

低温下 p-n 结正向特性的实验研究*

张开逊 王 向

(第一机械工业部机械工业自动化研究所)

我们在 4.2—300 K 的温区对 Ge, Si, GaAs 的 p-n 结正向压降与温度的关系进行了实验研究,发现了两个有普遍性的规律:

(1) 随着温度的降低,所有的 Ge, Si, GaAs 二极管的正向压降与温度关系曲线都存在一个突变点,低于突变温度之后,二极管正向压降随着温度的降低急剧增高,呈单晶热敏电阻特性。

(2) 高于突变温度后,二极管正向压降 V 随着温度 T 的增高而缓慢减小, $|dV/dT|$ 随温度的增高而增大, $|d^2V/dT^2|$ 随温度的增高单调减小。

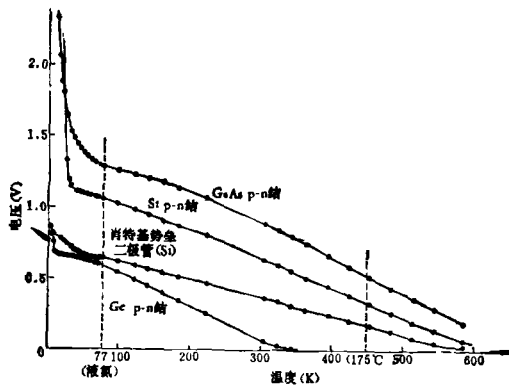


图1 Ge, Si, GaAs 和肖特基势垒二极管 $V-T$ 曲线(正向电流值 $91.25\mu A$)

在文献 [1] 中,我们对 $V-T$ 曲线低温区的突变提出过解释,在本文中则作了更深入的研究。实验中所测得的二极管正向压降 V 实际上是三部分电压之和,即 $V = V_j + V_c + V_r$ 。其中 V_j 为 p-n 结压降; V_c 为金属-半导体欧姆接触处的压降,其值很小^[2]; V_r 为二极管 p 区和 n 区材料体电阻上的压降。在室温下,与 V_j 相比 V_r 甚小,可忽略不计,二极管正向压降表现为

物理

普通的 p-n 结特性。随着温度的降低, V_r 逐渐增大成为 V 的主要成份, $\frac{dV_r}{dT}$ 亦随温度的减小而递增^[3], $V-T$ 曲线发生突变的温度,也就是多子浓度开始显著减少使 V_r 急剧增大的温度。

为了证实这一点,将一个硅材料 n 沟道结型场效应管栅极 G 和源极 S 短接,通过电流 I ,测量和漏极 D 之间的压降,设为 V_A ,这是电流 I 在纯沟道电阻上产生的压降。同一个场效应管 S 和 D 短接,在 G-SD 间通过同样的正向电流 I ,测量 G-SD 间的正向压降,设为 V_B ,它是 p-n 结正向压降与部分沟道电阻上压降之和,相当于普通二极管的正向压降。 V_A , V_B 与温

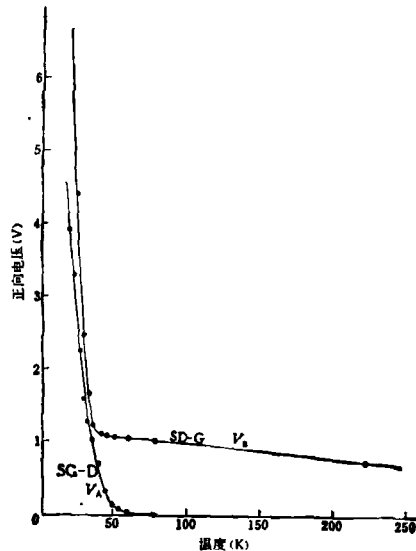


图2 场效应管两种不同接法的正向压降与温度的关系

* 1980 年 3 月 14 日收到。

度关系的实验结果如图 2 所示。

由图 2 可见, 曲线 V_B 可以分为截然不同的两部分, 低温区与 V_A 的变化规律相似, 当温度升高时, 经过某个转折点之后与普通 p-n 结变化规律相似, 曲线 V_B 的转折发生在 V_A 差不多变为零的时候。

为了进一步证实这一论断, 我们研究了硅二极管在液氮温度和液氦温度下的正向伏安特性。在液氮温度下, $V-I$ 关系呈对数曲线, 在液氦温度下, 则呈一条直线(如图 3), $V-I$ 关系完全呈电阻性, 相应阻值高达 $6M\Omega$ 。

这些曲线有两个明显的特点: 第一, 不同半导体材料的二极管在低温区突变温度不同, 在我们所研究的试样中, Ge 材料最低, 约 10K,

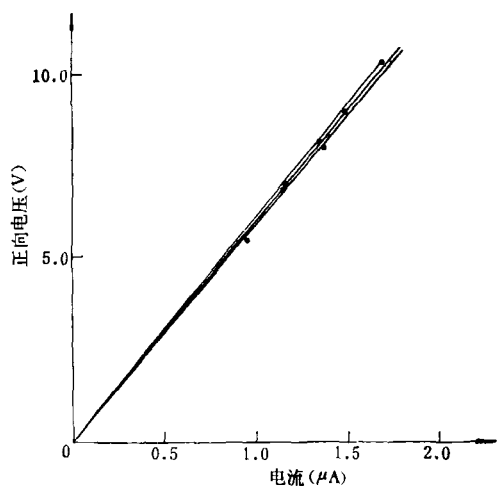


图 3 4.2 K 时硅二极管正向伏安特性曲线 (等效电阻 $6.2 M\Omega$)

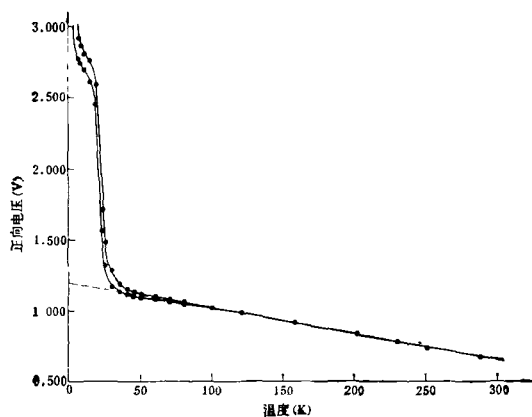


图 4 两个不同的 Si p-n 结 $V-T$ 曲线 (正向电流 $91.25 \mu A$)

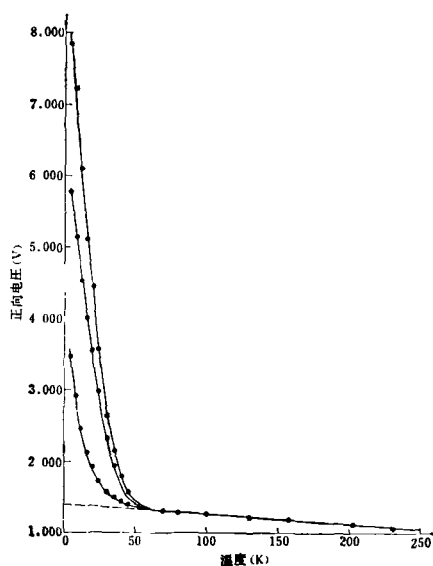


图 5 三个不同的 GaAs p-n 结 $V-T$ 曲线 (正向电流 $91.25 \mu A$)

Si 材料次之, 约 40 K, GaAs 材料最高, 约 60 K. 第二, 材料相同但型号不同的二极管在突变温度以下曲线之间差异甚大, 而高于突变温度时, 曲线基本重合。

二极管正向电压随温度变化的区域实际上可以分为三个部分: (1) V_j 起主要作用的温区; (2) V_j, V_r 同时起作用的温区; (3) V_r 起主要作用的温区. 对于 p^+n 型二极管, V_r 主要由 n 区材料的体电阻决定, 而这个电阻又决定于浅掺杂的多子浓度和迁移率, 因此分析 V_r 随着温度的变化规律, 应该从这两个因素去考虑. 迁移率是温度的缓变函数, 而浅掺杂的浓度在某个临界温度之下随着温度的降低急剧减小, 使 V_r 突然增大. 当杂质电离能很小时, (2) 区的温度范围实际上是非常窄的, 使 $V-T$ 呈现出明显的突变. 对于相近的浅掺杂浓度, 突变温度之比大约等于浅掺杂电离能 E_i 之比, Si 中浅掺杂施主电离能约为 $0.039-0.044 eV$, Ge 中浅掺杂施主电离能约为 $0.09-0.011 eV$ ^[3], 实验结果很好地证实了这一点. Ge 半导体材料容易获得较小的浅施主电离能, 为了扩大 p-n 结温度传感器的低温使用范围, 应该采用重掺杂的 Ge p-n 结, 甚至采用杂质电离能更小的半导体材料, 如铋化锑等。

图 5 的实验采用了在 p 区和 n 区都掺 Si 的 GaAs 二极管, $V-T$ 曲线的突变温度为 60 K, 而且曲线在突变点之后 V 随温度降低而增大的趋势远较 Si 二极管平缓, 根据文献 [3], Si 在 GaAs 中施主电离能为 0.002 eV, 受主电离能为 0.026 eV. 由上面的分析, $V-T$ 曲线的突变温度应该比 Si 二极管更低, 变化趋势也应该比 Si 二极管更陡峭. 我们认为, 在本实验所采用的试样中, 有一种深能级的杂质对形成 p-n 结和决定 V_r 都起主要作用.

在突变温度以下, 同种材料不同二极管的 $V-T$ 曲线的离散性是由于其体电阻的差异引起的. 在没有能级简并和杂质补偿的情况下, 体电阻率与多子浓度成反比. 杂质浓度的变化直接引起电阻率变化, 工艺条件的微小差异会使各试样的正向压降相差很大. 然而, p-n 结的正向压降在杂质全部电离时, 仅与载流子浓度的对数有关, 是载流子浓度的缓变函数, 因而杂质浓度的差异对 p-n 结正向压降的影响甚微. 所以, 在突变温度以下离散的曲线簇随着温度的升高, 经过突变点后基本重合. 这个实验结果也从另外一个角度揭示了 p-n 结温度传感器在低温时发生了两种性质完全不同的物理过程, 这一点对保证 p-n 结温度传感器的一致性和稳定性很有意义, 也是它不同于热敏电阻的又一特点.

突变温度以下, 随着温度的降低 Ge, GaAs 材料二极管正向压降单调上升, 传感器灵敏度 $\left| \frac{dV}{dT} \right|$ 亦单调增大, 这种规律一直延伸到 4.2 K. 在 4.2 K 时, Ge 二极管的测温灵敏度达到 36 mV/K, 输出阻抗为 2 k Ω , GaAs 二极管灵敏度为 280 mV/K, 输出阻抗为 65 k Ω . Si 二极管

的情况则比较复杂, 在 20 K 附近, 灵敏度 $\left| \frac{dV}{dT} \right|$ 突然减小, 之后又继续增大, 文献 [4] 中也报道过类似的实验结果. 具有复合中心 (Au) 的 Si p-n 结情况更加复杂, $\left| \frac{dV}{dT} \right|$ 值发生两次突变 (如图 6).

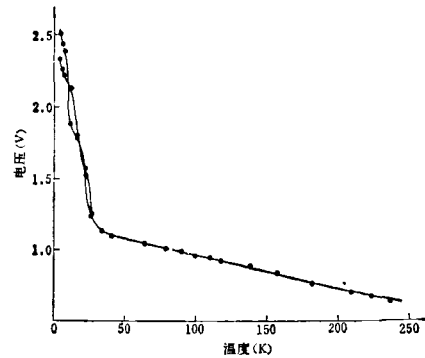


图 6 掺金 Si p-n 结 $V-T$ 曲线
(正向电流为 91.25 μ A)

我们曾指出^[1], 当杂质全部电离时, p-n 结正向压降 V 与温度 T 关系的非线性是由于 V 的表达式中含有非线性项 $\left(-\frac{Mk}{q} T \ln T \right)$. $\frac{dV}{dT}$ 的变化率与 $\frac{1}{T}$ 成正比, 愈到低温, 这种非线性愈加明显, 这是 p-n 结的普遍规律. 在突变温度以上, Ge, Si, GaAs 的实验结果很好地证实了这一点.

参 考 文 献

- [1] 张开逊、王向, 物理, 9-3(1980), 213.
- [2] E. H. Rhoderick, Transport Processes in Schottky Diodes, (1974), 9, 10.
- [3] S. M. SZE, Physics of Semiconductor Devices, (1969), 30.
- [4] Davide L. Swartz, John M. Swartz, Advances in Instrumentation, ISA-76, Vol. 31, Part 2, p. 611.