

低温下质子辐照对 Y-Ba-Cu-O 和 La-Sr-Cu-O 性质的影响

熊光成

李宏成

(北京大学物理系)

(中国科学院物理研究所)

O. MEYER, G. LINKER

(Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Institut für Nuklear
Festkörperphysik, 7500 Karlsruhe, B.R.D.)

1988年8月4日收到

使用外延 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 薄膜, 测量了低温下(液氮或液氦温度)质子辐照对样品输运性质的影响。不仅观察到由低温辐照引起的样品超导转变温度 T_c 下降及电阻率 ρ 上升, 还观察到 $d\rho/dT$ 的上升和发生金属至非金属的相变。经室温热循环的样品显示出强烈室温退火效应。近 60% 由辐照引起的样品电阻升高和 T_c 下降可以得到恢复, 并可伴随发生非金属至金属的相变。在 La-Sr-Cu-O 薄膜的低温辐照实验中观察到了类似的室温退火效应。对实验结果的分析表明, $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 高 T_c 氧化物超导体的电子能带结构对由低温辐照引入的无序分布缺陷十分敏感。

一、引言

自 Bednorz 和 Müller 发现高 T_c 氧化物超导材料以来^[1], 在这方面已经取得了很多引人注目的进展。对这种材料受辐照后的超导性能也做了一些研究^[2,3]。利用在 SrTiO_3 衬底上外延生长的薄膜, 我们完成了低温下质子辐照对 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 输运性质影响的研究。实验中观察到由于辐照而引起的样品电阻率 ρ 上升及超导转变温度 T_c 下降, 以及样品中发生的金属-非金属相变。升温至室温的热循环可以使样品中由辐照引起的这些变化在很大程度上得以恢复, 即样品电阻率的升高可降低 60%, T_c 有所回复并可伴有非金属至金属的相变。辐照前样品的电阻温度曲线及经小剂量辐照和室温循环的样品电阻温度曲线在很宽温区呈线性关系, 经辐照后样品的电阻温度曲线斜率 $d\rho/dT$ 上升。这众多非寻常现象显示了高 T_c 氧化物超导材料 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 与其它超导材料的不同之处。实验结果的分析说明, $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 的电子能带结构对无序缺陷十分敏感。用 La-Sr-Cu-O 样品完成了低温质子辐照实验。实验中观察到了类似的由辐照引起的 ρ 上升、 T_c 下降及室温退火效应。下面详细介绍实验和实验结果, 并进一步讨论。

二、样品制备与实验装置

实验用的薄膜样品是用磁控直流溅射法制备的。溅射氩分压为 4×10^{-4} Torr, 氧分

压为 2×10^{-1} Torr, 溅射电压为 100V, 溅射速率为 $5 \text{ \AA/s}$, 溅射时衬底温度保持在 800°C 左右, 而后降温在 430°C 一个大气压氧气中保持 20min. 在 SrTiO_3 单晶衬底上制成的 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 薄膜电流密度可达 $1.2 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$. 样品制备已另文详述^[4]. 图 1 为用 14keV 电子小角掠射外延薄膜所得电子衍射图 (RHEED). 对样品的 X、Rutherford 背散射及沟道谱和 RHEED 衍射图分析表明, 在 SrTiO_3 单晶 (100) 面上外延生长的 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 薄膜 c 轴垂直于膜面^[5].

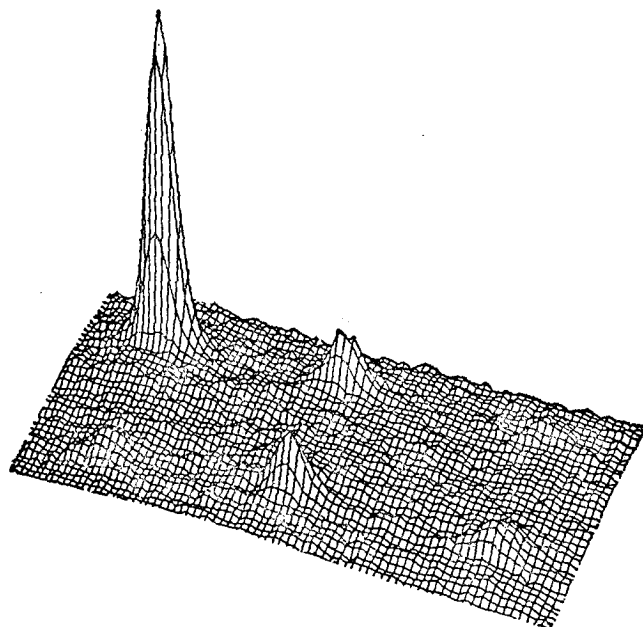


图 1 14keV 电子小角掠入射 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 外延薄膜样品的电子衍射图

为完成低温辐照及后继的升降温电阻测量, 使用了一套由高真空管路与 300keV 离子注入机相联通的低温杜瓦系统. 图 2 为注入室及低温恒温器简图. 低温恒温器由液氮液池(6)、隔热辐射液氮液池(8)、减压液池及恒温块(2)等组成. 为减少热辐射对恒温块及样品温度的影响, 使用了两级隔热辐射屏. 一级紫铜屏围绕于液氮液池与恒温块四周, 以液氮为冷源. 二级冷屏(4)取恒温块温度. 二级冷屏也做为离子辐照防护屏使用, 以避免对温度计的直接辐照. 使用恒温块加热器(3), 可将恒温块加热到稍高于室温. 整个恒温器由涡轮分子泵和机械泵组成的高真空系统抽至高真空. 在一般温度, 真空度约为 2×10^{-6} Torr. 当液池(6)存有液氮时, 真空度约为 7×10^{-7} Torr.

利用两台数字电压表、恒流源和微型计算机等仪器组成数据采集系统. 采用标准四端引线直流电阻法测量样品电阻值. 样品电流、电压引线用银胶引出. 测试电流由一台稳定度优于 10^{-4} 的恒流电源提供. 为消除引线热电势的影响, 每组数据都对电流为零的数值加以修正. 为使温度计准确反映样品实际温度, 除使温度计紧靠样品外, 变温测量时恒温块变温速度均小于 0.5 K/min .

使用积分器和电流表测量辐照离子剂量. 对辐照至样品及刚进入注入室的离子束流强度和剂量加以监测和对照. 为降低二次电子发射对辐照强度测量的影响, 在测量电极

前装有 300V 二次电子抑制栅级。低温辐照的离子束流密度均小于 $2\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。

对变温测量的样品电阻温度曲线分析得到样品超导转变温度 T_c 及超导转变宽度 ΔT_c 的数据。取电阻曲线转变中点(50% 处)所对应温度为 T_c 值。电阻转变 90% 和 10% 之间所经历的温度变化为 ΔT_c 值。

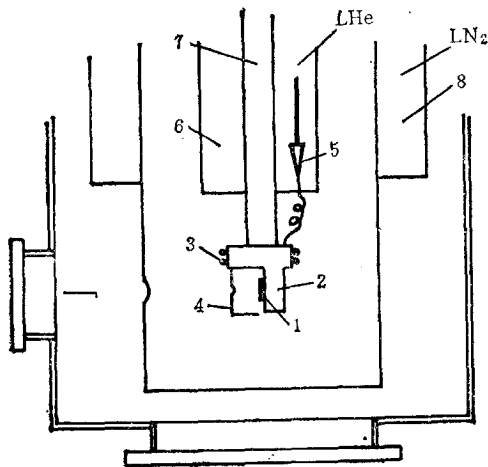


图2 离子注入室与低温恒温器简图

1为样品;2为减压液池与恒温块;3为加热器;4为二级防热辐射屏;5为针尖阀;6为液氮液池;7为减压管道;8为液氮液池与一级防热辐射屏

曲线 b 后的样品在液氮温度再以 300keV 质子辐照至总剂量 $5 \times 10^{15} \text{H}^+/\text{cm}^2$ 。而后升温测得曲线 c 。再次低温辐照后样品的 T_c 及 ΔT_c 仍未明显变化。辐照后样品电阻值升高，电阻升温曲线 c 在 200K 附近温区明显偏离线性关系。这一偏离线性关系的样品升温测量行为是一不可逆过程。升至室温后再次降温及升温测得图 3 曲线 d 。曲线 d 显示样品电阻在很宽温区随温度线性变化。由曲线 d 可以得出，经室温热循环后由此次低

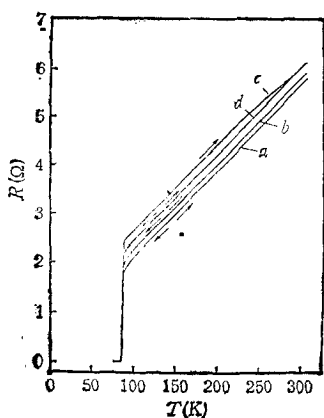


图3 300keV 质子辐照的 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 样品电阻温度曲线 辐照温度为液氮温度; a 为样品辐照前电阻温度曲线; b 为经 $1.5 \times 10^{15} \text{H}^+/\text{cm}^2$ 辐照并经历室温热循环后的样品电阻温度曲线; c 为经总剂量为 $5 \times 10^{15} \text{H}^+/\text{cm}^2$ 辐照后样品的升温曲线; d 为升至室温后的样品再次降温、升温曲线

三、实验结果

研究辐照用 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 样品为 3000 Å 外延薄膜。样品辐照前 T_c 为 87K, ΔT_c 为 1.6K。从 100K 至室温, 样品的电阻温度曲线呈线性 (见图 3)。样品在液氮温度经能量为 300keV 的质子辐照至剂量 $1.5 \times 10^{15} \text{H}^+/\text{cm}^2$ 又经室温热循环的样品 T_c 及 ΔT_c 没有明显变化, 电阻率升高、电阻温度曲线仍在很宽温区呈线性变化 (图 3 曲线 b)。经历室温热循环后的样品电阻升降温曲线重复, 所以曲线以双向箭头表明变温方向。测得

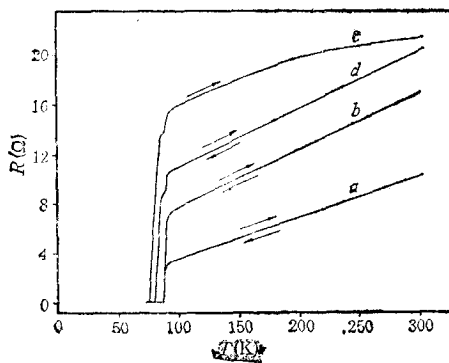


图4 中等剂量质子辐照 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 样品的电阻温度曲线 辐照温度为液氮温度; a 为样品辐照前曲线; b 为经过室温热循环的经总剂量 $1.3 \times 10^{16} \text{H}^+/\text{cm}^2$ 辐照的样品电阻温度曲线; c 为辐照至总剂量为 $2.3 \times 10^{16} \text{H}^+/\text{cm}^2$ 后的升温曲线; d 为升至室温后样品降温、升温测得的曲线

温质子辐照引起样品电阻升高的约 60% 得到了恢复。

在以中等剂量辐照的样品测量曲线中也观察到了类似的室温热循环对样品电阻温度曲线的影响, 图 4 中对照了中等剂量辐照对样品电阻温度曲线的影响, 曲线 *a* 为样品辐照前行为, 曲线 *b* 为经过室温热循环的经总剂量为 $1.3 \times 10^{16} \text{H}^+/\text{cm}^2$ 质子辐照样品的电阻温度曲线, 曲线 *c* 为液氮温度辐照至总剂量为 $2.3 \times 10^{16} \text{H}^+/\text{cm}^2$ 后的升温测量曲线, 曲线 *d* 为再次降温、升温测得的, 与图 3 的不同之处在于, 经中等剂量辐照后样品的 T_c 下降, ΔT_c 值略有上升, 经室温热循环后样品的 T_c 值有所回复, ΔT_c 再度变小, 值得提到的是图 4 显示出即使经过了中等剂量的辐照, 在经历了室温热循环后样品的电阻温度曲线仍有很好的线性关系, 对照图 4 的曲线 *a*, *b* 与 *d* 可以看出: 经辐照及室温热循环的样品, 不仅样品的电阻率 ρ 升高而且样品电阻温度曲线的斜率 $d\rho/dT$ 也稍许增大, 样品经 $2.3 \times 10^{16} \text{H}^+/\text{cm}^2$ 质子辐照后样品的超导转变曲线上出现阶梯, 这有可能是由于样品电压测量引线间有小部分区域未被离子束辐照所致, 这一与初始样品 T_c 值所对应的阶梯在以后的历次不同剂量辐照的曲线上都能观察到。

当辐照剂量累加到 $7.8 \times 10^{16} \text{H}^+/\text{cm}^2$ 后样品在液氮温度电阻仍不为零, 图 5 曲线 *c* 为辐照后样品的升温电阻测量曲线, 样品电阻随温度升高从液氮温度的 100Ω 急剧下降, 在 15K 附近出现一电阻极小值, 而后样品电阻值随温度升高而增大, 在 70K 附近经历样品电阻极大值后样品电阻率又随温度升高而下降, 经过室温热循环的样品电阻升、降温曲线如图 5 中 *d* 所示, 图 5 曲线 *d* 与 *c* 的最大不同之处为曲线 *d* 显示经历室温热循环的样品低于 46K 时进入零电阻状态, 图 5 曲线 *b* 为该次辐照前样品行为, 其时样品也经过剂量为 $4 \times 10^{16} \text{H}^+/\text{cm}^2$ 的 300keV 质子辐照并经历了室温热循环, *a* 为样品辐照前的电阻温度曲线。

经总剂量为 $1.13 \times 10^{17} \text{H}^+/\text{cm}^2$ 的质子辐照后, 样品在液氮温度的电阻值为 $93k\Omega$, 此时样品电阻值与测量电流有关, 随测量电流升高样品电阻值下降, 图 6 曲线 *a* 为辐照后样品升温测量曲线, 测量电流为 $1\mu\text{A}$, 在曲线 *a* 上没有观察到超导转变迹象, 升温至室温后再次测量的样品降、升温曲线如图 6 曲线 *b*, 虽然经室温热循环的样品在液氮温度

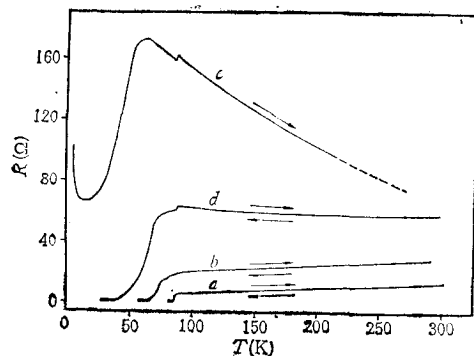


图 5 较大剂量时低温质子辐照 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 薄膜样品的电阻温度曲线 *a* 为辐照前样品电阻温度曲线; *b* 为经过总剂量为 $4 \times 10^{16} \text{H}^+/\text{cm}^2$ 质子辐照和室温热循环的样品电阻曲线; *c* 为经总剂量 $7.8 \times 10^{16} \text{H}^+/\text{cm}^2$ 质子辐照后的升温曲线; *d* 为经过室温热循环后的样品降温、升温曲线

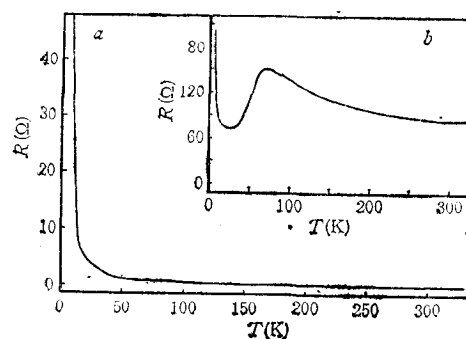


图 6 辐照后的样品电阻温度曲线 *a* 为经总剂量 $1.13 \times 10^{17} \text{H}^+/\text{cm}^2$ 的质子辐照后 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 样品的升温电阻曲线, 辐照温度为液氮温度; *b* 为经过室温热循环后样品的电阻温度关系

电阻仍不为零,而且低温段样品电阻值随温度降低而显著升高,但在 50K 温区样品的电阻

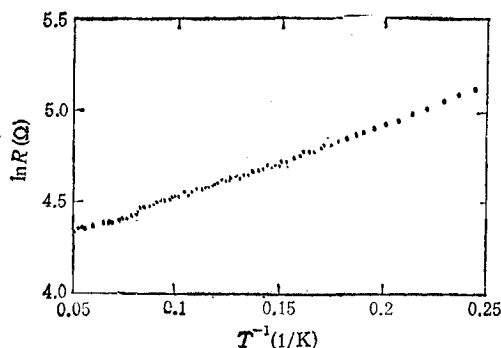


图7 经总剂量 $1.13 \times 10^{17} \text{H}^+/\text{cm}^2$ 辐照与室温热循环后 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 样品低温下的 $\ln R-T^{-1}$ 曲线

阻曲线有一引人注目的下降阶梯.这说明经室温热循环后,样品的一部分在温度低于50K时再次进入超导状态.需要提及的还有经历室温热循环的样品在液氮温度下的电阻值比刚辐照时下降近三个数量级.为了研究样品低温段电阻曲线随温度降低而上升的起因,将图6曲线b以 $\ln R-T^{-1}$ 的坐标重新绘制(见图7).在 $\ln R-T^{-1}$ 图中得到了线性关系很好的实验曲线.

辐照时将样品保持在液氮温度还是液氮温度由样品的零电阻温度而确定.低温下以

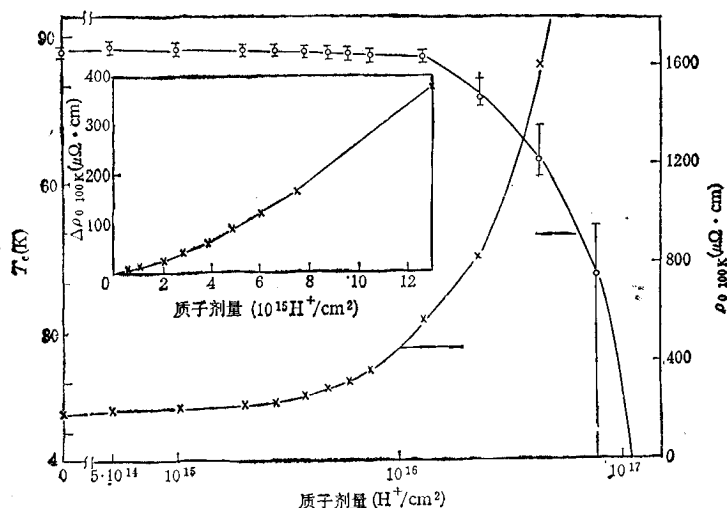


图8 低温下 300keV 质子辐照 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 外延薄膜后样品超导转变温度 T_c 、超导转变宽度 ΔT_c 和 100K 时电阻率 ρ 与辐照剂量的关系 插图为 100 K 时样品电阻率变化 $\Delta \rho$ 与辐照剂量的关系

300keV 质子辐照 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 外延薄膜样品,引起的样品超导转变温度 T_c 、超导转变宽度 ΔT_c 和 100K 时样品电阻率 ρ 随辐照剂量的变化如图8所示.图8小插图为 ρ 的变化与辐照剂量的关系.

对蓝宝石衬底上溅射的 La-Sr-Cu-O 超导薄膜测量了液氮温度下 300keV 质子辐照对其电阻曲线的影响.图9曲线a为辐照前样品的行为;曲线b为经 $3 \times 10^{15} \text{H}^+/\text{cm}^2$ 质子辐照后的升温曲线;c为经历室温热循环后的样品电阻温度关系.图9中可观察到经低温辐照的 La-Sr-Cu-O 样品与 Y-Ba-Cu-O 样品类似,也有一室温退火效应.图10曲线c为辐照至总剂量为 $4 \times 10^{16} \text{H}^+/\text{cm}^2$ 后的升温曲线;d为升温至室温后的再次降、升温曲线;b为该次辐照前样品行为,其时已经历剂量为 $3 \times 10^{15} \text{H}^+/\text{cm}^2$ 辐照与室温循环;a为辐照前样品电阻曲线.

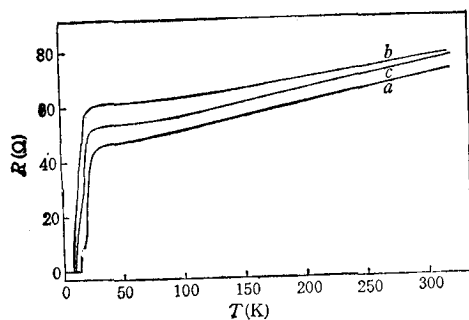


图9 300keV 质子辐照的 La-Sr-Cu-O 样品电阻温度曲线 辐照温度为液氮温度, *a* 为辐照前样品电阻曲线; *b* 为经过 $3 \times 10^{13} \text{H}^+/\text{cm}^2$ 质子辐照后的升温曲线; *c* 为升至室温后的再次降温、升温曲线

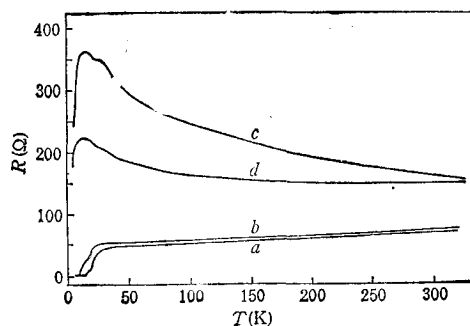


图10 300keV 质子辐照液氮温度 La-Sr-Cu-O 样品的电阻温度曲线 *a* 为辐照前样品电阻曲线; *b* 为经 $3 \times 10^{13} \text{H}^+/\text{cm}^2$ 辐照及室温循环的样品电阻温度曲线; *c* 为辐照至总剂量 $4 \times 10^{16} \text{H}^+/\text{cm}^2$ 后的升温曲线; *d* 为再次降、升温曲线

四、讨 论

低温质子辐照实验揭示出了 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 氧化物超导体与先前高 T_c 材料(如 A15 材料等)的不同之处。以 300keV 的质子辐照 3000 Å 厚的 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 薄膜, 大部分质子将穿过薄膜。这也就是说以 300keV 的质子辐照将不改变样品的成分, 而只在样品中引入了无序分布的缺陷。剂量为 $7.8 \times 10^{16} \text{H}^+/\text{cm}^2$ 的 300keV 质子辐照在样品中引起损伤的能量平均到原子约为 1.1eV/atom, 若取原子平均位移能为 23eV, 则原子平均位移为 2.4%。在这样的损伤范围内从样品的电阻温度变化曲线上不仅观察到样品电阻率 ρ 上升和超导转变温度 T_c 下降, 而且观察到 $d\rho/dT$ 的升高以及金属至非金属的相变。简单升温至室温可使约 60% 由低温辐照损伤引起的 T_c 下降和 ρ 上升得以恢复, 并可伴随着非金属-金属相变过程。考虑到这样一个强烈的退火效应仅发生在室温附近, 甚至起始于远低于室温的温度下, 而即使室温下原子获得的热激发也是相当低的, 此时难于设想存在有元素或缺陷的长程扩散。综合分析以上实验结果, 这些都反映了 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 的电子能带结构及输运性质对低温辐照在样品中引入的无序分布缺陷十分敏感。

金属的直流电阻率变化是样品很多物理量的综合反映。样品在直流电场作用下具有一定电阻值, 可以看成为样品中的电子在外电场作用下的运动受到杂质、晶格振动和晶体缺陷等散射而达到的一种平衡。参与这一输运过程的载流子为费密面附近的电子。以玻耳兹曼方程和弛豫时间近似来描述金属的电导率, 经简化后可写为

$$\sigma = \frac{N_0 e^2 \tau(E_F)}{m^*},$$

式中 N_0 , m^* 及 $\tau(E_F)$ 分别为费密面处电子浓度、有效质量及平均弛豫时间。辐照在样品中引入了无序分布缺陷。这些缺陷将是新的电子散射中心。这就是经辐照后样品电阻升高的一个原因。缺陷引起散射的弛豫时间倒数正比于缺陷的数量。如果认为小剂量辐照时入射质子引起的一系列级联碰撞是相互独立的事件, 则缺陷的数量应正比于辐照剂量。由此得到样品电阻率的增加应该与辐照剂量有线性关系。而图 8 插图表明, 实验

中 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 样品电阻率增加比线性更快. 这说明样品电阻率增加伴随有其它原因. 在此需要考虑到低温辐照引入的无序缺陷有效地改变了 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 的电子能带结构.

低温辐照在样品中引入了无序分布缺陷. 一般而言, 无序分布缺陷可使费密面附近能带的细微结构变模糊从而改变了电子能态密度等, 也可能产生一些局域态. 而图 5 与图 6 显示出样品经辐照后有一相变. 图 7 中随 $1/T$ 线性变化的 $\ln(R)$ 曲线表明, 相变后样品费密面处存在一个小能隙, 这一相变为金属-非金属相变. 这表明 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 的电子能带结构对无序分布缺陷十分敏感.

室温时晶格原子的热激发能比较低, 难于设想存在长程热扩散. 但低温辐照后的 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 样品显示了强烈的室温退火效应. 低温辐照引起的样品电阻升高及 T_c 下降的约 60% 可以经过一次室温热循环得以恢复, 并可伴有非金属-金属相变过程. 需要提到的是, 对外延的 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 薄膜也做了仔细地 Rutherford 背散射及准直、沟道谱的测量分析实验. 从低温辐照后样品升温前后的 $\langle 001 \rangle$ 准直谱中并没有观察到这样的室温退火效应^[9]. 这意味着引起样品输运性质强烈变化并可伴有相变发生的室温退火可能只涉及到数量不大的间隙原子-空穴对的复合, 或者涉及到的是晶格结点上的一些无序分布缺陷重新有序化. 实验中已经观察到了 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 晶格中铜氧平面层上 O(1) 无序或有序分布决定了样品是超导体还是半导体^[6]. 而改变铜氧平面上 O(1) 的有序程度是通过改变样品中氧含量得以实现的. 但在低温辐照实验中并没有改变样品成份, 只不过在样品中引入了无序分布缺陷. 样品中无序分布缺陷可以在 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 中引起样品性质如此显著的变化. 而简单的室温热循环给样品无序分布缺陷带来的难以观察到的变化, 又引起了如此强烈的退火效应. 这只能以 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 的电子能带结构对无序分布缺陷十分敏感加以解释.

$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 在很宽温区电阻率与温度有线性关系, 很多研究着力于分析这一现象^[7]. 样品的电阻率随温度的变化反映了电子气在参与输运过程中与晶格的相互作用. 依照 Allen 等人^[8]将电阻率的斜率公式简化为

$$\frac{\partial \rho}{\partial T} = \frac{2\pi k_B}{\hbar e^2} \left[\frac{m}{n} \right]_{\text{eff}} \lambda_{\text{tr}}$$

可以更清楚地看到电阻率的斜率与输运过程的电声子相互作用常数 λ_{tr} 相关连. 根据 BCS 超导理论, 超导体的超导转变温度 T_c 也与电声子相互作用相关连. 联系到低温辐照实验中观察到的样品 T_c 下降和 $d\rho/dT$ 上升, 也需要认为无序分布缺陷有效地影响了 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 的能带结构.

一个简单的低温质子辐照实验及样品电阻率测量显示了如此众多的非寻常现象, 这正说明 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 氧化物超导体有别于先前的高 T_c 材料的特性. 这种材料不仅对结构缺陷, 而且对缺陷的无序分布也十分敏感. 对 La-Sr-Cu-O 样品的低温辐照实验表明, 以上特性可能是高 T_c 氧化物超导体所共有的.

五、结 论

高 T_c 氧化物超导体是一种有别于其它超导材料的新型超导体. 这一材料的电子能带

结构对晶格中缺陷的无序程度十分敏感. 小剂量质子辐照在低温下产生的无序缺陷就可以引起费密面处电子状态的可观变化. 稍大剂量的辐照产生的无序缺陷足以在费密面处形成能隙, 使材料发生金属至非金属的相变. 这一无序缺陷在室温附近的运动和重新有序化可以引起强烈的退火效应, 可使样品在 100K 时的电阻值下降 60% 并可发生非金属至金属的相变. $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 晶格上 $z = 0$ 处铜氧平面上的氧空位分布情况可能对 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 样品中这一过程起了重要作用.

本工作的实验部分作为合作研究项目是在德意志联邦共和国卡尔斯鲁尔核研究中心 (Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH) 完成的. 作者熊光成和李宏成对卡尔斯鲁尔核研究中心提供的各种支持表示感谢.

- [1] J. G. Bednorz, K. A. Müller, *Z. Phys. B*, **64**(1986), 511.
- [2] J. Geerk, G. Linker, O. Meyer, C. Politis, F. Ratzel, R. Smithey, B. Strehlau and G. C. Xiong, *Z. Phys. B*, **67**(1987), 507.
- [3] A. Umezawa, G. W. Crabtree, J. Z. Liu, H. W. Weber, W. K. Kwok, L. H. Nunez, T. J. Moran, C. H. Sowers and H. Claus, *Phys. Rev.*, **B36**(1987), 7151.
- [4] H. C. Li, G. Linker, F. Ratzel, R. Smithey and J. Geerk, *Appl. Phys. Lett.*, **52**(1988), 1098.
- [5] O. Meyer, F. Weschenfelder, J. Geerk, H. C. Li and G. C. Xiong, *Phys. Rev.*, **B37**(1988), 9757.
- [6] J. D. Jorgensen, B. W. Veal, W. K. Kwok, G. W. Crabtree, A. Umezawa, L. J. Nowicki and A. P. Paulikas, *Phys. Rev.*, **B36**(1987), 5731.
- [7] R. Micnas, J. Ranninger and S. Robaszkiewicz, *Phys. Rev.*, **B36**(1987), 4051.
- [8] P. B. Allen, T. P. Beaulac, F. S. Khan, W. H. Butler, F. J. Pinski and J. C. Swihart, *Phys. Rev.*, **B34**(1986), 4331.

THE EFFECTS OF LOW TEMPERATURE PROTON IRRADIATION ON Y-Ba-Cu-O AND La-Sr-Cu-O

XIONG GUANG-CHENG

LI HONG-CHENG

(Department of Physics, Peking University) (Institute of Physics, Academia Sinica)

O. MEYER G. LINKER

(Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Institut für Nukleare Festkörperphysik, P. O. Box 3640, 7500 Karlsruhe, B. R. D.)

ABSTRACT

The influence of low temperature proton irradiation on the transport property of high T_c oxide Y-Ba-Cu-O and La-Sr-Cu-O is studied by a standard four probe method. After irradiation, besides the resistivity of the sample increases and the superconducting transition temperature T_c decreases, the dp/dT of the sample increases and a metal-nonmetal phase transition occurs. A strong annealing effect is found during warming up irradiated samples to room temperature. After room temperature annealing, nearly 60% of changes of the sample resistance and T_c which were caused by low temperature proton irradiation can be recovered. These phenomena can be attributed to that the electronic band structure of the high T_c oxide superconductor is very sensitive to the random defects.