

MMVCX 光伏型 HgCdTe 中波探测器暗电流温度特性

王 鹏¹, 何家乐², 许 娇², 吴明在^{1*}, 叶振华^{2*}, 丁瑞军², 何 力²

(1. 安徽大学 物理与材料科学学院, 安徽 合肥 230601;

2. 中国科学院上海技术物理研究所红外物理国家重点实验室, 上海 200083)

摘要:研究了光伏型 HgCdTe 中波探测器的暗电流与烘烤时间的关系特性. 编写了一种适用于 *n-on-p* 型的中波 HgCdTe 红外探测器的解析拟合程序. 结合暗电流的主导机制有扩散机制、产生复合机制、带间直接隧穿机制和陷阱辅助隧穿机制. 通过对比不同烘烤时间特征参数的变化, 分析了烘烤对器件的影响.

关键词: HgCdTe; 光伏探测器; 暗电流; 非线性同时拟合模型; 烘烤

中图分类号: O472+.4 **文献标识码:** A

Parameters extraction from the dark current characteristics of mid-wavelength HgCdTe photodiode after annealing

WANG Peng¹, HE Jia-Le², XU Jiao², WU Ming-Zai^{1*}, YE Zhen-Hua^{2*}, DING Rui-Jun², HE Li²

(1. School of Physics & Materials Science, Anhui University, Hefei 230601, China;

2. National Laboratory for Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: In this paper, we studied the relationship between dark current and baking time of mid-wavelength HgCdTe infrared photovoltaic detector. A simultaneous-mode nonlinear fitting program for *n-on-p* mid-wavelength HgCdTe infrared detector is reported. The curve-fitting model includes the diffusion, generation-recombination, band-to-band tunneling and trap-assisted tunneling current as dark current mechanisms. The dark current components and six characteristic parameters were obtained from the fitting of resistance-voltage (*R-V*) curves measured before and at different annealing time. The effects of annealing on the performance of the photodiodes were analyzed by comparing the characteristic parameters of devices at different annealing time.

Key words: HgCdTe, photodiode, dark current, simultaneous-mode nonlinear fitting program, annealing

PACS: 11. 40. -q, 85. 60. Dw, 85. 60. Gz

引言

暗电流是制约 HgCdTe 光伏器件性能的重要参数, 器件的噪声、探测率、量子效率等性能参数都与器件暗电流直接相关, 要想提高器件性能就必须降低暗电流. 然而, 降低暗电流首先要研究暗电流的来源, 因此研究暗电流的形成机制在器件研制过程中至关重要. 由于 HgCdTe 器件价格昂贵、产率低, 并

且制作周期长、制作工艺复杂, 这使得器件模拟技术逐渐成为 HgCdTe 器件设计和制作过程中的主要工具^[1-4]. 通过器件模拟, 我们能直观的得到 HgCdTe 器件的各项性能参数. 器件模拟技术不仅减少了器件开发的费用, 而且为器件优化提供了理论依据. 在器件优化中, 器件模拟技术是一种切实可行、省时省力的方法. HgCdTe 器件模拟模型包括数值模拟和解析拟合. 数值模拟准确度较高, 但是建模复杂且耗时

收稿日期: 2016-06-05, 修回日期: 2016-12-30

基金项目: 国家自然科学基金(11374013, 51672001)

Foundation items: Supported by the National Natural Science Foundation of China (11374013, 51672001)

作者简介 (Biography): 王鹏 (1989-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为红外探测器物理与应用研究. E-mail: wangpeng2010@hotmail.com

* **通讯作者 (Corresponding author):** E-mail: mingzaiwu@gmail.com, zhye@mail.sitp.ac.cn

Received date: 2016-06-05, **revised date:** 2016-12-30

长. 相比之下, 解析拟合简单快捷, 已成为光伏型 HgCdTe 器件的暗电流提取和分析上的常用方法. Quan Zhi-jue^[5] 等人利用解析拟合模型对长波 HgCdTe 的暗电流特性进行了研究. Wang Jun^[6] 等人利用解析拟合模型研究了长波 HgCdTe 探测器的温度特性. 此外还有很多文献^[7-9] 都是利用解析拟合模型来研究 HgCdTe 器件的性能. Hu Wei-da^[10] 等人利用解析拟合模型对钝化后的长波 HgCdTe 的暗电流特性进行了分析. Bai Yun^[11] 等人研究了低温退火对 HgCdTe 器件 γ 辐照效应的影响. 烘烤作为 HgCdTe 探测器的常用热处理工艺, 对 HgCdTe 的性能有非常大的影响. 探测器在存储和使用过程中需要较强的环境适应性, 当器件所处环境温度较高时, 器件又相当于进行了烘烤, 于是研究烘烤实验对探测器性能是否造成影响是一项重要的课题. 但是, 目前关于不同时间的烘烤处理对器件的性能参数的影响的研究还比较少, 因此研究不同时间烘烤对器件的影响是有重要意义的.

利用解析拟合模型对低温烘烤后的中波 HgCdTe 器件的暗电流特性进行了研究. 通过提取烘烤前后及不同烘烤时间下六个特征参数的变化, 分析了烘烤对中波 HgCdTe 器件的影响.

1 物理模型和拟合方法

1.1 暗电流的理论模型

HgCdTe 光伏器件的暗电流主要有: 扩散机制电流 (I_{diff})、产生复合机制电流 (I_{gr})、直接隧穿机制电流 (I_{bbt}) 和间接隧穿机制电流 (I_{tat}).

扩散机制电流为^[12-14]:

$$I_{\text{diff}} = Aqn_i^2 \sqrt{\frac{kT}{q}} \left(\sqrt{\frac{\mu_n}{\tau_n}} \cdot \frac{1}{N_a} + \sqrt{\frac{\mu_p}{\tau_p}} \cdot \frac{1}{N_d} \right) \left(\exp\left(\frac{qV_d}{kT}\right) - 1 \right) \quad (1)$$

与扩散机制电流对应的电阻为:

$$R_{\text{diff}} = \left(\frac{dI_{\text{diff}}}{dV_e} \right)^{-1} \quad (2)$$

其中, A 是 pn 结结区面积; n_i 是本征载流子浓度; μ_n 和 μ_p 和 τ_n , τ_p 分别是非平衡电子与空穴的迁移率; τ_n 和 τ_p 分别是非平衡电子与空穴的寿命; N_a 是 p 区的受主浓度; N_d 是 n 区的施主浓度; V_d 是外加电压.

产生复合机制电流为^[15-17]:

$$I_{\text{gr}} = A \cdot \frac{n_i W_0 kT}{\tau_0 V_{bi}} \frac{2 \sinh\left(\frac{qV_d}{2kT}\right)}{\left(1 - \frac{V_d}{V_{bi}}\right)^{\frac{1}{2}}} \cdot f \quad (3)$$

与产生复合机制电流对应的电阻为:

$$R_{\text{gr}} = \left(\frac{dI_{\text{gr}}}{dV_e} \right)^{-1} \quad (4)$$

其中, W_0 是零偏下的空间电荷区宽度; τ_0 是耗尽区的有效寿命; V_{bi} 是内建电压; $f(b)$ 是一个积分因子.

直接隧穿机制电流为^[18]:

$$I_{\text{bbt}} = -A \frac{q^3 \sqrt{2m_e^*} E(V_{bi} - V_d)}{4\pi^3 h^2 \sqrt{E_g}} \exp\left(-\frac{\pi \sqrt{m_e^*} / 2E_g^{3/2}}{2qEh}\right) \quad (5)$$

与直接隧穿机制电流对应的电阻为:

$$R_{\text{bbt}} = \left(\frac{dI_{\text{bbt}}}{dV_e} \right)^{-1} \quad (6)$$

其中, m_e^* 是电子有效质量; E 是空间电荷区的电场; E_g 是能带宽度.

陷阱辅助隧穿机制电流为^[19-21]:

$$I_{\text{tat}} = -A \frac{\pi^2 q^2 N_t m_e^* M^2 (V_{bi} - V_d)}{h^3 (E_g - E_t)} \exp\left(-\frac{\sqrt{3}E_g^2 F(a)}{8\sqrt{2}qPE}\right) \quad (7)$$

$$F(a) = \frac{\pi}{2} + \sin^{-1}(1 - 2a) + 2(1 - 2a) \sqrt{a(1 - a)} \quad (8)$$

$$a = E_t / E_g \quad (9)$$

与陷阱辅助隧穿机制电流对应的电阻为:

$$R_{\text{tat}} = \left(\frac{dI_{\text{tat}}}{dV_e} \right)^{-1} \quad (10)$$

其中, E_t 是陷阱能级; N_t 是缺陷能级的浓度; M 是跃迁矩阵元; P 是 Kane 矩阵元.

在实际的光伏型 HgCdTe 器件中, 除了上述四种机制的暗电流外, 还存在表面漏电流. 表面漏电流的形成原因比较复杂, 一般用比较简单的模型来考虑^[22], 表面漏电流对应的电阻称为串联电阻, 以 R_s 来表示. 因此拟合得到的总的动态电阻可以表示为:

$$R_{\text{fit}} = \left(\frac{1}{R_{\text{diff}}} + \frac{1}{R_{\text{gr}}} + \frac{1}{R_{\text{tat}}} + \frac{1}{R_{\text{bbt}}} \right)^{-1} + R_s \quad (11)$$

1.2 解析拟合的方法和途径

采用全知觉^[23] 等人建立的非线性同时拟合模型对 R - V 曲线进行解析拟合分析. 对于 HgCdTe 光伏器件, 需要拟合提取的特征参数有六个. 这六个特征参数分别是: n 区施主浓度 N_d , p 区的电子迁移率与其少子寿命之比 μ_n / μ_p , 耗尽区的有效寿命 τ_0 , 陷阱能级的相对位置 E_t / E_g , 陷阱浓度 N_t 以及串联电阻 R_s . 在拟合过程中, 先给每个特征参数一个初始值和一个变化范围. 在变化范围内的每一组参数代入到式(11)中可以得到一条拟合的 R - V 曲线. 然后

取一个目标函数:

$$F = \sum_{i=1}^N [\log(R_{fit}(V_{di})) - \log(R_{exp}(V_{di}))]^2, \quad (12)$$

其中, N 为数据个数, R_{fit} 为拟合的得到的动态电阻, R_{exp} 为实验上的电阻. 然后, 采用标准的非线性梯度搜索法与 N 维函数全域极小值搜寻问题重构法结合^[24] 来进行目标函数最小值的求解. F 的值越小, 则拟合的结果和实验结果越相近. 由于式(12)是一个由 6 个特征参数形成的 6 维空间的极小值函数. 因此, 确定六个特征值的合理的初始值对于解这个多指函数具有很大的意义.

我们可以假设 $F=0$, 根据式(11)、(12)可以得到:

$$R_{exp} - \left(\frac{1}{R_{diff}} + \frac{1}{R_{gr}} + \frac{1}{R_{lat}} + \frac{1}{R_{bbt}} \right)^{-1} - R_s = 0, \quad (13)$$

要解式(13), 我们可以选取 6 个特征点就可以得到六个方程的超越方程组, 因而得到六个特征参数的初始值.

首先, 在大反偏下, 认为带间直接隧穿机制主导暗电流, 式(13)可以简化为:

$$R_{exp} - R_{bbt} = 0, \quad (14)$$

而 R_{bbt} 又只与特征参数 N_d 有关, 选取大反偏下的一个实验点代入式(14), 就可以得到 N_d 的初始值.

其次, 认为扩散机制主导大正偏时的暗电流, 式(13)可以简化为:

$$R_{exp} - R_{diff} = 0, \quad (15)$$

而 R_{diff} 又只与 N_d 和 μ_n/τ_n 有关, 选取大正偏下的一个实验点代入式(15), 再把 N_d 的值代入式(15), 就可以得到 μ_n/τ_n 的初始值.

再次, 认为小正偏下扩散机制和产生复合机制共同主导暗电流, 式(13)可以简化为:

$$R_{exp} - \left(\frac{1}{R_{diff}} + \frac{1}{R_{gr}} \right)^{-1} = 0, \quad (16)$$

而 R_{gr} 又只与 t_0 有关, 选取小正偏下的一个实验点代入式(16), 再把 N_d 和 μ_n/τ_n 的值代入式(16), 就可以得到 t_0 的初始值.

最后, 认为中反偏下带间直接隧穿机制、陷阱辅助隧穿机制和产生复合机制共同主导暗电流, 式(13)可以简化为:

$$R_{exp} - \left(\frac{1}{R_{gr}} + \frac{1}{R_{lat}} + \frac{1}{R_{bbt}} \right)^{-1} = 0, \quad (17)$$

而 R_{lat} 只与 N_d 、 N_i 、 E_i/E_g 有关, 选取中反偏下的两个实验点代入式(17), 再把 N_d 和 t_0 的值代入式(17), 就可以得到 N_i 和 E_i/E_g 的初始值. 通过这样

的方法求得六个特征参数的初始值后, 通过迭代就很容易的能得到一组 F 值最小的最优解.

2 结果和讨论

碲镉汞中波红外探测器的实验数据是由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提供的. 样品都是先由分子束外延(MBE)在衬底上生长的砷掺杂 p 型 HgCdTe 材料. 然后再在 p 型材料上用硼离子注入形成 n 区. 这样就得到了 n -on- p 型器件的 pn 结, 接着生长钝化层、镀金属电极、制备钢柱, 从而制成红外探测器件. 测试时, 器件封装于真空杜瓦瓶中, 在液氮温度下测量其 I - V 曲线. 将器件连同杜瓦瓶放入恒温烘箱中, 烘烤温度为 85°C . 每次烘烤时间为 8 h, 每次烘烤后在相同条件下再次测量器件的 I - V 曲线. 这样连续重复 6 次, 便得到了两个样品烘烤前和烘烤 0 h, 8 h, 16 h, 24 h, 32 h, 40 h, 48 h 的 I - V 数据. 我们再通过上面描述的方法对两个样品烘烤前后的暗电流进行了拟合分析. 样品的材料参数如表 1 所示. 其中, x 是镉(Cd)的组分, μ_p 是空穴迁移率, A 是光敏元面积, T 是测量温度. 由于我们以 $N_a * N_d$ 为一个参数呈现在拟合参数里, 所以 N_a 的值就不列在表 1 中了.

表 1 解析拟合用的样品材料参数

Table 1 Device parameters for theoretical calculation

样品编号	x	$\mu_p/\text{cm}^2/\text{Vs}$	A/m^2	T/K
1#	0.308 8	275	50 × 50	77.2
2#	0.304 8	248	50 × 50	77.2

对于样品 1#, 我们一共取了 23 个光敏元进行拟合分析, 编号为 1#02-1#24. 对于样品 2#, 我们一共取了 21 个光敏元进行拟合分析, 编号为 2#04-2#24. 在样品 1#中, 我们以元 1#10 为例分析暗电流的烘烤性能. 在样品 2#中, 我们以元 2#14 为例分析暗电流的烘烤性能. 图 1 为样品 1#和 2#在烘烤前暗电流的分量拟合结果, 从中可以看出, 烘烤前的 n -on- p 样品, 大反偏和中反偏时由陷阱辅助隧穿机制电流 (I_{lat}) 主导暗电流, 零偏和小正偏时由产生复合机制电流 (I_{gr}) 主导暗电流, 大正偏时由扩散机制电流 (I_{diff}) 主导暗电流.

图 2 为样品 1#在不同烘烤时间下各暗电流的分量拟合结果. 随着烘烤时间的增加样品 1#的各个偏压范围内主导暗电流机制并没有发生变化. 但是, 样品的动态电阻随着烘烤时间的增加先减小再增大. 在烘烤 24 h 时具有最小的动态电阻. 但是 24 h

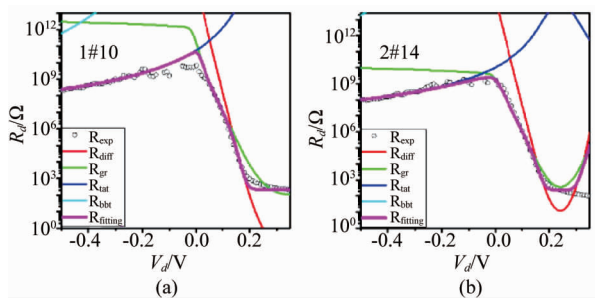


图1 两个样品烘烤前暗电流成分拟合结果. (a) 样品 1#, (b) 样品 2#

Fig.1 The measured R-V curves and the corresponding fitted current components for the two samples after annealing: (a) Sample 1#, (b) Sample 2#

后,动态电阻的不稳定性也相应提高.这说明了烘烤 24 h 内随着时间增长会增大暗电流,烘烤 24 h 后会随着时间增大而降低暗电流,但是同时会导致器件的不稳定性.

图 3 为 2# 在不同烘烤时间下各暗电流的分量拟合结果.随着烘烤时间的增加样品 2# 的各个偏压范围内主导暗电流机制也没有发生变化.样品的动态电阻随着烘烤时间的增加先减小,超过到 24 h 后再增大,最后在 48 h 时又出现反常的减小.与上个样品相同,随着烘烤时间增大会导致器件的暗电流增大,并且不稳定性增大,甚至超过 48 h 后,有可能会对器件造成损坏.

为了进一步研究 n -on- p 中波 HgCdTe 器件烘烤后的暗电流性能,我们分析了拟合提取的六个特征参数的变化特性.图 4 给出了各拟合的特征参数随烘烤时间的变化关系.从中可以看出,各个特征参数的值在烘烤 8 h 和 16 h 时和烘烤前变化很小.但是在烘烤 24 h 后, $N_d * N_a$, τ_0 , E_i/E_g , N_i 和 R_s 的值都发生了很大的变化.这可以理解为器件只有烘烤时间达到 24 h 后,才对器件的性能有一定的影响.

图 4(a) 是 n 区施主浓度和 p 区受主浓度之积 $N_d * N_a$ 随烘烤时间的变化关系, $N_d * N_a$ 随着烘烤时间的增加逐渐减小.由于中波禁带宽度比较大,所以载流子很难发生带间直接隧穿^[25],所以在大反偏下始终不能主导暗电流.所以 $N_d * N_a$ 的值也就不准确.图 4(c) 是 p 区少子寿命 τ_n 随烘烤时间的变化趋势.因为在液氮温度附近扩散电流可以忽略,所以 τ_n 的值也不准确.图 4(b) 是耗尽区载流子有效寿命 τ_0 随烘烤时间的变化趋势.总的趋势是 τ_0 随烘烤时间的增加而降低.可能的原因是随着烘烤时间的增加复合加剧,导致载流子寿命降低.这也说明

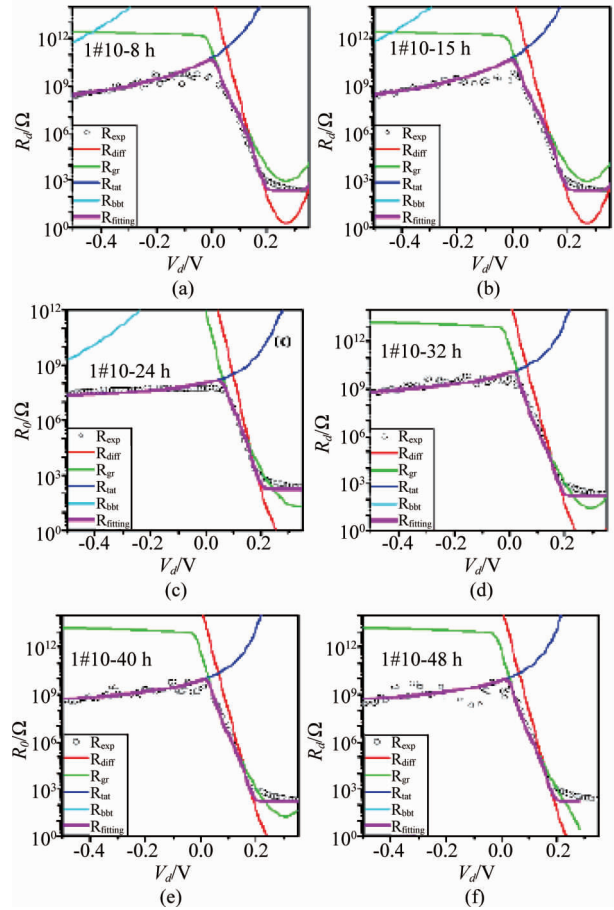


图 2 样品 1# 在不同烘烤时间后的暗电流成分拟合结果. (a) 8 h, (b) 16 h, (c) 24 h, (d) 32 h, (e) 40 h, (f) 48 h

Fig. 2 The measured R-V curves and the corresponding fitted current components for the sample 1# after different annealing time. (a) 8 h, (b) 16 h, (c) 24 h, (d) 32 h, (e) 40 h, (f) 48 h

随着烘烤时间的增长,器件暗电流增大,是由于烘烤导致载流子寿命降低造成的.

如图 4 (d) 和 4 (e) 所示, n -on- p 型中波 HgCdTe 器件的陷阱浓度随烘烤时间的增加而减少,同时随烘烤时间的增加陷阱能级的位置向浅能级移动.这是因为烘烤使器件的缺陷结构重新排列,这种重新排列可以使缺陷解体和恢复或部分消失,或者增长,或者出现新的缺陷^[26-27].可以理解为这两个样品在烘烤 24 h 后都在 $0.75E_g$ 处出现了新的陷阱能级.图 4(f) 所示为串联电阻随着烘烤时间的增加而减小.可以理解为烘烤后 τ_0 减小导致产生复合机制电流变大,这样就减小了串联电阻效应对总体暗电流的贡献,所以出现烘烤后串联电阻减小的趋势.

对于光伏型中波 HgCdTe 器件,每个机制的暗电流值在实验上是没法测量的.同时, $N_d * N_a$, τ_n ,

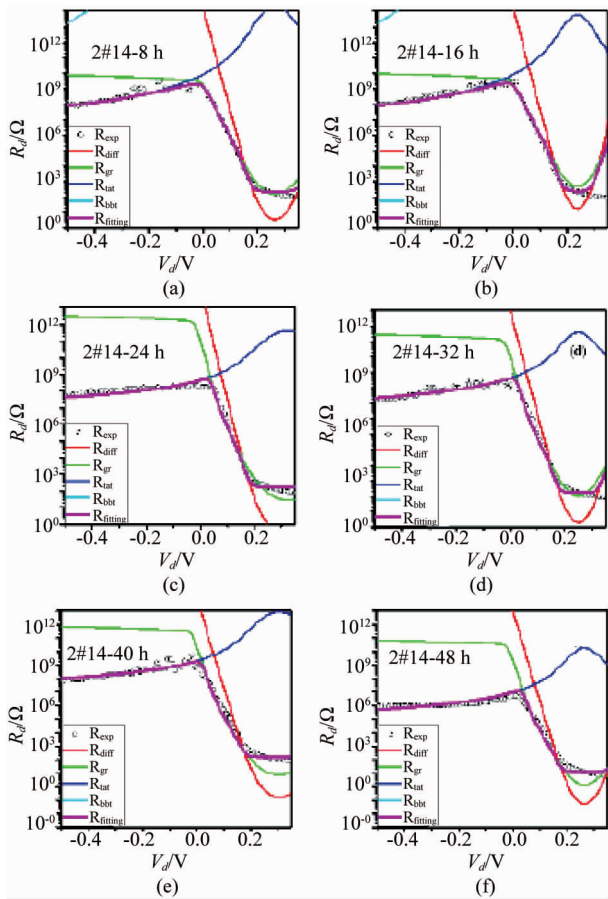


图3 样品2#在不同烘烤时间后的暗电流成分拟合结果. (a) 8 h, (b) 16 h, (c) 24 h, (d) 32 h, (e) 40 h, (f) 48 h
 Fig. 3 The measured R-V curves and the corresponding fitted current components for the sample 2# after different annealing time. (a) 8 h, (b) 16 h, (c) 24 h, (d) 32 h, (e) 40 h, (f) 48 h

$\tau_0, E_t/E_g$ 和 N_t 等重要器件参数也是实验上难以直接测试得到. 暗电流成分和器件参数都会受烘烤时间变化的影响, 因此通过拟合器件不同烘烤时间的 R-V 曲线, 可以得到许多与器件制造技术相关的重要参数.

3 结论

基于一种适用于 n-on-p 型的中波 HgCdTe 红外探测器的暗电流解析拟合模型, 完成编写了一种多维极小值参数拟合程序. 通过此模型完成对两个样品烘烤前和在不同时间的低温烘烤后的 R-V 曲线拟合分析. 发现烘烤后器件在各个偏压范围内主导暗电流的机制并没有发生变化. 烘烤时间要达到 24 h 后才对器件的性能有一定的影响. 烘烤 24 h 后, 在 $0.75E_g$ 处出现了陷阱能级, τ_0, N_t 和 R_s 都随着烘烤时间的增大而降低.

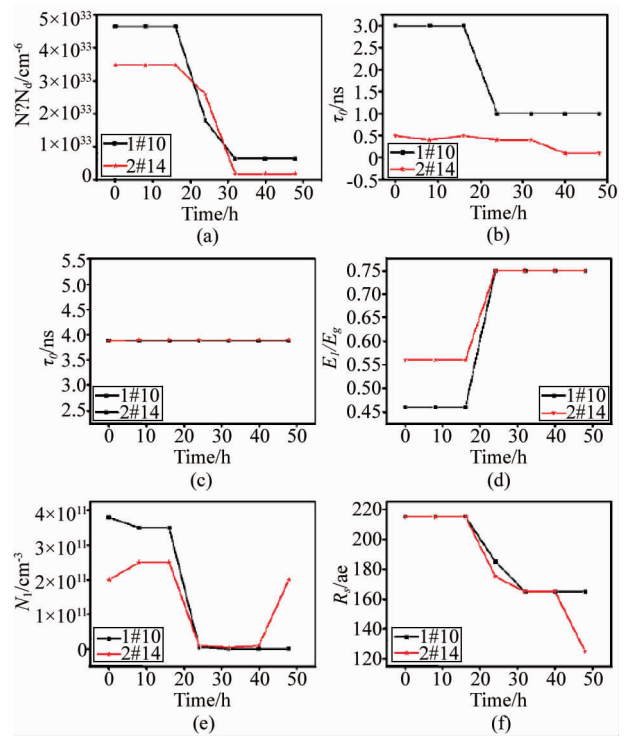


图4 两个样品各拟合参数与烘烤时间的关系. (a) n 区施主浓度和 p 区受主浓度之积 ($N_d * N_a$), (b) 耗尽区载子有效寿命 (τ_0), (c) p 区的少子寿命 (τ_n), (d) 陷阱能级的相对位置 (E_t/E_g), (e) 陷阱浓度 (N_t), (f) 串联电阻 (R_s)
 Fig. 4 Annealing time dependence of six characteristic parameters extracted from the resistance-voltage curves of two samples. (a) The product ($N_d * N_a$) of donor concentration in the n region and acceptor concentration in the p region, (b) effective lifetime in the depletion region (τ_0), (c) electron lifetime in the p region (τ_n), (d) relative energy position of the trap level (E_t/E_g), (e) trap density (N_t) in the depletion region, (f) series resistance (R_s)

References

- [1] Kosai K. Status and application of HgCdTe device modeling [J]. *J. Electronic Mat.* 1995, **24**: 635 – 640.
- [2] Hu W, Liang J, Yue F, et al. Recent progress of subwavelength photon trapping HgCdTe infrared detector [J], *J. Infrared Millim. Waves.* 2016, **35**(1), 25 – 36.
- [3] Gopal V, Hu W, Characterization of leakage current mechanisms in long wavelength infrared HgCdTe photodiodes from a study of current – voltage characteristics under low illumination [J], *J. Appl. Phys.* 2015, **118**:224503.
- [4] Qiu W, Hu W, Chen L, et al. Dark Current Transport and Avalanche Mechanism in HgCdTe Electron-Avalanche Photodiodes [J], *IEEE Transactions on Electron Devices.* 2015, **62**:1926 – 1931.
- [5] Quan Z, Ye Z, Li Z, et al. Effects of carrier degeneracy and conduction band non-parabolicity on the simulation of HgCdTe photovoltaic devices [J]. *Infra. Phys. Technol.* 2007, **50**:1 – 8.
- [6] Wang J, Chen X, Hu W, et al. Temperature dependence

- characteristics of dark current for arsenic doped LWIR HgCdTe detectors [J]. *Infra. Phys. Technol.* 2013, **61**: 157 – 161.
- [7] NGUYEN T, MUSCA C A, Dell J M, *et al.* Dark currents in long wavelength infrared HgCdTe gated photodiodes [J]. *J. Electronic Mat.* 2004. **33**(6):621 – 629.
- [8] Gopal V, Xie X, Liao Q, *et al.* Analytical modelling of carrier transport mechanisms in long wavelength planar n + - p HgCdTe photovoltaic detectors [J], *Infra. Phys. Technol.* 2014, **64**:56 – 61.
- [9] Gopal V, Li Q, He j, *et al.* Current transport mechanisms in mercury cadmium telluride diode [J], *J. Appl. Phys*, 2016, **120**:084508.
- [10] Hu W, Chen X, Y, *et al.* Analysis of temperature dependence of dark current mechanisms for long-wavelength HgCdTe photovoltaic infrared detectors [J]. *J. Appl. Phys.* 2009, **105**(104502): 1 – 8.
- [11] Bai Y, Qiao H, Li X, *et al.* Effects of annealing on HgCdTe detectors after γ irradiation [J]. *High Power Laser and particle Beam.* 2007, **02**:301 – 304.
- [12] Gopal V, Gupta S, Bhan R K, *et al.* Modeling of dark characteristics of mercury cadmium telluride $n^+ - p$ junctions [J]. *Infra. Phys. Technol.* 2003. **44**:143 – 152.
- [13] Nemirovskyy, Rosenfeld D, Adar R, *et al.* Tunneling and dark currents in HgCdTe photodiodes [J]. *J. Vac. Sci. Technol.* 1989. **A7**:528 – 535.
- [14] Martyniuk P, Rogalski A. MWIR barrier detectors versus HgCdTe photodiodes [J], *Infra. Phys. Technol.* 2015, **70**:125 – 128.
- [15] Qiu W. ,Hu W. ,Lin C. ,*et al.* Surface Leakage Current in 12.5 μ m Long-wavelength HgCdTe Infrared Photodiode Arrays [J]. *Optics Letters.* 1989. **41**:828 – 831.
- [16] Reine M B, Sood A K, Tredwell T J. Mercury cadmium telluride photovoltaic infrared detectors [M]. New York; Academic Press. 1981; 216 – 220.
- [17] Rogalski A. Infrared detectors [M]. 2nd ed. Boca Raton, Florida; CRC Press. 2011;206 – 208.
- [18] Blanks D K, Beck J D, Kinch M A, *et al.* Band-to-band tunnel processes in HgCdTe; Comparison of experimental and theoretical studies [J]. *J. Vac. Sci. Technol.* 1988. **A6**: 2790 – 2794.
- [19] Singh S K, Gopal V, Mehra R M. Relationship between deep levels and R_0A product in HgCdTe diodes [J]. *Opto-Electro. Rev*, 2001. **9**(4):385 – 390.
- [20] Gopal V, Singh S K, Mehra R M. Analysis of dark current contributions in mercury cadmium telluride junction diodes [J]. *Infra. Phys. Technol.* 2002. **43**:317 – 326.
- [21] Gopal V, Gupta S, Bhan R K, *et al.* Modeling of dark characteristics of mercury cadmium telluride $n^+ - p$ junctions [J]. *Infra. Phys. Technol.* 2003. **44**:143 – 152.
- [22] Gopal V, Qiu W, Hu W, Modelling of illuminated current - voltage characteristics to evaluate leakage currents in long wavelength infrared mercury cadmium telluride photovoltaic detectors [J], *Journal of Applied Physics.* 2014, **116**:184503.
- [23] Quan Z, Li Z, Hu W, *et al.* Parameter determination from resistance-voltage curve for long-wavelength HgCdTe photodiode [J]. *J. Appl. Phys.* 2006. **100**:084503.
- [24] Lu W, Tao F, Mu Y, *et al.* The application of solid crystallization process in optimization algorithm [J]. *Chinese Journal of Computational Physics.* 1999, **16**:141 – 144.
- [25] Cao J. *The effect of irradiation on semiconductor or material* [M]. Beijing; Science Press. 1993.
- [26] He L, Yang D, Ni G, *et al.* *Introduction to advanced focal plane arrays* [M]. Beijing; National Defence Industry Press. 2011.
- [27] Qiu W, Hu W, Lin T, *et al.* Temperature-sensitive junction transformations for mid-wavelength HgCdTe photovoltaic infrared detector arrays by laser beam induced current microscope [J]. *Applied Physics Letters.* 2014. **105**: 191106.

(上接第 269 页)

- [10] Leitenstorfer A, Hhnsche S, Shan J, *et al.* Detectors and sources for ultrabroadband electro-optic sampling; experiment and theory [J]. *Applied Physics Letters*, 1999, **74**(11): 1516 – 1518.
- [11] Fattahi H, Barros H, Gorjan M, *et al.* Third-generation femtosecond technology [J]. *Optica*, 2014, **1**(1): 45 – 63.
- [12] Clerici M, Peccianti M, Schmidt B, *et al.* Wavelength scaling of terahertz generation by gas ionization [J]. *Physical Review Letters*, 2013, **110**(25): 253901.
- [13] Vicario C, Monoszlai B, Jazbinsek M, *et al.* Intense, carrier frequency and bandwidth tunable quasi single-cycle pulses from an organic emitter covering the terahertz frequency gap [J]. *Scientific Reports*, 2015, **5**: 14394.
- [14] Du H W, Yang N. Theoretical investigation on THz generation from optical rectification with tilted-pulse-front excitation [J]. *Chinese Physics Letters*, 2014, **31**(12):124201.
- [15] Pradarutti B, Matthaus G, Bruckner C, *et al.* Electrooptical sampling of ultra-short THz pulses by fs-laser pulses at 1060 nm [J]. *Applied Physics B*, 2006, **85**:59 – 62.
- [16] Casabuoni S, Schlarb H, Schmidt B, *et al.* Numerical studies on the electro-optic detection of femtosecond electron bunches [J]. *Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams*, 2008, **11**(7):072802.
- [17] Sliker T, Jost J. Linear electro-optic effect and refractive indices of cubic ZnTe [J]. *Journal of Optical Society of America B*, 1966, **56**: 130 – 131.
- [18] Nelson D, Turner E. Electro-optic and piezoelectric coefficient and refractive index of gallium phosphide [J]. *Journal of Applied Physics*, 1968, **39**(7): 3337 – 3344.