

Si 基碲镉汞光伏探测器的深能级研究*

张 珊¹⁾²⁾ 胡晓宁^{1)†}

1) (中国科学院上海技术物理研究所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 100049)

(2010年5月28日收到; 2010年9月21日收到修改稿)

通过变温 $I-V$ 测试方法对中波 Si 基碲镉汞光伏探测器的深能级进行了研究. 首先在产生-复合电流为主导电流机理范围内对 Si 基碲镉汞探测器的 $I-1/(k_B T)$ 曲线拟合, 得到 -0.01 V 偏压下单元 Si 基碲镉汞器件的深能级 $E_g/4$. 然后对不同偏压下的实验数据进行了拟合、比较, 发现不同偏压下起主导作用的深能级与该偏压下的暗电流机理有较好的对应关系. 最后对 -0.01 V 偏压下不同面积器件的深能级进行了拟合、比较, 发现深能级与器件面积关系不大, 与理论分析相一致, 验证了实验方法的可行性.

关键词: Si 基碲镉汞, 深能级, 产生-复合电流, 理想因子

PACS: 85.60. -q, 71.55. -i, 71.55. Gs, 73.61. Ga

1. 引言

Si 基碲镉汞光伏探测器具有响应波段可调、量子效率高、介电常数小、光学吸收系数高等优点, 还可有效解决由于探测器芯片和 Si 读出电路热失配带来的可靠性问题^[1,2]. 但由于 Si 衬底与碲镉汞材料之间较大的晶格失配 (19.3%) 和热失配, 使得材料在生长过程中产生大量失配缺陷^[3], 这些缺陷会在禁带中引入较多缺陷能级^[4], 从而极大地影响器件性能.

深能级为禁带中距离导带底和价带顶位置较远的能级. 一般情况下, 深能级的含量极少, 但对载流子的复合作用比浅能级强, 能够充当载流子的陷阱和产生复合中心, 从而影响红外探测器的性能^[5]. 由于 Si 基碲镉汞材料的特殊性质, 对 Si 基碲镉汞探测器中深能级进行研究, 能够反映材料质量和器件性能, 为高性能器件研制提供实验依据.

国内外研究缺陷深能级的方法有很多^[6,7], 包括深能级瞬态谱技术、光致发光谱技术、正电子深能级瞬态谱等, 这些都需用到特殊的实验装置, 且实验和分析过程复杂. 利用变温 $I-V$ 测试方法, 通过拟合暗电流与温度的关系曲线可以得到器件的深

能级^[8], 具有测试方法简单的优点, 是半导体器件质量和可靠性评价的有效手段. 本文即通过变温 $I-V$ 的方法对不同偏压下、不同光敏面积器件的实验数据进行了深能级拟合、分析, 研究了深能级与暗电流机理的对应关系; 并通过对比不同面积器件的深能级拟合结果, 分析、验证了拟合方法的可行性和拟合数据的可信度.

2. 碲镉汞光伏探测器暗电流机理

碲镉汞光伏探测器的暗电流机理^[9] 主要包括扩散电流、产生-复合电流、直接隧道电流、陷阱辅助隧道电流和表面漏电流. 直接隧道电流和陷阱辅助隧道电流仅通过禁带宽度和载流子浓度与温度产生关系, 但载流子浓度随温度的变化趋势非常缓慢, 因此两种电流机理随温度的变化非常小; 表面漏电流机理较为复杂, 可通过钝化得到较好地抑制. 下面主要分析扩散电流和产生复合电流.

2.1. 扩散电流

扩散电流是 p-n 结光电二极管的基本电流机理, 主要产生于空间电荷区两侧一个少子扩散长度内的电子空穴对的随机产生、复合过程, 对空间电

* 国家自然科学基金 (批准号: 60706012) 资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: xnhu@mail.sitp.ac.cn

荷区的细节不敏感,其表达式为

$$I_{\text{diff}} = Aqn_i^2 \sqrt{\frac{k_B T}{q}} \left(\sqrt{\frac{\mu_n}{\tau_n} \frac{1}{N_a}} + \sqrt{\frac{\mu_p}{\tau_p} \frac{1}{N_d}} \right) \times \left[\exp\left(\frac{qV}{k_B T}\right) - 1 \right], \quad (1)$$

其中 A 为 p-n 结面积, q 为电子电量, n_i 为本征载流子浓度, k_B 为 Boltzmann 常数, N_a 和 N_d 分别为 p 区受主浓度和 n 区施主浓度, τ_n 和 τ_p 为中性区电子寿命和空穴寿命, μ_n 和 μ_p 为电子迁移率和空穴迁移率, V 为 p-n 结所加偏压, T 为器件温度.

2.2. 产生-复合电流

位于空间电荷区的杂质或缺陷,作为产生-复合中心引起的电流为产生-复合电流.

$$I_g = \frac{qAn_i W_{\text{dep}} V}{V_1 \tau_g}, \quad (2)$$

$$\tau_g = \frac{1}{N_{c,v} v_{\text{th}} \sigma \exp(-E_i/k_B T)}, \quad (3)$$

其中 W_{dep} 为耗尽区宽度, 可表示为 $W_{\text{dep}} = \sqrt{\frac{2\epsilon_s \epsilon_0 (N_a + N_d) (V_{\text{bi}} - V)}{qN_a N_d}}$, V_{bi} 为 p-n 结内建电场强度, $V_1 = V_{\text{bi}} + V$, $N_{c,v}$ 为导带或价带的态密度, E_i 为陷阱能级, τ_g 为产生时间, σ 为俘获截面, v_{th} 为热速度. 这里 $N_{c,v}$ 正比于温度 $T^{3/2}$, v_{th} 正比于温度 $T^{1/2}$, 代入(2)和(3)式可得到电流与温度的关系为

$$I_g \propto T^2 \exp(-E_i/k_B T). \quad (4)$$

因此,通过做 $\ln I/T^2$ 与 $1/(k_B T)$ 的关系图(即标准

Arrhenius 方法),得到的直线斜率就是深能级大小.

由以上碲镉汞光伏探测器电流机理分析可以看出,不同温度下对应的主导电流机理不同,分析电流随温度的变化曲线可以拟合得到器件的理想因子. 当器件的理想因子接近 1 时,扩散电流机理起主导作用;当理想因子接近 2 时,产生-复合电流起主导作用,这样便可得到产生-复合电流起主要作用的温度范围. 通过对此温度范围内的产生-复合电流与温度的关系曲线进行拟合即可得到深能级位置 E_i .

3. 实 验

器件由用分子束外延法制备的硅基碲镉汞外延薄膜材料加工而成,材料组分 $x = 0.31$, 位错密度为 $6 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$. 实验采用 n-on-p 型平面结器件结构,如图 1 所示,器件光敏元尺寸分别为 $20 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$, $30 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$, $40 \mu\text{m} \times 40 \mu\text{m}$, $50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$, $80 \mu\text{m} \times 80 \mu\text{m}$. 器件按照常规工艺制备而成:在 p 型 Si 基碲镉汞材料上进行 B^+ 注入形成 n 型区,注入剂量为 $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$, 离子流能量为 150 keV. 生长钝化膜进行表面钝化,制备电极后封装于真空杜瓦内进行测试. 器件测试温度从 80 K 逐渐升温到 265 K,利用 Keithley 236I-V 型测量仪测试不同温度下器件的 I-V 特性曲线.

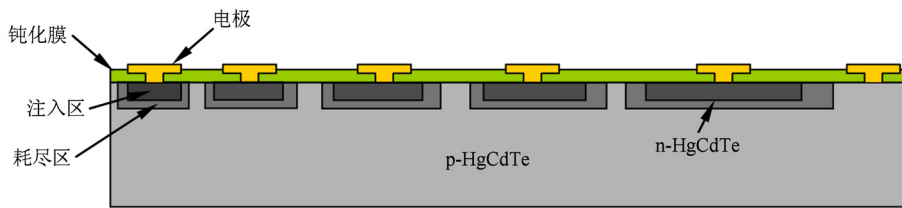


图 1 变面积硅基碲镉汞平面器件结构图

4. 实验结果与讨论

4.1. 单元硅基碲镉汞光伏探测器的深能级拟合

通过上述探测器暗电流机理分析可知,较小偏压下的产生-复合电流与 $1/(k_B T)$ 呈对数关系,通过

拟合变温曲线可得到深能级大小. 首先对 -0.01 V 偏压下动态阻抗 R 与温度 T 的关系曲线进行分析,找到产生-复合电流机理起主导作用的温度范围. 图 2 为测量得到的 -0.01 V 偏压下光敏元面积为 $50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$ 器件的动态阻抗 R 与温度 T 的关系曲线.

由图 2 可以看到:从 290 K 直到 140 K, R 随温

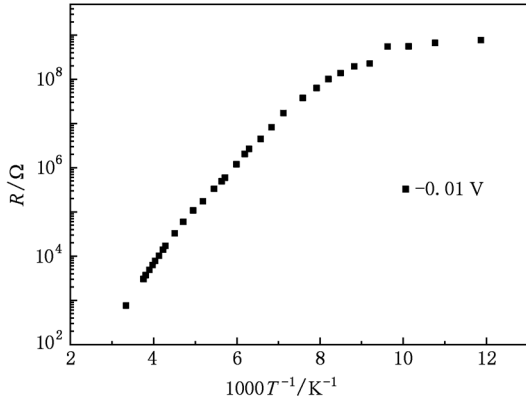


图2 -0.01 V 偏压下光敏元面积为 $50\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$ 器件的 $R-1000/T$ 特性实验曲线

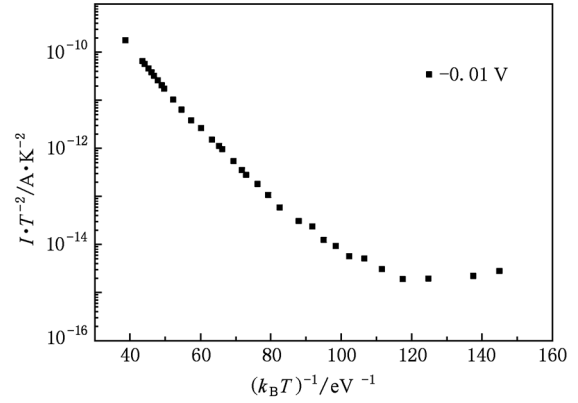


图4 -0.01 V 偏压下,光敏元面积为 $50\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$ 器件的 $I-1/(k_B T)$ 特性实验曲线

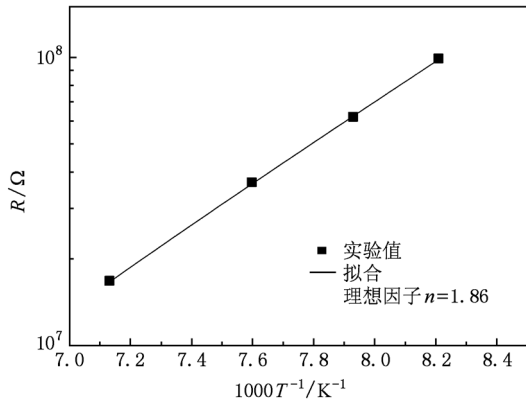


图3 120—140 K 范围内器件 $R-1000/T$ 特性实验曲线的拟合结果

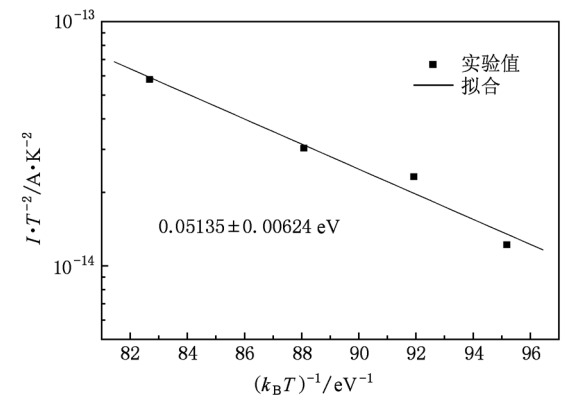


图5 120—140 K 范围内器件 $I-1/(k_B T)$ 特性实验曲线的拟合结果

度变化明显,电流机理以热电流为主,扩散电流与产生-复合电流共同起作用,与 $1000/T$ 呈指数关系;温度在 100 K 以下 R 的变化相对较小,隧道电流机理开始起作用. 在热电流机理为主导的温度范围内,对 $R-1000/T$ 曲线进行拟合,可得到理想因子. 在 120—140 K 范围内的拟合结果如图 3 所示,拟合得到理想因子 $n = 1.86$,表明产生-复合电流起主导作用,因此利用变温 $I-V$ 法测试深能级时,应在此温度范围内进行拟合. 对图 4 的 $I-1/(k_B T)$ 曲线进行拟合,结果如图 5 所示,得到此时器件对应深能级为 $0.05135\ \text{eV}$. 对于组分 $x = 0.31$ 的碲镉汞材料器件,其截止波长为 $4.89\ \mu\text{m}$,对应的禁带宽度为 $0.254\ \text{eV}$,此缺陷能级应该属于 $E_g/4$ ^[10].

4.2. 不同偏压下探测器深能级比较

半导体材料中的深能级种类繁多,而且其位置

与产生原因相关. 如异质衬底与外延薄膜之间晶格失配和热失配形成的位错、碲镉汞材料生长过程中形成的汞空位、成结过程中离子注入造成的损伤、感应耦合等离子体刻蚀过程中材料的损伤,这些都会在材料中产生不同位置的深能级. 在不同的偏压下,获得不同能量的电子可以跃迁到不同的陷阱能级,此时不同位置深能级对器件性能影响的差异也会显现出来,因此我们对不同偏压下对器件性能起主导作用深能级位置进行了研究. 不同偏压下,光敏元面积为 $50\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$ 的硅基碲镉汞探测器所对应的 $I-1/(k_B T)$ 曲线如图 6 所示. 对曲线进行拟合,得到不同偏压下对器件性能起主导作用的深能级,结果如图 7 所示.

由图 7 可以看出:1) 在零偏压附近,拟合得到的深能级约为 $0.2E_g$,可能与离子注入产生的缺陷有关^[11];在小偏压 $-0.1\ \text{V}$ — $-0.3\ \text{V}$,深能级约为

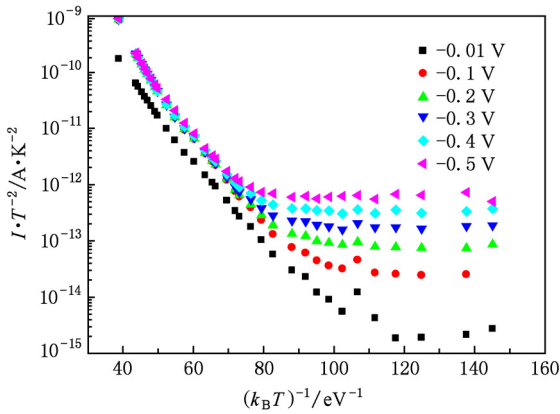


图6 不同偏压下光敏元面积为 $50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$ 器件的 $I-1/(k_B T)$ 特性实验曲线

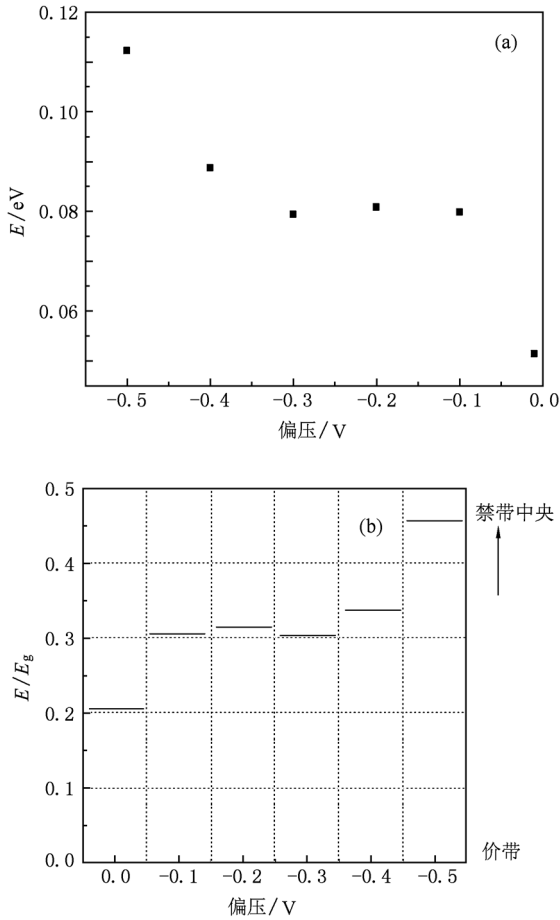


图7 不同偏压下器件 $I-1/(k_B T)$ 特性实验曲线的拟合结果

$0.3E_g$, 与 Si 基碲镉汞材料中大的晶格失配和热失配产生的材料缺陷有关^[6]; 在中等反向偏压 -0.5

V, 深能级约为 $0.45E_g$, 对应陷阱辅助隧穿中陷阱隧道电流的缺陷能级; 随着反向偏压的增大, 深能级逐渐增大. 这与利用深能级瞬态谱方法得到的结果一致, 为 Si 基碲镉汞材料所特有. 2) 通过硅基碲镉汞探测器的暗电流特性分析^[12] 可知: 对于硅基碲镉汞器件, 在零偏压附近, 扩散电流和产生复合作用共同起作用; 在小反向偏压附近, 产生复合和陷阱辅助隧道电流作用共同起作用, 产生复合电流起主导; 在中等反向偏压, 陷阱辅助隧道电流起主导. 因此实验得到的不同偏压下的深能级类型可以较好复合不同偏压时的电流机理.

4.3. 不同面积碲镉汞光伏探测器的深能级比较

根据应用系统对焦平面器件像素大小的要求, 器件有不同的光敏元面积. 下面我们对不同面积碲镉汞光伏探测器的深能级进行了拟合与比较. -0.01 V 偏压下, 不同面积器件对应的 $I-1/(k_B T)$ 曲线如图 8 所示. 将 $120-140 \text{ K}$ 范围内的曲线进行拟合, 即可得到不同面积样品的拟合深能级结果, 如图 9 所示.

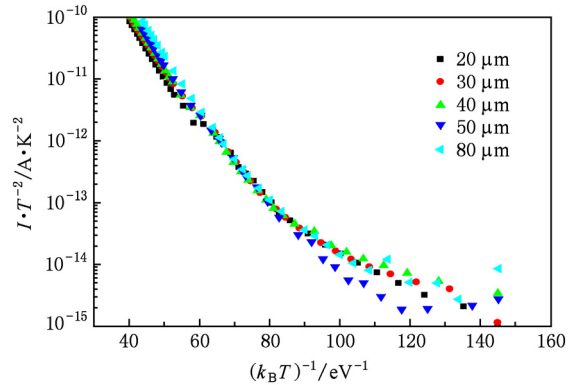


图8 不同面积器件的 $I-1/(k_B T)$ 特性实验曲线比较

由图 9 可以看出: -0.01 V 时得到的不同面积器件的深能级在 0.05 eV 左右, 约为 $0.2E_g$, 与器件面积关系不大. 由文献[11]的分析可知, 此深能级可能与离子注入造成的缺陷有关, 而离子注入损伤与光敏元面积无关, 因此实验结果与前人的理论分析可以较好符合, 说明这里得到的深能级数据在实验误差范围内, 是可信的.

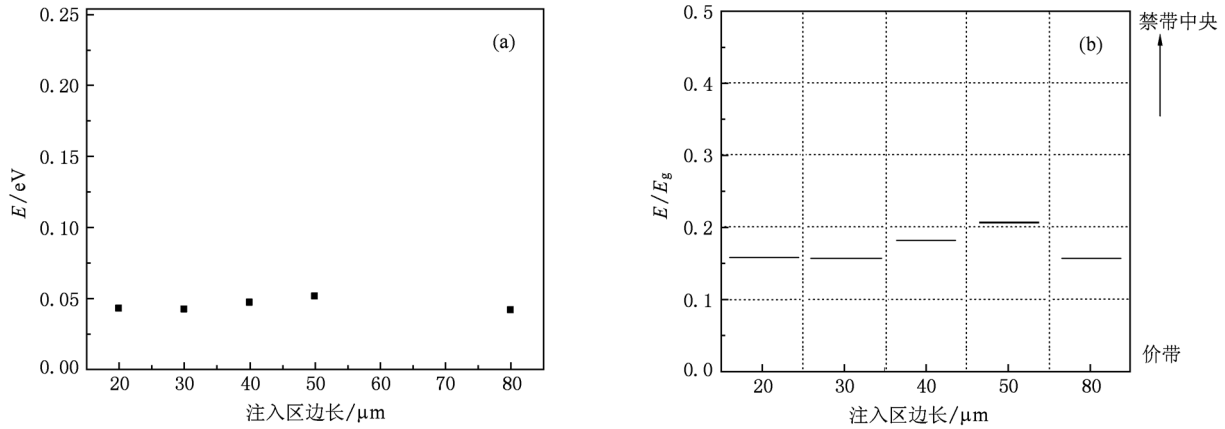


图9 不同面积器件 $I^{-1}/(k_B T)$ 特性实验曲线的拟合结果

5. 结 论

对硅基碲镉汞光伏探测器的暗电流 I 随温度 T 的变化曲线进行了测量,通过 $\ln I/T^2 - 1/(k_B T)$ 的关系图(即标准的 Arrhenius 方法),在不同偏压下拟合得到对 p 型 Si 基碲镉汞器件性能起主导作用

的不同位置深能级: $0.2E_g, 0.3E_g, 0.45E_g$, 这些能级与利用深能级瞬态谱方法得到的结果一致,为 Si 基碲镉汞材料所特有. 分析了深能级的产生机理,发现不同偏压下对 Si 基碲镉汞器件性能起主导作用的深能级类型可以较好地对应应该偏压下的电流机理. 以上结果可为 Si 基碲镉汞器件红外探测器性能的工艺改进和性能提高提供有益的参考.

[1] Johnson S M, Radford W A, Buell A A, Vilela M F, Peterson J M, Franklin J J, Bornfreund R E, Childs A C, Venzor G M, Newton M D, Smith E P G, Ruzicka L M, Pierce G K, Lofgreen D D, de Lyon T J, Jensen J E 2005 *SPIE* **5732** 250

[2] Dhar N K, Tidrow M Z 2004 *SPIE* **5564** 34

[3] Jacobs R N, Almeida L A, Marknuas J, Pellegrino J, Groenert M, Jaime-vasquez M, Mahadik N, Andrews C, Qadri S B, Lee T, Kim M 2008 *J. Electron. Mater.* **37** 1480

[4] Qiao H, Xu Z Z, Zhang K M 1993 *Acta Phys. Sin.* **42** 1830 (in Chinese) [乔皓、徐至中、张开明 1993 物理学报 **42** 1830]

[5] Liu E K, Zhu B S, Luo J S 1998 *Semiconductor Physics* (Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press) p37 (in Chinese) [刘恩科、朱秉升、罗晋升 1998 半导体物理学(西安:西安交通大学出版社)第37页]

[6] Yoshion J, Morimoto J, Wada H 1998 *Jpn. J. Appl. Phys.* **37** 4032

[7] Yuan H X, Li Q G, Jiang S, Lu W, Tong F M, Tang D Y 1990 *Acta Phys. Sin.* **39** 464 (in Chinese) [袁皓心、李齐光、姜山、陆卫、童斐明、汤定元 1990 物理学报 **39** 464]

[8] Johnstone D, Golding T D, Hellmer R, Sinan J H, Carmody M 2007 *J. Electron. Mater.* **36** 832

[9] Gopal V, Singh S K, Mehra R M 2002 *Infrar. Phys. Technol.* **43** 317

[10] Hu X W, Zhao J, Lu H Q, Li X Y, Fang J X 1999 *Acta Phys. Sin.* **48** 1107 (in Chinese) [胡新文、赵军、陆慧庆、李向阳、方家熊 1999 物理学报 **48** 1107]

[11] Yoshion J, Morimoto J, Wada H 1998 *Jpn. J. Appl. Phys.* **37** 4027

[12] Yue T T, Yin F, Hu X N 2007 *Laser Infrar. (Suppl.)* (in Chinese) **37** 931 [岳婷婷、殷菲、胡晓宁 2007 激光与红外(增刊) **37** 931]

Deep levels of HgCdTe diodes on Si substrates *

Zhang Shan¹⁾²⁾ Hu Xiao-Ning^{1)†}

1) (Key Laboratory of Infrared Imaging Material and Detectors, Shanghai Institute of Technical Physics, Shanghai 200083, China)

2) (Graduated School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(Received 28 May 2010; revised manuscript received 21 September 2010)

Abstract

The deep levels of the mid-wave infrared $\text{Hg}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}$ diodes ($x=0.31$), which are fabricated on Si substrates, are studied using the current-voltage-temperature (IVT) relationship. Firstly, the $I-1/(k_B T)$ relationship is fitted when the reverse current is dominated by generation-recombination process, and the deep level $E_g/4$ is calculated at the reverse bias 0.01 V. Secondly, the deep levels at different reverse biases are investigated. The origins of these deep levels correspond well to the reverse current mechanisms. Finally, the deep levels of different area diodes are calculated and compared. It is confirmed that the deep level is not related to diode area. This result is well corresponding to the theory, and indicates that the experimental method is correct.

Keywords: HgCdTe on Si substrate, deep level, generation recombination current, ideal factor

PACS: 85.60. -q, 71.55. -i, 71.55. Gs, 73.61. Ga

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60706012).

† Corresponding author. E-mail: xnhu@mail.sitp.ac.cn