

# 碲化铅/碲锡铅异质结构二极管 结电阻的温度关系

张素英 乔怡敏

(中国科学院上海技术物理研究所)

1983年11月19日收到, 1984年7月31日收到修改稿

在 28—160K 温度范围内测量了液相外延制备的  $n\text{-PbTe}/p\text{-PbSnTe}$  异质结构二极管的零偏压结电阻面积乘积  $R_0A$ 。采用通常的 p-n 结模型计算了  $R_0A$  的温度关系, 并与实验曲线进行比较, 结果表明: 对于掺杂浓度约  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 、77K 的半峰值截止波长为  $11.5 \mu\text{m}$  的典型二极管, 在低于 50K 时  $R_0A$  主要受隧道电流限制。

## 一、引言

碲锡铅是  $8\text{--}14 \mu\text{m}$  大气窗口的红外探测器材料之一。光伏型红外探测器的热限制理论探测极限与二极管的零偏压电阻面积乘积  $R_0A$  的平方根成正比<sup>[1]</sup>。除少数载流子的扩散电流外, 如果二极管中还存在产生复合电流, 隧道电流或表面漏电等导电机构, 那么二极管的零偏压电阻及探测率就要降低。关于组分  $x$  在 0.20 左右的碲锡铅同质结二极管的电流机构已有详细的报道<sup>[2-7]</sup>。对于碲锡铅异质结的光伏探测器的电流机构, 目前尚无肯定的结论。L. H. Devaux 在资料[2]中给出了  $\text{PbTe}/\text{PbSnTe}$  异质结在 30—100 K 间的  $R_0A$  的温度关系, 但未作详细分析。C. C. Wang<sup>[6]</sup> 用通常的 p-n 结模型研究了  $\text{PbTe}/\text{PbSnTe}$  异质结构二极管的正向和反向区域的电流特性, 认为面积大于  $10^{-3} \text{ cm}^2$  的二极管在 60K 以下是体内缺陷漏电, 在较高温度下是激活能为 0.082 eV 的扩散电流和激活能为 0.044 eV 的产生复合电流, 即 p-n 结二极管电流是由  $\text{PbSnTe}$  一侧产生的。而 A. Zemel 等<sup>[8]</sup>指出,  $\text{PbTe}/\text{PbSnTe}$  异质结构二极管的正向电流在 20—92K 间具有隧道电流的特征。本文报道了 160—28 K 温度范围内的  $R_0A$  的测量结果, 并用通常的 p-n 结模型计算了辐射复合和俄歇复合两种寿命机构的扩散电流限制的  $R_0A$ , 产生复合电流限以及隧道电流限的  $R_0A$  与温度的关系, 并与实验曲线进行了对比。对低温区  $R_0A$  趋于饱和的现象进行了讨论。

## 二、实验方法

### 1. 样品的制备

用汽相法生长的高载流子浓度的  $\text{PbSnTe}$  单晶作为衬底, 取向为 (100) 面, 偏差小于

0.5°。用液相外延方法在550—520°C生长一层低载流子浓度的PbSnTe层，厚20—30μm，其浓度由红外反射测量<sup>[9]</sup>得出约为 $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ；再在520—510°C液相外延一层n-PbTe，厚7—10 μm。采用改进的台面二极管工艺，降低了器件工艺损伤<sup>[10,11]</sup>，制作了光敏面为 $0.6 \times 0.6$ 或 $0.3 \times 0.3 \text{ mm}^2$ 的光伏型红外探测器。

## 2. 实验装置

图1为测量PbTe/PbSnTe二极管零偏压电阻的装置示意图。其中 $V_1$ 和 $R_1$ 一起构成一个交流恒流源。如与样品并联的阻抗足够大，则有 $V_i = \left(\frac{V_1}{R_1}\right) \cdot R$ ，即124A型锁相放大器得到的讯号正比于探测器的动态电阻 $R$ 。用直流电阻很低的大电感 $L$ 建立一个近似直流零偏压条件，但对交流近似开路，不影响交流阻抗测量，即由124A型锁相放大器接到X-Y记录仪Y轴的电压正比于元件零偏压电阻 $R_0$ 。

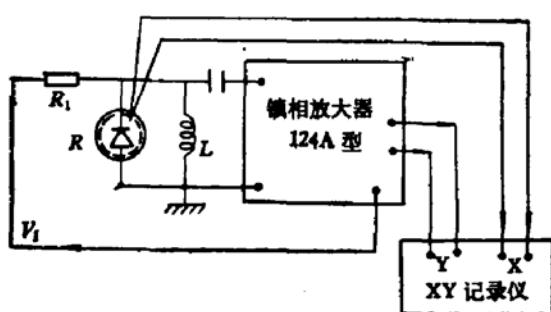


图1 PbTe/PbSnTe二极管零偏压电阻  
测量装置示意图

将制备好的二极管安装在28K氖节流致冷机作冷源的变温杜瓦瓶的冷头上，用作温度指示的金铁热偶埋在紧贴着二极管的钢片中。金铁热偶直接连结到X-Y记录仪的x轴上，同时采用数字电压表监示热偶读数。热偶的参考点是77K液氮点。这样由X-Y记录仪直接描出的是零偏压电阻 $R_0$ 随热偶电动势变化曲线，然后利用热偶定标曲线得出 $R_0$ 与温度的关系曲线。

将电感接地端断开，接入一个可变直流偏压源，记录仪X轴记录探测器上的偏压 $V$ ，则记录仪Y轴所测得的是探测器在直流偏压 $V$ 处的动态电阻 $R$ 。改变探测器温度，可以得到不同温度下的 $R \sim V$ 的关系曲线。

在所有测量中，调整图1中的 $V_1$ 和 $R_1$ 使二极管都处于交流小讯号条件下。

## 三、实验结果及讨论

在图1的交流讯号源 $V_1$ 的频率小于5kHz时，改变频率不影响n-PbTe/p-PbSnTe异质结构二极管的电阻测量结果。本文的实验值都是在这个低频范围内得出的，因而可以不考虑二极管电容的影响。

用小光点扫过二极管台面区域，测量二极管的光电讯号，得到光敏面与台面的几何尺寸一致<sup>[11]</sup>，因此这里的实验结果都用零偏压电阻面积乘积 $R_0A$ 来表示。

图2、3给出n-PbTe/p-PbSnTe异质结构二极管的 $R_0A$ 实验值的两种温度关系。对于图2的典型器件，在高于50K时， $R_0A$ 与 $\exp\left(\frac{0.048 \text{ eV}}{kT}\right)$ 成正比，低于50K则趋于平坦。图3中的优质器件，在高于100K的范围内 $R_0A \propto \exp\left(\frac{0.086 \text{ eV}}{kT}\right)$ 。

由于PbTe的禁带宽度在77K时为0.22eV，并随温度上升而增大，而 $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ 的

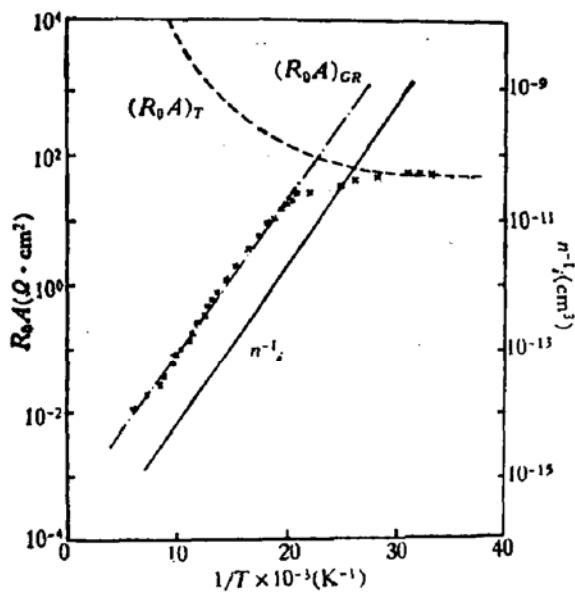
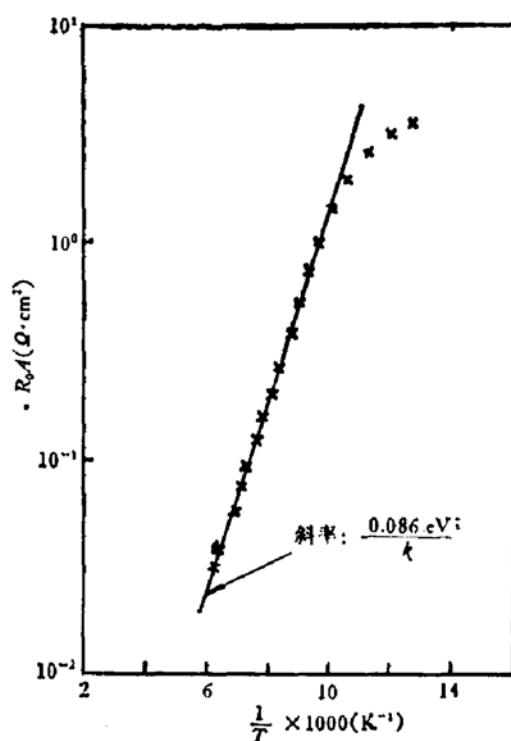


图2 典型二极管的  $R_0A$  与温度的关系  
 $\text{PbTe}/\text{Pb}_{0.81}\text{Sn}_{0.19}\text{Te}$ , No. 2E-98-50  
 ×为实验值



禁带宽度小于此值, 对组分  $x$  约 0.20 的材料, 77K 下约为 0.1 eV, 所以上述实验给出的两个激活能值指出, 二极管电流主要来自  $n$ -PbTe/ $p$ -PbSnTe 二极管的 PbSnTe 一侧。由二极管的光电响应光谱曲线得出 77 K 的半峰值灵敏度长波限为  $11.5 \pm 0.2 \mu\text{m}$ , 对于禁带宽度  $E_g = 0.108 \pm 0.002 \text{ eV}$ 。用资料 [7] 的  $E_g \sim x$  经验公式算得  $p$ - $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$  外延层的组分  $x = 0.190 \pm 0.0035$ 。

因此在高于 50 K 的较高温度范围内  $R_0A$  的温度关系可以用普通的  $p$ - $n$  结扩散电流和产生复合电流来解释<sup>[4,6]</sup>。

扩散电流决定的  $R_0A$  理论公式为

$$(R_0A)_D = \frac{(kT)^{\frac{1}{2}}}{q^{3/2} n_i^2} \left\{ \frac{1}{p} \left( \frac{\mu_n}{\tau_n} \right)^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{n} \left( \frac{\mu_p}{\tau_p} \right)^{\frac{1}{2}} \right\}^{-1}. \quad (1)$$

其中各量有其通常含义<sup>[4]</sup>。本征载流子浓度  $n_i$  采用资料 [12] 的公式, 式中有效质量等参数和 [4] 所用的相同, 并假定在 28—160K 间不变。迁移率  $\mu_n$  与  $\mu_p$  相差不大且可忽略与浓度的关系<sup>[6]</sup>, 但与  $T^{-2.6}$  成正比<sup>[13]</sup>。类似于 [4], 利用这些参数及前述  $E_g$  的公式, 计算了辐射复合及本征俄歇复合两种情况下的扩散电流限制的零偏压电阻面积乘积  $(R_0A)_{D,R}$  及  $(R_0A)_{D,A}$ , 其与温度和载流子浓度的关系分别示于图 4、5。

产生复合电流决定的  $R_0A$  为<sup>[3]</sup>

$$(R_0A)_{G,R} = V_{bi} \cdot \tau / (q \cdot n_i \cdot w), \quad (2)$$

计算的曲线也示于图 4、5, 空间电荷区宽度  $w$  分别按突变结和缓变结模型计算, 内建势  $V_{bi}$  取为  $\frac{E_g}{q}$ ; 为了简洁图 4 中计算结果用  $\tau \sqrt{N}$  (突变结) 或  $\tau a^{\frac{1}{2}}$  (缓变结) 作参变量表

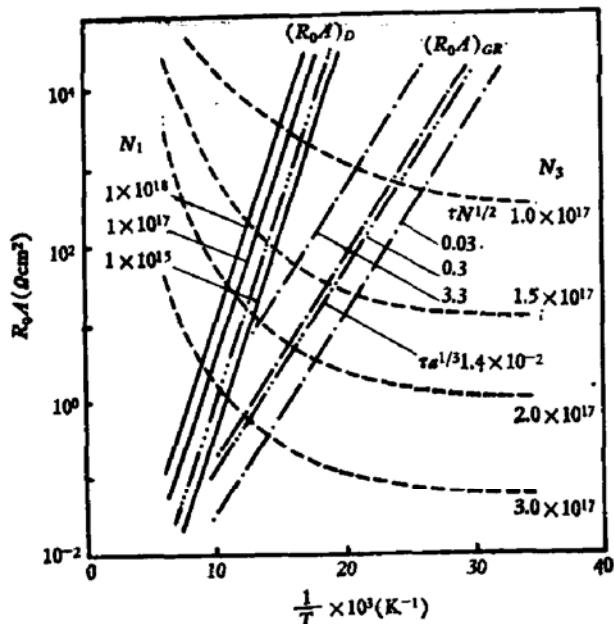


图4 几种电流机构决定的  $R_oA$  与温度的关系  
 —····— 为俄歇复合    ——— 为辐射复合  
 - · - · - 为突变结    - · - - - 为缓变结    - - - - - 为隧道电流

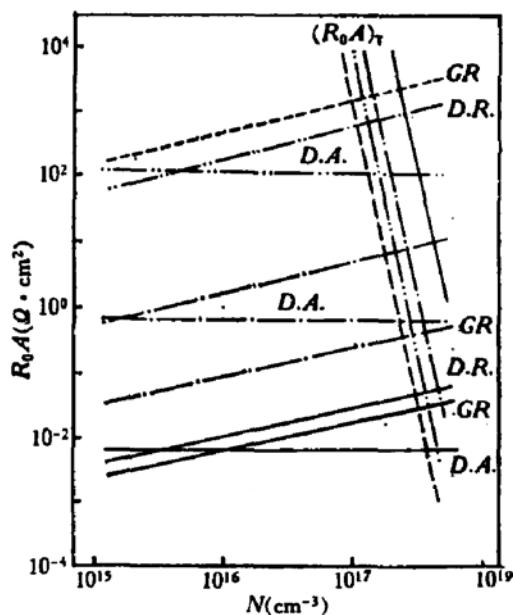


图5 几种电流机构决定的  $R_oA$  与浓度的关系  
 [DR, DA 代表  $(R_oA)_{DR}$ ,  $(R_oA)_{DA}$ ]  
 ——— 160K    - - - 100K    - · - 70K  
 - - - - - 40K    - - - - - 30K

示， $\tau$  为寿命， $N$  为有效浓度， $a$  为缓变系数，图 5 中则给出对应  $\tau = 10^{-9}$  秒的计算结果。

从图 4 看到，只要浓度和寿命不太低，则在约 100 K 以上的高温区有可能出现扩散电流决定  $R_oA$  的情况。图 3 中的实验点在 100 K 以上与俄歇复合情况的扩散电流决定的  $(R_oA)_{D,A}$  符合得很好，与  $n_i^2$  成反比，电离能 0.086 eV 与  $x = 0.19$  的 PbSnTe 在 0K 的禁带宽度 0.087 eV 一致。在 77K 下  $R_oA$  高达  $3.4 \text{ cm}^2$ 。在寿命值较低时，会出现与  $n_i$  成反比的温度关系，图 2 中的实验结果即属于这种情况。这里不能确定二极管过渡区的情况，但电容-电压关系测量表明，有可能是缓变结，且缓变系数  $a = 1.5 \times 10^{21} \text{ cm}^{-4}$ <sup>[14]</sup>。取寿命  $\tau = 1\text{ns}$ ，则可以使产生复合电流限制的  $R_oA$  的计算曲线与图 2 的实验值拟合得很好。对突变结情况作相似的拟合，得到  $\tau \sqrt{N}$  的值为  $0.23 \text{ s} \cdot \text{cm}^{-3/2}$ ，若取  $N$  为  $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ，则  $\tau$  为  $0.73 \text{ ns}$ 。在计算曲线与实验值进行拟合时，忽略了复合中心俘获系数的温度关系，而把杂质半导体的寿命作为与温度无关的常数。约 1ns 的复合中心复合寿命是完全可能的，因为掺杂浓度为  $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  时本征俄歇复合寿命就很低，例如 100 K 时为 3ns ( $x = 0.19$ )。

图 2 中实验曲线的电离能为 0.048 eV，高于 0K 的  $E_g/2$ ，这可能是二极管中还含有较多的扩散电流成份的缘故。

对于 50K 以下的  $R_oA$  平坦区，不必用表面漏电或体内缺陷<sup>[6]</sup>来说明。隧道电流是一种可能的解释。隧道电流决定的  $(R_oA)_T$  公式为<sup>[4]</sup>：

$$R_oA = \frac{1.67 \cdot \epsilon_f^{1/2}}{\left(\frac{m_{in}^*}{m_0}\right)^{1/2} \cdot N_3^{1/2}} \cdot \exp \left[ \frac{3.59 \times 10^{10} \cdot \left(\frac{m_{in}^*}{m_0}\right)^{1/2} \cdot \epsilon_f^{1/2} \cdot E_g}{N_3^{1/2}} \right]. \quad (3)$$

式中  $m_{in}^*$  是隧道有效质量， $\epsilon_f$  为相对介电常数，取为常数<sup>[4]</sup>， $N_3$  为有效载流子浓度，禁带

宽度  $E_g$  仍采用资料[7]的经验公式, 计算出  $(R_0A)_T$  与温度和浓度的理论曲线, 亦示于图 4、图 5 中。可以看出, 为了提高隧道电流限制的  $R_0A$ , 必需降低掺杂浓度, 浓度越低, 则隧道电流起作用的温度也越低。但浓度降得太低, 也会引起产生复合电流增高。由图 5 可见, 对于寿命值在 1 ns 附近, 器件的最佳掺杂浓度在  $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  附近。图 2 中 50 K 以下的平台与  $N_d = 1.25 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  的理论曲线相符。这个浓度与红外反射<sup>[9]</sup>给出的值相近。L. H. Devaux<sup>[2]</sup>给出的  $R_0A \sim T$  关系, 在约 30 K 时  $R_0A$  仅略有下降, 估计其器件的掺杂浓度不高于  $6 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 。图 3 的优质器件在 100 K 以下  $R_0A$  即下弯, 估计浓度接近  $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 。Zemel<sup>[8]</sup>指出在 92 K 下还出现隧道电流, 其器件的浓度也是比较高的。

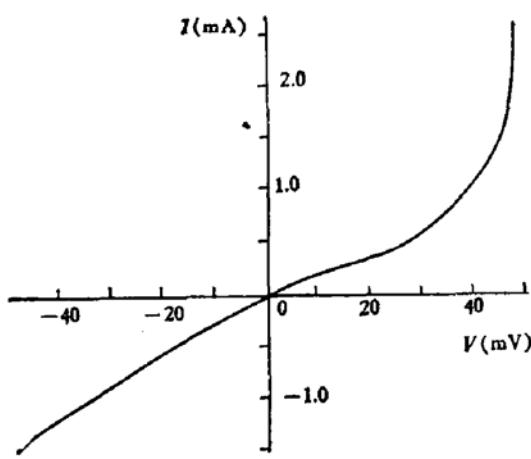


图 6 n-PbTe/p-PbSnTe 二极管伏安特性  
28K, 2E-98-A

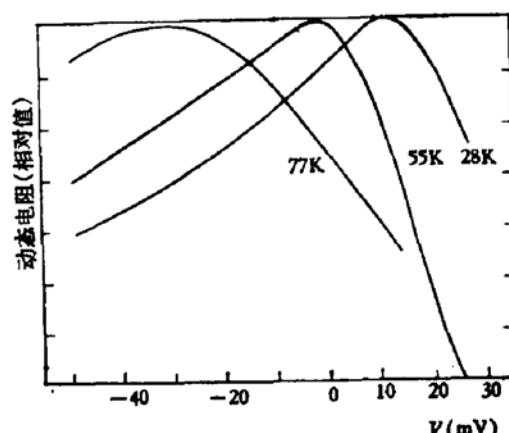


图 7 n-PbTe/p-PbSnTe 二极管动态电阻与直  
流偏压的关系 2E-98-A

温度低于 50 K 时二极管伏安特性在正向 10 mV 附近出现一个不大显著的隆起(图 6)。而动态电阻与直流偏压的关系曲线有一个明显的极大值(图 7)。在低于 50 K 时此极大值移到了正向区域, 28 K 下此极大值出现在 10 mV 处, 对应于伏安特性曲线正向的隆起。目前还不能深入分析这个现象, 但可以认为这与图 2 中  $R_0A$  曲线在 50 K 以下趋于饱和是一个原因, 即二极管存在隧道电流。

#### 四、结 论

用低损伤工艺制备的液相外延 n-PbTe/p-Pb<sub>0.81</sub>Sn<sub>0.19</sub>Te 异质结构二极管的空间电荷区在 p-Pb<sub>0.81</sub>Sn<sub>0.19</sub>Te 一侧, 优质器件的  $R_0A$  在 100 K 以上为扩散电流限制, 电离能为 0.086 eV。典型器件  $R_0A$  在高于 50 K 时为产生复合电流限制, 电离能为 0.048 eV, 低于 50 K 则为隧道电流占主要优势。

#### 参 考 文 献

- [1] 汤定元, 红外物理与技术, 4—5期, 62(1976).
- [2] L. H. Devaux, H. Kimura, M. J. Sheets, F. J. Renda, J. R. Balon, P. S. Chia and A. H. Lockwo-

- od, *Infrared Phys.*, **15**, 279 (1975).
- [3] M. R. Johnson, R. A. Chapma and J. S. Wrobel, *Infrared Phys.*, **15**, 317 (1975).
- [4] H. Preier, *Infrared Phys.*, **18**, 43 (1978).
- [5] M. Grudzien and A. RoGalski, *Infrared Phys.*, **21**, 1 (1981).
- [6] C. C. Wang, *Solid-State Electronics*, **21**, 625 (1978).
- [7] W. W. Anderson, *Infrared Phys.*, **20**, 353 (1980).
- [8] A. Zemel and D. Eger, *Solid-State Electron.*, **23**, 1123 (1980).
- [9] 冷静, 杨永年, 袁诗鑫, *半导体学报*, **3**, 182(1982).
- [10] 张素英, 贡树行, 于梅芳, 乔怡敏, *红外物理与技术*, **6**期, 1(1981).
- [11] 张素英, 陈泉森, 贡树行, 乔怡敏, 余中和, *红外研究*, **3**, 180, (1984).
- [12] I. Melngailis and T. C. Harman, *Semiconductors and Semimetals* (edited by Willardson. R. K. A C. Bear) Vol. 5, 111, Academic Prese New York (1970).
- [13] S. C. Gupta, B. L. Sharm and V. V. Agashe, *Infrared Phys.*, **19**, 545 (1979).
- [14] 凌冲廉, *红外研究*, **1**, 87(1982).

## Temperature Dependence of Junction Resistance of n-PbTe/p-PbSnTe Heterostructure Diodes

Zhang Suying and Qiao Yimin

(Shanghai Institute of Technical Physics, Academia Sinica)

### Abstract

The zero bias junction resistance-area product,  $R_oA$ , is measured in the temperature range from 28—160 K on n-PbTe/P-PbSnTe heterostructure diodes prepared by the liquid-phase epitaxy technique. The  $R_oA$  is calculated on the basis of a simple p-n junction model and compared with experimental results, showing that the  $R_oA$  of a typical diode, with a doping concentration of about  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$  and 50% cutoff wavelength of  $11.5 \mu\text{m}$ , is mainly dominated by the tunnel mechanism below 50 K.