

# 压力下隧道管的电流性质\*

王 积 方

(中国科学院物理研究所)

隧道二极管的伏-安特性是由带间隧道电流、剩余电流、热电流构成的<sup>[1]</sup>。对应于这些电流，电子需穿过的位垒都与禁带宽有关，本征籍不同导带谷( $L_1, \Gamma'_2, \Delta_1$ )，与价带顶 $\Gamma'_{25}$ 构成的禁带宽随压力改变的速率是不一样的，分别为<sup>[2]</sup>:  $dE_{L_1}/dp = 5 \times 10^{-6}$ ,  $dE_{\Gamma'_2}/dp = 12 \times 10^{-6}$ ,  $dE_{\Delta_1}/dp = (0 \sim -2) \times 10^{-6} \text{eV/Bar}$ 。因此，研究隧道管特性在高压下的变化，有助于对隧道电流性质的了解。

图1是不同隧道管 T.D. 1, 2, 3 的峰值电流  $I_p$ ，谷电流  $I_v$  与压力  $p$  的对数关系。这些隧道管是由掺 As 的 N型锗片，与 (In + Ga) 烧合金制成。T.D. 2, 3 的 N区浓度分别为  $1.5 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$  和  $3 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ ，Ga:In 的百分数各为 2.0, 1.0。

$\ln I_p - p$  的特点是在 8kbar 附近有折点，而且不同掺杂隧道管的  $\ln I_p - p$  彼此平行，斜率相同。 $\ln I_v - p$  则分别在 8 和 16.5kbar 附近折断，而且不同掺杂隧道管的  $\ln I_v - p$  斜率不同，说明  $I_v$  与掺杂关系密切，符合谷电流是由杂质能级引起的推测<sup>[3]</sup>。

我们从剩余电流表示式：<sup>[1]</sup>

$$A_x \exp[-\alpha(E_{vc} - ev_x)/(n^+)^{1/2}] \quad (1)$$

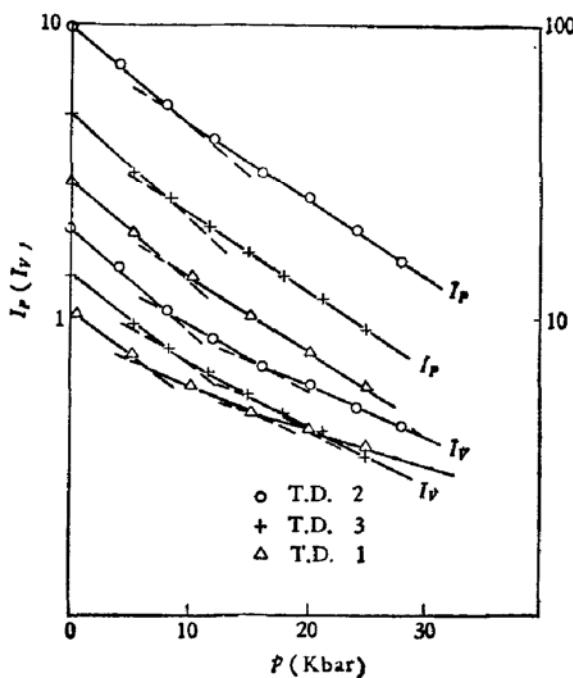


图 1

\* 1980年10月9日收到，1981年1月24日收到修改稿。

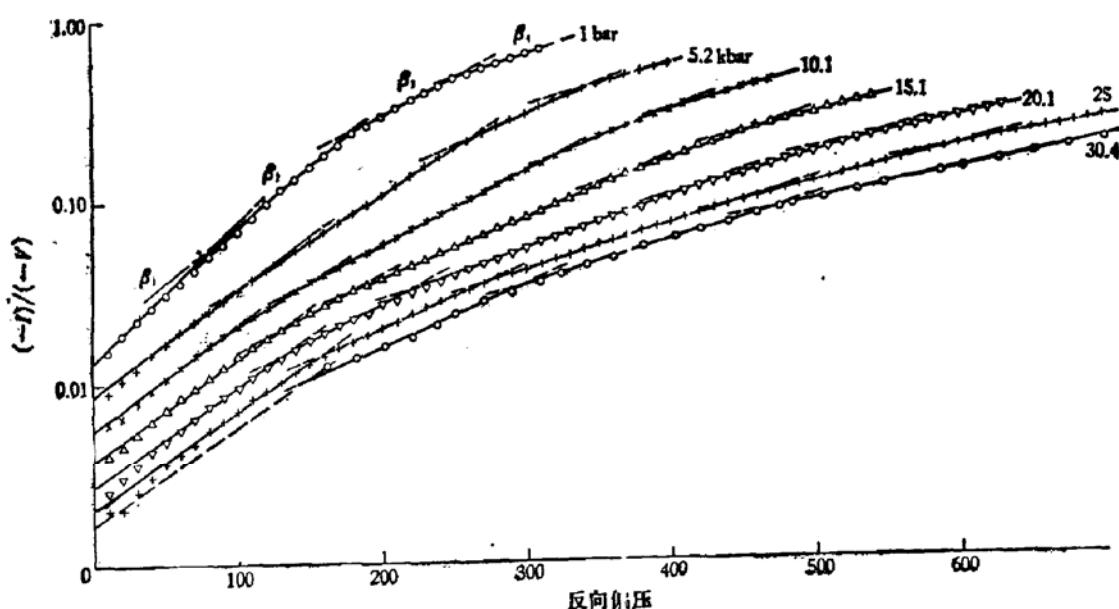


图 2

导出，在保持  $I_s$  恒定条件下有：

$$dE_{sc}/dp = \alpha dV_s/dp \quad (2)$$

因此，从对应于恒定  $I_s$  的随压力改变的偏压  $V_s$  值，可获得不同压力下重掺杂锗的禁带宽，我们发现重掺杂锗，与本征锗禁带宽随压力改变的形式是完全相同的。

根据 Kane<sup>[4]</sup> 的理论、直接和间接隧道电流都可表示为：

$$\begin{aligned} I &= \alpha V \exp(-\beta v) \\ \beta &= (Km^*)^{1/2}/(2\pi n^*)^{1/2} \hbar \end{aligned} \quad (3)$$

图 2 是由不同压力下，掺杂浓度较低的隧道整流管反向特性构成的  $\ln(-I/-V)$ - $(-V)$  关系。根据(3)式，它们应为线性关系，但实际上是由不同的线性区构成。常压时是由  $-80$ ,  $-160$  和  $-244$  mV 三个偏压点分开的四个线性区构成。这些斜率不同的  $\ln(-I/-V)$ - $(-V)$  线性区的性质，可从能带结构的特点了解。图 3 是处于反偏压下的 P-N 结（以及能谷位置）的模型。

对于斜率为  $\beta_1$  线性区的电流，是间接隧道电流、电子由 P 区价带顶  $\Gamma'_2$  隧道穿透到 N 区  $L_1$  谷空能级上。对于  $\beta_2$  的电流，是直接隧道电流，电子由  $\Gamma'_2$  穿透到  $\Gamma'_1$  谷。由间接过程过渡为直接过程的阈偏压  $V_{T'_2}$  为：

$$eV_{T'_2} = -[E_{T'_2} - E_{L_1} - \xi_n] \quad (4)$$

$\xi_n = E_F - E_C = 38 \times 10^{-16} \times n^{2/3} \times (m_0/m^*)$ ,  $m^* = 0.562 m_0$ , 由于  $n = 1.5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ , 所以  $\xi_n = 0.041 \text{ eV}$ .  $V_{T'_2}$  的实验值为  $-80 \text{ mV}$ , 从而得

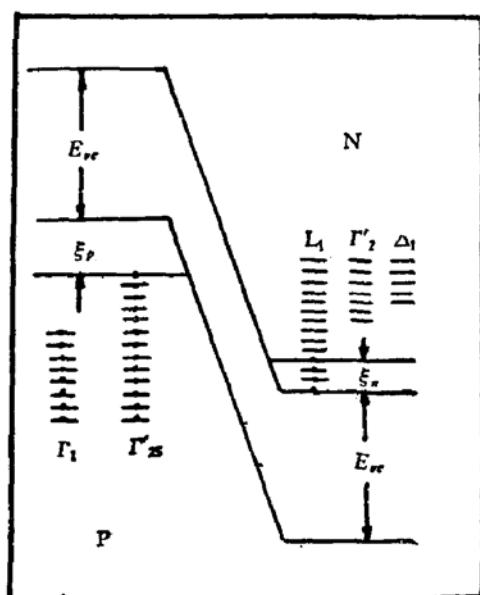


图 3

到  $E_{r'_2} - E_{L_1} = 0.121\text{eV}$ .

对应于  $\beta_3$  的电流也是间接隧道电流，电子由  $\Gamma'_{25}$  隧道穿透到 N 区  $\Delta_1$  空能级上，其偏压为：

$$\epsilon V_{\Delta_1} = -[E_{\Delta_1} - E_{L_1} - \xi_n] \quad (5)$$

$V_{\Delta_1}$  的实验值为  $-160\text{mV}$ ，所以  $E_{\Delta_1} - E_{L_1} = 0.201\text{eV}$ .

对应于  $\beta_4$  的电流是 P 区  $\Gamma_1$  上电子隧道穿透到 N 区  $L_1$  谷空能级上的电流，其偏压为：

$$\epsilon V_{r_1} = -[E_{r_1} - E_{r'_{25}} + \xi_n] \quad (6)$$

$V_{r_1}$  的实验值为  $-244\text{mV}$ ，故  $E_{r_1} - E_{r'_{25}} = 0.285\text{eV}$ .

偏压  $V_{r'_2}$ ,  $V_{\Delta_1}$  是随压力的增加而增加的。 $dV_{r'_2}/dp$  的实验值为  $6.5 \times 10^{-6}\text{eV/bar}$ ，而  $dV_{\Delta_1}/dp$  的实验值为  $13.6 \times 10^{-6}\text{eV/bar}$ .

$dV_{r'_2}/dp$  实验值与本征锗的  $dE_{r'_2}/dp - dE_{L_1}/dp = 7.2 \times 10^{-6}\text{eV/bar}$  相近。这证明在掺 As 浓度较低的锗隧道整流管中，也与掺 Sb 隧道管中情况一样，存在着由间接隧道过程转变为直接过程的事实，但偏压比掺 Sb 的为小。 $dV_{\Delta_1}/dp$  的实验值与本征的  $dE_{\Delta_1}/dp - dE_{r'_2}/dp = (12 \sim 14) \times 10^{-6}\text{eV/bar}$  也相近。

这些事实说明， $\ln(-I/-V) - (-V)$  不同线性区，是对应于不同隧道电流的。

从图 2 还可看到，第一线性区的斜率  $\beta_1$  不随压力改变，第二区的斜率  $\beta_2$  则随压力改

变。由于  $\beta = [km^*]^{1/2}/2(\pi n^*)^{1/2}\hbar$ ，说明与  $\beta_1$  对应的有效质量  $m^*(\beta_1)$ （即与  $L_1$  谷和  $\Gamma'_{25}$  顶对应的结两边的有效折合质量）不随压力改变。而与  $\beta_2$  对应的有效质量  $m^*(\beta_2)$ ，是随压力改变的，其变化率在略去  $n^*$  变化的条件下可表示为：

$$\frac{1}{m_0^*(\beta_2)} \cdot \frac{dm^*(\beta_2)}{dp} = \frac{2}{(\beta_2)_0} \cdot \frac{d\beta_2}{dp} - \frac{1}{K_0} \cdot \frac{dK}{dp} \quad (6')$$

由 (2) 式

$$\frac{1}{K_0} \cdot \frac{dK}{dp} = -1.19 \times 10^{-6}\text{bar}^{-1},$$

从而得  $\frac{1}{m^*(\beta_2)} \cdot \frac{dm^*(\beta_2)}{dp}$  的平均值约为  $-5.6 \times 10^{-5}\text{bar}^{-1}$ ，若再略去  $K$  的变化，还得

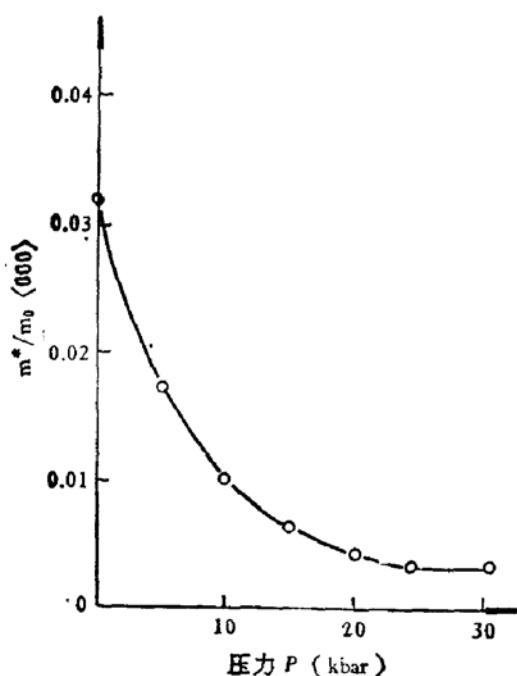


图 4

$$\frac{m^*(\beta_2) - m_0^*(\beta_2)}{m_0^*(\beta_2)} = \frac{\beta_2^2 - (\beta_0)^2}{(\beta_0)^2} \quad (7)$$

图4是通过(7)得到的实验结果。

由于对应于价带顶  $\Gamma_2'$  的空穴有效质量一般不随压力改变, 所以折合质量  $m^*(\beta_2)/m_0^*(\beta_2)$  随压力的变化, 主要反映了对应于  $\Gamma_2'$  谷(即  $<000>$  谷)电子有效质量  $m^*(\Gamma_2')$  随压力的变化。

### 参 考 文 献

- [1] H. S. Sommehens, *Phys. Rev.*, **124**, 1101(1961).
- [2] W. Paul and D. M. Warschauer, "Role of Pressure On Semiconductor Research" in "Solids Under Pressure", p. 197—245.
- [3] T. P. Brody, *J. Appl. Phys.*, **33**, 100(1962).
- [4] E. O. Kane, *J. Phys. Chem. Solids*, **12**, 181(1961); *J. Appl. Phys.*, **32**, 83(1961).

### Behaviours of the Tunnel Diode Current under Pressure

Wang Jifang

(Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences)