

重掺杂高补偿锗的电导和磁阻

李国华 傅绮英 吕 红 王大为

(中国科学院新疆物理研究所)

1985年11月23日收到

测量了双掺砷、镓，掺杂浓度 $\sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ，补偿程度 ~ 0.9 的N型和P型锗在2.5—300K的电导特性和2.5—77K、0—7T磁场下的磁阻。当 $T < 6\text{K}$ 时，电导特性满足变距跳跃电导的 $T^{1/4}$ 关系。在 $10 < T < 60\text{K}$ 时电导特性表现为声子帮助下的跳跃电导， $T > 60\text{K}$ 时，基本带的扩展态电导起主要作用。在弱磁场下观察到负磁阻效应，磁场强度增大时磁阻变成正值。N型和P型样品的正磁阻部分分别与磁场强度的2.8次方和2次方成正比。

利用重掺杂高补偿锗已经制得了可用于磁场下的宽温区电阻温度计。本文介绍了作为器件基础的电导和磁阻特性的测量结果。虽然关于锗的电导和磁阻已有很多研究^[1-9]，但重掺杂高补偿锗的测量还很少见到。本测量可以为深入研究重掺杂高补偿半导体中的输运过程提供一些帮助。

在单晶炉中用直拉法制得双掺砷和镓的晶锭，从晶锭的某些部位可以切得高补偿的N型或P型晶片，晶面为(111)面。把这些晶片切成长方形的样品，做成四极型电阻，老化后装入铜外壳中进行电导和磁阻测量。样品的基本参数在表1中列出。

电导和磁阻均在中国科学院物理所低温实验室进行。样品和标准温度计一起装在铜热沉上，置于液氮变温杜瓦中，电导测量时用KS-4高精度低温控温电桥控温，磁阻测量时用CSC-400型电容控温仪控温。测量电流由KEITHLEY 225型恒流源提供，样品电压由KEITHLEY 181型数字电压表测量。

表1 样品的基本参数

样品号	长×宽×厚 (mm ³)	电导类型	电阻率(Ωcm)			N_{Ga} (cm ⁻³)	n_{300K} (cm ⁻³)	K	电流与磁场 关系
			300K	77K	4.2K				
680	3×1×0.3	N	0.51	2.49	72.0	8.6×10^{17}	7.6×10^{16}	0.91	/
698	3×1×0.3	N	0.52	—	133.7	8.6×10^{17}	7.5×10^{16}	0.92	/
703	1.5×0.5×0.35	N	0.28	2.10	47.3	8.6×10^{17}	1.4×10^{17}	0.86	/
706	1.5×0.5×0.35	N	0.41	2.54	140.5	8.6×10^{17}	1.0×10^{17}	0.90	/
707	1.5×0.5×0.35	N	0.42	3.13	115.0	8.6×10^{17}	9.8×10^{16}	0.90	/
708	1.5×0.5×0.35	N	0.30	1.41	26.3	8.6×10^{17}	1.3×10^{17}	0.87	/
729	1.5×0.5×0.35	N	0.30	1.46	15.2	8.6×10^{17}	1.3×10^{17}	0.87	±
3009	1.5×0.5×0.3	P	0.50	1.91	15.9	1.2×10^{18}	8.0×10^{16}	0.93	/
3029	3.5×0.5×0.3	P	0.40	0.82	11.8	5.1×10^{18}	1.0×10^{17}	0.98	/
3032	3.5×0.5×0.3	P	0.42	1.66	8.44	5.1×10^{18}	9.8×10^{16}	0.98	/
3033	3.5×0.5×0.3	P	0.31	1.05	11.1	5.1×10^{18}	1.3×10^{17}	0.97	/

图1给出了N型和P型样品的典型的 $\ln R - 1/T$ 曲线，图中方框内为低温下的 $\ln R - T^{-1/4}$ 曲线。从图中可以看到，在低温下($< 6\text{K}$) $\ln R - T^{-1/4}$ 是一直线表明此时的电导主要是定域态之间的变距跳跃电导。P型样品的直线可延伸到10K左右，但斜率要小一些。 $T > 6\text{K}$ 时，从 $\ln R - 1/T$ 关系可以看到，高温段($T > 60\text{K}$)斜率较陡，相应的激活能 $> 10\text{meV}$ 。此时主要是激发到基本带中的扩展态电导。低温段($T < 60\text{K}$)斜率较缓，此时定域态之间的声子帮助下的跳跃电导起主要作用。这样的电导特性与非晶材料的电导特性类似。表明在重掺杂高补偿锗中带尾中的定域态在电导过程中起着相当重要的作用。

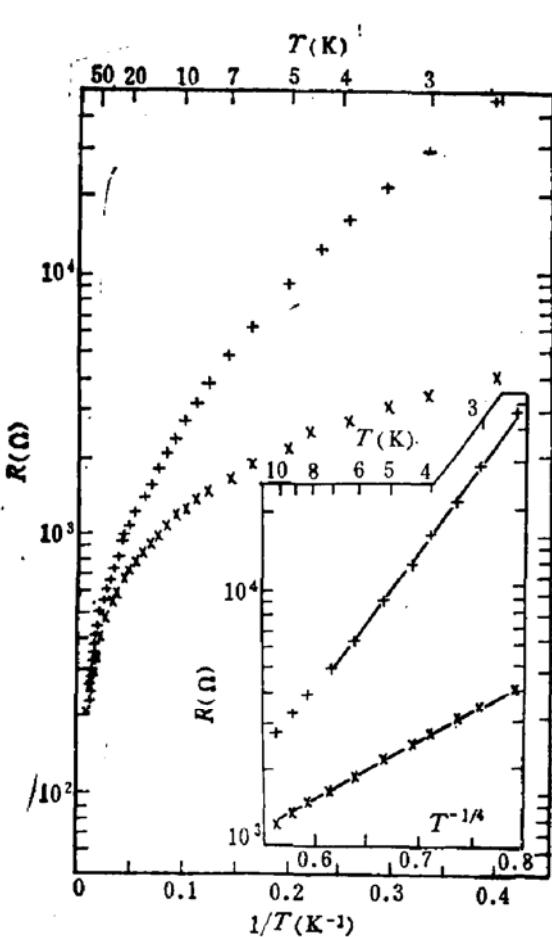


图1 n-Ge 和 p-Ge 的 $\ln R - 1/T$ 关系。图内小图为
低温下的 $\ln R - T^{-1/4}$ 关系。
+698n-Ge, ×3033 p-Ge

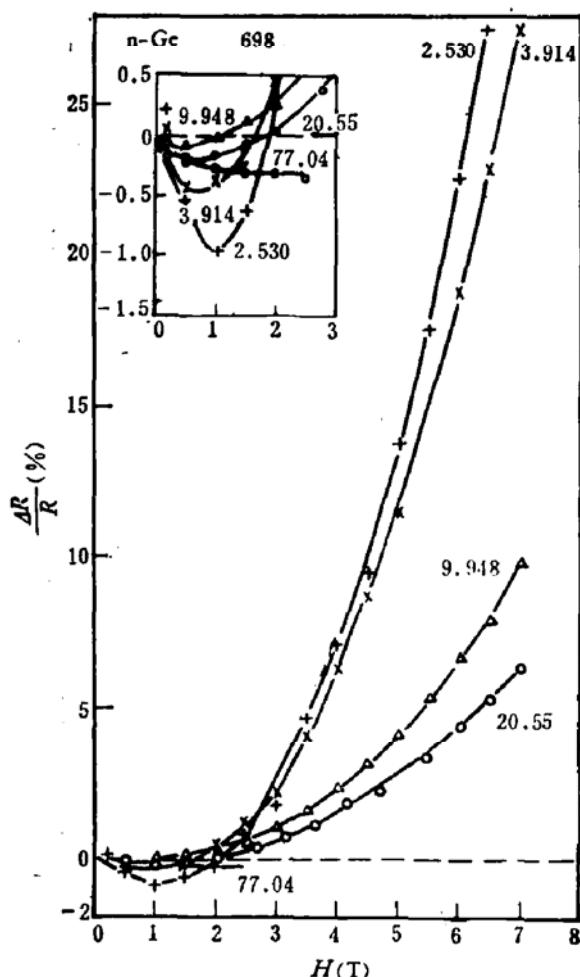


图2 n-Ge 的磁阻变化
其中 77K 数据是684号样品的结果

图2和图3分别给出了N型和P型样品在0—7T磁场中几个温度下的磁阻 $\frac{\Delta R}{R}$ 与磁场强度 H 的关系，其中 ΔR 是磁场下电阻 R_H 和零场下电阻 R 之差。图中方框内为弱磁场时的细节。温度值已在曲线旁标出。从图中可以看到在弱场下，磁阻为负值在1T附近达到极大值。随着磁场强度的增大，磁阻逐渐变成正值。77K下的磁阻在所测的磁场强度下都是负值。正磁阻部分的磁阻与磁场强度的关系满足

$$\frac{\Delta R}{R} = c(T)H^n$$

关系。从实验结果得到的 n 和 c 值见表 2。不同温度下的 n 值基本相等。N型和P型样品的平均 n 值分别为 2.8 和 2.0。 $c(T)$ 随温度的升高而减小。

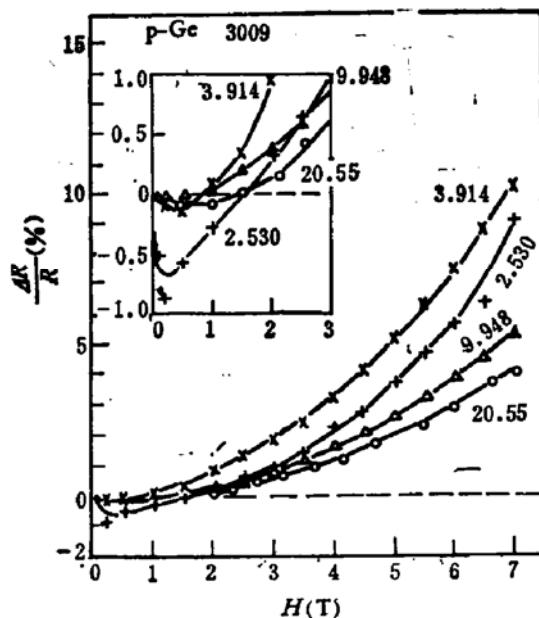


图 3 p-Ge 的磁阻变化

根据 Mikoshiba 和 Gonda 的理论^[2]，磁场使施主态波函数收缩，从而减小了电子的跃迁几率，导致正磁阻。在重掺杂高补偿锗中，低温下电导主要是带尾中局域态之间的跳跃电导，因此也可以用 Mikoshiba 和 Gonda 的理论来解释观察到的正磁阻效应。由波函数收缩引起的磁阻与磁场强度的平方成正比。P型样品的实验结果与此相符，N型样品的 n 值偏大一些。对于负磁阻效应，Hedgcock 和 Raudorf 曾提出双带模型^[3]加以解释。在重掺杂高补偿锗中，带尾中不同深度的能级上的电子迁移率不同，能级越深迁移率越小，在磁场下，自旋向上的电子能级下降 $\beta_0 H$ 、自旋向下的电子能级上升 $\beta_0 H$ 的值，使一

表 2 n-Ge 和 p-G 的 n 值和 $c(T)$ 值

样品号	电导类型	n				$c(T)$			
		2.530K	3.914K	9.948K	20.55K	2.530K	3.914K	9.948K	20.55K
698	N	2.77	2.59	2.68	2.68	2.54×10^{-4}	2.11×10^{-4}	7.58×10^{-5}	4.87×10^{-5}
703	N	2.88	2.74	2.64	3.19	1.83×10^{-4}	1.50×10^{-4}	6.67×10^{-5}	4.60×10^{-5}
706	N	3.04	2.56	2.54	2.49	2.22×10^{-4}	2.02×10^{-4}	7.78×10^{-5}	5.05×10^{-5}
707	N	2.87	2.56	2.34	2.48	2.25×10^{-4}	2.02×10^{-4}	7.56×10^{-5}	5.00×10^{-5}
708	N	3.42	3.32	2.91	2.78	1.67×10^{-4}	1.32×10^{-4}	4.52×10^{-5}	3.36×10^{-5}
3009	P	2.61	2.01	2.14	2.27	1.56×10^{-3}	1.76×10^{-3}	9.37×10^{-4}	7.01×10^{-4}
3032	P	1.78	1.63	1.77	2.09	1.58×10^{-3}	1.76×10^{-3}	8.31×10^{-4}	5.41×10^{-4}

部分电子从迁移率小的能级转移到迁移率较大的能级，从而引起负磁阻，并可推出负磁阻与磁场强度成正比。由于上述两个因素的同时作用，使总的磁阻在弱场下表现为负值并

随着磁场强度的增大而逐渐变成正值。

在实验中电流方向与磁场方向平行的样品与垂直的样品的磁阻没有明显的差别。表明磁阻效应基本上是各向同性的。

中国科学院物理所崔长庚、蒋华、郭树权同志帮助进行了电导和磁阻测量，在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] B. I. Shklovskii and A. L. Efros, *Electronic Properties of Doped Semiconductors*, p. 295, Springer-Verlag 1984.
- [2] N. Mikoshiba and S. Gonda, *Phys. Rev.*, **127**, 1954, 1962, (1962).
- [3] F. T. Hedgcock and T. W. Raudorf, *Solid State Commun.*, **8**, 1819, (1970).
- [4] B. Giovannini and F. T. Hedgcock, *Solid State Commun.*, **11**, 367(1972).
- [5] W. Sasaki, *J. Phys. Soc. Japan*, **20**, 825 (1965).
- [6] G. Sadasiv, *Phys. Rev.*, **128**, 1131, (1962).
- [7] K. Sugiyama, *J. Phys. Soc. Japan*, **22**, 109 (1967).
- [8] Y. Furukawa *J. Phys. Soc. Japan*, **17**, 630 (1962).
- [9] I. S. Shlimax and V. V. Emtzev, *Phys. Stat. Sol. (b)*, **47**, 325 (1971).

Conduction and Magnetoresistance of Heavily Doped and Highly Compensated Germanium

Li Guohua, Fu Qiying, Lu Hong and Wang Dawei

(Xinjiang Institute of Physics, Academia Sinica)

Abstract

The conduction properties from 2.5 to 300 K and magnetoresistance under 0—7 T magnetic field at 2.5—77 K are studied for As, Ge doped n-type and p-type germanium with impurity concentration about 10^{18} cm^{-3} and compensation degree about 0.9. When $T < 6 \text{ K}$, the conductivity satisfies the $T^{1/4}$ law of variable-range hopping conduction. In the range of 10—60 K, the conduction is phonon helped-hopping conduction. When $T > 60 \text{ K}$, spread state conduction of fundamental band is dominating. Under weak magnetic field the magnetoresistance is negative but becomes positive with the increase of magnetic field. The positive components of magnetoresistance of n-Ge and p-Ge are proportional to $H^{2.8}$ and $H^{2.0}$ respectively.