

n-Ge 中单峰型反常霍尔效应的理论研究

姜 坤

(吉林师范学院理学院 吉林 132011)

姜 伟

(辽阳石化高等专科学校 辽阳 111003)

摘要 理论分析表明不同于 n-Ge 中双反转型和凹陷型反常霍尔效应, n-Ge 中的单峰型反常霍尔效应是由于样品中的反型区形成一逾渗集团 在此基础上的定量计算结果与 Kono-rova 的实验结果相当一致

PACC: 7220M, 7215G

1 引言

对半导体材料 Ge 中的反常霍尔效应的研究已有大量的文献报道^[1~7]。按霍尔效应的反常温度, Ge 中的反常霍尔效应可分为超低温(10K)^[1~3]、低温(190K)^[4]和常温(300K)^[5]反常霍尔效应;按霍尔系数 R 与温度的关系曲线类型, Ge 中的反常霍尔效应可分为单峰型^[1,4]、凹陷型^[4]和双反转型^[3~5]。对 Ge 的超低温反常霍尔效应 Hong (洪朝生)^[8]用杂质能带导电理论给予了成功的理论解释;对低温和常温下 Ge 的凹陷型和双反转型反常霍尔效应,邢旭和姜伟等^[9,10]用反型层模型也给予了很好的理论解释。然而自 1978 年 Kono-rova^[4]报道了低温下(190K) n-Ge 的单峰型反常霍尔效应的实验现象以来,这一现象一直没有得到理论解释。揭示这一反常现象的机理不仅是理论研究的一个重要问题,而且对在实际中如何利用和避免反常霍尔效应也有着深远的意义。

2 n-Ge 中霍尔效应反常的机理及其模型的选取

2.1 n-Ge 中霍尔效应反常的机理

对 Ge 的超低温反常霍尔效应, Hong^[8]提出了杂质能带导电模型。由于杂质原子间电子的共有化,可以产生杂质能带。因共有化的程度远小于组成晶体的原子的价电子的共有化,

姜 坤 女, 1965 年出生, 讲师, 从事半导体材料电磁特性研究和物理学的教学工作

姜 伟 男, 1962 年出生, 博士, 副教授, 从事凝聚态物理研究和物理学的教学工作

1998-11-20 收到, 1999-01-08 定稿

所以杂质能带一定很窄,相应的载流子的有效质量大,因此在杂质能带中载流子的迁移率很小.由该模型得出的对 n-Ge 的单峰型反常霍尔效应出现的条件是:

$$n_C = \frac{\mu_D}{\mu_C} n_D \quad (1)$$

其中 n_C 和 n_D 是导带及杂质能带中电子的浓度; μ_C 和 μ_D 为相应的迁移率.因 $\mu_C \gg \mu_D$, 由 (1) 式可知 $n_C \ll n_D$, 而该条件只有在极低温度 (10K 左右) 下的弱电离范围才能满足.所以该模型解释不了在 190K 出现的 n-Ge 的单峰型反常霍尔效应.

对低温和常温下 n-Ge 的凹陷型和双反转型反常霍尔效应,邢旭和姜伟等^[9,10]提出了反型层模型,在该模型中 p-n 结起着关键作用.由文献[9]中的结果可以计算 p-n 结的单位面积的线性电阻 g_M 、p 型区的电阻率 ρ_p 及 n 型区的电阻率 ρ_n , 如表 1 所示.

表 1 在 Ge 样品中具有受主密度为 $N_D = 1.7 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 的 n 型区和施主密度为 $N_A = 7.5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 的 p 型区所形成的 p-n 结的单位面积电阻 g_M 、p 型区的电阻率 ρ_p 、n 型区的电阻率 ρ_n 与温度 T 的关系

T/K	160	180	200	220	240	260
$g_M / (\Omega \cdot \text{cm}^2)$	1.2×10^{12}	1.8×10^8	1.0×10^7	1.4×10^5	4.0×10^3	2.0×10^2
$\rho_p / (\Omega \cdot \text{cm})$	1.1	1.4	1.8	2.3	2.8	3.4
$\rho_n / (\Omega \cdot \text{cm})$	3.4	4.2	4.9	5.8	6.7	7.6

由表 1 可知: 低温区, p-n 结的线性电阻 g_M 非常大, p 型区与 n 型区及 p 型区之间处于断路状态, 它对样品的霍尔电动势 V_H 的贡献为零. 当温度升到 g_M 与样品的体电阻可比时, p 型区对样品的霍尔电压 V_H 开始起作用. 由于 p 型区的霍尔电动势 E_p 与 n 型区的霍尔电压 E_n 相反, 温度继续升高将出现两种情况: 一种为 p 型区的体积足够大, E_p 对 V_H 的贡献大于 n 型的 E_n 的贡献, 霍尔系数 R 反号, 这就是双反转型反常霍尔效应; 另一种情况为 p 型区的体积不够大, E_p 对 V_H 的贡献小于 n 型的, 这时 R 的绝对值下降, 温度升到 p 型区的本征温度, 因 E_p 的方向与 E_n 的相同, R 的绝对值上升, 这就是凹陷型反常霍尔效应. 也就是说对应此结构的 n-Ge 样品只能出现双反转型, 凹陷型以致正常 n 型的霍尔效应, 而不可能出现单峰型反常霍尔效应. 所以只有采用新的模型才能对低温下 n-Ge 的单峰型反常霍尔效应给予合理的理论解释.

2.2 逾渗集团模型的选取

实验事实已经证明, 高温热处理可使 n-Ge 样品局部乃至全部反型^[4,7,10]. Kono-rova^[4]曾对四块相同的 n-Ge 样品分别进行了 550、650、700、800 的高温热处理. 其中经过 800 热处理的 n-Ge 样品表现为正常 p 型的 $R \sim T$ 关系, 经过 650、700 处理的样品分别表现为凹陷型和双反转型反常霍尔效应, 经过 550 热处理的样品表现为单峰型反常霍尔效应. Kono-rova 认为出现霍尔效应反常的原因是热处理后 n-Ge 样品中形成了 p 型区. 从逾渗的角度出发, p 型区在 n-Ge 样品中只能以两种形式存在. 一种为这些 p 型区孤立地分布在样品中, 反型层模型是这种形式的一个特例; 另一种为这些 p 型区相互连通在样品中形成一逾渗集团. 而对 p 型区形成一逾渗集团的 n-Ge 样品, p 型区的霍尔电势动 E_p 对样品霍尔电动势 V_H 的影响不受 p-n 结的控制. 在低温区, p 型区处于饱和态, p 型区的霍尔系数 R_p 与 n 型区的霍尔系数 R_n 相反, 若 p 型区对样品霍尔电压的贡献小于 n 型区的, 样品表现为 n 型

霍尔效应 当温度达到本征激发的载流子浓度与 p 型区点缺陷引起的载流子浓度相当时, R_p 改变符号, 样品霍尔系数 R 的绝对值开始增加 当温度进一步达到本征激发的载流子浓度与 n 型区施主浓度相当时, R 开始下降 这恰好是单峰型反常霍尔效应 所以可以说 n-Ge 中的单峰型反常霍尔效应是因样品中的反型区形成一逾渗集团

对 InAs, HgCdTe 这样材料的样品, 其电子的迁移率很高, p-n 结的线性电阻 R_M 与 p 型区的电阻相比可忽略, p-n 结不起关键作用 不论 p 型区是孤立的非逾渗结构还是连通的逾渗集团结构, p 型区的霍尔电动势 R_H 对样品霍尔电动势 V_H 的影响不受 p-n 结的控制 若忽略 p-n 结的势垒宽度, 对这样的半导体材料可不考虑 p-n 结对样品霍尔效应的影响^[11,12], 然而对于象 Ge, Si 这样材料的样品因其电子的迁移率较低, 在低温区 p-n 结的线性电阻远高于 p 型区的电阻, 所以 p 型区对样品霍尔效应所起的作用就会因 p 型区结构的不同而不同

3 理论计算

对 p 型区形成逾渗集团的 n-Ge 样品, 假设 n 型区和所有的 p 型区是均匀的并忽略 p-n 结的势垒宽度, 将分布在样品各处的 p 型区和 n 型区用相应的等效电源代替后可得到样品的霍尔系数 R 的近似表示式为^[10]

$$R = \frac{R_n \sigma_n + \alpha R_p \sigma_p}{\sigma_n + \alpha \sigma_p} \quad (2)$$

其中 R_n , σ_n 和 R_p , σ_p 分别为样品中 n 型区和 p 型区的霍尔系数和电导率; α 是 p 型区的总体积与 n 型区的总体积之比

当 n 型区的施主浓度 $N_d = 2.1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$; p 型区的受主浓度 $N_a = 1.0 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$; $\alpha = 0.40$ 时; 取迁移率与温度的关系为 Ge 的晶格散射公式, 由 (2) 式计算的结果与 Kono-rova^[4] 的实验结果相当一致 (如图 1 所示).

进一步计算表明: (1) p 型区的受主浓度越高, 霍尔效应开始反常的温度越高 (如图 2 所示); (2) p 型区所占的比例越高, 单峰型反常霍尔效应的峰越高 (如图 3 所示). 这些结果有待于实验的进一步验证

4 结束语

结合文献[10]的结论可以得出: 样品结构是影响 n-Ge 样品中霍尔效应反常类型的决定性因素; 而样品的电导率是影响 n-Ge 样品霍尔效应反常温度的主要因素

对具有 p 型区为分立结构的 n-Ge 样品出现双反转型, 凹陷型以致正常 n 型的霍尔效应; 对 p 型区形成一逾渗集团的 n-Ge 样品, 出现单峰型反常霍尔效应 而无论何种结构的样品, 样品的禁带宽度越窄, 电导率越低, 霍尔效应的反常温度就越低

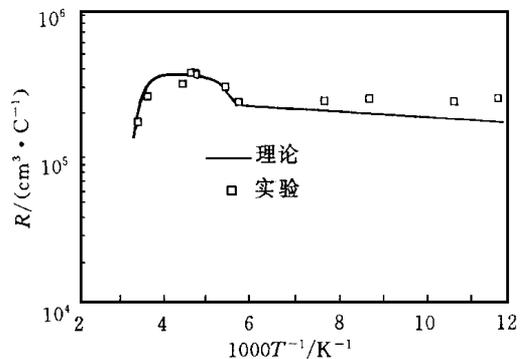


图 1 理论计算结果与实验结果的对比
 $N_d = 2.1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$; $N_a = 1.0 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$; $\alpha = 0.40$

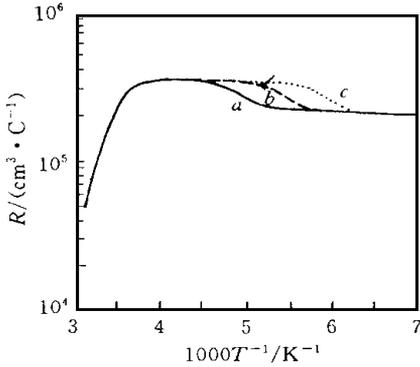


图 2 p 型区不同受主浓度下霍尔系数的温度关系

$$N_d = 2.1 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}; \alpha = 0.40;$$

$$a: N_a = 1.0 \times 10^{10} \text{cm}^{-3}, b: N_a = 1.0 \times 10^9 \text{cm}^{-3},$$

$$c: N_a = 1.0 \times 10^8 \text{cm}^{-3}.$$

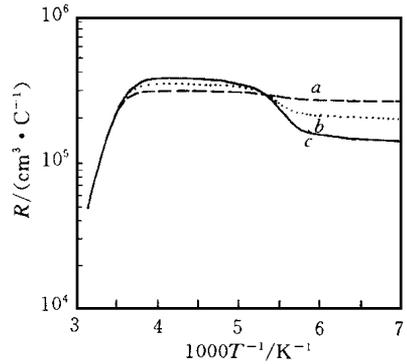


图 3 不同 p 型区总体积霍尔系数的温度关系:

$$N_d = 2.1 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}; N_a = 1.0 \times 10^9 \text{cm}^{-3};$$

$$a: \alpha = 0.10, b: \alpha = 0.40, c: \alpha = 0.67.$$

同样的 n-Ge 样品, 经过不同的高温热处理, 表现出了不同类型的反常霍尔效应, 说明不同热处理过程中点缺陷的集聚所形成的 p 型区的结构亦不同。揭示这一现象的内在规律有待于理论和实验的进一步研究。

参 考 文 献

- [1] 黄昆, 谢希德著, 半导体物理学, 北京: 科学出版社, 1958
- [2] C. S. Hung and J. R. Gliessman, Phys Rev, 1950, **79**: 726
- [3] Hiroo Yonemitsu, Hajime M aeda and Hisao M iyaiaw, J. Phys Soc Jpn., 1960, **15**: 1717.
- [4] L. F. Konorova, Soviet Solid State Phys., 1978, **20**(8): 2507.
- [5] 邢旭, 科学通报, 1985, **30**: 1701.
- [6] 邢旭, 物理学报, 1990, **39**: 614
- [7] 邢旭, 中国科学, 1990, **20**: 880
- [8] C. S. Hong, Phys Rev., 1950, **79**, 727.
- [9] 邢旭, 姜伟, 王锡绂, 物理学报, 1989, **38**: 1210
- [10] Jiang Wei, Lu Gang and Song Luwu, Acta Phys Sin. (Overseas Edition), 1995, **4**: 923
- [11] M. C. Chen, J. Appl Phys., 1989, **65**: 1571.
- [12] C. Besikci, Y. H. Choi, R. Sudharsanan, et al., J. Appl Phys., 1993, **73**: 5009.

Theoretical Investigation on Anomalous Hall Effect with Single Peak of n-Ge

Jiang Kun

(Jilin Normal Collage, Jilin 132011)

Jiang Wei

(Liaoyang Petrochemical Engineering College, Liaoyang 111003)

Received 20 November 1998, revised manuscript received 8 January 1999

Abstract It is pointed out that the anomalous Hall effect with single peak of n-Ge resulted from the percolation cluster formed by inversion regions. From this model the calculated results are in good agreement with Konorova experimental results.

PACC: 7220M; 7215G