

Pb_{0.8}Sn_{0.2}Te-PbTe 异质结区附近 净施主浓度分布

凌 仲 贻

(中国科学院上海技术物理研究所)

摘要——测量了用液相外延技术制备的 (p)Pb_{0.8}Sn_{0.2}Te-(n)PbTe 异质结二极管的电容-电压特性, 据此计算了结区附近 PbTe 外延层中的净施主浓度分布。发现零偏压下 PbTe 外延层中空间电荷区边界的净施主浓度 (N_0) 强烈地依赖于液相外延的生长温度 (T_{ep}), 认为它是由于液相外延生长过程中缺陷的互扩散所造成。

一、引 言

液相外延 (p)Pb_{0.8}Sn_{0.2}Te-(n)PbTe 异质结光电二极管的电学和光电特性与 PbTe 层的外延温度有很大关系^[1,2]。Zemel 等^[3]对 n 型 PbTe 外延层直接作霍尔效应和电阻率测量, 他们发现外延层载流子浓度(平均值)低于用同样温度下退火的块状 PbTe 的载流子浓度, 并将此归因于外延生长过程中缺陷的互扩散。本文报道异质结电容-电压特性的测量结果, 并据此计算了结区附近 PbTe 中的净施主浓度及其分布。由于这些结果不再是整个外延层的平均值, 因此更直接地反映了外延生长过程中缺陷互扩散的结果。

二、实验方法和结果

Pb_{0.8}Sn_{0.2}Te-PbTe 异质结光电二极管的结构剖面及等效电路如图 1 所示。衬底是气相生长的 Pb_{1-x}Sn_xTe 单晶 ($x \approx 0.2$), 厚度约 1 mm, 受主浓度 $p \approx 2 \sim 3 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ 。第一外延层是 Pb_{1-x}Sn_xTe ($x \approx 0.2$), 厚度 10~20 μm , 表面受主浓度 $p > 2 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ 。第二外延层是 PbTe, 厚度约 10 μm 。测量电容-电压 ($C-V$) 特性时, 一个电极由 PbTe 层引出, 另一电极由低阻衬底引出。

半导体 p-n 结电容测量, 当结电阻 R 较大且满足 $R \gg \frac{1}{\omega C}$ 条件时 (ω 为测试频率), 结阻抗可

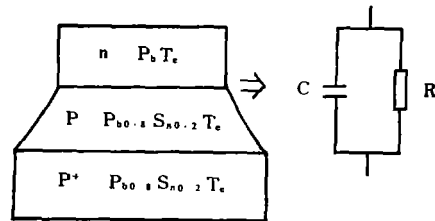


图 1 Pb_{0.8}Sn_{0.2}Te-PbTe 光电二极管的结构及等效电路

本文 1981 年 7 月 14 日收到。

作为纯电容处理,用市售的 $C-V$ 特性测试仪(如 CTG-1 型高频 $C-V$ 特性测试仪)很容易测出 $C-V$ 特性。而对结电阻较低的器件,漏电导的影响不能忽略,必须使用高频电桥,将待测器件接入电桥作为未知臂,调节电桥标准臂使电桥平衡,可同时测出电容和漏电导值。本工作所测量的器件结电阻均较低,我们采用 CD5 型高频阻抗电桥进行测量。该电桥导纳测量范围为 $0.5 \text{ m}\Omega \sim 32 \text{ m}\Omega$, 对导纳为 $Y = G + j\omega C$ (其中 $G = \frac{1}{R}$ 是器件的漏电导)的器件,其导纳应满足 $0.5 \text{ m}\Omega \leq \sqrt{G^2 + (\omega C)^2} \leq 32 \text{ m}\Omega$ 的条件。若测试频率取 100 KHz , 则对 $0.5 \text{ m}\Omega < G < 30 \text{ m}\Omega$ 、 $C < 10^4 \text{ PF}$ 的器件,上述不等式显然满足,可以有效地进行结电容的测量。图 2 为测量装置示意图。

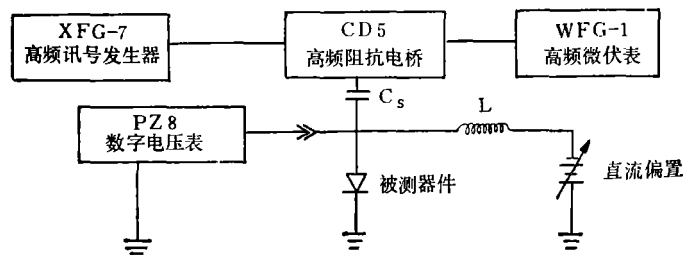


图 2 p-n 结 $C-V$ 特性测量装置示意图

图 2 中高频信号发生器作电桥信号源,频率为 100 KHz , 信号幅度为 $5 \sim 10 \text{ mV}$ 。高频微伏表调谐到测试频率,作电桥平衡零指示器。加在器件上的直流偏压用数字电压表读数,为避免接入电压表引起的附加导纳,在测量时,应将电压表断开。器件偏置是由一个可调直流电源提供的,为使直流偏压与电桥隔离,并防止高频测试信号被直流电源旁路,在器件和电桥之间加接一个隔直电容 C_s ($C_s \gg C$), 在器件和直流电源之间串接一个高频扼流圈 L ($\omega L \gg \frac{1}{\omega C}$), 我们工作中取 $C_s = 0.47 \mu\text{F}$, $L = 10 \text{ mH}$ 。

被测器件装在低温杜瓦瓶内,用液氮致冷,在不同偏压下测量器件结电容,便可得出器件的 $C-V$ 特性。一些器件在 82 K 的 $C-V$ 特性分别表示在图 3(a) ($C^{-2}-V$ 关系)和图 3(b) ($C^{-3}-V$ 关系)中。

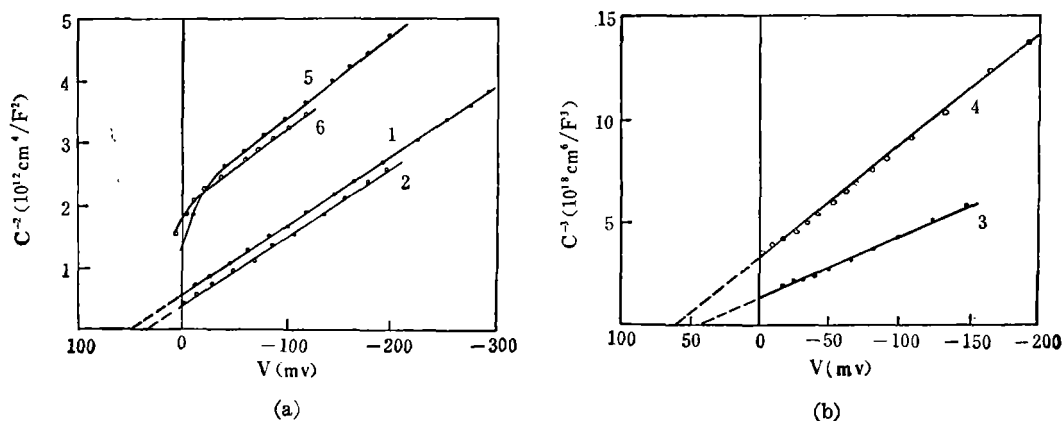


图 3 一些 $\text{Pb}_{0.8}\text{Sn}_{0.2}\text{Te-PbTe}$ 光电二极管的 $C-V$ 特性
(a) $C^{-2}-V$ 关系 (b) $C^{-3}-V$ 关系

三、异质结电容的计算模型

为了从 $C-V$ 关系得出结区附近的掺杂分布, 必须选择一个异质结电容的计算模型。已经知道, 当在异质结界面因晶格失配引起的界面态可以忽略时, 可以利用 Anderson 模型^[3] 进行计算。因此, 首先需要考虑 $\text{Pb}_{0.8}\text{Sn}_{0.2}\text{Te}-\text{PbTe}$ 界面晶格失配的程度。

晶格常数为 λ_1 和 λ_2 的半导体之间的晶格失配定义为 $\frac{2(\lambda_2 - \lambda_1)}{\lambda_1 + \lambda_2}$ ^[4]。PbTe 和 SnTe 的晶格常数分别为 6.460 \AA 和 6.328 \AA ^[5], 根据 Vegard 定律, $\text{Pb}_{0.8}\text{Sn}_{0.2}\text{Te}$ 的晶格常数由线性内插得出为 6.434 \AA 。这样, $\text{Pb}_{0.8}\text{Sn}_{0.2}\text{Te}-\text{PbTe}$ 界面的晶格失配约为 0.4% 。Donnelly 和 Milnes^[4] 曾经报道过, Anderson 模型对晶格失配为 0.08% 的 Ge-GaAs 是一个很好的一级近似, 但对晶格失配为 4% 的 Ge-Si 不适用。考虑到 $\text{Pb}_{0.8}\text{Sn}_{0.2}\text{Te}-\text{PbTe}$ 的晶格失配更接近于 Ge-GaAs 的情况, 且界面还存在组分渐变的过渡区^[2], 因此, 可以认为界面态密度可以忽略。Anderson 指出, 在忽略界面态的情况下, 异质结的结电容表达式可用类似于推导同质结电容的方法简单地推导出来。

器件 1、2、5、6, 由于 $\text{Pb}_{0.8}\text{Sn}_{0.2}\text{Te}$ 外延层的受主浓度较高 ($N_A \geq 2 \times 10^{17} / \text{cm}^3$), 可以近似看作单边结, 空间电荷区基本上位于 PbTe 内, 它们的 $C-V$ 特性类似于一个肖特基垒二极管, PbTe 外延层中 p-n 结附近的净施主浓度 $N(x)$ 可用下式计算^[6]:

$$N(x) = \frac{2}{\epsilon_0 \epsilon_n q} \left(\frac{dC^{-2}}{dV} \right)^{-1} = -\frac{1}{\epsilon_0 \epsilon_n q} \frac{C^3}{\left(\frac{dC}{dV} \right)}, \quad (1)$$

式中 C 为单位面积的结电容, 是偏压 V 的函数, ϵ_n 为 PbTe 的介电常数, ϵ_0 为真空电容率, q 为电子电量, x 为空间电荷区宽度:

$$x = \frac{\epsilon_0 \epsilon_n}{C}, \quad (2)$$

在这里 x 也就是偏压为 V 时 PbTe 中空间电荷区边界离结的位置。

对于器件 3、4, $C^{-3}-V$ 之间有线性关系, 可以看作线性渐变结。根据 Anderson 模型, 我们推导得到线性渐变异质结单位面积结电容的表达式如下:

$$C = \left[\left(\frac{\epsilon_0 \epsilon_n \epsilon_p}{\epsilon_n + \epsilon_p} \right)^2 \frac{G}{3} \right]^{1/3} (V_D - V)^{-1/3}, \quad (3)$$

式中 G 为电荷密度梯度 (Coulomb/cm), ϵ_p 为 $\text{Pb}_{0.8}\text{Sn}_{0.2}\text{Te}$ 的介电常数, V_D 为内建势。由上式可以得到掺杂浓度梯度 G_N :

$$G_N = \frac{G}{q} = \frac{3}{q} \left(\frac{\epsilon_n + \epsilon_p}{\epsilon_0 \epsilon_n \epsilon_p} \right)^2 \left(\frac{dC^{-3}}{dV} \right)^{-1}. \quad (4)$$

此时空间电荷区位于结的两边, 掺杂浓度随离结的距离 x 作线性变化:

$$N(x) = G_N x, \quad (5)$$

此时 x 是空间电荷区半宽度, 由下式给出:

$$x = \frac{\epsilon_0}{C} \left(\frac{\epsilon_n \epsilon_p}{\epsilon_n + \epsilon_p} \right). \quad (6)$$

四、计算结果和讨论

按上述模型计算了所测器件 PbTe 外延层中 p-n 结附近的净施主浓度及其分布。计算中取 PbTe 的介电常数 $\epsilon_n = 400^{[7]}$, $\text{Pb}_{0.9}\text{Sn}_{0.1}\text{Te}$ 的介电常数 $\epsilon_p = 560$ (这个数值是由 PbTe 和 SnTe^[8] 的介电常数线性内插得出的)。计算结果如图 4(a) 和图 4(b) 所示。主要测量结果和计算结果列于表 1。表 1 中 R_0 、 C_0 分别为零偏压时的结电阻和结电容, x_0 是零偏压时 PbTe 内空间电荷区边界离 p-n 结的距离, N_0 是该处的净施主浓度。 V_{D1} 和 V_{D2} 分别为由 C-V 特性和正向 V-I 特性得出的内建势。

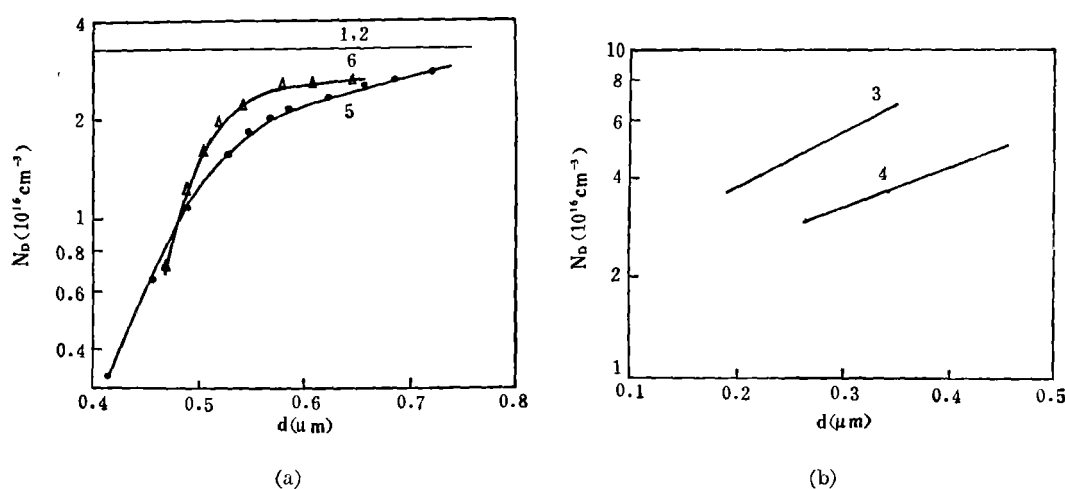


图 4 PbTe 外延层中净施主浓度随离 p-n 结距离的变化

表 1 主要测量结果和计算结果

序号	器件编号	R_0 (Ω)	c_0 (F/cm^2)	x_0 (μm)	V_D (mV)		N_0 (cm^{-3})	PbTe 外延温度 T ($^{\circ}\text{C}$)
					V_{D1}	V_{D2}		
1	2E-48-50-4-9	147	$1.4 \cdot 10^{-6}$	0.26	50	43	$3.3 \cdot 10^{16}$	527~517
2	2E-48-50-4-7	71	$1.7 \cdot 10^{-6}$	0.21	33	35	$3.3 \cdot 10^{16}$	527~517
3	2E-56-50-3	130	$8.8 \cdot 10^{-7}$	0.20	46	35	$3.8 \cdot 10^{16}$	525~514
4	2E-56-50-10	160	$6.7 \cdot 10^{-7}$	0.27	55	38	$3.0 \cdot 10^{16}$	525~514
5	2L-148B	50	$8.6 \cdot 10^{-7}$	0.41		32	$3.2 \cdot 10^{15}$	560~550
6	2L-182A-2	50	$7.6 \cdot 10^{-7}$	0.47		30	$7.2 \cdot 10^{15}$	548~543

由以上结果可以看出:

1. PbTe 外延层中结附近的净施主浓度随离开结的距离的增大而增大。
2. 对应于位置 x_0 的起始浓度 N_0 与 PbTe 外延温度 T 有强烈的依赖关系。器件 1、2、3、4 外延温度基本上一样, N_0 的数值也十分接近, 器件 5 和 6 外延温度较高, N_0 低 5~10 倍。图 5 以 $\log N_0 - \frac{1}{T}$ 的形式画出了 N_0 (cm^{-3}) 与外延温度 T (K) 之间的关系, 这个关系

可以用下式拟合:

$$N_0 = 6.5 \times 10^{-9} \exp\left(\frac{4.5 \times 10^4}{T}\right). \quad (7)$$

以上结果可以用外延过程中缺陷的互扩散来解释^[1]: PbTe 和 PbSnTe 材料的导电类型和载流子浓度主要由电活性点缺陷确定, 这些缺陷主要是金属和 Te 的空位, 金属空位(主要是 Pb 空位)起受主作用, Te 空位起施主作用。当在 p 型 $\text{Pb}_{0.8}\text{Sn}_{0.2}\text{Te}$ 上生长 n 型 PbTe 时, 在两种材料间产生空位浓度梯度, 由于金属空位在 PbTe 中的扩散系数很大, 衬底中的金属空位从 $\text{Pb}_{0.8}\text{Sn}_{0.2}\text{Te}$ 流入 PbTe 顶层, 在结区附近形成一个“补偿区”, 使结区附近 PbTe

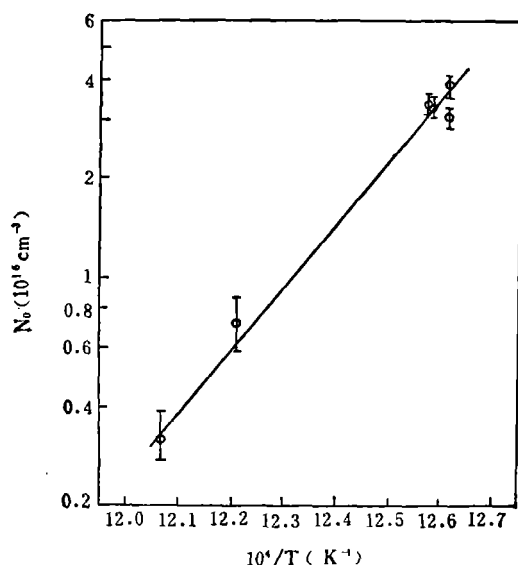


图5 N_0 与 PbTe 外延温度的关系

中的净施主浓度下降。外延温度愈高, 缺陷扩散愈易, 补偿愈厉害, 净施主浓度就愈低。外延温度更高时, p-n 结位置甚至移向 PbTe, 器件的分谱响应峰值波长移向短波^[2]。这一解释定性地符合我们的实验结果: PbTe 外延层的表面施主浓度 $N_D \sim 10^{17}/\text{cm}^3$, 而结区附近的净施主浓度下降到 $3 \times 10^{15} \sim 3 \times 10^{16}/\text{cm}^3$ 。Zemel 等^[1]将 p-n 结作为隔离层, 对 PbTe 外延层作霍尔效应测量, 得到的载流子浓度低于用同样温度退火的块状样品, 而且他们也发现, 外延温度愈高, 与退火样品的差别愈大, 这些结果是很容易用我们上面的解释来理解的。

致谢——本工作所测量的器件是由本所 150 组制备的, 为此对 150 组及袁诗鑫同志的支持和帮助表示感谢。

参 考 文 献

- [1] Zemel A. et al., *J. Appl. Phys.*, **50** (1979), 5549.
- [2] Графеев В. И. и др., *Физ. Твёрдого Тела*, **12** (1978), 1723.
- [3] Anderson, R. L. *Solid-State Electron.*, **5** (1962), 341.
- [4] Sharma B. L. and Purohit R. K., *Semiconductor Heterojunctions*, Pergamon Press, 1974, Ch. 4, 5.
- [5] Bis P, F. and Dixon J. R. *J. Appl. Phys.*, **40** (1969), 1918.
- [6] Hilibrand J. and Gold R. D. *RCA Rev.*, **21** (1960), 245.

- [7] Kanai Y. and Shohno K., *Jap. J. Appl. Phys.*, **1** (1962), 4, 239.
[8] Pawley G. S. et al., *Phys. Rev. Lett.*, **17** (1966), 14, 753.

**NET DONOR CONCENTRATION PROFILES
NEAR THE JUNCTION REGION IN
Pb_{0.8}Sn_{0.2}Te-PbTe HETEROJUNCTION**

LING ZHONGGENG

(Shanghai Institute of Technical Physics, Academia Sinica)

ABSTRACT

The C-V characteristic curves are measured on LPE-grown (p) Pb_{0.8}Sn_{0.2}Te-(n) PbTe heterojunction diodes, and the net donor concentration profiles of PbTe epitaxial layer near the junction region are calculated thereby. The net donor concentration (N_0) at the edge of space-charge region in PbTe epitaxial layer at zero bias is found to be strongly dependent on LPE growth temperature (T_{ep}), possibly due to the interdiffusion of native defects during the LPE growth process.