133201120009), 教育部留学人员回国启动基金, 中科院红外成像材料与器件重点实验室开放课题(No. IIMDKFJJ-13-01)和江苏省普通高校研究生实践创新计划(Nos. SJLX15-0600, SJLX15-0601)资助

第一作者: 朱敏(1992-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为半导体器件. Email: 20145228025@stu.suda.edu.cn

导师(通讯作者): 陈俊(1981-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为光电器件. Email: junchen@suda.edu.cn

收稿日期: 2015-08-10; **录用日期:** 2015-09-29

<http://www.photon.ac.cn>

红外探测器,例如 Ge、InGaAs、InSb、HgCdTe. 近年来,由三元系化合物 InGaAs 构成的红外光探测器在光电与电子领域中发挥着越来越重要的作用,例如红外夜视和红外成像等^[1-3]. $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 合金有诸多优点:与 InP 衬底晶格匹配,具有直接带隙和较高的电子迁移率,在室温下仍对 $0.9\ \mu\text{m}\sim 1.7\ \mu\text{m}$ 波段的短波红外光敏感等^[4-6]. 这些优点使得由 InGaAs 构成的红外探测器与传统探测器比起来可以省去制冷剂等附加装置,从而缩小了探测器的体积,并减少了生产探测器器件的成本. 在光纤通信中,由 InGaAs/InP 制成的 p-i-n 型二极管,由于对 $1.3\ \mu\text{m}$ 和 $1.55\ \mu\text{m}$ 这两个波段(小损耗)的红外光敏感,已成为长波长光纤通信中的关键光接收元件^[7-10]. 然而,尽管由 InGaAs 构成的探测器有诸多优点,它的暗电流仍然是一个难以避免的问题. 暗电流的存在限制了探测器的探测灵敏度,影响了探测器的探测性能. 为了实现高灵敏度探测,红外探测器需要被优化以减小暗电流,从而更有效地收集信号.

本文建立了可靠的 p-i-n 型红外探测器模型,通过改变吸收层的厚度和掺杂浓度进行仿真,并利用仿真结果改善和优化器件性能,为新型红外探测器的进一步发展提供指导.

1 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$ p-i-n 光电探测器的仿真模型与结构

二维仿真采用 Silvaco 公司的商用半导体器件仿真软件——ATLAS. 在仿真过程中,选用了一些特殊的物理模型:浓度依赖迁移率模型(Conmob)、电场依赖迁移率模型(Fldmob)、俄歇复合模型(Auger)、间接复合模型(Srh)、能带变窄模型(Bgn)和碰撞离化模型(Impact). 由于仿真是在低电压下进行的(不超过 1 V),因此隧穿模型没有被考虑. 图 1 为 p-i-n 型红外光探测器的二维模型^[11]. 这种 p-i-n 型 InP/ $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}$

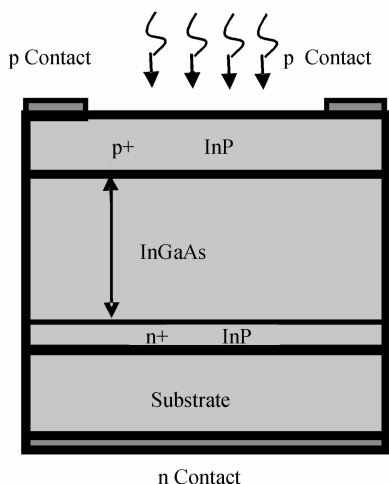


图 1 p-i-n 型红外探测器的二维结构
Fig. 1 2D structure of the p-i-n detector

表 1 仿真关键参量列表

Table 1 List of the key parameters used in the simulations

Parameters	Units	InGaAs	InP
Band gap	eV	0.75	1.34
Effective conduction band density of states	cm^{-3}	2.1×10^{17}	5.7×10^{11}
Effective valence band density of states	cm^{-3}	7.7×10^{18}	1.1×10^{19}
Electron mobility	cm^2/Vs	10000	5000
Hole mobility	cm^2/Vs	500	250
Electron Auger coefficient	cm^6/s	2×10^{-27}	9×10^{-31}
Hole Auger coefficient	cm^6/s	2×10^{-27}	9×10^{-31}
Electron SRH lifetime	s	7×10^{-6}	6×10^{-12}
Hole SRH lifetime	s	7×10^{-6}	6×10^{-12}
Radiative recombination coefficient	cm^3/s	9.6×10^{-11}	1.2×10^{-10}
Permittivity		13.9	12.5

As/InP 的三明治结构生长在 n 型 InP 衬底上,底层是 $0.5\ \mu\text{m}$ 的高掺杂 n 型 InP 缓冲层,其掺杂浓度为 $5\times 10^{18}/\text{cm}^3$;中间层为 $2.5\ \mu\text{m}$ 的轻掺杂 n 型 InGaAs 吸收层,其掺杂浓度为 $5\times 10^{16}/\text{cm}^3$;顶层是 $1\ \mu\text{m}$ 的高掺杂 p 型 InP,其掺杂浓度为 $5\times 10^{18}/\text{cm}^3$,该器件截面大小为 $15\ \mu\text{m}\times 500\ \mu\text{m}$. 另外,辐射光从器件的顶层入射. 表 1 列出了仿真中用到的关键参量.

2 结果与讨论

本文以降低 p-i-n 探测器的暗电流为目的对模型仿真,并通过能带图和电场图进行分析. 在仿真过程中,首先对实验数据进行拟合,以保证实验结果的有效性;接着,通过研究吸收层掺杂浓度和本征层厚度两方面来探讨降低暗电流的方法;最后,通过比较不同反偏电压下的器件响应速度,分析 p-i-n 红外探测器的瞬态响应.

2.1 仿真与实验结果的拟合

图 2 和图 3 分别为仿真得出的 $I-V$ 特性曲线及归一化光谱响应与实验结果的对比如. 两幅图都较好的

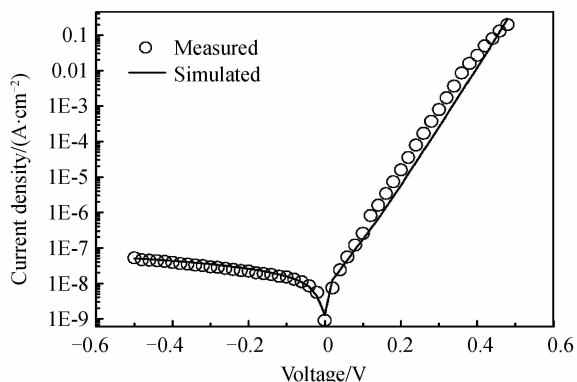


图 2 实验 $I-V$ 特性曲线与仿真结果的比较
Fig. 2 Comparison of experimental and simulated $I-V$ characteristics

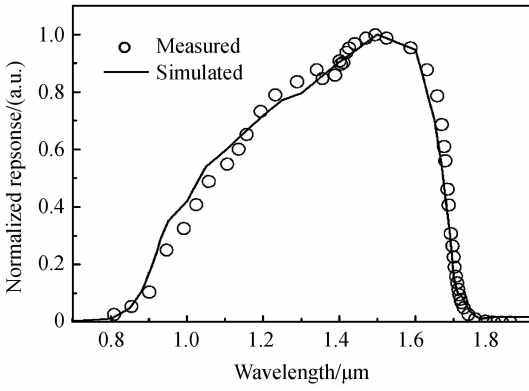


图3 实验归一化光谱响应与仿真结果比较

Fig. 3 Comparison of experimental and simulated normalized response characteristics

拟合了仿真与实验结果,说明仿真中采用了合适的物理模型,也证明仿真结果的有效性.而从图3可以看出,当入射光波长在 $0.95\ \mu\text{m}$ 到 $1.65\ \mu\text{m}$ 之间时,探测器的响应度较高.当入射光波长超过 $1.65\ \mu\text{m}$ 时,InGaAs的吸收系数变得很小,导致响应度变差.

2.2 吸收层不同掺杂浓度下的暗电流

图4为吸收层不同掺杂浓度下的暗电流.从图中可以看出,当吸收层掺杂浓度按 $1\times 10^{16}/\text{cm}^3$ 、 $5\times 10^{16}/\text{cm}^3$ 、 $2\times 10^{17}/\text{cm}^3$ 的顺序上升时,暗电流依次降低.从图3中的插图更能清晰地发现此类现象:随着吸收层掺杂浓度的上升,暗电流单调下降.但当吸收层浓度到达 $2\times 10^{17}/\text{cm}^3$ 时,暗电流达到最小值;超过这个浓度时,暗电流又有上升趋势.因此,为了减小暗电流,可将吸收层掺杂浓度提升至 $2\times 10^{17}/\text{cm}^3$ 或适当提高吸收层掺杂浓度.

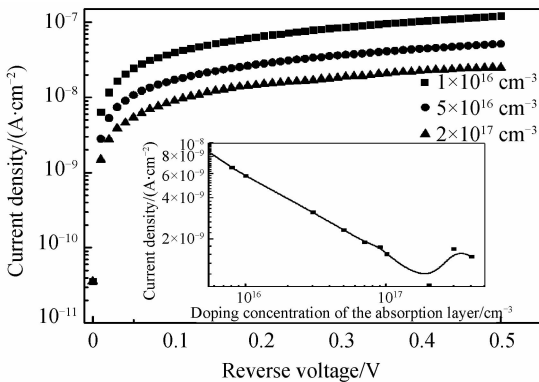
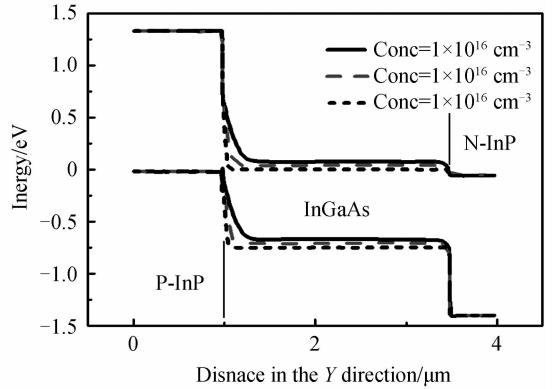


图4 吸收层不同掺杂浓度下的暗电流,插图为一10 mV下吸收层掺杂浓度与暗电流的关系

 Fig. 4 The dark current with different doping concentration of the absorption layer. Inset shows the dark current at $-10\ \text{mV}$ bias vs. doping concentration of the absorption layer

上述现象可通过相应的能带图和电场图来解释.图5为p-i-n型红外探测器在 $-0.5\ \text{V}$ 偏压下的能带图.从图中可以看出,吸收层没有被完全耗尽,且耗尽区宽度随吸收层掺杂浓度的增加而增加.众所周知,对于PN

结,反偏时耗尽区中存在产生电流.反偏时的总电流密度公式和产生电流公式如式(1)和式(2)所示^[12]


 图5 $-0.5\ \text{V}$ 偏压下,吸收层不同掺杂浓度下的能带图
Fig. 5 The energy band diagrams of the photodetector with different doping concentration of the absorption layer at $-0.5\ \text{V}$ bias

$$J_R = J_s + J_{\text{gen}} \quad (1)$$

$$J_{\text{gen}} = \int_0^W e \cdot G dx \quad (2)$$

式中, J_s 为反向饱和电流密度, W 为耗尽区宽度, e 为电子电荷, G 为空间电荷区中电子空穴对的产生速率.从式(2)可以看出,产生电流和耗尽区宽度成正比^[13],而产生电流又为反向电流的主要组成部分,因此通过减小耗尽区宽度,即增加吸收层掺杂浓度,能减小器件暗电流.

对不同吸收层掺杂类型进行仿真,当吸收层掺杂类型换为p型后,得到的暗电流与掺杂为n型时差别不大,这是由于顶层与底层的掺杂浓度与材料完全一致,只是掺杂类型不同;当吸收层掺杂浓度不变,仅改变掺杂类型时,虽然反型结的位置改变了,但器件的耗尽区宽度不变,因此探测器的暗电流仿真结果不变.

图6为吸收层不同掺杂浓度下的光响应度.图6可明显看出,随着本征层掺杂浓度的升高,其光响应度越低,因此本征层掺杂浓度上升会造成光电器件灵敏度下降.但当本征层掺杂浓度为 $2\times 10^{17}/\text{cm}^3$ 时,与吸

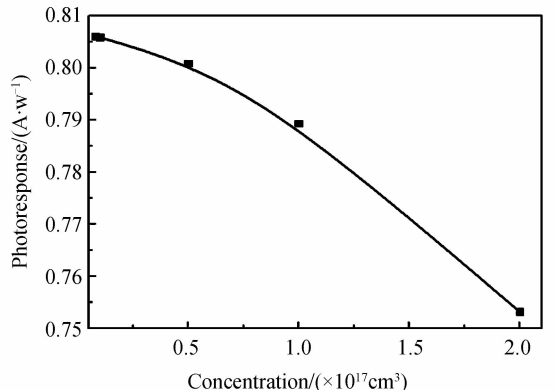


图6 吸收层不同掺杂浓度下的光响应

Fig. 6 The photoresponse with different doping concentration of the absorption layer

收层掺杂浓度为 $1 \times 10^{16} / \text{cm}^3$ 时相比,光响应度下降约 0.05 A/W,但暗电流下降为后者的 1/5(从 121 nA/cm² 下降为 25 nA/cm²),综合考虑,增加吸收层掺杂浓度能降低暗电流且对器件灵敏度影响较小.

2.3 吸收层不同厚度下的暗电流

图 7 为吸收层不同厚度下的暗电流,从图中插入的放大图可以看出,暗电流随着吸收层厚度的增加(从 0.1 μm 增加到 0.3 μm)而增加,当厚度超过 0.3 μm 后,其暗电流就不再变化.这个现象可以从图 8 中得到解释.图 8 为吸收层厚度从 0.1 μm 到 1 μm 的电场图,从图中可以看出:当吸收层厚度不大于 0.3 μm 时,整个吸收层被完全耗尽;而当厚度大于 0.3 μm 后,耗尽区宽度不变.前面已经提过,产生电流与耗尽区宽度有关,当吸收层厚度不大于 0.3 μm 时,暗电流随着吸收层厚度的变大而增大;当吸收层厚度大于 0.3 μm 后,暗电流基本不变.

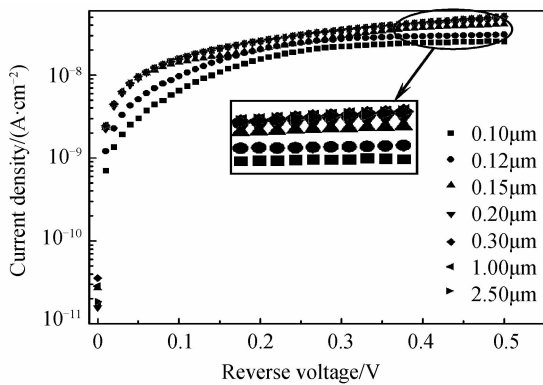


图 7 吸收层厚度不同时的暗电流

Fig. 7 Dark current with different thickness of the absorption layer

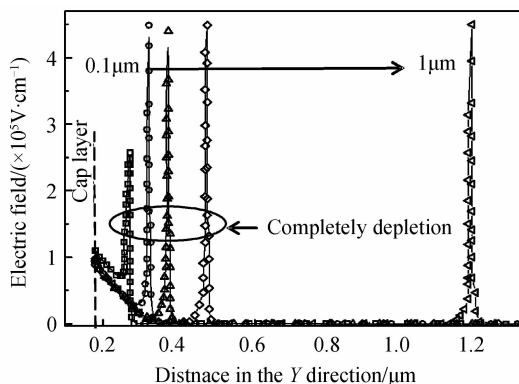


图 8 吸收层厚度不同时的电场图

Fig. 8 Electric field distribution for different thickness of the absorption layer

图 9 为吸收层厚度不同时的光响应度,从图中可以看出,吸收层厚度越厚,其对光的吸收越充分.结合图 7 可以看出,若适当增加吸收层厚度,其产生的光电流会更大,而暗电流不受太大影响.

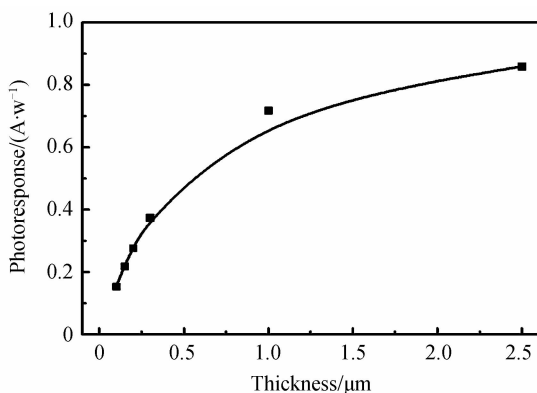


图 9 吸收层厚度不同时的光响应度

Fig. 9 The photoresponse for different thickness of the absorption layer

2.4 不同反偏电压下的瞬态响应

研究不同反偏电压下 p-i-n 红外探测器的瞬态响应.图 10 为 0.1V 到 2V 范围内,该 p-i-n 探测器从有光照到没光照的瞬间电流的变化.响应时间为电流从平稳值(有光照时)降到原电流 1/10(无光照时)的时间.从图 10 中的插图能清晰地看出,反偏电压与响应速度的关系:电压越大,响应速度越快.对于光伏探测器,其响应时间由 3 个因素组成^[14]:扩散时间、漂移时间和 RC 延迟时间,其中扩散时间和漂移时间都很小,可忽略不计.RC 延迟时间由 PN 结电容和管芯电阻、负载电阻构成,而异质结电容为

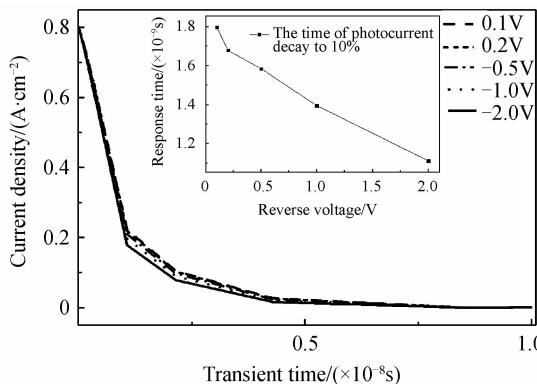


图 10 不同反偏电压下的瞬态响应

Fig. 10 Transient response under different reverse bias

$$C_j = A \left[\frac{\epsilon_1 \epsilon_2 q N_{A1} N_{D2}}{2(\epsilon_1 N_{A1} + \epsilon_2 N_{D2})(V_D - V)} \right]^{1/2} \quad (3)$$

式中, A 为结面积, ϵ_1 、 ϵ_2 分别为 p 型材料和 n 型材料的介电常量, N_{A1} 、 N_{D2} 分别为 p 区和 n 区掺杂浓度, V_D 为异质结势垒, V 为外加电压.由异质结电容的公式可知,反偏电压越大, C_j 越小, RC 延迟时间也会随之减小.因此,提高反偏电压能减小 p-i-n 光电探测器响应时间,即提高频率响应.以上分析为器件交流特性模拟的初步探讨,后续工作会结合器件的交流响应实验进行拟合分析.

3 结论

本文在建立可靠的 p-i-n InP/In_{0.53}Ga_{0.47}As/InP 红外探测器的基础上,对该器件进行了仿真.器件仿真结果与实验结果相吻合,并且通过改变吸收层厚度和掺杂浓度,得到暗电流与耗尽区宽度的关系.由理论分析得出,通过增加吸收层掺杂浓度可以有效降低暗电流,且对探测器灵敏度影响不大,掺杂浓度的最佳值为 $2 \times 10^{17} / \text{cm}^3$;分析还得出,当吸收层宽度大于 $0.3 \mu\text{m}$,暗电流几乎不再增加,因此可以使用较宽的吸收层来提高光吸收率而不用担心产生较大的暗电流.另外,通过对瞬态响应的仿真,发现提高反偏电压能减小探测器的响应时间,即提高频率响应.

参考文献

[1] TURAN E. Fiber grating spectra[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, **15**(8): 1468-1488.

[2] FUKUCHI K, KOJIMA S, HISHIDA Y, *et al.* Optical water-level sensors using fiber Bragg grating technology[J]. *Hitachi Cable Review*, 2002, **21**(3): 23-28.

[3] NELLEN Ph M, MAURON P, FRANK A, *et al.* Reliability of fiber Bragg grating based sensors for downhole applications [J]. *Sensors and Actuators A*, 2003, **103**(3): 364-376.

[4] SU An, QIAO Xue-guang, JIA Zhen-an, *et al.* Temperature and pressure responsive characteristics of polymer packaged fiber Bragg grating with large dynamic range [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, **32**(2): 224-227.

孙安, 乔学光, 贾振安, 等. 聚合物封装光纤布拉格光栅传感器温度压力特性研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(2): 224-227.

[5] FENG De-quan, QIAO Xue-guang, WANG Hong-liang, *et al.* Experimental study of large range enhanced pressure sensitivity concerning fiber Bragg grating pressure sensor[J].

Acta Photonica Sinica, 2007, **36**(7): 1273-1276.

冯德全, 乔学光, 王宏亮, 等. 大范围光纤 Bragg 光栅压力传感器增敏实验研究[J]. *光子学报*, 2007, **36**(7): 1273-1276.

[6] ZHAN Ya-ge, CAI Hai-wen, GENG Jian-xin, *et al.* Study on aluminum groove encapsulating technique and sensing characteristics of FBG sensor [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(8): 952-955.

詹亚歌, 蔡海文, 耿建新, 等. 铝槽封装光纤光栅传感器的增敏特性研究[J]. *光子学报*, 2004, **33**(8): 952-955.

[7] MOREY W W, MELTZ G, GLENN W H. Fiber Bragg grating sensors[C]. SPIE, 1989, **2507**: 98-107.

[8] HECHT J. 光纤光学[M]. 贾东方, 余震虹, 王肇颖, 译. 北京: 人民邮电出版社, 2004.

[9] 廖延彪. 光纤光学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.

[10] 申国铤, 张铁强. 光电子学[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1994.

[11] ZHANG Ying, LIU Zhi-guo, GUO Zhuan-yun, *et al.* A high-sensitivity fiber grating pressure sensor and its pressure sensing characteristics[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(1): 89-91.

张颖, 刘志国, 郭转运, 等. 高灵敏度光纤光栅压力传感器及其压力传感特性的研究[J]. *光学学报*, 2002, **22**(1): 89-91.

[12] SZE S M, KWOK K N. Physics of semiconductor devices [M]. 3rd edition, 2006.

[13] LINGA K R, OLSEN G H, BAN V S, *et al.* Dark current analysis and characterization of In_xGa_{1-x}As/InAs_yP_{1-y} graded photodiodes with $x > 0.53$ for response to longer wavelengths ($> 1.7 \mu\text{m}$)[J]. *Journal Lightwave Technology*, 1992, **10**(8): 1050-1055.

[14] BIAN Jian-tao, CHENG Xiang, CHEN Chao. Frequency response research of photodetector by laplace transform[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **36**(10): 1804-1807.

卞剑涛, 程翔, 陈朝. 基于 Laplace 变换法的光电探测器频率响应研究[J]. *光子学报*, 2006, **36**(10): 1804-1807.