在微重和超重环境下生长的InSb晶体的电学特性研究

张仿清　张　莉*　张南屏　陈光华
（兰州大学物理系）
马文驹
（中国科学院力学研究所，北京）

关键词　微重力、超重力、对流

一、引　言

最近几年来利用空间微重力条件进行晶体生长引起了人们极大的兴趣[1-3]．因为在空间微重力条件下，由重力导致的自然对流基本消失，液体中的浮力也消失了，由于物质密度不同引起的沉浮和分层消失，物质的混合和悬浮可以得到控制．这时扩散过程成为主要因素，液体由表面张力所束缚．但是，微重力物理研究还处在发展阶段，不少现象还不能解释，对流的真实物理图象还不清楚．目前，一方面研究空间物理，另一方面研究材料加工中的物理现象及材料性能，同时还设计制造一些模拟微重环境和超重环境来研究重力的作用．为了研究重力引起的对流对晶体生长的影响，Müller[4] 等人利用离心机对晶体生长炉进行加速，使生长过程中熔体所受的力大于 g_0（g_0 为重力加速度），相当于超重条件，研究了晶体生长过程中熔体内的对流情况．本文主要报道在不同重力条件下生长的 InSb 晶体的电学性能，并讨论了重力对材料性能的影响．

二、实　验

本实验所用 InSb 样品是在不同受力条件下，用定向正常凝固法进行重熔和再结晶．首先把地面沿〈111〉方向生长的掺 Zn（$\sim 10^{16}/cm^3$）InSb 晶体切成几段长为 50 mm 的长方形晶棒，分别装入清洁的石英管内，在 1.33×10^{-3}Pa 真空度下封管．将封好的石英小安瓿分别用于不同受力环境下的重熔和再结晶实验．

微重条件是在 1987 年 8 月 5 日中国发射的返回式卫星上进行的[5]．其微重力水平估算值优于 $2 \times 10^{-4}\ g_0$，即样品是在 $2 \times 10^{-4}\ g_0$ 的条件下制备的．$1\ g_0$ 的条件是在正常的重力环境下，用卫星上所用的加工炉，以近似于卫星上相同的温度梯度，在装入卫星之前在地面进行的重熔和再结晶．超重条件是利用离心机对晶体生长炉进行加速，模拟超重环境．在晶体生长过程中，离心机先以 22 r/min（每分钟的转数）的转速旋转，在这个条件下熔体所受的离心

本文 1989 年 2 月 27 日收到．1989 年 6 月 17 日收到修改稿．
* 西北师范学院．

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

力为 $3g_0$. 然后,再增加离心机的转速达到 31 r/min, 这时样品所受的力为 $6g_0$. 在 3、$6g_0$ 的受力条件下样品分别加热 90 min, 其温度梯度近似与 1 g_0 的条件相同. 在整个加工过程中,晶体加工炉的轴和温度梯度与离心力平行. 为了叙述方便,把大于 1 g_0 的力称为超重力.这样在 2×10^{-4}, 1、3、6 g_0 条件下分别制备出四种样品. 然后在相应位置切成 1 mm 厚的小片,做好欧姆接触,待电学性能测试使用.

电学测量主要用 Van Der Pauw 法测量了各种样品的霍尔系数 R_H、电阻率 ρ 及其与测量温度的关系. 测量温度范围从 80 至 400 K. 用 JEM-1200ES 透射电镜对各样品进行了能谱分析,又用金相显微镜观察了各样品的位错和缺陷.

三、结果和讨论

图 1 给出在微重 1、6 g_0 条件下制备的 InSb 样品 Hall 系数 R_H 随温度的变化关系. 在低温下 R_H 是正值,呈现空穴型导电. 随着温度升高 R_H 由正值向负值转变,变号温度分别为 198、248、308 K, 即样品由杂质激发进入本征激发,由于电子迁移率远大于空穴迁移率,这时电子导电起主要作用. Hall 系数变号温度 T_R 随着重力增加而升高,如图 2 所示. 这一结果说明,在超重环境下制备样品导致了新的缺陷态. 这些缺陷态起到了杂质的作用,使杂质电

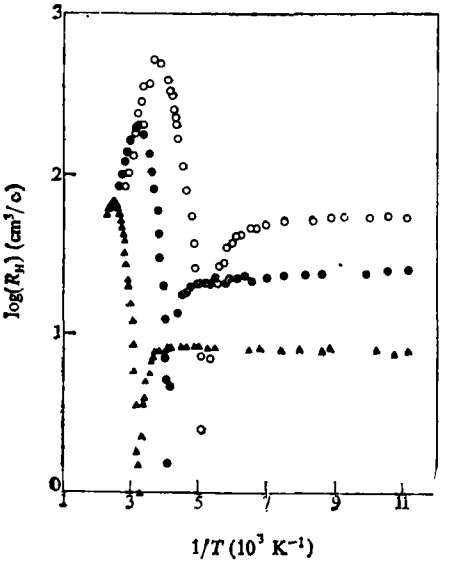

图 1 不同重力环境下制备的 InSb 样品 R_H 随温度的变化关系

○微重下的样品; ●1 g_0 下的样品; ▲6 g_0 下的样品

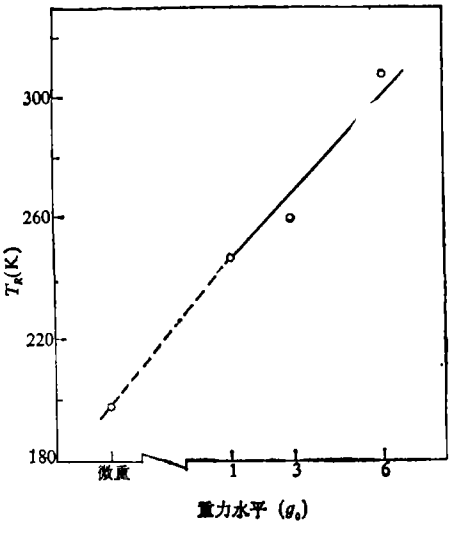

图 2 Hall 系数变号温度 T_R 与制备环境 g 的关系

导增加,达到本征激发的温度升高. 这样,制备条件的重力越大, R_H 的绝对值也越低,正如图 1 中所看到的, 6 g_0 下制备的样品 R_H 值最低.

我们还测量了不同重力条件下所得样品电阻率 ρ 与温度的关系. 在低温区, 微重样品的电阻率 ρ 随温度升高而增加,地面样品、3 g_0 样品变化不大, 6 g_0 样品 ρ 随温度的增加略有下降. 在中等温度范围,电阻率均随温度的增加而增加,先后达到极大值, 然后迅速下降. 在微重、1、3、$6g_0$ 环境下制备的样品电阻率达到最大值的温度 T_ρ 分别是 200、250、270、300 K.

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

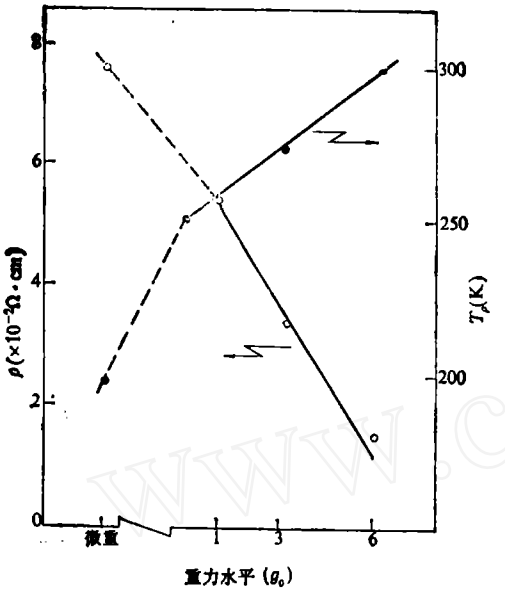

图 3 ρ(150K)和 T_ρ 与制备环境 g 的关系

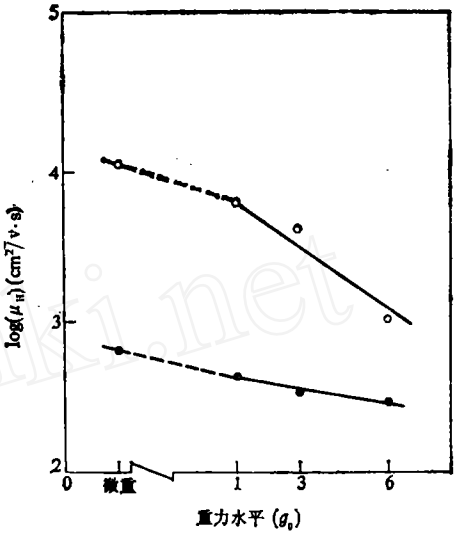

图 4 μ_H 与制备环境 g 的关系

○ 350K; ● 100K

在同一温度下，重力越大的电阻率越低，如图 3 所示．图 3 为 150 K 下各样品电阻率的值．

根据 $\mu_H = \sigma R_H$ 关系，我们计算了霍尔迁移率 μ_H．由 R_H 和 ρ 的测量结果可知：在 150 K 以下几种样品均可以认为处于杂质导电的饱和区、在这个温度范围内得到的是空穴迁移率．而 310 K 以上可以认为已进入本征导电区，又由于 InSb 材料电子迁移率远大于空穴迁移率，所以此时可认为以电子导电为主，这样可得到电子迁移率． 我们分别计算了不同样品 100 K 和 350 K 时的霍尔迁移率，画在图 4 中．从图 4 中可以看出，对同一样品高温下的电子迁移率远大于低温下的空穴迁移率．在同一温度下，不论是电子迁移率还是空穴迁移率均随生长时重力加速度的增加而下降，而在微重条件下制备的样品迁移率值最高，这表明该样品的杂质和缺陷最少．

从上述结果可以看出，在微重条件下制备的样品电学性能最好，而超重条件下制备的样品电学性能差．为了从结构上说明重力对材料性能的影响，我们用金相显微镜观察了各样品的位错和腐蚀坑，在超重情况下制备的样品，腐蚀坑显著增加，而微重条件下制备的样品位错和缺陷均较少．同时又用透射电镜进行了能谱分析，对样品内原子组分偏析情况进行了测量，每个样品测 10 个点，发现各 InSb 样品内 In 原子均多于 Sb 原子，平均原子偏析度列于表 1．由表 1 看出，在 6 g_0 环境下制备的样品比微重条件下制备的样品原子偏析度约大 7 倍，这说明微重条件下制备的样品化学计量比接近理论值．而在超重条件下制备的样品使得 In 原子析出，造成负电中心，在 InSb 样品中这些负电中心起杂质中心作用，使样品电导增加，电阻率下降，霍尔系数减小；由于散射中心增加，霍尔迁移率减小；由于缺陷杂质增加，使得由杂质激发向本征激发转变的温度提高了．

不同重力环境对晶体生长的影响实质上是重力影响着熔体的对流情况．在空间微重力环境下熔体中对流速度很慢，而且相当稳定，流线平行于熔体表面[6]．这样，在晶体生长过程中生长速率均匀，组分均匀，对二元以上的化合物原子组分偏析度很小，晶体结构比较完整．在

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1 不同制备条件下的样品平均原子偏析度

制备样品的重力水平	微重	$1g_0$	$3g_0$	$6g_0$
原子偏析度	0.16%	0.44%	0.75%	1.2%

地面 1 g_0 的环境下进行晶体生长时，熔体内存在着重力引起的自然对流，这种对流产生周期性振荡，熔体对流的振荡导致固液界面处温度起伏[7]，这样使生长速率变化，造成杂质分布不均匀，可以观察到生长的杂质条纹[8]. 但当用离心机加速造成超重条件时，熔体内不仅存在与温度梯度平行的离心力，而且还存在与温度梯度垂直的重力. 这两种力使熔体内的对流相当复杂，出现湍流甚至还存在涡流，熔体内周期性振荡的对流逐渐消失，温度梯度方向与对流方向不一致，造成晶体生长速率不稳定，杂质分布不均匀，缺陷多，晶体完整性差，样品电学性能差. 但是，Müller 等人在晶体生长时利用增大加速度可以消除杂质条纹，得到和微重条件下相同的结果，而我们尚未观察到这个现象，该问题有待进一步的研究.

致谢：本工作中空间微重条件是由空间技术研究院和五一〇研究所帮助完成的，超重环境是由中国科学院力学研究所帮助完成的，该工作还得到周伯骏同志的热情支持，在此表示衷心的感谢.

参 考 文 献

[1] Witt, A. F., Gatos, H. C., Lichtensteiger, M., Lavine, M. C., Herman, C. J., *J. Electrochem. Soc.*, **122**(1975), 276.
[2] Khashimove, F. R., *Proc. 3rd European Symposium on Material Science in Space*, **9—15** (1979), ESA SP-142.
[3] Benz, K. W. and Nagel, G., *Proc. 5th European Symposium on Material Science in Microgravity*, 1984, ESASP-222; Eyer, A., Leiste, H. and Nitch, R., *J. Crystal Growth.*, **71**(1985), 249—252.
[4] Muller, G., Schmidt, E. and Kyr, P., *J. Crystal Growth.*, **49** (1980), 387—395.
[5] 张仿清、张莉、陈光华等、科学通报，**34** (1989), 5:322.
[6] Schwabe, D., Scharmann, A., *Natur Wissenschaften*, **73** (1986), 351—359.
[7] Preisser, F., Schwabe, D., Scharmann, A., *J. Fluid Mechanics*, **126** (1983), 545—567.
[8] Muller, G. and Neumann, G., *J. of Crystal Growth*, **59** (1982), 548.

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net