

研究简报

掺砷锗中基态能级裂距的作用

傅 绮 英

(中国科学院新疆物理研究所)

1984年2月29日收到

迁移率分析结果表明,在掺砷锗中,砷施主三重态能级与单态能级间的裂距对其低温性能的影响是不可略的。它是引起掺砷锗电阻温度计。在正常的激发自由载流子的电导温度范围内,出现灵敏度起伏的原因。

一、引 言

Blackmore 曾实验比较掺不同浅能级杂质的锗电阻温度计特性,发现只有掺砷锗的电导温度特性曲线,在自由载流子导电和杂质导电的交叠区(约 10K 温度附近)是“圆滑过渡”的,因此,掺砷锗最适于作宽低温范围的精密计温工具。他用切比雪夫多项式拟合掺砷锗温度计的电阻温度函数关系时^[2],还发现在 10K 和 45K 温度附近,存在着与分度测量精度无关的计算残差的乱真波动峰。

为了查明影响锗电阻温度计材料“杂质属性”,和在正常的自由载流子激发的 45K 温度附近,出现电导机构的变化,我们进行了电学测量分析。

二、实验材料和测量数据

锗单晶是在正压氩气氛中用直拉法生长的。主掺杂剂分别为 As 和 Sb。掺杂浓度按 Conwell^[3] 根据洪朝生的杂质电导理论,计算出波函数交叠的浓度值,即 n 型锗,以 $5 \times 10^{16} \sim 6 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 的浓度加入。并以主掺杂剂的 8~10% 量加入 Ga 补偿。这种设计是为了在 10K 附近的电阻温度特性呈“软过渡”^[1]。

在 4.2—400K 温度范围内,用范德堡尔法进行了电导率和霍尔系数的测量。图 1 列出了一个掺 As 锗样品的电导率 ρ 、霍尔系数 R_H 、载流子浓度 n 的测量数据。图 2 示出了五个样品的 μ_H 随温度的变化。所有电学测量样品全部在 LT-1A 型离子探针质谱仪上进行了杂质浓度的比较测量。

用上述材料所制锗电阻温度计,在 2—100K 温度进行了逐点分度。图 3 为掺 As 锗和掺 Sb 锗电阻温度计的电阻温度函数特性,并附出一支美国 Cryocal, Inc 用掺 As 锗制作的锗温度计的特性。将温度计的灵敏度 $\frac{dR}{dT} \cdot \frac{1}{T}$ 与温度的乘积,即灵敏度绝对改变量,将其随温度的变化作图示于图 4 中。10K 附近的“过渡特性”从图 3 中能清楚识别,并且与

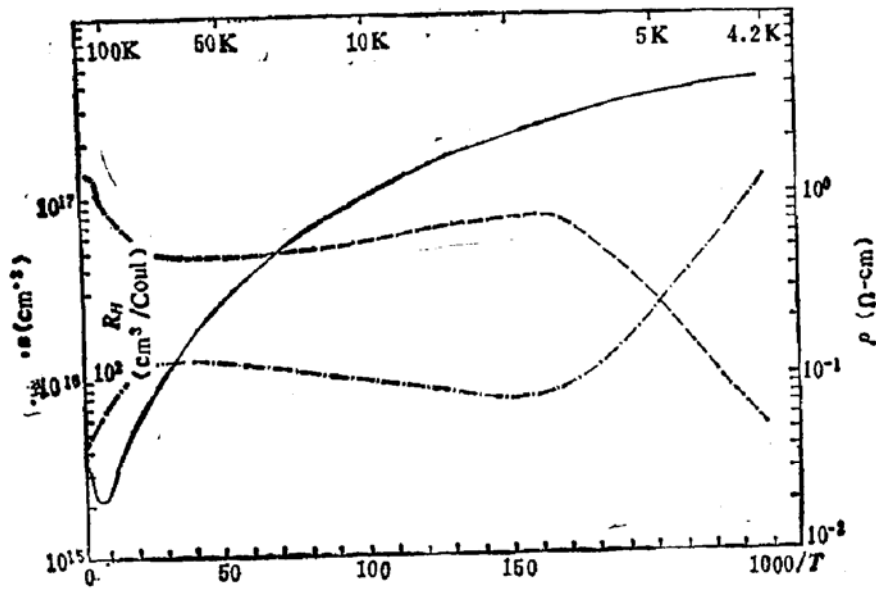


图1 782-2 样品电阻率 ρ 、霍尔系数 R_H 和载流子浓度 n 与温度 T 的函数曲线
——电阻率 ($\Omega\text{-cm}$); --- 霍尔系数 (cm^2/coul); -.- 载流子浓度 $n(\text{cm}^{-3})$

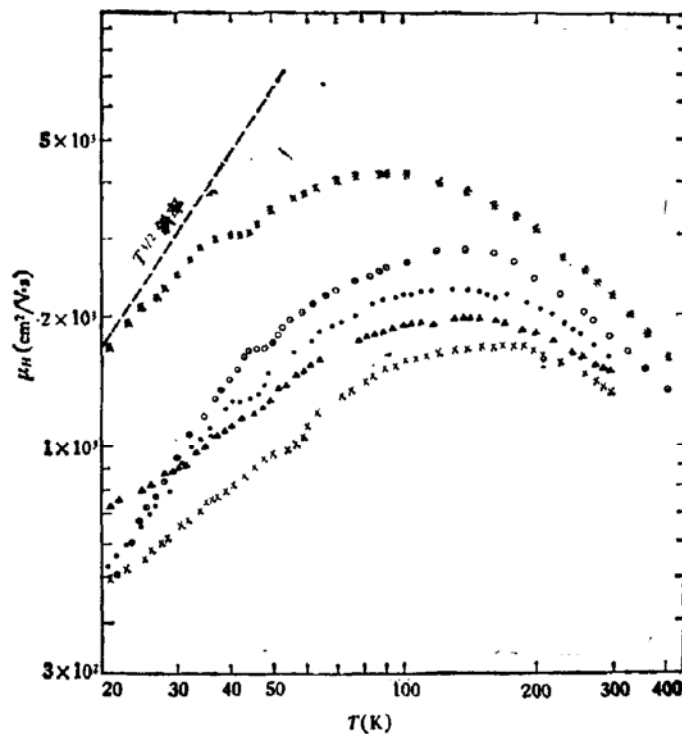


图2 五个掺 As 锗样品的霍尔迁移率 μ_H 随温度的变化

* —782-1 ▲ —782-2 ● —801-3 × —801-4 ○ —781-2

图4在10K出现的灵敏度绝对改变量的最大波动相对应。掺As锗温度计除此还在45K附近出现一个次大波动。而掺Sb锗只有一个变化最大的起伏。

三、计算结果与讨论

首先用迁移率分析计算了掺杂密度和补偿度。半导体中的各种散射机构已为人们所

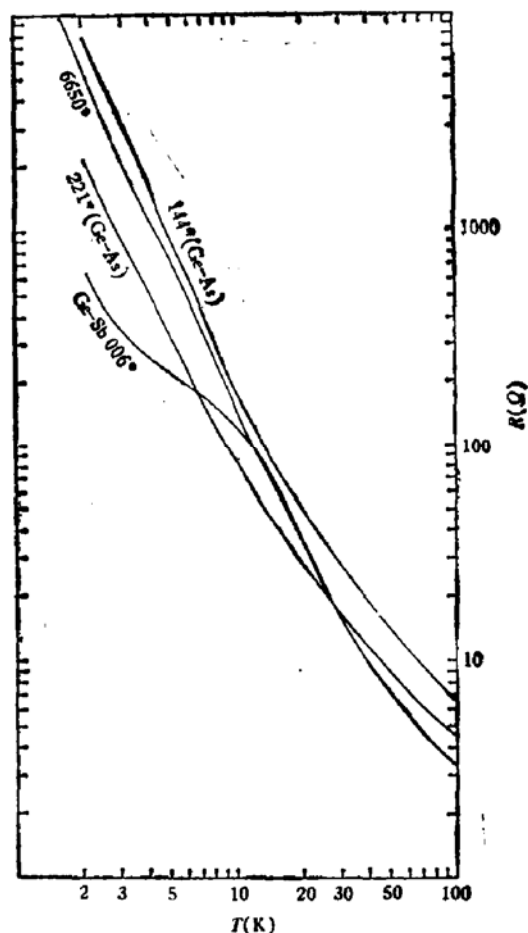


图3 不同掺杂剂的锗温度计的电阻温度特性
6650°——掺 As 锗制(美国 Cryocal. Inc 产)

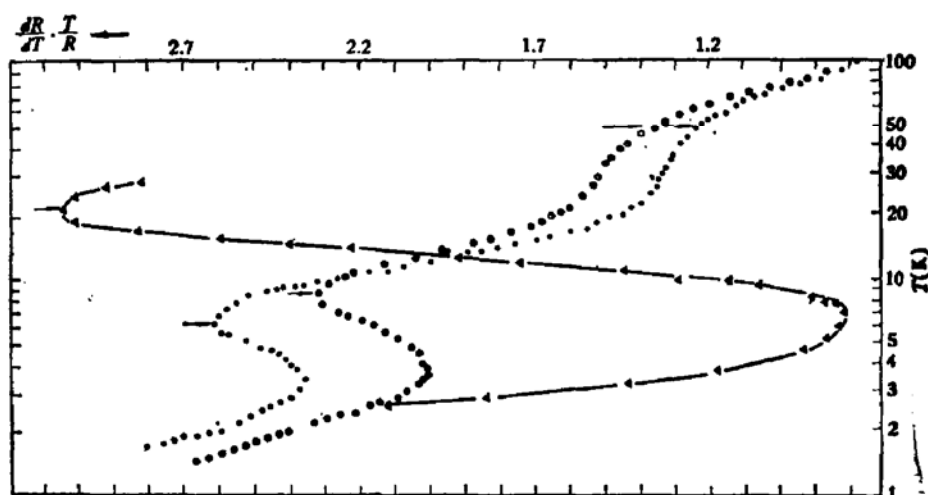


图4 两支掺As锗温度计(其中一支7576°为美国 Cryocal. Inc 产)和一支掺Sb锗温度计(006°)的灵敏度 $\frac{dR}{dT} \cdot \frac{1}{T}$ 与温度 T 的乘积, 得到各温度下的灵敏度绝对改变量 $\frac{dR}{dT} \cdot \frac{T}{R}$ 值。掺As锗, 除在10K附近因杂质电导引起一个较大起伏外, 另在45K附近温度出现一个次大起伏。掺Sb锗的基态能级裂距作用温度与杂质电导相重合, 虽不显示第二个起伏, 但大大地加强了杂导引起的起伏。

● —— 掺砷锗温度计 (144°, 即 782-1 晶体) ○ —— 掺砷锗温度计 (7576° 美 Cryocal. Inc) △ —— 掺锑锗温度计 (006°)

熟知,假设各散射机构是彼此独立的,则所测迁移率是各类迁移率的组合。

为简化分析,我们只考虑特定温度范围的晶格散射和电离杂质散射的组合。晶格散射迁移率 μ_L 利用在高纯锗中的测定值^[4]: 在 77K 以下, $\mu_{Ln} = 2.65 \times 10^7 T^{-3/2}$; 在 78K 以上, $\mu_{Ln} = 4.9 \times 10^7 T^{-1.66}$ 。电离杂质散射迁移率 μ_i , 用 Brooks-Herring 公式^[5]计算。对于 n 型锗,取 $m^*/m_0 = 0.12$, $\epsilon_0 = 16$ 。并用 $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{S}$ 单位,则:

$$\mu_i = \frac{2.42 \times 10^{18}}{N_i} \cdot T^{3/2} \cdot \frac{1}{\ln(1+b) - b/(1+b)}$$

其中

$$b = 2.48 \times 10^{14} T^2 / n^*$$

$$n^* = n + (n + N_A)(N_D - N_A - n) / N_D$$

n^* 称为有效散射密度,它是考虑载流子对电离杂质的屏蔽作用,使得所带电荷与载流子相反的电离杂质附近的载流子密度增加。先用测量载流子浓度 n 值代替 n^* 求得电离杂质密度 N_i , 然后利用以下关系:

$$N_i = 2N_A + n,$$

$$N_D - N_A = N_i + [(N_D - N_A) - n(T)],$$

求得施主和受主密度初值,反复叠代求得 n^* , 最后得到电离杂质密度及其补偿度。

对于不同样品,存在一个对最佳分析温度的选择。分析表明,应取测量迁移率出现峰值的温度为最佳分析温度。

测量迁移率峰值温度下的电离杂质密度的计算结果,与离子探针质谱分析结果相一致。当与霍尔分析进行比较时,即由质量作用定律得到的电中性方程。

$$\frac{n(n + N_A)}{N_D - N_A - n} = \frac{N_c}{g} \exp(-\Delta E/kT)$$

所计算的结果,存在着相当大的不符。

如果考虑在自旋与轨道耦合作用下,Ge 中 V 族杂质能级基态的分裂,它分裂为一个单态能级与一个三重简并态能级,其裂距为 4Δ 。不计及激发态时,质量作用定律可表述为

$$\frac{n(n + N_A)}{N_D - N_A - n} = \frac{N_c \exp(-\Delta E/kT)}{2 + 6 \exp(-4\Delta/kT)}$$

用此式拟合计算峰值温度下的迁移率分析结果,所得到的 4Δ 值是 0.004eV。

将能隙 4Δ 除以玻尔兹曼常数 k , 0.004eV 能量所对应温度正是 46K。这与掺 As 锗温度计灵敏绝对改变量出现次大起伏的高温起始温度是一致的。

利用 Fritzsche^[6] 所测定的、锗中 Sb 的基态能级裂距 $4\Delta = 0.57$ 毫电子伏,所对应的温度是 6.6K。因此,掺 Sb 锗基态分裂能的作用与杂质电导相重合。虽然它不像掺 As 锗出现第二个灵敏度变化的起伏,但大大地加大了杂质电导所引起的起伏。这也正是掺 Sb 锗在自由载流子电导与杂质电导的交叠温度范围,电阻温度特性变化不能呈现“圆滑过渡”的杂质属性原因。

四、结 论

掺 As 锗温度计在 10K 和 45K 温度附近所出现的灵敏度变化,均是电导机构的变化

所致。前者是杂质电导的开始,后者是V族杂质基态分裂能的作用。

在锗温度计材料的杂质设计中,杂质基态分裂能的作用不可略。锗中各种浅杂质的分裂能值,以As杂质的单态能级低于三重态的能隙最大。作用温度距杂质电导温度较远,只要在浓度及补偿度适中时,“圆滑过渡”的情况最易获得。

为了排除灵敏度起伏对拟合精度的影响,利用分段的拟合法则可得到高精度的分度表。

对北京有色金属研究院冯仪同志,和中国科学院半导体所王万年同志所给予的电学测量帮助,表示衷心感谢。

参 考 文 献

- [1] J. S. Blackmor, *Rev. Sci. Instrum.*, **33**, 545. (1962).
- [2] J. S. Blackmor, *Rev. Sci. Instrum.*, **44**, 835 (1970).
- [3] E. M. Conwell, *Phys. Rev.*, **103**, 51 (1956).
- [4] L. H. Detert, *Nuclear Instrument and Methods*, **101**, 11 (1972).
- [5] H. Brooks, *Phys. Rev.*, **83**, 879 (1951).
- [6] H. Fritzsche, *Phys. Rev.*, **120**, 1120 (1960).

Function of the Splitting of Ground State Level in Arsenic Doped Germanium

Fu Chiying

(Xinjiang Institute of Physics, Academia Sinica)

Abstract

Based on the experimental results on mobility, it is suggested that the three-fold state donor level of As impurity in Ge and the splitting of the single-state level have an effect on the low temperature characteristics of arsenic doped germanium thermometer that can not be ignored, for this splitting leads to a vibration in the sensitivity of arsenic doped germanium thermometer in the normal conduction temperature range of excited free carriers.