

# 离子注入对超导转变温度的影响

赵 光 林

(中国科学院物理研究所)

1983年4月9日收到

## 提 要

本文中提出了超导转变温度  $T_c$  与离子注入剂量  $\phi$  的经验关系式,

$$T_c = 1.13\theta_D \exp \left[ -1 / \left( \frac{A}{\phi + 1} + B \right) \right].$$

将这一关系式和若干实验结果进行了对比,结果表明,计算值与实验结果符合得很好. 最后我们讨论了这一关系式的物理基础,认为由于费密面附近出现了杂质能带,导致了样品  $T_c$  的变化.

## 一、引 言

利用离子注入技术探讨亚稳相超导电性,是近几年比较活跃的研究领域<sup>[1,2]</sup>. 离子注入后产生的效果主要有两个方面:掺杂和产生无序态. 通过选择注入样品的不同厚度,离子的种类和能量,也可以将掺杂和产生的无序态分开进行研究.

同时,我们应该注意到,由于离子注入产生的亚稳相,其结构是复杂的,我们现在还没有很好的方法,像晶态的情况那样求出材料的能谱,这就给从理论上定量地分析实验结果和它的物理本质带来了许多困难. 这里,我们采用半经验的方法,来寻求材料的超导转变温度  $T_c$  与离子注入剂量  $\phi$  间的关系. 然后再探讨这一经验关系的物理思想和理论基础,或许这对于我们加深物理问题的认识是有帮助的.

## 二、 $T_c$ 与 $\phi$ 间的经验关系式

基于我们对若干离子注入实验结果和非晶态超导体研究结果的分析,提出用以下经验关系式来近似表达超导转变温度  $T_c$  与离子注入剂量  $\phi$  间的关系,

$$T_c = 1.13\theta_D \exp \left[ - \frac{1}{\frac{A}{(\phi + 1)} + B} \right] \quad (\phi \geq 1), \quad (1)$$

其中  $\phi = \phi/\phi_0$  为约化了的注入离子剂量;  $\theta_D$  为样品的德拜温度;  $\phi_0$  是取  $T_c$ - $\phi$  实验曲线中,对  $T_c$  明显影响的最小剂量,我们一般把  $\phi_0$  作为所需处理的  $T_c$ - $\phi$  关系中的最小值.  $A$  和  $B$  为两个由实验决定的待定常数.

这一关系式只适用于单调上升或下降的  $T_c$ - $\phi$  曲线的光滑部分,至于在某些实验中,

$\phi$  较小区域中出现的复杂现象需要另外处理<sup>[2-4]</sup>.

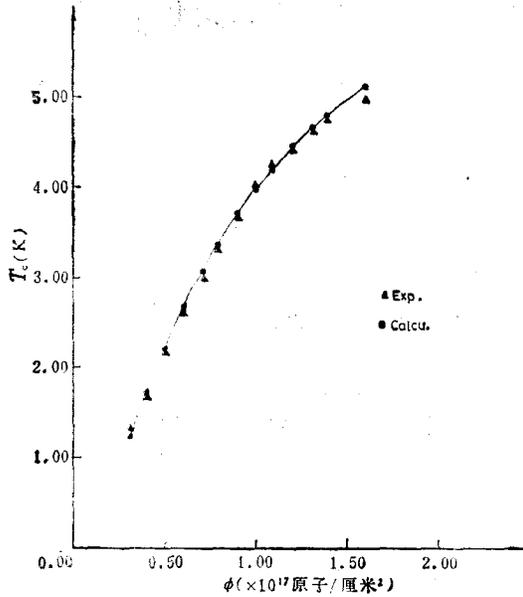


图 1

— 为计算曲线; ▲ 为实验值

现在我们利用这一关系式具体处理若干超导体中离子注入的实验结果. 计算结果列在表 1 中. 作为一个典型的例子, 图 1 给出了 100keV  $H^+$  注入到 Ti 箔中, 计算的  $T_c$ - $\phi$  曲线与实验结果的比较.

从表 1 和图 1 所给的结果, 可以看出, 我们只用了二个待定参数  $A$  和  $B$ , 就能用关系式 (1) 很好地拟合  $T_c$ - $\phi$  实验曲线. 使我们感到惊奇的是, 这一关系式不仅对简单金属、过渡族金属的实验结果符合得很好, 对 A15 化合物(其能带结构一般是复杂的) 也符合得很好. 这可能是由于某种选择定则的结果<sup>[9,10]</sup>.

### 三、讨 论

强耦合超导理论的结果表明, 超导体的凝聚能是与费密面附近导带电子的能带结构紧密相关的. 所以, 我们认为离子注入产生的亚稳相, 主要是由于材料的能带结构发生了改变. 具体地说, 就是在材料的费密面附近产生了新的能带——杂质能带. 这里的“杂质能带”包括非晶化导致的能带杂化. 随着离子注入剂量  $\phi$  的增大, 杂质能带的贡献越来越大, 从而明显地影响超导转变温度  $T_c$ .

表 1 几个离子注入实验的计算结果

样品	注入离子	待定常数		实验参数		$\phi$ 计算区域 (ions/cm <sup>2</sup> )	方均根 误差 <sup>1)</sup> (K)	参考文献
		$A$	$B$	$\theta_D$ (K)	$\phi_0$ (ions/cm <sup>2</sup> )			
Ti 箔	$H^+$	-0.1520	0.2447	420	$0.31 \times 10^{17}$	$\phi_0 \leq \phi \leq 1.6 \times 10^{17}$	0.06	[5]
Ti 箔	$D^+$	-0.1462	0.2387	420	$0.303 \times 10^{17}$	$\phi_0 \leq \phi \leq 1.90 \times 10^{17}$	0.12	[5]
Al 膜	$H^+$	-0.0783	0.2379	428	$1 \times 10^{21}$	$\phi_0 \leq \phi \leq 6.0 \times 10^{21}$	0.09	[6]
Al 膜	$Si^+$	-0.1398	0.2907	428	$0.5 \times 10^{17}$	$\phi_0 \leq \phi \leq 1.23 \times 10^{17}$	0.33	[7]
In 膜	$Ar^+$	-0.0336	0.2999	108	$0.25 \times 10^{16}$	$\phi_0 \leq \phi \leq 3.16 \times 10^{16}$	0.05	[4]
$Nb_3Al$	$H^+$	0.1419	0.2173	290	$0.5 \times 10^{17}$	$\phi_0 \leq \phi \leq 6.0 \times 10^{17}$	0.17	[8]

1) 方均根误差是指计算  $T_c$  值与实验值间的误差.

从超导理论我们近似地有

$$T_c = 1.13\theta_D \exp\left[-\frac{1}{\lambda}\right], \quad (2)$$

其中  $\lambda$  为电-声子耦合常数. 我们近似地认为费密面附近的导带, 是由原来的能带结构附加了新的杂质能带而构成的, 因此可以写为

$$\lambda = N_1(\epsilon_F)V_1 + N_2(\epsilon_F)V_2, \quad (3)$$

其中第一部分  $N_1(\epsilon_F)V_1$  表示注入前材料的电-声子耦合常数,  $N_2(\epsilon_F)V_2$  反映了离子注入所产生的杂质带的影响,  $V_1$  和  $V_2$  是相应能带的电子与声子互相作用常数.

我们假定

$$N_1(\epsilon_F) + N_2(\epsilon_F) = N, \quad (4)$$

其中  $N$  为一个常数. 如果把  $N$  理解为费密面附近电子的总态密度  $N(\epsilon_F)$ , 那么在我们计算的范围 ( $\phi \geq \phi_0$ ) 内, 虽然  $T_c$  有了较大的改变, 但  $N(\epsilon_F)$  近似是不变的. Ghosh 和 Caton<sup>[11]</sup> 的实验结果支持了这一点. 这样

$$\lambda = N_1(\epsilon_F)(V_1 - V_2) + NV_2. \quad (5)$$

随着离子注入剂量  $\phi$  的增加,  $N_1(\epsilon_F)$  将逐渐减小,  $N_2(\epsilon_F)$  的贡献将逐渐增加, 因此近似地有

$$N_1(\epsilon_F) \propto \frac{1}{\phi} \quad (6)$$

或

$$N_1(\epsilon_F) = a/(\Phi + 1). \quad (7)$$

这样就得到关系式

$$\lambda = A/(\Phi + 1) + B, \quad (8)$$

$$T_c = 1.13\theta_D \exp \left[ -\frac{1}{\left( \frac{A}{\Phi + 1} \right) + B} \right]. \quad (1)$$

这就是我们所需要得到的关系式(1).

管惟炎先生对本工作进行了指导. 郑家祺同志始终参与了本工作的讨论, 提出了很多有益的意见. 作者还曾得到了章立源先生的有益讨论和指教. 在此一并表示感谢.

### 参 考 文 献

- [1] Harry Bernas and Pierre Nedellec, *Nucl. Instru. Meth.*, 182/183(1981), 845.
- [2] O. Meyer, *Radiation Effects*, 48(1980), 51.
- [3] P. Ziemann, G. Heim and W. Buckel, *Radiation Effects*, 48(1980), 55.
- [4] A. Hofmann, P. Ziemann and W. Buckel, *Nucl. Instru. Meth.*, 182/183(1981), 943.
- [5] J. D. Meyer and B. Stritzker, *Nucl. Instru. Meth.*, 182/183(1981), 933.
- [6] S. T. Sekula and J. R. Thompson, *Nucl. Instru. Meth.*, 182/183(1981), 937.
- [7] F. Meunier, *et al.*, *J. Phys. Lett.*, 38(1977), L-435.
- [8] U. Schneider, G. Linker and O. Meyer, *J. Low Temp. Phys.*, 47(1982), 439.
- [9] J. J. Hopfield, *Phys. Rev.*, 186(1969), 443.
- [10] G. D. Gaspari and B. L. Gyorffy, *Phys. Rev. Lett.*, 28(1972), 801.
- [11] A. K. Ghosh and R. Caton, *Solid State Commun.*, 44(1982), 1083.

## THE INFLUENCE OF IMPLANTED IONS ON THE SUPER- CONDUCTING TRANSITION TEMPERATURE

ZHAO GUANG-LIN

(*Institute of Physics, Academia Sinica*)

### ABSTRACT

We present an empirical relationship between the superconducting transition temperature,  $T_c$ , and the doses of implanted ions,  $\phi$ , namely

$$T_c = 1.13\theta_D \exp\left[-1/\left(\frac{A}{\phi + 1} + B\right)\right]$$

In comparing with experimental results, the calculated values of  $T_c$  by this expression are found in good agreement with them. Finally, we discuss the physical base of this relationship. The analysis indicates that the existence of the impurity band near the Fermi surface results in the change of  $T_c$ .