第2卷 第4期 半 导 体 学 报 Vol. 2, No. 4
1981 年 11 月 CHINESE JOURNAL OF SEMICONDUCTOR Nov., 1981

研究简报

确定 n-Si 补偿度的简捷方法*

孙毅之 张又立 薛绍仁 徐维明
(天津电子材料研究所)

在确定 n-Si 补偿度时通常采用变温的霍尔测量进行霍尔分析[1]或迁移率分析方法[2],前者必须具备比液氮温度低很多的温度条件,费时而冗长. 迁移率分析则根据 n-Si 的能带结构和散射机构,由液氮温度下的迁移率值和室温下测量载流子浓度得出补偿度. 虽然迁移率分析方法较霍尔分析已经大大简化,但仍然要变换样品温度;况且对在室温下呈高阻的样品,测量也比较困难. 我们根据电中性方程和 Si 中电子散射机构提出了只根据液氮温度下霍尔测量数据确定补偿度的方法.

一、原 理

根据 Si 中电子散射机构知道,载流子霍尔迁移率 μ_H 是温度 T、载流子浓度 n、总离化杂质浓度 N_I 和中性杂质浓度 N_0 的函数,我们可以把它表示为

$$\mu_H = F_1(T, n, N_I, N_0) \tag{1}$$

载流子浓度 n 是 T、N_D、N_A 和杂质激活能的函数,对于特定的控制杂质的样品,n 则是 T、N_D、N_A 的函数. 假定中性杂质仅为净施主的去离化部分构成,根据电中性方程可以写为

$$N_D - N_A - n = N_0 = F_2(T, n, N_A) \tag{2}$$

因为 $N_A = \frac{1}{2}(N_I - n)$,所以

$$N_D - N_A - n = F_1'(T, n, N_I) \tag{3}$$

方程 (3) 表示去离化部分的净施主浓度与总离化杂质浓度的关系. 将方程 (3) 代入方程 (1),则霍尔迁移率变为 N_I、n、T 的函数,同时也可表示为 $(N_D - N_A - n)$、n、T 的函数. 即

$$\begin{aligned} \mu_H &= F_1'(T, n, N_I) \\ \mu_H &= F_1''(T, n, (N_D - N_A - n)) \end{aligned} \tag{4}$$

根据方程 (4) 可以看出,通过一个温度下的迁移率测量可以同时确定 N_I 和 $(N_D - N_A - n)$,经由方程

$$N_D + N_A = N_I + (N_I - N_A) - n$$

* 1980 年 12 月 3 日收到,1981 年 3 月 7 日收到修改稿.

可以方便地得出总杂质浓度 $(N_D + N_A)$，再根据同一温度下霍尔测量所确定的载流子浓度 n 结合测量迁移率确定出来的 $(N_D - N_A - n)$，可求出净施主浓度 $(N_D - N_A)$，因之补偿度可定.

我们采用经由低温霍尔分析验证符合实际的 Самойлович 所提出的散射模型，考虑了各向异性的声学声子谷间和谷内散射，离化杂质散射和中性杂质散射，并根据几率相加确定出各种机构对迁移率的贡献[3-7]. 由于只有在低温下迁移率对离化杂质灵敏，因此选择液氮温度. 利用电子计算机分别对掺磷、砷、锑的 n-Si，以载流子浓度 n 为参变量分别计算了 μ_H^{77} 对 N_I^{77} 和 μ_H^{77} 对 $(N_D - N_A - n)$ 的关系曲线，n 的浓度范围为 $10^{11}\text{cm}^{-3} - 10^{15}\text{cm}^{-3}$，$N_I$ 的范围为 10^{11}cm^{-3}—10^{16}cm^{-3}. 磷、砷、锑在 Si 中的激活能很接近，在 77K 时离化程度差别有限；计算结果表明，在测量误差范围之内对应不同杂质元素的关系曲线是完全重合的. 图 1 给出了根据计算结果绘制的 $\mu_H \sim N_I$ 和 $\mu_H \sim (N_D - N_A - n)$ 的曲线.

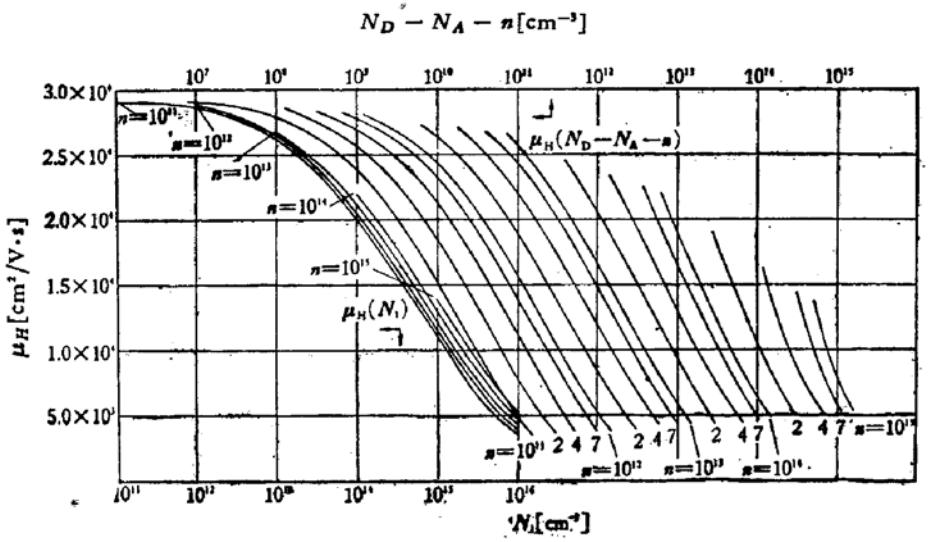

图 1 77K 下霍尔迁移率对离化杂质浓度 N_I 和净施主去离化浓度 $(N_D - N_A - n)$ 的关系

为了由霍尔测量确定出载流子浓度，需要知道待测样品的霍尔因子 Γ，因为 Γ 值在特定温度下是 n 和 N_I 的函数，根据我们的工作将 Γ 表示为测量迁移率的函数[8]. 计算表明 Γ 对 n 的依赖关系是很微弱的，在 77K 下实际上可以忽略不同载流子浓度的影响而退化为一条 $\mu_H \sim \Gamma$ 曲线，图 2 给出 μ_H 与 Γ 的关系曲线.

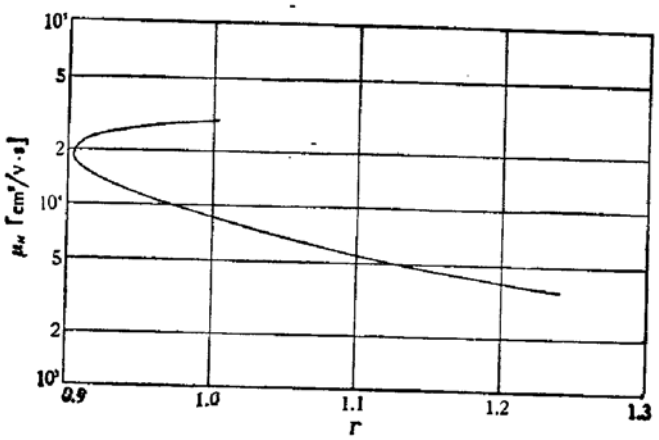

图 2 77K 下霍尔迁移率和 Γ 因子的关系

二、应用和讨论

根据霍尔测量所测定的 μ_H 和霍尔常数 R_H，由 μ_H 在图 2 上查得 Γ 因子，并结合 R_H 确定 n；尔后经由 μ_H 和 n 值由图 1 的曲线分别确定出相应的 N_1 和 $(N_D - N_A - n)$，这样由一个温度下的霍尔测量数据就可得到估算材料补偿度所需的全部数据.

我们对 ρ 在几个欧姆-厘米至上千欧姆-厘米的 n-Si 用本方法作了补偿度估计，同时亦采用通常使用的室温霍尔测量结合 77K 下霍尔测量数据估算了补偿度. 两者对照表明，不同方法所确定的 N_D, N_A 值相对偏离最大值约 10% 左右. 可以认为，对估价材料中反型杂质浓度，上述两种方法具有相同的精度.

本方法是考虑了离化杂质中心散射、晶格散射和净施主去离化中心散射对迁移率的贡献，并且考虑掺杂浓度对杂质激活能的影响，利用电中性方程而建立的. 所绘制的曲线是对含有等效补偿浓度为 N_A 并具有单一施主杂质能级的样品计算的，原则上不同的杂质应该对应其相应的结果. 已经指出，对于 Si 中磷、砷、锑为杂质的材料，迁移率的计算曲线是重合的. 对于适于大多数器件使用的掺杂 Si 单晶，根据它的制备工艺条件和掺入杂质的水平，是足以保证上述的要求的. 因此所绘制的曲线适合于在器件和集成电路用材料分析中使用.

本方法与以前任何一种方法相比，明显的优点在于：(i) 简单，它只须测量一次，从而省时；(ii) 降低对仪器和测量条件的要求，因为在液氮温度下测量时，大多数样品(特别是高阻样品)降低阻值，从而降低了对测量仪器输入阻抗的要求，并减少了高阻测量时所遇到的困难. 在曲线所给的浓度范围内使用时，仅需测量迁移率和霍尔常数，使用方便.

参　考　文　献

[1] E. H. Putley, The Hall Effect and Related Phenomena, Chapter 4.
[2] И. В. Даховский, *ФТП*, **7**, 1946 (1973).
[3] P. Norton, *Phys. Rev. B*, **8**, 5632 (1973).
[4] И. В Даховский, *ФТТ*, **5**, 2332 (1963).
[5] А, Г, Самойлович, *ФТТ*, **3**, 2939 (1961). *ФТТ*, **3**, 3285 (1961).
[6] П. И. Баранский, *ФТП*, 10, 1345 (1968).
[7] S. S. Li, *Solid-State Electronics*, **20**, 609 (1977).
[8] 薛绍仁，孙毅之，张又立，电子科学，1980 年第二期，43.

A Simple and Quick Method of Determining the Compensation Degree of n-Si

Sun Yizhi, Zhang Youli, Xue Shaoren and Xu Weiming

(Tianjin Electronic Material Research Institute)