

文章编号:1001-9014(2007)02-0092-05

# 光伏型碲镉汞长波探测器暗电流特性的参数提取研究

全知觉, 李志锋, 胡伟达, 叶振华, 陆卫

(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:**报道了一种适用于碲镉汞长波光伏探测器的由典型电阻电压( $R-V$ )曲线提取器件基本特征参数的数据处理途径. 拟合程序中采用的暗电流机制包括了扩散电流机制, 产生复合电流机制, 陷阱辅助隧穿机制以及带到带直接隧穿电流机制. 本文详细地给出了该拟合计算所采用的方法和途径, 分析了拟合参数的误差范围. 通过对实际器件的 $R-V$ 特性曲线的拟合计算, 给出了实际器件的基本特征参数, 验证了该数据处理途径的实用性.

**关键词:**碲镉汞(MCT); 光伏探测器; 暗电流; 参数提取

**中图分类号:**TB4 **文献标识码:**A

## PARAMETERS EXTRACTION FROM THE DARK CURRENT CHARACTERISTICS OF LONG-WAVELENGTH HgCdTe PHOTODIODE

QUAN Zhi-Jue, LI Zhi-Feng, HU Wei-Da, YE Zheng-Hua, LU Wei

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

**Abstract:** An data-processing method was developed to obtain the device parameters from the resistance-voltage ( $R-V$ ) characteristics measured in long-wavelength HgCdTe photodiode. This curve-fitting model includes the diffusion, generation-recombination, trap-assisted tunneling, and band-to-band tunneling current as dark current mechanisms. The fitting procedure was presented in details and the extents of the fitting errors were discussed. By fitting the  $R-V$  characteristics of a real device, the applicability of our method has been proved for obtaining the basic parameters of devices.

**Key words:** HgCdTe (MCT); photodiode; dark current; parameter extraction

### 引言

由于其优良的性能, 光伏型碲镉汞(MCT)探测器成为目前最重要的一种红外探测器<sup>[1,2]</sup>. 碲镉汞探测器的电流-电压( $I-V$ )特性通常被用来表征其性能. 要获得高性能的器件, 就必须尽量减小暗电流. 因此, 定量地分析器件的 $I-V$ 特性, 提取器件的相关物理参数, 了解暗电流产生的物理机制显得尤为重要. 然而, 目前的 $I-V$ 分析中往往还需要较多的经验辅助下的拟合计算来获得器件的基本特征参数<sup>[3]</sup>, 该方法不仅耗费时间, 而且得到的拟合参数会因经验不同而有所差异. 其主要原因是一些简单的拟合程序得到的拟合参数往往会出现多值情况, 这是一个数学上至今未解决的最小值求解难题. 针

对这一问题, 本文提出了一种数据处理途径进行数据拟合计算, 研究表明这种途径适用于光伏型MCT长波探测器的自动拟合, 可满足器件 $I-V$ 特性分析的需要.

### 1 理论模型

碲镉汞探测器的暗电流主要来源于4种机制: 扩散电流( $I_{diff}$ )、产生复合电流( $I_{gr}$ )、陷阱辅助隧穿电流( $I_{tat}$ )和带到带直接隧穿电流( $I_{bbt}$ ). 在下面给出的暗电流表达式中,  $V_d$ 是外加电压;  $N_a$ 、 $N_d$ 分别为p区和n区的掺杂浓度;  $\mu_{n,p}$ 和 $\tau_{n,p}$ 分别代表非平衡电子与空穴的迁移率和寿命;  $\tau_0$ 是耗尽区有效载流子寿命;  $N_t$ 是耗尽区的陷阱浓度;  $E_t$ 为陷阱能级;  $m_e^*$ 是表征导带边和轻空穴价带边的有效质量;  $P$

收稿日期:2006-02-16, 修回日期:2006-09-21

Received date: 2006-02-16, revised date: 2006-09-21

基金项目:国家重点基础研究专项基金(2004CB619004, 2001CB309302)和国家自然科学基金(60476031, 10234040, 60244002)资助项目

作者简介:全知觉(1977-), 男, 江西临川人, 中科院上海技术物理研究所红外物理国家重点实验室博士, 研究方向为碲镉汞器件的模拟与设计.

是 Kane 矩阵元, 取值  $8.49 \times 10^{-8} \text{ eV} \cdot \text{cm}$ ;  $M$  是跃迁矩阵元, 有  $(m_c^*/m_0)M^2 = 1 \times 10^{-23} \text{ eV}^2 \cdot \text{cm}^3$ ;  $W_0$  是零偏下的空间电荷区宽度;  $E$  是空间电荷区的电场;  $A$  是结面积; 其它常用符号代表各自通常的意思.

扩散电流可以表述为<sup>[4,5]</sup>

$$I_{\text{diff}} = A \cdot J_{\text{diff}0} \cdot \left( \exp\left(\frac{qV_d}{kT}\right) - 1 \right) \quad (1)$$

其中,  $J_{\text{diff}0} = qn_i^2 \sqrt{\frac{kT}{q}} \left( \sqrt{\frac{\mu_n}{\tau_n}} \cdot \frac{1}{N} + \sqrt{\frac{\mu_p}{\tau_p}} \cdot \frac{1}{N_d} \right)$ . 与扩散电流相联系的电阻可表述为

$$R_{\text{diff}} = \left( \frac{dI_{\text{diff}}}{dV} \right)^{-1} = \left( A \cdot J_{\text{diff}0} \cdot \frac{q}{kT} \cdot \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) \right)^{-1} \quad (2)$$

产生复合电流可以表述为<sup>[5,6]</sup>

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

式中,  $f(b)$  是一个积分因子<sup>[6]</sup>. 与产生复合电流相联系的电阻可表述为

$$R_{gr} = \left( \frac{dI}{dV} \right)^{-1} = \frac{\tau_0 \sqrt{V_{bi}}}{A \cdot 2n_i W_0 kT} \left[ \frac{\cosh\left(\frac{qV}{2kT}\right) \cdot \frac{q}{2kT} \cdot f(b) + \sinh\left(\frac{qV}{2kT}\right) \cdot \frac{df(b)}{dV}}{\sqrt{(V_{bi} - V)}} + \frac{\sinh\left(\frac{qV}{2kT}\right) \cdot f(b)}{2(V_{bi} - V)^{3/2}} \right]^{-1} \quad (4)$$

陷阱辅助隧穿电流可以表述为<sup>[5,7]</sup>

$$I_{\text{lat}} = -A \cdot \frac{\pi^2 q^2 N_i m_c^* M^2 (V_{bi} - V_d)}{h^3 (E_g - E_t)} \exp\left(-\frac{\sqrt{3} E_g^2 F(a)}{8 \sqrt{2} q P E}\right) = \text{tat}1 \cdot (V_{bi} - V_d) \cdot \exp\left(\frac{\text{tat}2}{\sqrt{V_{bi} - V_d}}\right) \quad (5)$$

其中,  $\text{tat}1 = -\frac{A \cdot \pi^2 q^2 N_i m_c^* M^2}{h^3 (E_g - E_t)}$ ,  $\text{tat}2 = -\frac{\sqrt{3} E_g^2 F(a)}{8 \sqrt{2} q P}$

$\cdot \sqrt{\frac{2 \varepsilon_s \varepsilon_0 (N_a + N_d)}{q N_a N_d}}$ . 与陷阱辅助隧穿电流相联系的电阻可表述为

$$R_{\text{lat}} = \left( \frac{dI_{\text{lat}}}{dV} \right)^{-1} = \left( -\text{tat}1 \cdot \exp\left(\frac{\text{tat}2}{\sqrt{V_{bi} - V}}\right) \cdot \left(1 - \frac{\text{tat}2}{2 \sqrt{V_{bi} - V}}\right) \right)^{-1} \quad (6)$$

带到带直接隧穿电流可以表述为<sup>[4,7-10]</sup>

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

$$= \text{bbt}1 \cdot (V_{bi} - V_d)^{\frac{3}{2}} \cdot \exp\left(\frac{\text{bbt}2}{\sqrt{(V_{bi} - V_d)}}\right) \quad (7)$$

其中,  $\text{bbt}1 = -A \cdot \frac{q^3 \sqrt{2m_c^*}}{4 \pi^3 h^2 \sqrt{E_g}} \cdot \sqrt{\frac{q N_a N_d}{2 \varepsilon_s \varepsilon_0 (N_a + N_d)}}$ ,

$$\text{bbt}2 = -\frac{\pi \sqrt{\frac{m_c^*}{2}} \cdot E_g^{\frac{3}{2}}}{2 q h} \sqrt{\frac{2 \varepsilon_s \varepsilon_0 (N_a + N_d)}{q N_a N_d}}$$
, 与带到带隧穿电流相联系的电阻可表述为

$$R_{\text{bbt}} = \left( \frac{dI_{\text{bbt}}}{dV} \right)^{-1} = \left( \text{bbt}1 \cdot (-1.5 \sqrt{V_{bi} - V} + 0.5) \exp\left(\frac{\text{bbt}2}{\sqrt{(V_{bi} - V_d)}}\right) \right)^{-1} \quad (8)$$

上面各表达式中使用的电场可表示为:  $E = \frac{V_{bi} - V}{W}$ , 耗尽区宽度  $W = \sqrt{\frac{2 \varepsilon_s \varepsilon_0 (N_a + N_d) (V_{bi} - V_d)}{q N_a N_d}}$

. 总的动态电阻可以表示为

$$R_{\text{th}} = \left( \frac{1}{R_{\text{diff}}} + \frac{1}{R_{gr}} + \frac{1}{R_{\text{lat}}} + \frac{1}{R_{\text{bbt}}} \right)^{-1} \quad (9)$$

## 2 拟合方法和途径

由于背景光的影响, 实验得到的碲镉汞二极管  $I$ - $V$  特性中往往包含有部分光电流. 在小背景情况下, 一般认为光电流与偏压无关<sup>[11]</sup>, 实验所得  $I$ - $V$  特性为暗电流特性沿纵坐标向下平移, 因此两者的  $R$ - $V$  特性相同. 基于这样一个假设, 我们将参数拟合的对象定为对器件  $R$ - $V$  特性的拟合.

目前, 主流的碲镉汞焦平面探测器为在汞空位掺杂的 p 型材料上采用 B 离子注入成结的 n-on-p 型平面结. 对于这种类型的器件, 需要拟合提取的参数主要有 5 个: n 区掺杂浓度  $N_d$ 、电子迁移率与寿命之比  $(\mu_n/\tau_n)$ 、空间电荷区有效寿命  $\tau_0$ 、陷阱能级相对位置  $E_t/E_g$  和陷阱浓度  $N_t$ . 在拟合过程中, 每一参数先给定一初值和合理变化范围, 然后在变化范围内, 循环对 5 个参数取不同组合值; 通过公式(1) ~ 式(8), 每一组参数可以计算得到一条理论  $R$ - $V$  曲线. 对比  $N$  个偏压下的理论值  $R_{\text{th}}$  和实验值  $R_{\text{exp}}$ , 取目标函数值  $F = \sum_{i=1}^N [\log(R_{\text{th}}(V_{di})) - \log(R_{\text{exp}}(V_{di}))]^2$  作为判据;  $F$  值越小, 理论与实验越吻合. 通过这样一个方法, 我们总可以得到一条与实验比较吻合的理论  $R$ - $V$  曲线, 同时获得一组拟合参数. 由于  $F$  值时 5 个参数形成的五维空间中的多极小值函数, 所以这种方法取得的拟合参数会随参数初值的选取不同而不同, 其误差范围较难确定; 而且, 由于参数的

合理变化范围比较大,所需要花费拟合时间也相应增大,因此寻求一种快捷、准确的拟合途径是很有意思的。

从上面可以看出,拟合方法的改进主要应该在拟合参数初值的选取上. 假设理论与实验完全吻合,即实验  $R_{exp}$  值与理论  $R_{th}$  值之差为零,因此对任一偏压可建立方程:

$$R_{exp} - \left( \frac{1}{R_{diff}} + \frac{1}{R_{gr}} + \frac{1}{R_{tat}} + \frac{1}{R_{bbt}} \right)^{-1} = 0 \quad (10)$$

式(10)中包含 5 个未知量,即 5 个拟合参数. 只要在实验曲线上选取 5 个特征点,就可以得到一个五元超越方程的方程组. 求解方程组,即可得到拟合参数的初值. 由于式(10)是非线性超越方程,需要使用泰勒级数将非线性项展开,然后迭代求解;所以在求解过程中,仍旧需要选定一组初值. 在这个过程中,又会存在容错性问题:当初值偏离方程解一定范围时,方程求解出现发散. 因此,直接求解五元方程组在实际操作中不可行.

由于长波碲镉汞暗电流的 4 种机制在各个偏压段所起的作用各不相同:大正偏压下,扩散电流为主导,零偏和小正偏时,产生复合电流流为主导;小反偏下,陷阱辅助隧穿为主导;大反偏下,带到带直接隧穿为主导. 虽然它们之间的作用范围会存在交叠甚至掩盖,但这个一般性规律也为求解式(10)提供了假设依据.

首先,我们观察到带到带直接隧穿机制的式(8)只与拟合参数  $N_d$  有关. 只要在大反偏下找一实验点,认为此偏压下暗电流由带到带隧穿机制主导,式(10)可以简化为

$$R_{exp} - R_{bbt} = 0 \quad (11)$$

式(11)为一元超越方程. 这样可很容易地求得  $N_d$ . 同样,只要在大正偏下找一实验点,认为此偏压下暗电流由扩散机制主导,式(10)可以简化为

$$R_{exp} - R_{diff} = 0 \quad (12)$$

将所得的  $N_d$  代入,式(12)为一元超越方程,可求得  $\mu_n/\tau_n$ . 在小正偏压下,可认为暗电流来自产生复合机制和扩散机制共同作用,式(10)可以简化为

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

将所得的  $N_d$  和  $\mu_n/\tau_n$  代入,式(13)为一元超越方程,可求得  $\tau_0$ . 在小反偏下,认为暗电流来自产生复合机制、陷阱辅助隧穿机制和带到带隧穿机制共同作用,式(10)简化为

$$R_{exp} - \left( \frac{1}{R_{gr}} + \frac{1}{R_{tat}} + \frac{1}{R_{bbt}} \right)^{-1} = 0 \quad (14)$$

将所得的  $N_d$ 、 $\mu_n/\tau_n$  和  $\tau_0$  代入,式(14)为二元超越方程. 此时,需选 2 个实验点来求解  $E_i/E_g$  和  $N_i$ . 首先考虑迭代法:对一实验点给定  $E_i/E_g$  初值,求得  $N_i$ ;然后根据求得的  $N_i$ ,对另一实验点求  $E_i/E_g$ ;如此迭代. 但这种方法仍然有容错性问题. 采用搜索法: $E_i/E_g$  存在一合理范围(0.2 ~ 0.8),在这一范围变化,对每一  $E_i/E_g$  对应 2 个实验点分别求得 2 个  $N_i$  值;比较这 2 个  $N_i$  值,两者越接近,对应的  $E_i/E_g$  则作为前面所说的迭代法的初值. 这样通过迭代,可求得  $E_i/E_g$  和  $N_i$ .

通过以上方法,我们能得到较为合理的拟合参数初值. 根据初值,可以给出一定范围的拟合上、下限,一般在一个数量级范围. 在拟合过程中,如发现拟合参数被上、下限钉扎,可适当调宽范围.

在器件的  $I-V$  测量当中,常常会有噪声干扰. 我们的拟合模型并不能描述这些噪声,但噪声大小显然会影响拟合参数. 为估计该拟合方法对于外界随机噪声的敏感性,利用拟合程序对经过随机噪声处理后的理论曲线进行拟合,即设定 5 个拟合参数值求得理论曲线,在上述理论计算值的基础上分别增加了一变化范围为  $\pm 1\%$ 、 $\pm 1.25\%$  和  $\pm 2\%$  的随机噪声;然后使用拟合程序拟合这些理论曲线又分别得到各自的一组拟合参数值,对比前面的理论设定值,即为拟合误差. 计算中,对  $R-V$  特性的拟合范围为  $-0.46 \sim 0.08V$ ,所用材料参数见表 1 所列,设定的拟合参数和拟合求得的拟合参数见表 2 所列.

由表 2 可以看出,在噪声小于 2% 的范围内,拟合得到的参数值与理论设定值相差很小,完全满足暗电流分析的准确性要求,所以在通常的实验随机噪声条件下(一般都  $< 2\%$ ),所采用的拟合方法是可行的.

表 1 理论计算用器件参数

Cd 组分	$N_d$ (cm <sup>-3</sup> )	$\mu_p$ (cm <sup>2</sup> /Vs)	$A$ ( $\mu\text{m}^2$ )	$T$ (K)
0.233	$8 \times 10^{15}$	633	$28 \times 28$	77.4

表 2  $R-V$  曲线拟合中理论设定的 5 个拟合参数及分别加上大小为 1%、1.25% 和 2% 的背景噪声后得到的拟合结果

Table 2 Five setting-up fitting parameters in  $R-V$  curve fitting and their changes by adding 1%、1.25% and 2% noises in  $R-V$  curves, respectively

	$N_d$ (cm <sup>-3</sup> )	$\mu_n/\tau_n$ (cm <sup>2</sup> /V <sup>2</sup> s)	$\tau_0$ (ns)	$E_i/E_g$	$N_i$ (cm <sup>-3</sup> )
理论设定	$1.676 \times 10^{16}$	$9.51 \times 10^{13}$	0.207	0.491	$1.968 \times 10^{12}$
噪声 1%	$1.689 \times 10^{16}$	$9.76 \times 10^{13}$	0.237	0.499	$1.681 \times 10^{12}$
噪声 1.25%	$1.688 \times 10^{16}$	$9.76 \times 10^{13}$	0.236	0.499	$1.642 \times 10^{12}$
噪声 2%	$1.681 \times 10^{16}$	$9.76 \times 10^{13}$	0.242	0.501	$1.382 \times 10^{12}$

但对于实际器件, 我们无法知道参数的真实值, 只有拟合参数值. 因此需要知道拟合参数的最大误差范围来判定拟合参数值的准确性. 任一偏压下拟合引起的动态电阻标准误差可表示为:  $\Delta R = |R_{th}(V_{di}) - R_{exp}(V_{di})|$ . 假设这一误差均来自某一参数, 于是可以得到

$$\sigma_{x_j} = \left| \frac{\partial R_{th}}{\partial x_j} \right| \cdot \Delta R \quad (15)$$

式中,  $\sigma_{x_j}$  为各拟合参量的误差,  $x_j$  代表各拟合参数. 可以用式(15)得到各拟合参数的误差上限, 在一定程度上表述提取的拟合参数的准确度.

但  $R-V$  曲线有其本身的特性: 在不同偏压下, 不同机制占主导. 如在产生复合机制占主导情况下分析  $\mu_n/\tau_n$  参数的最大误差, 显然这个参数的误差要被放大; 在大反偏下更甚, 会无限放大. 因此, 对所有偏压进行平均是不可行的. 可以象前面定初值的方法一样, 根据参数的作用范围分段计算误差. 所有的 4 种暗电流机制均与  $N_d$  有关, 其误差估计可对所有偏压进行平均.  $\mu_n/\tau_n$  仅与扩散电流相关, 取从  $R-V$  特性曲线峰值对应的电压至正偏方向的所有电压为其误差估计范围.  $\tau_0$  仅与产生复合电流相关, 取  $R-V$  特性曲线峰值左边比峰值小 2 个数量级对应的电压为下限, 至正偏方向的所有电压为误差估计范围.  $E_i/E_g$  和  $N_i$  仅与陷阱辅助隧穿电流有关, 取  $R-V$  特性曲线峰值对应电压至反偏方向的所有电压为误差估计范围. 求得的拟合参数最大误差见表 3 所列. 表 2 中, 不同噪声下得到的拟合参数对比理论设定值的误差均在表 3 的最大误差范围内, 因此, 可以认为, 用此方法估算的拟合误差具有一定的参考价值. 同时我们也发现  $E_i/E_g$  和  $N_i$  的误差范围与真实的误差值很接近, 这主要是由于这 2 个参数对  $R-V$  的影响重点在慢变的负偏压区域, 受到快变的正偏压区域影响较小, 这一点在下文讨论的受串联电阻影响的情况中也表现出相似特征.

实际器件的  $R-V$  特性中还包含了串联电阻效应. 因此, 在上面的计算当中再加入  $200\Omega$  的串联电阻后进行拟合, 拟合得到的参数值及误差范围分别见表 4 和表 5 所列.

对比表 2 和表 4, 可以发现串联电阻对  $\mu_n/\tau_n$  影响较大, 即对扩散电流机制影响较大, 这是因为扩散电流机制为主导时, pn 结的动态电阻较小, 因此串联电阻效应成为主导. 而对于 pn 结动态电阻远大于串联电阻的范围, 串联电阻效应对拟合参数的影响几乎可以忽略. 对比表 3 和表 5,  $N_d$ 、 $\mu_n/\tau_n$  和  $\tau_0$  的误

表 3 大小为 1%、1.25% 和 2% 的背景噪声下计算得到的 5 个拟合参数的最大误差范围 (括号内为表 2 给出的真实误差值)

Table 3 The maximum errors of the five fitting parameters from the calculations with 1%, 1.25% and 2% background noises. (data in brackets are the real errors from Table 2)

误差范围	$\Delta N_d$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$\Delta \mu_n/\tau_n$ ( $\text{cm}^2/\text{V}^2$ )	$\Delta \tau_0$ (ns)	$\Delta E_i/E_g$	$\Delta N_i$ ( $\text{cm}^{-3}$ )
噪声 1%	$2 \times 10^{15}$ ( $1 \times 10^{14}$ )	$9 \times 10^{12}$ ( $1 \times 10^{12}$ )	0.1 (0.03)	0.01 (0.008)	$3 \times 10^{11}$ ( $3 \times 10^{11}$ )
噪声 1.25%	$3 \times 10^{15}$ ( $1 \times 10^{14}$ )	$8 \times 10^{12}$ ( $1 \times 10^{12}$ )	0.2 (0.03)	0.01 (0.008)	$4 \times 10^{11}$ ( $3 \times 10^{11}$ )
噪声 2%	$5 \times 10^{15}$ ( $5 \times 10^{13}$ )	$1 \times 10^{13}$ ( $1 \times 10^{12}$ )	0.3 (0.04)	0.03 (0.01)	$6 \times 10^{11}$ ( $6 \times 10^{11}$ )

表 4 加  $200\Omega$  串联电阻后, 各背景噪声下获得的 5 个拟合参数

Table 4 The five fitting parameters for various noises after adding a  $200\Omega$  series resistance

	$N_d$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$\mu_n/\tau_n$ ( $\text{cm}^2/\text{V}^2$ )	$\tau_0$ (ns)	$E_i/E_g$	$N_i$ ( $\text{cm}^{-3}$ )
噪声 1%	$1.691 \times 10^{16}$	$6.72 \times 10^{13}$	0.236	0.499	$1.669 \times 10^{12}$
噪声 1.25%	$1.689 \times 10^{16}$	$6.72 \times 10^{13}$	0.236	0.499	$1.626 \times 10^{12}$
噪声 2%	$1.682 \times 10^{16}$	$6.72 \times 10^{13}$	0.239	0.501	$1.378 \times 10^{12}$

表 5 加串联电阻后, 各背景噪声下的 5 个拟合参数的最大误差范围 (括号内为表 4 给出的真实误差值)

Table 5 The maximum errors of the five fitting parameters for various noises after adding a  $200\Omega$  series resistance (data in brackets are the real errors from Table 4)

误差范围	$\Delta N_d$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$\Delta \mu_n/\tau_n$ ( $\text{cm}^2/\text{V}^2$ )	$\Delta \tau_0$ (ns)	$\Delta E_i/E_g$	$\Delta N_i$ ( $\text{cm}^{-3}$ )
噪声 1%	$4 \times 10^{16}$ ( $2 \times 10^{14}$ )	$1 \times 10^{14}$ ( $3 \times 10^{13}$ )	0.5 (0.03)	0.01 (0.01)	$3 \times 10^{11}$ ( $3 \times 10^{11}$ )
噪声 1.25%	$4 \times 10^{16}$ ( $1 \times 10^{14}$ )	$1 \times 10^{14}$ ( $3 \times 10^{13}$ )	0.6 (0.03)	0.02 (0.01)	$4 \times 10^{11}$ ( $3 \times 10^{11}$ )
噪声 2%	$4 \times 10^{16}$ ( $1 \times 10^{14}$ )	$1 \times 10^{14}$ ( $3 \times 10^{13}$ )	0.7 (0.03)	0.03 (0.01)	$6 \times 10^{11}$ ( $6 \times 10^{11}$ )

差范围变得很大, 这与它们误差估计时的偏压范围均包含了大正偏相关, 因为在大正偏下, 串联电阻效应成为主导. 分析中我们可以看出, 当  $R-V$  特性的拟合范围中出现有串联电阻效应为主导的情况, 需将出现串联电阻效应的部分排除在拟合范围之外, 然后再进行拟合.

### 3 在实际器件中的应用

对不同长波器件的数条  $R-V$  曲线进行拟合的结果证明, 该方法有很好的实用价值. 下面以一长波器件为例进行说明, 拟合范围为  $-0.46 \sim 0.04\text{V}$ . 首先观察整条曲线, 取数据较平滑的一段作为拟合范围. 然后在拟合范围内选择计算拟合参数初值的 5 个特

征数据点:第一步,取偏压为-0.45V的实验点带入式(11)中求得 $N_d$ 的初值;第二步,取偏压为0.04V的实验点带入式(12)中求得 $\mu_n/\tau_n$ 的初值;第三步,取偏压为0V的实验点带入式(13)中求得 $\tau_0$ 的初值;第四步,取偏压为-0.1V和-0.2V的2个实验点带入式(14)中求得 $E_i/E_g$ 和 $N_i$ 的初值.其具体方法已在第二节作了详细说明.求得初值后开始拟合.器件参数、拟合参数和拟合参数误差范围分别见表6和表7所列. $R-V$ 曲线和拟合结果如图1所示.

表7中, $\mu_n/\tau_n$ 的误差范围相对较大.这主要是因为拟合范围内的正偏压下,扩散电流机制一直未能成为主导(如图1所示),导致拟合得到的 $\mu_n/\tau_n$ 参数准确性不高.总体而言,5个基本特征参数的准确性依次为: $E_i/E_g$ 、 $N_i$ 、 $\tau_0$ 、 $N_d$ 和 $\mu_n/\tau_n$ .图1显示经该方法拟合得到的理论曲线与实验曲线吻合很好.

4 结语

本文介绍了一种精确拟合 $R-V$ 特性的方法,发

展了适用于光伏型MCT长波探测器的自动拟合程序.通过仔细分析不同偏压下起主导作用的暗电流机制,分别确定各拟合参数的初值,并由迭代拟合得到n区掺杂浓度 $N_d$ 、电子迁移率与寿命之比 $\mu_n/\tau_n$ 、空间电荷区有效寿命 $\tau_0$ 、陷阱能级相对位置 $E_i/E_g$ 和陷阱浓度 $N_i$ 等5个基本特征参数的拟合值.分析了在不同噪声水平下,这些拟合参数的误差范围.通过对实际器件 $R-V$ 特性拟合,证明这一方法将会成为实际器件 $I-V$ 分析的有效工具.

REFERENCES

[1] YE Zhen-Hua, HU Xiao-Ning, CAI Wei-Ying, et al. The application of laser beam induced current for technology detecting of HgCdTe two-color detector[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (叶振华, 胡晓宁, 蔡炜颖, 等. LBIC在HgCdTe双色探测器的工艺检测中的应用. *红外与毫米波学报*), 2005, 24(6): 459—462.

[2] SUN Li-Zhong, CHEN Xiao-Shuang, ZHOU Xiao-Hao, et al. First-principles calculations on the mercury vacancy in  $Hg_{0.5}Cd_{0.5}Te$ [J]. *Acta Physica Sinica* (孙立忠, 陈效双, 周孝好, 等. 碲镉汞材料中Hg空位缺陷的第一性原理研究. *物理学报*), 2005, 54(4): 1756—1761.

[3] YE Zhen-Hua, HU Xiao-Ning, ZHANG Hai-Yan, et al. Study of dark current for mercury cadmium telluride long-wavelength photodiode detector with different structures[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (叶振华, 胡晓宁, 张海燕, 等. 不同结构的碲镉汞长波光伏探测器的暗电流的研究. *红外与毫米波学报*), 2004, 23(2): 86—90.

[4] AKIRA AJISAWA, NAOKI ODA. Improvement in HgCdTe Diode Characteristics by Low Temperature Post-Implantation Annealing[J]. *J. Electr. Mater.*, 1995, 24: 1105—1111.

[5] Gopal V, Gupta S, Bhan R K. Modeling of dark characteristics of mercury cadmium telluride n<sup>+</sup>-p junctions[J]. *Infra. Phys. Technol.*, 2003, 44: 143—152.

[6] Reine M B, Sood A K, Tredwell T J. *In Semiconductors and Semimetals*[M]. Willardson R K, Beer A C. Editors, New York: Academic Press, 1981, 18:207.

[7] Nguyen T, Musca C A, Dell J M, et al. Dark current in long wavelength infrared HgCdTe gated photodiodes[J]. *J. Electr. Mater.*, 2004, 33: 621—629.

[8] John L Moll. *In Physics of Semiconductors*[M]. New York: McGraw-Hill, 1964, 252.

[9] Gumenjuk-Sichevskaya J V, Sizov F F. Currents in narrow-gap photodiodes[J]. *Semicond. Sci. Technol.*, 1999, 14: 1124—1131.

[10] Blanks D K, Beck J D, Kinch M A, et al. Colombo, band-to-band tunnel processes in HgCdTe: comparison of experimental and theoretical studies[J]. *J. Vac. Sci. Technol.*, 1988, A6: 2790—2794.

[11] Sze S M. *Physics of Semiconductor Devices*[M]. New York: Wiley, 1981, 800.

表6 实际器件的器件参数

Table 6 Parameters of the real device

Cd组分	$N_d$ (cm <sup>-3</sup> )	$\mu_n/\tau_n$ (cm <sup>2</sup> /Vs)	A (μm <sup>2</sup> )	T (K)
0.2323	$5.65 \times 10^{15}$	813	2500	80

表7 实际器件的5个拟合参数

Table 7 Five fitting parameters for the real device

	$N_d$ (cm <sup>-3</sup> )	$\mu_n/\tau_n$ (cm <sup>2</sup> /V <sup>2</sup> s)	$\tau_0$ (ns)	$E_i/E_g$	$N_i$ (cm <sup>-3</sup> )
数值拟合值	$2.36 \times 10^{16}$	$1.83 \times 10^{13}$	0.148	0.491	$1.106 \times 10^{12}$
误差范围	$1.704 \times 10^{16}$	$5.59 \times 10^{13}$	0.029	0.005	$1.023 \times 10^{11}$
参数值	$(2 \pm 1) \times 10^{16}$	$(2 \pm 6) \times 10^{13}$	$0.15 \pm 0.03$	$0.491 \pm 0.005$	$(1.1 \pm 0.1) \times 10^{11}$
参数相对误差	50%	300%	20%	1%	10%

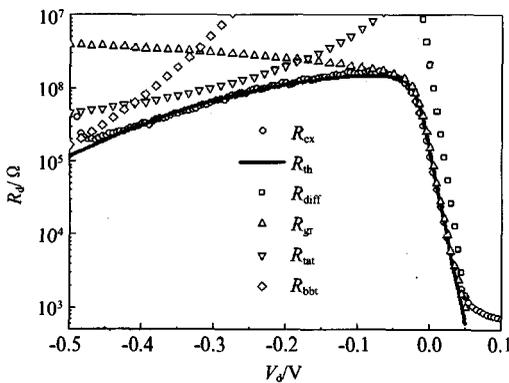


图1 长波器件的 $R-V$ 曲线及其拟合结果

Fig.1  $R-V$  characteristics of the long-wavelength diode, and its fitting results