

文章编号: 1001-3806(2007)01-0083-03

硅光电二极管钝化膜的抗辐射性能研究

张建新^{1,2}, 陈永平^{1*}, 梁平治¹

(1. 中国科学院 上海技术物理研究所, 上海 200083; 2 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘要: 为了研究硅光电二极管钝化膜的抗辐射性能, 采取了 0.8 MeV 电子在 4 个辐照剂量 ($10^{13} \text{ cm}^{-2} \sim 10^{14} \text{ cm}^{-2}$) 分别辐照 3 种不同厚度二氧化硅钝化的光电二极管的方法, 比较了光电二极管光电流变化率和暗电流变化率, 得到了 3 种钝化厚度的光电二极管的性能参数有不同程度衰减的结果。辐照后光电二极管的光电流衰减强烈依赖入射光波长, 在短波和长波阶段衰减明显, 而在中波阶段 (600nm ~ 800nm) 基本不衰减。另外, 暗电流变化率随着辐照剂量迅速增加, 当辐照剂量达到 $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 时, 短波光电流仅为辐照前的 80%, 暗电流为辐照前的 40 倍。实验中还发现, 薄钝化的二极管的光电流衰减最小, 其暗电流增加最显著。结果表明, 钝化膜的辐射特性与器件结构和钝化膜工艺密切相关。

关键词: 光电子学; 钝化膜; 电子辐照; 抗辐射

中图分类号: TN315+.2 **文献标识码:** A

Radiation hardness study of passivation film on Si photodiode

ZHANG Jian-xin^{1,2}, CHEN Yong-ping¹, LIANG Ping-zhi¹

(1. Shanghai Institute of Technical Physics, the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China; 2 Graduate School, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract With 0.8 MeV electron irradiating the passivation film with three different thickness of SiO_2 at 4 radiation dosages ($10^{13} \text{ cm}^{-2} \sim 10^{14} \text{ cm}^{-2}$), the radiation hardness of the passivation film was studied through comparing the photocurrent and dark current of the photodiode. It is found after radiation, the characteristics of the photodiodes degrade to some extent. The photocurrent decreases at short and long wavelength, never decrease at middle wavelength (600nm ~ 800nm). On the other hand, the dark current increases with radiation dosage. When the radiation is $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$, the photocurrent is only 80% of that before radiation and the dark current is 40 times of that before radiation. In addition, for photodiodes passivated with thin SiO_2 , photocurrent decreases slightly, however dark current increases remarkably. Results show that the radiation effect has a relationship with device structure and technics of the film.

Key words optoelectronics; passivation film; electron irradiation; radiation hardness

引 言

硅光电器件越来越多的应用到空间辐射、核辐射等辐射环境当中。这对器件的抗辐射性能提出很高的要求。提高光敏面钝化膜的抗辐射性能是提高器件抗辐射性能的简单、有效的方法。通过选择钝化膜的材料、结构来提高器件抗辐射性能的研究已有报道^[1-3]。本文中主要研究不同厚度二氧化硅作为钝化膜的辐射效应, 并且分析辐射效应的机制。

1 试验内容和仪器

1.1 样品和辐照条件

实验中所用样管为自行制备的光电二极管。选用

作者简介: 张建新 (1981-), 女, 硕士研究生, 主要从事光电器件的抗辐射性能研究。

* 通讯联系人。E-mail: chen_yip@mail.sitp.ac.cn

收稿日期: 2005-12-05; 收到修改稿日期: 2006-01-09

N 型 <111> 晶向硅衬底, 衬底电阻率为 $1000 \Omega \cdot \text{cm}$ 。采用离子注入和背面扩散工艺形成 PN 结。光敏面表面热生长二氧化硅作为钝化膜, 钝化膜厚度分别为: 70nm, 120nm 和 200nm, 对应的光电二极管命名为: A, B 和 C。共进行了 4 次辐照实验, 每组实验样品都包括 A, B 和 C 3 种光电二极管。辐照源为直线电子加速器, 提供 0.8 MeV 的电子。辐射剂量分别为 $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$, $2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$, $5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 和 $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 。辐照时二极管未加偏压。

1.2 测试过程

辐照前后分别测试了光电二极管的绝对光谱响应和暗电流。定义辐照变化率 $R = A/A_0$, A 为辐照后参数, A_0 为未辐照的参数。

2 实验结果

2.1 光电流

电子辐照后, 3 种样管的光电流在短波和长波都

有明显的衰减,而在中间波段(600nm~800nm)基本没有衰减,保持了辐照前的光电流值(见图1)。

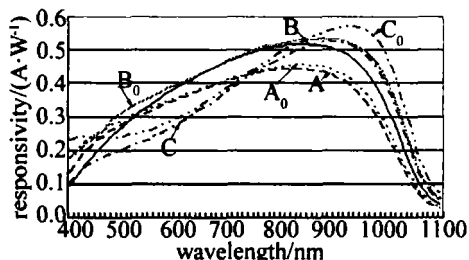


Fig 1 Compare of spectrum of three samples before and after radiation where A_0 , B_0 , C_0 are spectrum before radiation, radiation dosage $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$

不同钝化膜厚度的光电二极管,光电流的衰减存在明显差异。薄钝化的样管在短波和长波波段的电流变化率都要高于厚钝化样管。图2表明,当辐射剂量为 $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 时,3个样管在波长为400nm处的光电流变化率分别为80%,60%,40%。在波长为1100nm处,薄钝化样管的光电流变化率为87%,厚钝化的两个样管的变化率相同,均为71%。从光电流的衰减程度,可以得出结论:钝化膜越薄,光电流衰减越轻微,抗辐射能力越强。

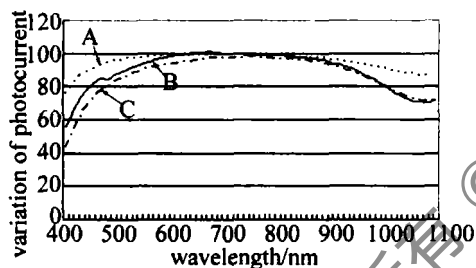


Fig 2 Relationship between variation of photocurrent and wavelength, radiation dosage $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$

2.2 暗电流

电子辐照后,光电二极管暗电流增加。随着辐射剂量的增加,暗电流增加越明显。当辐射剂量达到 $2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 时,暗电流增加了一个数量级(见图3)。

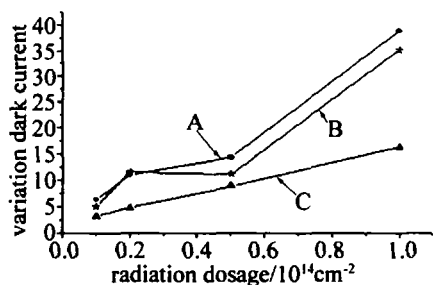


Fig 3 Relationship between variation of dark current and radiation dosage

不同钝化膜厚度的光电二极管暗电流变化率表现不同,随着钝化膜厚度的增加,暗电流变化率减小。这说明钝化膜越厚,暗电流的辐射效应越小,光电二极管的抗辐射性能越好。

3 分析讨论

3.1 光电流的衰减

硅材料对短波光吸收系数很大,吸收长度很短^[4]。400nm的光在硅中的吸收长度只有 $0.13 \mu\text{m}$,在非常靠近表面就被完全吸收。所以,光电二极管的短波光电流主要取决于表面状态,载流子的表面复合速度和表面区的少子寿命。电子辐照在硅材料内部产生缺陷^[5,6],导致少子寿命减小,光电流衰减。另外,电子辐照使 Si/SiO₂ 界面处的界面态密度增加,使得二极管表面复合速度很高,表面光电流减小。因此,短波光电流在电子辐照后衰减非常严重。

光电流在中间波段(600nm~800nm)的变化率在98%以上,几乎没有衰减。这是因为这一波段光产生的光电流不受少子寿命和复合速度的影响。实验中所用二极管的表面P区注入结深约为 $0.2 \mu\text{m}$,空间电荷区宽度约为 $9 \mu\text{m}$ 。而600nm的光在硅中的吸收长度为 $2.3 \mu\text{m}$,800nm的光吸收长度为 $9.8 \mu\text{m}$ 。中间波段的光正好落在耗尽区,产生的光电流只包含漂移项,与少子寿命无关。故这一波段的光电流基本没有辐射衰减。

波长大于800nm的光在硅中的吸收长度大于 $10 \mu\text{m}$ 。因此,长波段的入射光将穿过表面P区和耗尽区,最后被衬底N区吸收。产生的光电流包括漂移项和扩散项,其中扩散项受到N区少子寿命的影响。波长越长,扩散项比重越大,受少子寿命影响越明显。所以,电子辐照后长波段的光电流将要衰减,并且随着波长增加,衰减越严重。

3.2 暗电流增加

暗电流测试是在反偏电压10V下进行的。此时的暗电流 J 由3项决定^[7]:

$$J = J_d + J_g + J_s = \frac{qD_p n_i^2}{L_p N_d} + \frac{q n_i W}{2\tau_g} + \frac{1}{2} q n_i S \quad (1)$$

式中, J_d 为少子扩散电流, J_g 为耗尽区产生电流, J_s 为表面复合电流, q 为电子电荷, D_p 为空穴扩散系数, n_i 为本征载流子浓度, L_p 为空穴扩散长度, N_d 为衬底掺杂浓度, W 为耗尽区宽度, τ_g 为产生寿命, S 为表面复合速度。

根据衬底掺杂浓度 N_d 和外加电压,可以计算耗尽区宽度 $W = 37 \mu\text{m}$,产生电流比扩散电流大两个数量级。所以暗电流 J 由耗尽区产生电流 J_g 和表面复合电流 J_s 决定,即:

$$J = J_g + J_s = q n_i (W / \tau_g + S) / 2 \quad (2)$$

辐照在 Si/SiO₂ 界面处感生界面态,导致表面复合速度 S 增加;同时,辐照在硅材料内引入缺陷,导致产生的

寿命 τ_g 减小。最终导致暗电流增加。

3.3 不同钝化厚度的二极管的参数衰减

光谱衰减表明薄钝化样管的抗辐射性能更好。但是,暗电流变化率表明厚钝化样管抗辐射性能更好。下面分析可能导致这种实验结果的原因。

光电二极管的短波光电流主要取决于表面状态。辐照在 Si/SiO₂ 界面处感生界面态,界面态密度随氧化层厚度和剂量的增加而增加^[8]。SiO₂ 厚度为 100nm 的界面结构经 $2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 剂量辐照后,界面态密度将增加 1 个量级。钝化膜越厚的二极管,辐照产生的界面态密度越大,表面复合速度越大,表面光电流衰减越严重。因此,3 种样管短波波段的光电流衰减程度不同。薄钝化样管表现出更好的抗辐射性能。

光谱在长波段衰减是因为光电流的扩散项减小,也就是衬底 N 区的少子(空穴)寿命减小。而少子寿命主要取决于深能级缺陷。

反偏工作下的光电二极管,其暗电流主要由耗尽区的产生电流决定。产生电流是复合中心热激发的电子空穴,在强电场下漂移产生的。电流值由温度和充当复合中心的缺陷密度决定。由于耗尽区内载流子数目非常少,所有能级的缺陷都可以充当复合中心。所以,暗电流衰减的根本原因是辐射引入的缺陷密度。

根据以上分析猜测:辐射在 A、B 和 C 3 种样管引入的缺陷类型和密度不同。此说法有待于进一步实验证明^[9]。

4 结 论

经电子辐照后,光电二极管的光电流下降,暗电流

增加。短波段和长波段的光电流衰减明显,中间波段的光电流基本不衰减。3 种钝化厚度的光电二极管表现出不同的参数衰减现象。薄钝化的二极管在光谱响应上表现出良好的抗辐射性能,但是暗电流衰减比厚钝化的二极管更严重。这可能是因为薄钝化和厚钝化的工艺时间不同,辐射引入的缺陷不同。要设计出良好抗辐射钝化方案,需要综合考虑光电流和暗电流这两个参数,选择合适的钝化膜厚度。

参 考 文 献

- [1] ZHANG JX. Influence of reliability of silicon photodiode by radiation [J]. Infrared, 2005, 26(9): 25~31 (in Chinese).
- [2] LUO Zh K. Research and development of the techniques of laser radiation protection and optoelectronic countermeasures [J]. Laser Technology, 2003, 27(5): 423~427 (in Chinese).
- [3] ZHANG JL. The study of passivated thin film resist V radiation [J]. Semiconductor Magazine, 1997, 22(4): 17~22 (in Chinese).
- [4] TANG D Y, MI Zh Y. Fundamentals of optoelectronic devices [M]. Shanghai Shanghai Scientific and Technical Literature Press 1989 184~224 (in Chinese).
- [5] KORSHUNOV F P, BOGATYREV Y V, LASTOVSKY S B *et al* Investigation of radiation induced defects in the electron irradiated power transistor structures [J]. Vacuum, 2003, 70: 197~200.
- [6] HAZDRA P, DORSCHNER H. Radiation defect distribution in silicon irradiated with 600keV electrons [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2003, B201(3): 513~519.
- [7] LAI Z W. Radiation hardening electronics radiation effects and hardening techniques [M]. Beijing National Defence Industry Press 1998 87~131 (in Chinese).
- [8] CAO J Zh. Radiation effect of semiconductor material [M]. Beijing Science Press 1993. 66~192 (in Chinese).
- [9] CUI C, YANG D R, YU X G *et al* Minority carrier lifetime of thermal oxide passivated CZ Si wafers [J]. Chinese Journal of Semiconductors 2003, 24(1): 54~57 (in Chinese).
- [10] Heilongjiang University, 1994, 11(2): 70~71 (in Chinese).
- [6] PAN X M, LAN H J. The polarization of reflected light and refracted light and the amount of the polarization [J]. Journal of Lüzhou Teachers College, 2004, 19(1): 119~120 (in Chinese).
- [7] MOVILLA JM, PUQUERO G, MEJIAS P M. On the measurement of the generalized degree of polarization [J]. Optical and Quantum Electronics, 2000, 32(12): 1333~1342.
- [8] CAO H, SONG L K, PENG H D *et al*. The study of the relationship between polarized light's incident azimuth and intermediary reflectance [J]. Laser Technology, 2005, 29(1): 104~105 (in Chinese).
- [9] LIAO Y B. Polarization optics [M]. Beijing Science Press, 2003, 58 (in Chinese).
- [10] LI G H. Optics [M]. Jínan Shandong Education Press, 1990, 159~164 (in Chinese).
- [11] WEI G H, YAN J X. Matrix optics [M]. Beijing Weapon Industry Press, 1995, 186~190 (in Chinese).

(上接第 82 页)

参 考 文 献

- [1] LI J Zh. Optical handbook [M]. Xi'an: Shanxi Science and Technology Press, 1986, 546~560 (in Chinese).
- [2] BORN M, WOLF E. Principles of optics [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1999, 70~71.
- [3] GONG J X, LU Zh Y, QU W J. Research progress in polarizer [J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2004, 19(4): 260~265 (in Chinese).
- [4] ZHANG R J, ZHOU P, LIL. Design and fabrication of a novel infrared reflection polarizer [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2003, 24(6): 399~401 (in Chinese).
- [5] XU W J. Reflection ratio of energy current and polarization degree of transmission light on glass boundary [J]. Journal of Natural Science of