

# 非晶态 InSb 及其亚稳中间相的 霍耳效应和超导电性\*

曹效文 赵典锋<sup>1)</sup>

(中国科学院等离子体物理研究所)

张裕恒

(中国科学技术大学物理系)

1986年9月25日收到

## 提 要

实验研究了非晶态 InSb 及其结晶相变过程中的霍耳效应。结果表明,金属型非晶态 InSb 以电子导电为主,半导体型非晶态 InSb 以空穴导电为主;金属型非晶态 InSb 中的第一电导跃变是一种由类液非晶态到类点阵非晶态的结构弛豫过程;第三电导跃变是富 In 或富 Sb 固溶体相在半导体 InSb 晶界上析出并集中所引起的;金属型非晶态 InSb 的三种不同的结晶相变类型具有鲜明不同的输运性质;第二电导跃变峰所对应的亚稳金属相超导  $T_c$  的提高,可能主要起因于电子浓度的增加。

## 一、引 言

作者及其合作者利用低温凝聚技术获得了金属型非晶态 InSb<sup>[1,2]</sup>,研究了它的结晶相变<sup>[3]</sup>。非晶态及其结晶相变过程中出现的亚稳中间相的超导电性研究表明,金属型非晶态 InSb 是一个新的超导体<sup>[1,2]</sup>,在亚稳中间相中出现了超导相变反常<sup>[4]</sup>。提出了一个以解释超导相变反常为主要目的的混合相模型<sup>[5]</sup>。我们还利用 X 射线衍射进行了结构分析<sup>[6,7]</sup>。但是,这一系统的一些重要问题仍然是不清楚的。

本文的目的是通过非晶态 InSb 及其结晶相变过程中的霍耳效应测量来研究其输运机制。

## 二、实验方法

样品在一个能进行原位电测量的低温凝聚装置上制备的<sup>[8]</sup>。薄膜厚度  $d$  用中国计量科学院的 Talystep 仪测量。样品的电阻和霍耳电压分别用四端引线法同时测量,如图 1

\* 中国科学院科学基金资助的课题。

1) 中国科学院等离子体物理研究所 83 级硕士研究生。

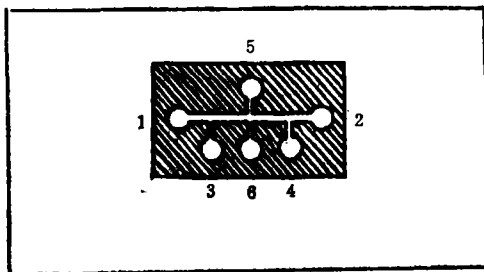


图 1

所示。电极 1 和 2 为电流引线, 3 和 4 为测量电阻的电位引线, 5 和 6 为霍尔电压引线。在电极 1 和 2 之间通一恒定电流  $I$ , 并在膜面的垂直方向建立一个稳定磁场  $B$  (它由一个水冷螺线管产生), 那么在电极 5 和 6 之间就能测量到相应的霍尔电压  $V_H$ 。其关系式为

$$V_H = R_H \frac{IB}{d}, \quad (1)$$

式中常数  $R_H$  为霍尔系数。为了消除杂散电动势以及由于霍尔电极 5 和 6 之间的非对称性引入的欧姆电压对霍尔电压的影响, 利用一个电位补偿电路将其补偿到零。

### 三、实验结果

#### 1. 非晶态 InSb 的霍尔效应

(1) 金属型非晶态 InSb 的霍尔效应 金属型非晶态 InSb, 按照第一电导跃变是否已经发生可分为两个阶段。它们的霍尔效应和电阻率测量结果见表 1。从表 1 可以看出, 第一电导跃变后和跃变前相比, 电阻率减小了一半, 霍尔迁移率  $\mu_H$  增加了 14 倍, 但是载流子浓度  $n_0$  减小了约 6 倍以上。由此可见, 第一电导跃变是迁移率突然大幅度增加所引起的。迁移率的增加表明了非晶态样品近程有序度的增加; 另一方面, 载流子浓度的减小也表明了第一电导跃变导致样品更远离于液态金属状态。金属型非晶态 InSb 的结构弛豫研究已经表明, 结构弛豫的结果是霍尔迁移率增加, 载流子浓度减小。由上述事实我们可以得出结论, 第一电导跃变是由类液非晶态到类点阵非晶态结构弛豫的一个结果。

在典型的金属型非晶态 InSb 中, 在第一电导跃变发生以后到第二电导跃变发生之前的非晶态阶段, 随着温度的升高, 电导保持基本不变或略有增加<sup>[2,4]</sup>, 我们的实验结果表明, 这一过程中的电导增加主要起因于电子迁移率的增加, 而载流子浓度则保持基本不变或变化不大。

表 1

样品状态	$\rho$ ( $10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ )	$R_H$ ( $10^{-7} \text{m}^3/\text{A} \cdot \text{s}$ )	$\mu_H$ ( $\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ )	$n_0$ ( $10^{18} \text{cm}^{-3}$ )	测量温度 (K)
跃变前	3.52	$< -1.83 $	$<52.0$	$>34.1$	87
跃变后	1.71	-12.4	725	5.04	85

(2) 半导体型非晶态 InSb 的霍尔效应 由表 1 可以看出, 在金属型非晶态 InSb 中, 霍尔系数  $R_H$  具有一个负值, 这表明, 它以电子导电为主。但是在半导体型非晶态 InSb 中, 霍尔系数总是一个正值, 其数值为  $+1.80 \sim +2.60 \times 10^{-7} \text{m}^3/\text{A} \cdot \text{s}$ 。这表明, 半导体型非晶态 InSb 以空穴导电为主。

## 2. 结晶相变过程中亚稳中间相的霍尔效应

在这一部分, 研究的是金属型非晶态 InSb 在结晶相变过程中所出现的亚稳中间相的霍尔效应。

实验结果表明, 结晶相变的三种类型<sup>[2,3]</sup>与样品组分偏离于 InSb 定比组分的程度有关。当组分偏离不大时, 发生典型的结晶相变, 即具有第二电导跃变发生; 当组分偏离较大时, 出现不发生第二电导跃变的结晶相变; 当在样品的厚度方向发生交替的组分偏离时, 则在第二电导跃变前, 出现多阶第一电导跃变。组分偏离的具体界线有待进一步研究。

(1) 典型变化 典型的金属型非晶态 InSb 的结晶相变(图 2(a))以及相变特征点的霍尔系数  $R_H$ (图 2(b))和迁移率  $\mu_H$ (图 2(c))绘在图 2 中。这些结果是在同一样品上同时测量的。其中  $R_H$  和  $\mu_H$  值取的是降温到液氮温度的测量值。图 2(b) 中的“·”表示负霍尔系数, “+”表示正霍尔系数。

由图 2 可以看出, 在第二电导跃变发生之前的非晶态阶段, 样品的霍尔系数  $R_H$  和迁移率  $\mu_H$  仅有稍微的增加; 在第二电导跃变峰阶段, 样品的  $R_H$  值有个不大的突然减小, 即电子浓度有个突然增加; 在此期间的霍尔迁移率  $\mu_H$  却增加了两倍左右。这一实验结果表明, 第二电导跃变的发生是载流子浓度和迁移率共同增加的结果, 但主要是迁移率的增加。载流子浓度和迁移率的同时增加是样品由非晶态转变成亚稳结晶金属相的结果。

在第二电导跃变峰的后沿<sup>[2]</sup>, 由图 2 可以看到, 载流子浓度迅速减小, 即  $R_H$  迅速增加, 并且在一定阶段,  $R_H$  值由负变成正。这一现象是样品由结晶金属相向结晶半导体相转变的结果。这还意味着, 样品在结晶半导体状态是一个 P 型半导体。在第二电导跃变峰的后沿, 迁移率也迅速减小。这反映出样品由均一金属相转变成由金属相和半导体相组成的混合相<sup>[5]</sup>。混合相的出现导致散射效应的增强, 因此迁移率减小。

第三电导跃变发生以后(图 2(a)), 霍尔系数  $R_H$  又由正号变成负号, 并且载流子浓度迅速增加, 但迁移率变化不大。由此可以得出结论, 第三电导跃变主要是载流子浓度增加的贡献。载流子浓度的大幅度增加不可能是结晶半导体晶粒长大<sup>[6,7]</sup>的直接结果。它显然是富 In 或富 Sb 的固溶体相在结晶 InSb 晶界处析出和集中的结果。而这些固溶相是以电子导电为主的, 并且具有比 InSb 高得多的载流子浓度。

(2) 不发生第二电导跃变型 和前一类型相比, 这一金属型非晶态 InSb 的结晶相变特点是, 在 200—220K 温度范围内不发生第二电导跃变; 在非晶态阶段发生了明显的结构弛豫过程。其结果绘在图 3 中。

由图 3 可以看出, 在 200K 以下的非晶态阶段, 随着温度的升高, 样品电阻率变化约 6%, 但霍尔系数  $R_H$  和迁移率  $\mu_H$  却增加了 200% 以上。这表明样品发生了明显的结构

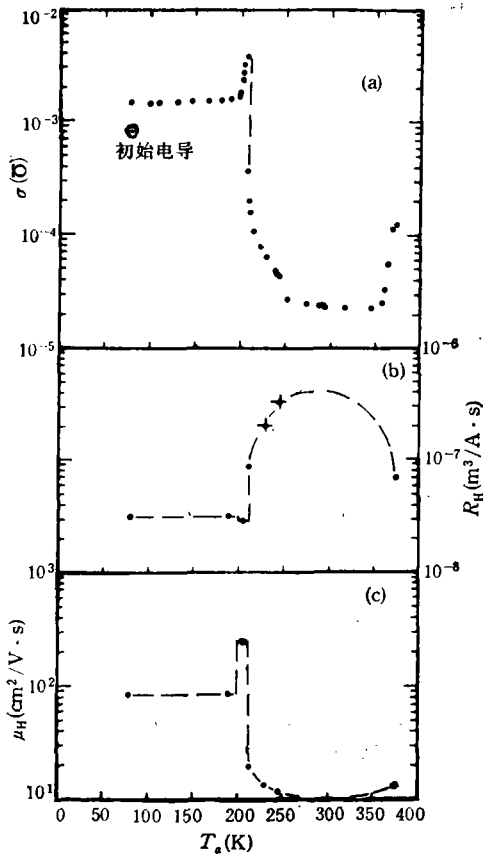


图2 发生第二电导跃变的金属型非晶态 InSb 的结晶相变 (a), 霍尔系数  $R_H$  (b) 和霍尔迁移率  $\mu_H$  (c)

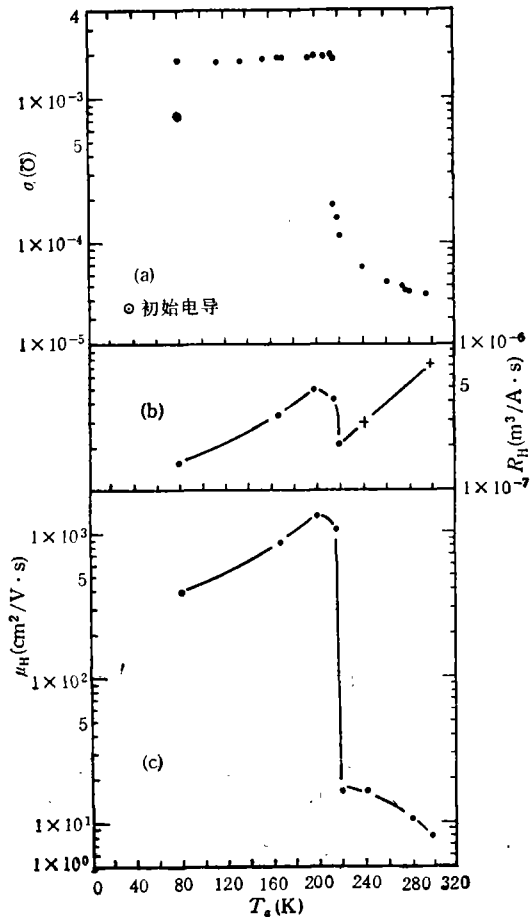


图3 没有第二电导跃变的金属型非晶态 InSb 的结晶相变 (a), 霍尔系数  $R_H$  (b) 和迁移率  $\mu_H$  (c)

弛豫。由此可以看出,霍尔效应测量是研究非晶材料结构弛豫的更灵敏方法。另一方面,载流子浓度的改变与电子结构的变化有关,所以霍尔效应测量结果表明,在这一类金属型非晶态 InSb 的结构弛豫过程中,伴随有电子结构变化的发生。

由图 3 还可以看到,在 200—220K 温度范围内,虽然没有发生第二电导跃变,但是霍尔系数却出现了较大幅度的突然减小,即载流子浓度有一个较大幅度的突然增加。显然,这是发生了由非晶态到亚稳结晶金属相的相变所引起的。第二电导跃变之所以没有发生,是由于迁移率的减小(见图 3(c))所引起的电阻率增加与载流子浓度的增加所引起的电阻率减小相消的结果。因此,在不发生第二电导跃变的结晶相变中,不能说样品由非晶态直接转变成结晶半导体相。

(3) 多阶电导跃变型 和前两种类型相比,这一结晶相变类型的主要特点是,在第二电导跃变发生之前的过程中发生多次电导阶跃,如图 4(a) 所示。以前我们把它划归第一电导跃变范畴<sup>[4]</sup>。它的结果绘于图 4 中。

由图 4 可以看出,在第一电导跃变发生前后的输运性质是显著不同的,这在前面已作

了叙述。

在第一电导跃变发生以后到第二电导跃变发生之前的过程中, 样品的电导处于大小不等的阶跃过程(图 4(a)), 霍尔系数逐渐大幅度减小, 即载流子浓度大幅度增加(图 4(b)), 而霍尔迁移率则大幅度减小。这表明, 这些电导阶跃起源于载流子浓度的增加。这和前两种类型的非晶态阶段所表现出的结构弛豫引起的载流子浓度减小与迁移率增加是不一致的。因此, 对这些电导阶跃究竟属于第一电导跃变还是属于第二电导跃变, 自然地

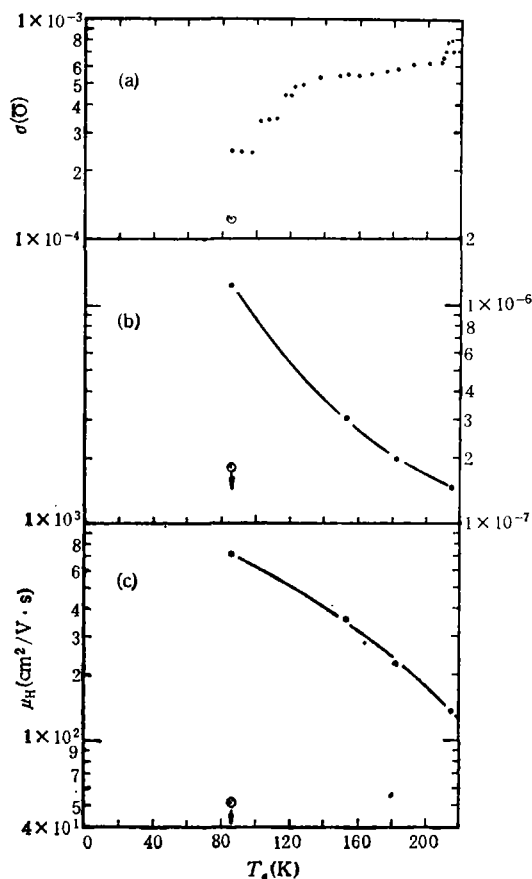


图 4 具有多阶电导阶跃的金属型非晶态 InSb 的结晶相变 (a), 霍尔系数  $R_H$  (b) 和霍尔迁移率  $\mu_H$  (c)  
 ○ 为第一电导跃变前的值; 箭头表示小于这个值

产生了疑问。为了阐明这一问题, 我们进一步研究了样品经历了多阶电导跃变以后, 但第二电导跃变没有发生之前的电阻  $\sigma$ -温度  $T$  关系, 绘于图 5 中。我们已经知道, 金属型非晶态 InSb 总是具有一个负的电阻温度系数, 而第二电导跃变后所形成的亚稳结晶金属相总是具有一个正的电阻温度系数<sup>[2,4]</sup>。由图 5 可以看出, 样品经历多阶电导阶跃后仍然具有一个负的电阻温度系数。因此, 这些电导阶跃仍然属于第一电导跃变范畴。

$R_H$  (m<sup>3</sup>/A·s)

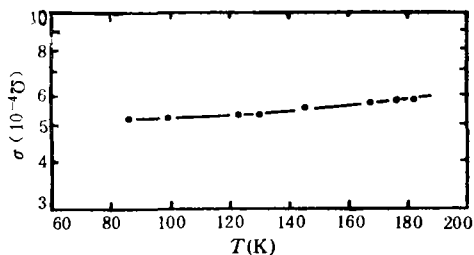


图 5 发生多阶电导阶跃以后, 第二电导跃变没有发生之前的  $\sigma$ - $T$  关系

## 四、讨论和结论

由上述实验结果, 我们能够得出如下结论

1. 金属型和半导体型非晶态 InSb 具有完全不同的导电机制, 前者以电子导电为主, 后者以空穴导电为主;
2. 在金属型非晶态 InSb 中, 第一电导跃变所伴随的载流子浓度的减小和迁移率的

大幅度增加,表明了第一电导跃变是一个由类液非晶态到类点阵非晶态的结构弛豫过程;

3. 在金属型非晶态 InSb 中,不同的结晶相变类型具有不同的输运行为:(1)具有第二电导跃变型(典型型),其非晶态阶段的载流子浓度和迁移率仅有微小变化,表明它的非晶态的稳定性较好;第二电导跃变起源于载流子浓度和迁移率的共同贡献,但主要是迁移率增加的贡献;(2)在不发生第二电导跃变的样品中,在 200K 以前的非晶态阶段,发生了显著的结构弛豫过程,其表现是,霍尔系数  $R_H$  和迁移率  $\mu_H$  出现大致相同幅度(200% 以上)的增加,尽管样品电阻没有明显变化。这表明它的非晶态稳定性不如前一种类型;在 200—220K (它对应于前一类型的第二电导跃变峰)范围内,虽然不存在第二电导跃变峰,但载流子浓度的增加表明,仍然出现一个亚稳结晶金属相;(3)在多阶电导跃变型样品中,第二电导跃变没发生之前的多阶电导阶跃仍然属于第一电导跃变范畴;在此期间的电导阶跃起源于电子浓度的增加;

4. 实验证明,第三电导跃变是富 In 或富 Sb 的固溶体相在 InSb 晶界上析出和集中所引起的载流子浓度增加的贡献;

5. 文献[4]中报道的,第二电导跃变峰对应的亚稳结晶金属相具有较高  $T_c$  值,这多半与它具有较高的载流子浓度有关。由此我们认为,不存在第二电导跃变的金属型非晶态 InSb 的结晶过程中,在 200—220K 范围的亚稳结晶金属相也可望有一个比非晶态更高的  $T_c$  值,尽管第二电导跃变没有发生。

本工作是霍裕平教授提议进行的,并得到他的有价值的讨论。实验中得到了刘宏宝、韦钦、潘引年和施嘉标的帮助。作者一并表示谢意。

### 参 考 文 献

- [1] 曹效文、张裕恒、彭先会、陈康华、李玉芝,科学通报, 27(1982), 1108;  
Cao Xiao-wen and Zhang Yu-heng *et al.*, *Science Bulletin*, 28(1983), 1053.
- [2] 曹效文、张裕恒,中国科学(8)(1986), 853;  
Cao Xiao-wen and Zhang Yu-heng, *Scientia Sinica*, A29(1986), 400.
- [3] 曹效文、张裕恒,物理学报, 32(1983), 1191.
- [4] 曹效文、张裕恒,物理学报, 33(1984), 1753.
- [5] 张裕恒等,物理学报, 34(1985), 640.
- [6] Zhang Yu-heng and Cao Xiao-wen *et al.*, *Solid State Commun.*, 57(1986), 427.
- [7] 张裕恒等,物理学报, 35(1986), 403.
- [8] 彭先会,低温物理, 4(1982), 335.

# HALL EFFECTS AND SUPERCONDUCTIVITY OF ANORPHOUS InSb AND ITS METASTABLE INTERMEDIATE PHASES IN THE PROCESS OF THE CRYSTALLIZATION PHASE TRANSITION

CAO XIAO-WEN    ZHAO DIAN-FENG

*(Institute of Plasma Physics, Academia Sinica, Hebei)*

ZHANG YU-HENG

*(Department of Physics, University of Science and Technology of China, Hebei)*

## ABSTRACT

Hall effects of amorphous InSb and its metastable intermediate phases which appear in the process of the crystallization phase transition have been studied. Experimental results show that the conduction of the electron is dominative in the metal-type amorphous InSb and the conduction of the hole is dominative in the semiconductor-type amorphous InSb. The first jump of the conductance is a process of the structure relaxation from the liquid-like amorphous state to the lattice-like one; the third jump of the conductance was caused by In-Sb solid solution with the rich In or rich Sb which was separated out and segregated on the grain boundaries. The three types of the crystallization phase transition of the metal-type amorphous InSb present obviously different transportation behaviours. The rise of superconducting  $T_c$  of the metastable crystalline metallic phase which corresponds to the peak of the second jump of the conductance originates possibly from the increase of the electron concentration.