

## Nb-Cu 多层膜超导体临界温度的计算

蔡学榆 尹道乐

(北京大学物理系)

1982 年 7 月 8 日收到

### 提 要

对于 Nb-Cu 多层膜超导体临界温度  $T_{cns}$  的无调节参数数值计算表明, 在充分考虑多层膜体系的周期性特点之后, 在层厚  $d > 30 \text{ \AA}$  的范围内邻近效应的理论和实验符合较好.

计算结果和实验的比较还表明:  $T_{cns}-d$  关系中存在阻尼振荡行为; 界面电子结构可能只在  $d < 30 \text{ \AA}$  的范围内对  $T_{cns}$  有明显的影响, 并且强异质界面对 Nb 的 (NV) 有加强作用.

随着样品制备技术的发展, 多层膜超导体正在引起广泛的兴趣. 对于 Nb-Cu 多层膜超导体的研究, 除了一般多层膜研究的意义外, 还有其特殊的意义, 因为它可以看作是日前广泛研究的实用超导材料, 例如崔氏线等的简化模型.

1980 年 Argonne 实验室 Shuller 等人<sup>[1]</sup>制成了 Nb-Cu 多层膜超导体 (layered ultrathin coherent structure). 最近他们又公布了对其临界温度  $T_{cns}$  测量的结果<sup>[2]</sup>. 测量数据表明,  $T_{cns}$  和层厚  $d$  的依赖关系, 在  $d > 300 \text{ \AA}$  时和 de Gennes-Werthamer 的邻近效应理论很好地符合, 但是当  $d < 300 \text{ \AA}$  时, 实验值比理论值低很多. 图 1 是他们公布的结果.

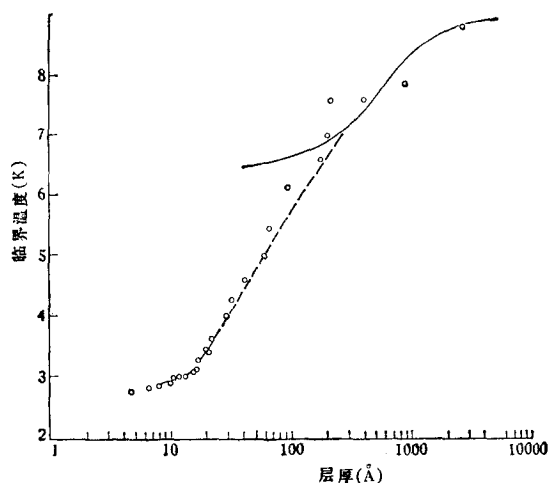


图 1 对于 Nb-Cu 多层膜超导体  $T_{cns}$  测量的结果

○ 为实验值; — 为文献[2]根据 de Gennes-Werthamer 理论作出的曲线;  
—— 为文献[2]对于实验数据拟合的曲线

Argonne 样品的总厚度为  $1\mu\text{m}$  左右, 层厚从  $5\text{\AA}$  到  $4000\text{\AA}$  左右, 因此总层数对于不同的样品有很大的差别, 约从 2 层到 2000 层左右. de Gennes-Werthamer 的邻近效应模型只适用于层数很少的情况, 因此在层数很多(即相应于这里  $d$  较小的情况)时, 必须充分考虑到体系的周期性这一因素. 文献[2]在用 de Gennes-Werthamer 理论计算 Nb-Cu 多层膜超导体的临界温度时, 对于所有的  $d$ , 只简单地把原来 de Gennes-Werthamer 理论中的实际层厚用  $\frac{1}{2}d$  代替, 以此计入周期性这一因素. 显然这一处理是过于简化了.

我们过去曾在充分考虑周期性的情况下, 推导出一个多层膜超导体临界温度的公式<sup>[3]</sup>. 当每层的厚度  $d$  不是太大时, 能隙函数  $\Delta$  在每层内可视为常数, 对于周期性的情况, 得到下列线性方程组:

$$\begin{aligned}\Delta(s_1) &= (NV)_1 \langle f_{11} \rangle \Delta(s_1) + (NV)_1 \langle f_{12} \rangle \Delta(s_2), \\ \Delta(s_2) &= (NV)_2 \langle f_{21} \rangle \Delta(s_1) + (NV)_2 \langle f_{22} \rangle \Delta(s_2),\end{aligned}\quad (1)$$

式中  $\Delta(s_1)$ ,  $\Delta(s_2)$  分别为两层的能隙函数;  $(NV)_1$ ,  $(NV)_2$  分别为两层的电声耦合系数;  $\langle f_{ij} \rangle$  为由能隙方程决定的系数. 体系的临界温度由方程组(1)的系数行列式本征值方程决定.

在一级近似下, 对于强异质情况(即两种金属的  $(NV)$  相差很大, 例如 Nb-Cu), 可得下述决定体系临界温度的超越方程:

$$\begin{aligned}\langle f_{11} \rangle &= \left( \frac{\pi k_B T}{\hbar} \right) \sum_{\omega} \frac{1}{|\omega|} (1 - \lambda) = \frac{1}{NV}, \\ \lambda &= \frac{l_{\omega}}{\alpha d} \int_1^{\infty} \frac{dt}{t^3} \left\{ \frac{\left[ 1 - \exp\left(-\frac{\alpha dt}{l_{\omega}}\right) \right] \cdot \left[ 1 - \exp\left(-\frac{1-\alpha}{l_{\omega}} dt\right) \right]}{\left[ 1 - \exp\left(-\frac{dt}{l_{\omega}}\right) \right]} \right\},\end{aligned}\quad (2)$$

式中各量的定义如下:

$k_B$ ,  $\hbar$  分别为玻耳兹曼和普朗克常数;

$$\omega = (2n + 1) \frac{\pi k_B T}{\hbar} \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots;$$

$\alpha = d_1/d$ ,  $d_1$  为超导层厚度,  $d$  为超导层和正常层厚度之和;  $l_{\omega} = v_F/2|\omega|$ ,  $v_F$  为费密速度;  $1/NV$  为超导层电声耦合系数倒数.

我们根据(2)式用文献[2]的参数对 Argonne 多层膜样品的  $T_{cs}$  作了无调节参数的数值计算, 计算结果示于图 2.

在计算中使用了文献[2]公布的下列参数:

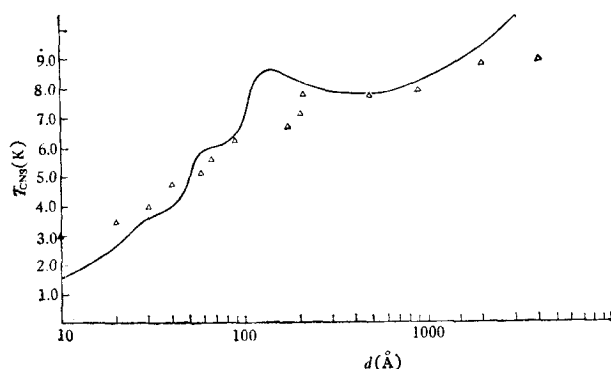
电子比热系数  $\gamma_{\text{Nb}} = 7.5 \times 10^3 \text{ J/m}^3\text{K}^2$ ; 电阻率和电子平均自由程积  $(\rho l)_{\text{Nb}} = 1.5 \times 10^{-15} \Omega \cdot \text{m}^2$ ;  $T_{c(\text{Nb})} = 8.91\text{K}$ .

由上述参数可得(2)式计算中所需的全部参数:  $\alpha = 0.5$ ;

$$v_{f(\text{Nb})} = \pi^3 k_B^2 / c^2 \gamma_{\text{Nb}} (\rho l)_{\text{Nb}} = 2.05 \times 10^7 \text{ cm/s}^{[4]};$$

$$\frac{1}{NV} = \ln \frac{1.45 T_{(\text{Nb})}}{\theta_{D(\text{Nb})}} = 3.06^{[2]}, \theta_D \text{ 为德拜温度, 取为 } 275\text{K}.$$

对  $\omega$  的求和按 BCS 法则截断.

图2 由(2)式给出的  $T_{cns}-d$  关系——为理论曲线;  $\Delta$  为实验数据

由图2可以清楚地看到,当 $d$ 比较大时,(层数较少) de Gennes-Werthamer 曲线和实验符合,而由(2)式算出的结果偏大.这显然由于:1)当 $d$ 比较大时不存在周期性;2)(2)式推导过程中 $\Delta$ 为常数的条件不满足而造成的.

在  $30 \text{ \AA} < d < 2000 \text{ \AA}$  范围内,(2)式和实验符合.考虑到没有使用任何可调参数和  $r_{\text{Nb}}$ ,  $(\rho l)_{\text{Nb}}$  等参数的精确程度,这一符合情况是令人满意的.

当  $d < 300 \text{ \AA}$  时,(2)式给出了呈阻尼振荡式衰减的  $T_{cns}-d$  关系,见图2.实验数据明显地表明了这一趋势,见图1.  $d \sim 200 \text{ \AA}$  的第一峰值处,实验数据不够密集,峰值不够明显,但呈现了很强的分散性,进一步的实验佐证是容易进行的.

这一阻尼振荡衰减行为的物理机制尚不清楚,估计在周期性非均匀体系中有可能存在宏观波函数的相位干涉现象.

$d$  很小时 ( $< 30 \text{ \AA}$ ),界面对于 Nb 的 ( $NV$ ) 有着较强的影响,这点在(2)式的推导中未予考虑,这很可能是在这个区域(2)式的结果和实验偏差较大的原因.如果这一结论成立,则表明界面只在很小 ( $< 30 \text{ \AA}$ ) 的范围内才有明显的影响,并且值得指出的是,(2)式的结果和实验的比较说明强异质界面对于 Nb 的  $NV$  有加强作用,这和文献[2]的结论相反.这点值得进一步研究.

与戴远东、李传义同志进行了十分有益的讨论;徐纪杨、林赛乐同志在计算中给予了帮助,作者在此谨致谢意.

### 参 考 文 献

- [1] I. K. Schuller, *Phys. Rev. Lett.*, **44**(1980), 1597
- [2] Indrajit *et al.*, *Sol. State Commun.*, **41**(1982), 805.
- [3] 蔡学榆、尹道乐, *物理学报*, **30**(1981), 700.
- [4] P. G. DE Gennes, *Superconductivity of Metals and Alloys*, p. 224.

## THE CALCULATION OF CRITICAL TEMPERATURE FOR Nb-Cu MULTILAYER FILM SUPERCONDUCTOR

CAI XUE-YU    YIN DAO-LE

*(Department of Physics, Peking University)*

### ABSTRACT

The calculation of critical temperature for Nb-Cu multilayer film superconductor without any adjustable parameter shows that as the periodic character of multilayer film is considered, the theory of proximity effect agrees reasonably with experiment within the range of layer thickness  $d > 30 \text{ \AA}$ .

It is also shown that there exists damped oscillation in the dependence of critical temperature  $T_{\text{ens}}$  on  $d$ , the electronic structure of interface between Nb and Cu has obvious influence upon  $T_{\text{ens}}$  only when  $d < 30 \text{ \AA}$  and the strong heterogeneous interface probably increases the  $(NV)$  of Nb.