

文章编号:1001-9014(2011)05-0412-05

Si基HgCdTe变面积光伏探测器的变温特性研究

张 珊^{1,2}, 胡晓宁^{1*}

(1. 中国科学院红外成像材料与器件重点实验室, 上海 200083; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:通过变面积Si基HgCdTe器件变温*I-V*测试和暗电流特性拟合分析,研究了不同偏压下n-on-p型Si基HgCdTe光伏器件的暗电流成分与Si基HgCdTe材料少子扩散长度和少子寿命随温度的变化规律.在液氮温度下,随着反向偏压的增大器件的表面漏电流在暗电流中所占比重逐渐增加.在零偏压下,当温度低于200 K时材料的少子扩散长度随温度的升高而变大,而高于200 K时材料的少子扩散长度随温度的降低逐渐减小.将汞空位掺杂的p型Si基HgCdTe材料少子寿命的变温曲线与常规衬底材料的少子寿命变温曲线进行比较,发现Si基HgCdTe材料少子寿命接近常规衬底外延薄膜材料水平.

关键词:Si基HgCdTe;少子寿命;少子扩散长度;变温特性

中图分类号:TN215 文献标识码:A

Temperature dependent characteristics of HgCdTe variable-area photovoltaic detectors on Si substrates

ZHANG Shan^{1,2}, HU Xiao-Ning^{1*}

(1. Key Laboratory of Infrared Imaging Material and Detectors, Shanghai Institute of Technical Physics, Shanghai 200083, China;
2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: The variable-area HgCdTe/Si photovoltaic detector was investigated in this paper. By analyzing the relationship of dark current density (J) and the ratio of perimeter to area (p/A) under different reverse bias, it is indicated that the n-on-p type HgCdTe/Si photovoltaic detector has a significant surface leakage current under larger reverse bias. The minority carrier diffusion length at different temperature can be obtained by fitting the relationship between the product of zero-bias resistance and area (R_0A) and p/A . It shows that the minority carrier diffusion length increases with the increase of temperature below 200 K, while the minority carrier diffusion length decreases with the increase of temperature above 200 K. The minority carrier lifetime of Hg-vacancy p-type HgCdTe on Si substrate was calculated from the minority diffusion length at different temperature. It was concluded that the lifetime of HgCdTe/Si minority carrier and its relationship with the temperature is the same as that of HgCdTe/CdZnTe material by comparing the minority carrier lifetime for these two kinds of materials.

Key words: HgCdTe on Si substrate; minority carrier lifetime; minority carrier diffusion length; temperature dependent characteristics

PACS: 07.57.Kp; 73.61.Ga; 73.50.-h; 81.70.Pg

引言

Si基HgCdTe红外焦平面探测器是典型的第3代红外焦平面探测器,它具有大面阵、低成本、与Si读出电路热匹配等优点^[1-2],对推动红外探测器在军用和民用方面的广泛应用具有重要的意义^[3].国外对Si基HgCdTe红外焦平面探测器的研究开始于上

世纪80年代,目前已具备6英寸Si衬底HgCdTe材料的生产能力,器件规模达到 $2\text{ K} \times 2\text{ K}$ 、 2560×512 ^[4],中、短波Si基HgCdTe器件的性能已与CdZnTe基器件的性能相当.国内在Si基HgCdTe焦平面方面的研究与国外存在一定差距,还需要对材料性能和器件工艺进行大量细致的研究.少子寿命是材料特征参数中的重要参数之一,对材料性能改

收稿日期:2010-10-28,修回日期:2010-11-21

Received date: 2010-10-28, revised date: 2010-11-21

基金项目:中国科学院知识创新工程前沿前瞻性项目(批准号:C2-53)

作者简介:张珊(1984-),女,山东淄博人,博士,主要研究领域为Si基HgCdTe焦平面探测器技术,E-mail:qfzhangshan@163.com.

* 通讯作者:E-mail: xnhu@mail.sitp.ac.cn.

进具有参考意义^[5-6]. 获得少子寿命的方法有很多, 如光电导衰减法、微波反射光电导衰减法、器件法等^[6-8].

本文通过变面积 Si 基 HgCdTe 器件变温 I - V 测试, 分析了不同面积器件的暗电流密度 (J) 与器件周长面积比 (P/A) 的关系曲线, 对液氮温度下不同偏压时 Si 基 HgCdTe 器件的暗电流成分进行了比较和分析; 通过拟合优值因子 (R_0A) 与 P/A 的关系, 对零偏压下的 P 型 Si 基 HgCdTe 材料的少子扩散长度的变温特性进行了研究; 最后计算得到了材料少子寿命随温度的变化规律并与常规衬底材料进行了比较.

1 实验

变面积 Si 基 $Hg_{1-x}Cd_xTe$ 探测器所用材料为 MBE 法外延得到的汞空位掺杂的 p 型 HgCdTe 薄膜材料, 材料组分 x 为 0.31. 平面型 n-on-p 器件结构如图 1 所示, 注入区为正方形, 边长分别设计为 20、30、40、50、80 μm . 通过在 p 型 Si 基 HgCdTe 材料上进行选区 B^+ 注入形成 n 型区, 然后生长 CdTe/ZnS 双层钝化膜对材料表面进行钝化, 制备电极后倒焊于宝石基板上, 封装于真空杜瓦内进行测试, I - V 特性测试采用 Keithley236, 测量用电压触发, 测试电流. 随着器件由液氮温度 (77 K) 逐渐升至室温, 测试得到不同温度和偏压下不同面积器件的 I - V 、 R - V 特性曲线.

2 结果与讨论

2.1 器件的暗电流成分分析

器件的暗电流来源可以分为与器件注入区面积成正比的体暗电流和与器件周长呈正比的表面漏电流, 即器件的暗电流密度可由下式表示^[9]:

$$I = J_B A + J_S P \quad (1)$$

其中: A 为器件注入区面积; P 为注入区周长; J_B 为体暗电流密度; J_S 为表面漏电流密度. 那么, 器件的暗电流密度可表示为:

$$J = I/A = J_B + J_S (P/A) \quad (2)$$

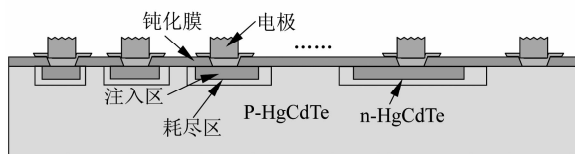


图 1 变面积硅基 HgCdTe 平面器件结构图 Fig. 1 Configuration of variable-area HgCdTe planar photodiode

因此通过分析暗电流密度 J 与 P/A 的关系即可获得器件的暗电流成分.

图 2 为在液氮温度 (77 K), 0 V、-10 mV 和 -100 mV 偏压下测试得到器件的 J 与 P/A 的关系曲线. 由图可以看出, 不同偏压下曲线均不为水平线, 说明表面漏电流在暗电流中占了一定的比重, 而且 -10 mV 和 -100 mV 偏压下曲线的斜率大于 0 V 偏压下斜率, 这说明随着反向偏压的增大, 表面漏电流在器件暗电流中所占的比重增大. 对于 Si 基 HgCdTe 器件而言^[10], 随着反向偏压的增大, 表面的结区诱导耗尽区宽度变窄, 致使缺陷辅助隧穿电流增大, 因此随着反向偏压由 0 V 增大到 100 mV, 表面漏电在暗电流中所占的比重会逐渐增大.

2.2 少子扩散长度和少子寿命

由于光伏器件通常工作于零偏压附近, 我们仅对零偏压下 Si 基碲隔汞材料的少子扩散长度随温度的变化规律进行分析. 零偏压时, 器件的优值因子 R_0A 与 P/A 具有以下关系^[11]:

$$\left(\frac{1}{R_0A}\right)_{planar} = \frac{L_n^2}{4} \frac{1}{R_S A_S} \left(\frac{P}{A}\right)^2 + \left(\frac{L_n}{R_S A_S} + \frac{X_j}{R_B A_j}\right) \left(\frac{P}{A}\right) + \frac{1}{R_B A_j} \quad (3)$$

其中: L_n 为少子扩散长度, X_j 为平面结结深, R_B 为与体暗电流对应阻抗, R_S 为与表面漏电对应阻抗, A_j 、 A_s 分别为与体暗电流和表面漏电相关面积, 可通过以下公式进行计算: $A_j = d^2 + 4 \cdot X_j \cdot d$; $A_s = (d + 2 \cdot L_n)^2 - d^2$, 其中 d 为注入区边长. 对于汞空位掺杂 B^+ 注入成结的中波 n-on-p 型器件, 通常取 $X_j = 1 \mu m$, R_B 为器件的零偏结阻抗, A_j 可以计算得到.

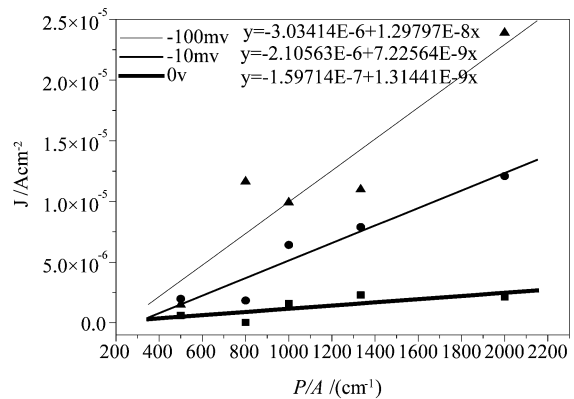


图 2 Si 基 HgCdTe 探测器的暗电流密度 J 与 P/A 的关系曲线 Fig. 2 The relationship between dark current density (J) and the ratio of perimeter to area (p/A) of the HgCdTe diodes on Si substrate under different reverse bias

将已知条件 $X_j, R_B A_j$ 代入公式(3),通过分析 $R_0 A$ 与 P/A 的关系,即可得到材料的少子扩散长度 L_n 和 $R_s A_s$ 的值.

图3是在零偏压时测试得到的不同温度下 Si 基 HgCdTe 探测器的 $1/R_0 A$ 与 P/A 的实验曲线和拟合结果,拟合参数结果如表1所示,少子扩散长度的变温曲线如图4(a)所示.

表1 不同温度下拟合得到的参数值
Table 1 The extracted parameters at different temperature

| Temp./K | $R_s A_s / \text{ohm} \cdot \text{cm}^2$ | L_n / m |
|---------|--|------------------|
| 100 | $1.09\text{E}4 \pm 1.93\text{E}3$ | 24.6 ± 3.2 |
| 150 | $6.81\text{E}2 \pm 3.98\text{E}2$ | 63.1 ± 19.2 |
| 200 | $3.74\text{E}1 \pm 1.24\text{E}1$ | 99.4 ± 14.1 |
| 250 | $8.09\text{E}-1 \pm 1.69\text{E}-1$ | 45.8 ± 5.9 |
| 295 | $9.01\text{E}-2 \pm 1.83\text{E}-2$ | 38.9 ± 4.8 |

对于 P 型 HgCdTe 材料,已知少子扩散长度 L_n 与迁移率 μ_n 就可以得到少子寿命 $\tau_n^{[12]}$:

$$\tau_n = \frac{qL_n^2}{kT\mu_n}, \quad (4)$$

而电子迁移率与温度 T 、组分 x 满足关系^[13]:

$$\mu_n = \frac{9 \times 10^8 b}{T^{2a}}, \quad (5)$$

其中, $a = \left(\frac{0.2}{x}\right)^{0.6}$, $b = \left(\frac{0.2}{x}\right)^{7.5}$. 因此,对于组分 $x = 0.31$ 的 p 型 Si 基 HgCdTe 材料,由少子扩散长度的变温规律可以推导得到少子寿命随温度的变化曲线,如图4(b)所示.

通过图4可以看出:少子扩散长度 L_n 和少子寿

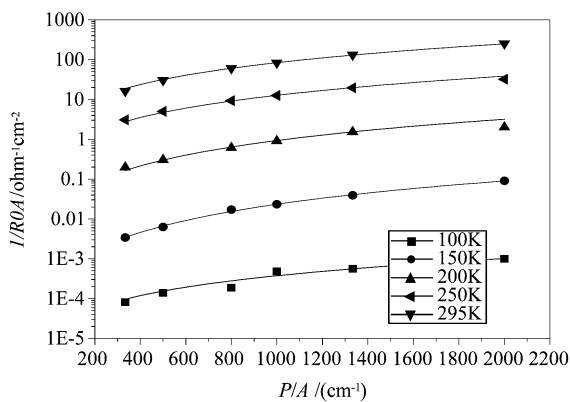


图3 不同温度下 Si 基 HgCdTe 探测器的 $1/R_0 A$ 与 P/A 的关系曲线和拟合结果
Fig.3 The fitted results and the relationship between $1/R_0 A$ and P/A of the HgCdTe diodes on Si substrate at different temperature

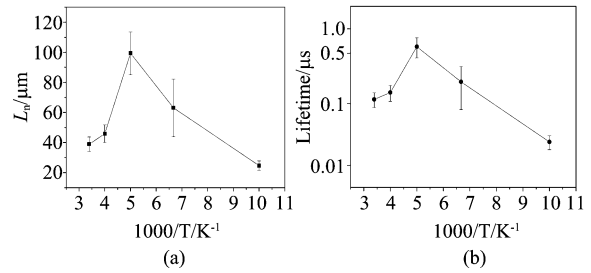


图4 少子扩散长度(a)和少子寿命(b)随温度的变化曲线
Fig.4 The minority carrier diffusion length (a) and lifetime (b) versus temperature

命 τ_n 随温度的变化规律基本一致,以 200 K 为转折点,呈现先变大后变小的变化规律;200 K 时少子扩散长度达到最大 100 μm ,此时对应材料少子寿命为 0.5 μs .

半导体材料中载流子的寿命是多种复合机制共同作用的结果,p 型材料中的少子寿命可表示为

$$\frac{1}{\tau_n} = \frac{1}{\tau_{SRH}} + \frac{1}{\tau_R} + \frac{1}{\tau_A}, \quad (6)$$

其中 τ_{SRH} 为 Shockly-Read-Hall 复合寿命, τ_R 为 Radiative 复合寿命, τ_A 为 Auger 复合寿命. 根据不同温度范围内复合机制的不同,可以通过少子寿命变温曲线转折点对应的温度和寿命大小来判断材料的质量. 图5为组分 $x = 0.3$ 的 CdZnTe 基 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 材料的少子寿命随温度的变化曲线^[6],与图4(b)比较可以看出,变温曲线转折点对应的少子寿命大小和温度基本一致,从而证明此 Si 基 HgCdTe 材料的少子寿命接近常规衬底外延薄膜材料水平. 在器件的工作温度 77 K 时,SRH 复合机制决定了材料的寿命大小,因此减少 SRH 复合陷阱数目,对提高材料的少子寿命和器件性能非常重要.

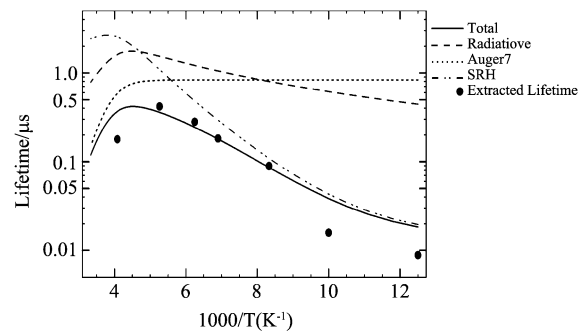


图5 文献[6]中给出的 CdZnTe 基 HgCdTe 中波器件材料的少子寿命随温度的变化关系
Fig.5 The minority carrier lifetime of the mid-wave HgCdTe grown on CdZnTe versus temperature from ref.6

- [4] LI Na, YUAN Xian-Zhang, LI Ning, *et al.* Design and measurement of GaAs/AlGaAs quantum well structure[J]. *Acta Phys. Sin*(李娜,袁先漳,李宁,等. GaAs/Al_xGa_{1-x}As 量子阱能级结构设计与光谱分析. *物理学报*), 2000, **49**(4):797-801.
- [5] YUAN Xian-Zhang, LU Wei, LI Ning, *et al.* Photocurrent spectra of very long wavelength GaAs/AlGaAs quantum well infrared photodetector[J]. *Acta Phys. Sin*(袁先漳,陆卫,李宁,等. 超长波 GaAs/AlGaAs 量子阱红外探测器光电光谱特性研究. *物理学报*), 2003, **52**(2):503-507.
- [6] FU Ying, LI Ning, Karlsteen M. Thermoexcited and photoexcited carrier transports in a GaAs/AlGaAs quantum well infrared photodetector [J]. *Journal of Applied Physics*. 2000, **87**(1):511-516.
- [7] LI N, XIONG D Y, YANG X F. Dark currents of GaAs/AlGaAs quantum-well infrared photodetectors[J]. *Applied Physics. A, Materials Science & Processing*. 2007, **89**(3):701-705.
- [8] HE M D, LIU J Q, CHEN X S. Light transmission through metallic two-dimensional arrays of compound coaxial structures with central and annular apertures: A charge oscillation picture [J]. *Journal of Applied Physics*. 2009, **106**(11352911).
- [9] TREDICUCCI A, GMACHL C, CAPASSO F. Single-mode surface-plasmon laser[J]. *Applied Physics Letters*. 2000, **76**(16):2164-2166.
- [10] PILLAI S, CATCHPOLE K R, TRUPKE T, *et al.* Surface plasmon enhanced silicon solar cells[J]. *Journal of Applied Physics*. 2007, **101**(9 Part 1):93101-93105.
- [11] CHANG Chi-Yang, CHANG Hsu-Yu, CHEN Chia-Yi, *et al.* Wavelength selective quantum dot infrared photodetector with periodic metal hole arrays[J]. *Applied Physics Letters*. 2007, **91**(16):163101-163107.
- [12] WU Wei, Bonakdar A, Mohseni H. Plasmonic enhanced quantum well infrared photodetector with high detectivity [J]. *Applied physics letters*. 2010, **96**(16):161101-161107.
- [13] ZHANG Y M, CHEN H B, LI Z F, *et al.* The optical coupling improvement of THz quantum well infrared photodetectors based on the plasmonic induced near-field effect [J]. *PHYSICA B-CONDENSED MATTER*. 2010, **405**(2):552-554.
- [14] WANG J A, CHEN X S, LI Z F, *et al.* Study of grating performance for quantum well photodetectors[J]. *JOURNAL OF THE OPTICAL SOCIETY OF AMERICA B-OPTICAL PHYSICS*. 2010, **27**(11):2428-2432.

(上接 414 页)

3 结论

通过变面积 Si 基 HgCdTe 器件变温 $I-V$ 测试, 对不同偏压下 Si 基 HgCdTe 器件的暗电流成分进行了分析, 发现不同偏压下表面漏电流和体暗电流所占的比重不同, -10 mV 和 -100 mV 偏压下表面漏电流在暗电流中所占比重大于零偏压. 对不同温度下空位掺杂的 p 型 Si 基 HgCdTe 材料的少子扩散长度进行了拟合, 发现以 200 K 为转折点, 随着温度的升高, 少子扩散长度呈现先变大、后变小的变化规律. 理论计算得到了不同温度下的少子寿命, 少子寿命变温曲线的转折点对应温度和少子寿命的大小与材料质量有关, 因此所得结果可以对 Si 基 HgCdTe 材料质量进行客观评价, 对材料性能比较和提高具有参考意义.

REFERENCES

- [1] Johnson S M, Radford W A, Buell A A. Status of HgCdTe/Si technology for large format infrared focal plane arrays [J]. *SPIE*, 2005, **5732**:250-258.
- [2] Dhar N K, Tidrow M Z. Large format IRFPA development on silicon[J]. *SPIE*, 2004, **5564**:34-43.
- [3] SUN Zhi-Jun. Application perspective of IRFPA technologies[J]. *Sensor World*(孙志君. 21 世纪红外焦平面阵列技术. *传感器世界*), 2002, **11**:1-8.
- [4] Bratt P R, Johnson S M, Rhiger D R, *et al.* Historical perspectives on HgCdTe material and device development at Raytheon Vision Systems[J]. *SPIE*, 2009, **7298**:72982u-1-35.
- [5] HU Yu-SHeng, Wang Le. Effect of crystal quality on minority carrier diffusion of MBE-GaAs/Si material[J]. *Chinese Journal of Semiconductors*(胡雨生,汪乐. MBE-GaAs/Si 材料晶体质量对少子扩散长度的影响. *半导体学报*), 1995, **16**(6):434-438.
- [6] JAMES T, MUSCA Ch, ANTOSZEWSKI J, *et al.* Investigation of surface passivation of HgCdTe MWIR photodiode arrays via a flood illumination Technique[J]. *IEEE*, 2005:185-188.
- [7] Lopes V C, Syllaios A J, Chen M C. Minority carrier lifetime in mercury cadmium telluride [J]. *Semicond. Sci. Technol.* 1993, **8**:824-841.
- [8] Nimitz G, Bauer G, Domhaus S R, *et al.* Transient carrier decay and transport properties in Hg_{1-x}Cd_xTe [J]. *Phys. Rev. B*, 1974, **10**:3302.
- [9] Joseph B, Takahiro I, Rengarajan S, *et al.* Performance of very low dark current SWIR PIN arrays[J]. *SPIE*, 2008, **6940**:69400L-1.
- [10] YUE Ting-Ting, YIN Fei, HU Xiao-Ning. Characterization analysis of dark current in HgCdTe/Si photodiodes [J]. *Laser & Infrared*(岳婷婷,殷菲,胡晓宁. 硅基 HgCdTe 光伏器件的暗电流特性分析. *激光与红外*), 2007, **37**supplement:931-934.
- [11] VISHNU G. Characterization of surface and bulk effects by variable area diode test structures in HgCdTe technology: contribution of series and contact resistances [J]. *SPIE*, **3122**:435-440.
- [12] Redfern D A, Thomas J A, Musca C A, *et al.* Diffusion length measurements in p-HgCdTe using laser beam induced current [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2001, **30**(6):696-703.
- [13] Rosbeck J P, Starr R E, Price S L, *et al.* Background and temperature dependent current-voltage characteristics of HgCdTe photodiodes [J]. *Journal of Applied Physics*, **53**(9):6430-6440.