

# NdBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub>/YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> 多层膜体系 的外延结构和磁通钉扎的研究\*

陈昌兆 蔡传兵<sup>†</sup> 刘志勇 应利良 高 波 刘金磊 鲁玉明

(上海大学物理系, 上海 200444)

(2007 年 7 月 19 日收到, 2007 年 12 月 7 日收到修改稿)

采用脉冲激光沉积技术, 在单晶 SrTiO<sub>3</sub> 基底上外延生长了一系列名义结构为  $p \times ( \text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta} (m) \text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta} (n) )$  的多层膜和准多层膜. 单元层 NdBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> 较厚而 YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> 呈非连贯的岛状分布,  $m, n$  为激光脉冲数,  $p$  为重复周期. 样品的超导转变温度在 87—91 K 范围, 具体大小取决于不同的调制结构, 多层膜的重复周期越大, 层状界面越多, 超导转变温度就越低. 磁传输测量表明, 准多层的样品不仅具有较高的超导转变温度, 而且具有较强的磁通钉扎性能, 77 K 零场下的临界电流密度高达  $4 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$ , 显示出良好的应用前景.

关键词: NdBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub>, 多层膜, 磁通钉扎, 临界电流密度

PACC: 6150C, 7475

## 1. 引 言

除 Ba<sub>1-x</sub>K<sub>x</sub>BiO<sub>3</sub> 外, 所有的氧化物高温超导体因为本征的层状结构均具有高度的各向异性. 建立多层膜和超晶格结构是对这种层状结构进行人工调制, 进而研究维度效应、近邻效应、应力效应和磁通钉扎各向异性等的一种十分有效的方法<sup>[1-4]</sup>, 这些研究不仅可以加深对高温超导电性和磁通钉扎机理等一些基本问题的理解, 而且对基于薄膜外延技术的高温超导涂层导体<sup>[5]</sup>的性能提高具有重要意义. 早期, Triscone 等人<sup>[6]</sup>对(Y123/Pr123)超晶格体系的研究结果表明, 虽然 CuO<sub>2</sub> 面对高温超导电性有重要贡献(一个 Y123 单胞就具有超导电性), 但面间耦合的作用也不容低估, 层间耦合强时,  $T_c$  高, 层间耦合弱时  $T_c$  下降. Cai 等人<sup>[7,8]</sup>对三种具有相同结构的 RE123( RE 代表稀土元素, 如 Nd, Gd, Eu 等)超导体组成的多层膜体系(Gd123/Nd123/Eu123)开展了较为详细的研究, 实验表明界面处应力以及由此引起的缺陷对体系的超导转变温度、磁场下电传输特性产生重要影响, 他们发现多层膜样品存在超导转变

温度的明显抑制和跳跃的磁通钉扎行为, 并给出了氧化物超导薄膜磁通钉扎力密度的可调制及其各向异性的直接证据. Haugan 等人<sup>[9]</sup>提出了一种基于多层膜结构的有效增强薄膜磁通钉扎的方法, 即建立所谓的准多层结构. 在相邻的 Y123 单元层之间周期性插入非连贯岛状分布的 Y211 相, 岛的尺寸在纳米量级. 这些正常的 Y211 相埋于超导的基体中可充当有效的钉扎中心, 从而大大提高了体系的磁传输性能, 其液氮温区的临界电流密度在高磁场下可提高近两倍. 这项工作已引起了人们的广泛关注, 例如 Cai 等<sup>[10]</sup>在 Y123/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 准多层结构也发现类似的高场下磁通钉扎大幅度增强的特性.

由于 Nd123 有着比 Y123 更好的超导性能, 并且 Nd123 相可以很好地在 Y123 相上外延生长<sup>[11]</sup>, 而在 SrTiO<sub>3</sub> 上的直接沉积性能较差, 因此我们选择 Nd123/Y123 作为研究对象, 设计和制备了一系列多层膜样品, 既包括单元层较厚(重复周期  $n = 2$ )的双膜, 也包括单元层较薄的超晶格样品, 还包括上面提到的准多层膜, 来考察不同调制结构对多层膜的外延生长质量、超导电性和磁通钉扎的影响.

\* 国家自然科学基金(批准号: 50672057, 10774098), 上海市重点科技攻关项目(批准号: 055211003), 中德合作科研项目(批准号: [2006] 3139), 上海市浦江人才计划(批准号: SPJ14048)和上海市重点学科建设项目(批准号: T0104)资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯联系人, E-mail: cbcai@staff.shu.edu.cn

## 2. 实验方法

所有样品都是利用  $\text{SrTiO}_3$  单晶作为基底,通过脉冲激光沉积(pulsed laser deposition, PLD)进行制备.所用的准分子激光波长为 248 nm,重复频率 5 Hz,打到靶体上的束斑形状是一个大约  $12 \text{ mm}^2$  的方形,能量密度  $2.4 \text{ J/cm}^2$ .基底被加热到  $820 \text{ }^\circ\text{C}$ ,氧分压 30 Pa.沉积后,增加氧压至  $4 \times 10^4 \text{ Pa}$  进行原位退火,冷却速率为  $15 \text{ K/min}$ .通过 Y123 和 Nd123 两个靶的轮流交替,制得名义结构为  $p \times (\text{Nd123}(m) / \text{Y123}(n))$  的多层膜和准多层膜,其中  $m$  为 Nd123 单元层的激光脉冲数, $n$  为 Y123 单元层的激光脉冲数, $p$  为重复周期,沉积速率大约  $1 \text{ \AA/pulse}$ .本文研究的样品有以下几种:NY1[ $2 \times (750/750)$ ], NY2[ $50 \times (30/30)$ ], NY3[ $40 \times (75/5)$ ], NY4[ $40 \times (75/20)$ ].

样品的微观结构、织构状况、表面形貌和超导转变温度分别由四极 X 射线衍射仪( $\text{CoK}\alpha$  线,  $\lambda = 0.17903 \text{ nm}$ )原子力显微镜(atomic force microscopy, AFM)和交流磁化率的方法来测量.超导转变温度定义为样品升温时感应电压上升 90% 时所对应的值.最后样品被刻蚀成长  $0.8 \text{ mm}$  宽  $50 \text{ }\mu\text{m}$  的微桥,通过标准的四引线法测量它在外磁场中的直流传输特性.测量仪器为 Quantum Design 公司生产的物性测量系统(physical properties measurement system, PPMS).最大磁场可以达到 9 T.测量时传输电流始终垂直于外磁场方向,超导临界电流的电场判据为  $1 \text{ }\mu\text{V/cm}$ .

## 3. 结构特征和表面形貌

图 1 给出了具有代表性的双膜 NY1[ $2 \times (750/750)$ ]和多层膜 NY2[ $50 \times (30/30)$ ]样品 X 射线的  $\theta-2\theta$  扫描图案,并给出了一个纯 Y123 薄膜样品作为参考.除了较强的基底  $\text{SrTiO}_3$  的衍射峰外,所有样品都仅显示出超导 123 相的(00 $l$ )衍射峰,反映它们均具有良好的  $c$  轴取向.由于 Y123 的(003)(006),(009)衍射峰分别与基底的相关衍射峰存在较大重叠而难以分辨开来,因而在图中表现出较高的强度和较大的宽度.

根据 Cai 等人<sup>[7]</sup>对超导多层膜体系( $\text{Gd123}_d / \text{Nd123}_d / \text{Eu123}_d$ ) $\times n$  的研究结果,当重复周期  $n$  ( $n = 1, 2$ )较小时,体系具有和单一膜相似的结构和性

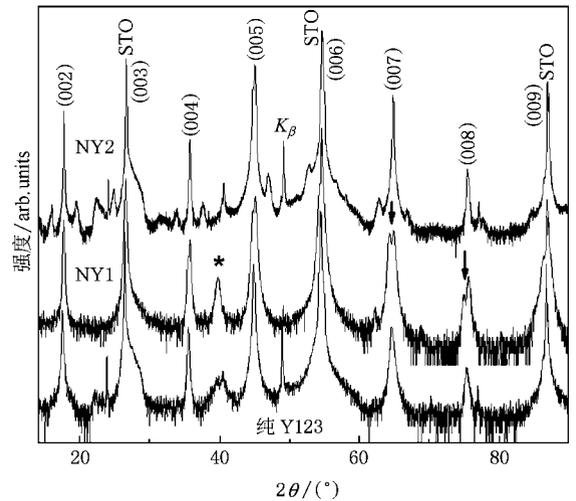


图 1 典型的双膜(NY1)和多层膜(NY2)样品的 X 射线的  $\theta-2\theta$  扫描图

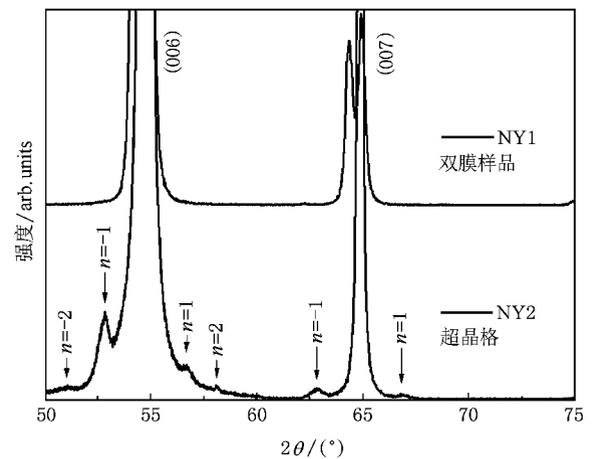


图 2 多层膜(NY2)样品显示出超晶格特征的卫星峰(标准的调制波长  $\lambda = 60 \text{ \AA}$ )

质,超导转变温度不会降低,体系的稳定性会增加,高场下的特性也有所改善,典型的 X 射线衍射谱可以看作相应单一膜的简单叠加,我们的双膜样品完全符合这种情况(见图 1),所以在这里我们将其作为标准样品进行比较分析研究.由于 Nd123 的晶格常数比 Y123 稍大,故在双膜样品的衍射图上,二者的同一(00 $l$ )峰不可能完全重合,将布拉格公式  $2d \sin \theta = \lambda$  两边取微分得  $|\delta \theta| = \frac{1}{d} \tan \theta |\delta d|$ ,由此可以看出掠射角  $\theta$  越大,差值  $\delta \theta$  就越大,同一个(00 $l$ )峰的裂分效应就越明显,正是因为如此, $\theta-2\theta$  扫描图上低角度下的裂分现象并不明显,而在较大的  $\theta$  处发生明显的劈裂现象,在图中用箭头表示

这一分裂现象, 左边的是 Nd123 的衍射峰, 右边的代表 Y123.

随着重复周期  $n$  的增大和相应的单元层厚度的减小, 多层膜样品的衍射谱会发生明显的变化, 这种变化主要体现在两个方面. 其一, 界面附近外应力的存在意味着 Y123 和 Nd123 晶格之间存在匹配效应, 晶格匹配的结果使得界面附近二者的晶格常数趋于相同. 因而在多层膜样品的衍射图上 Y123 和 Nd123 的同一个(00 $l$ )衍射峰会趋于重合, 并且重复周期  $n$  越大, 单元层厚度越薄, 界面越清晰, 这种趋近效应就越明显. Schuller<sup>[12]</sup>对 Nb/Cu 和姚素薇等人<sup>[13]</sup>对 Cu/Co 系列金属多层膜的 XRD 的测量结果对此给予了证实. 这种衍射峰位的移动现象在我们的样品中同样也有所反映, 主要表现在高角度区域, 多层膜样品(NY2)的主峰(如 007 峰)介于双膜样品明显分裂的同一衍射峰之间. 利用正交晶系晶面间距公式  $d_{hkl} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{h}{a}\right)^2 + \left(\frac{k}{b}\right)^2 + \left(\frac{l}{c}\right)^2}}$  和布拉格方

程由(007)峰计算出的双膜样品 NY1 的 Y123 和 Nd123 的  $c$  轴常数分别  $c_{Y123} = 1.1677\text{nm}$ ,  $c_{Nd123} = 1.1766\text{nm}$ , 多层膜样品 NY2 的  $c$  轴常数为  $c = 1.1692\text{nm}$ , 介于二者之间. 其二, 对于多层膜样品, 在同一个(00 $l$ )主峰旁往往存在一些小峰, 而这种小峰在双膜样品中并不存在, 这一区别在局部放大的图 2 中看得非常清楚. 实际上, 这些卫星峰的存在是超晶格体系的典型特征, 它反映了高温超导薄膜层状结构的人工调制, 调制波长  $\Lambda = \lambda_x / \chi \sin\theta_n - \sin\theta_{n+1}$ <sup>[12]</sup>, 此处标准的  $\Lambda = 60\text{Å}$ .  $\lambda_x$  为 X 射线的波长,  $\theta_n$  和  $\theta_{n+1}$  代表两个相邻的卫星峰的角度位置. 超晶格的结构越完整, 观察到的卫星峰个数就越多, Jakob 等<sup>[14]</sup>曾经在 Y123/Pr123 的超晶格上观察到 5 级很窄的卫星峰说明这个超晶格体系极度清晰的界面的存在, 基本不存在成分的涨落, 界面间几乎没有扩散现象. 在我们的 NY2[50 × (30/30)]样品中, 卫星峰的存在意味着 Nd123/Y123 间完整界面的存在, 由于 30 个脉冲(对应厚度大约 30 Å)并不能形成真正意义上的包含整数个单胞的层, 这就好比在界面两边存在 Nd 原子和 Y 原子的互扩散现象而导致成分的涨落, 所以在我们的样品中卫星峰非常微弱(有些主峰处甚至观察不到)且级数很低. 除了这些特征外, 我们还注意到图中在大约 40°位置存在一个杂峰(用星号表示), 此峰在超晶格中被压抑显得

很微弱, 推测可能是 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>[15]</sup>.

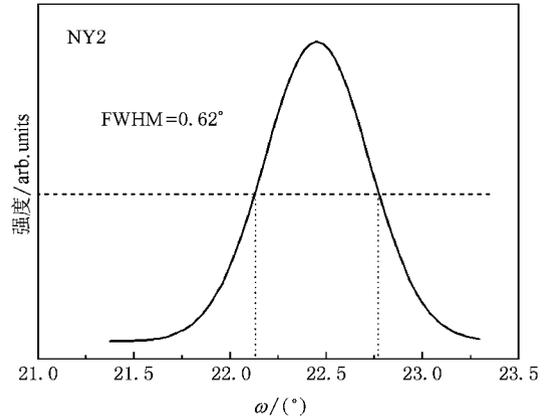


图 3 NY2[50 × (30/30)]样品(005)峰的摇摆曲线

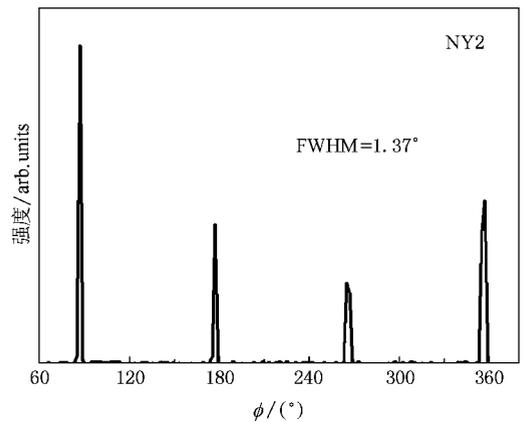


图 4 NY2[50 × (30/30)]样品(102)面的 φ 扫描图

除了衍射图上所显示的 Y123 的(00 $l$ )衍射峰外, 样品的面外结构也可以从样品(005)峰的摇摆曲线来说明. 图 3 给出的是样品 NY2 的(005)峰摇摆曲线, 其半高宽(FWHM)小于 0.7°, 其他样品的 FWHM 都稍小于此值, 表明所有样品都具有较好的面外结构. 另外我们还通过样品(102)极图的四重对称峰的半高宽来获得面内结构的优劣信息, 除了 NY2 样品稍大(1.37°)外(见图 4), 其他样品的 FWHM 都小于 1.2°, 表现出较好的面内结构.

样品的表面形貌通过原子力显微镜(AFM)来进行观察. 图 5 显示出不同人工调制的样品表面均是一些分立的岛以及岛和岛之间的沟道. 除此之外, 还存在一些杂相. 据上面 XRD 结果推测, 这些杂相可能是 Y-O 或 Cu-O 的沉积物<sup>[16]</sup>, 平均直径大约在几百个纳米.

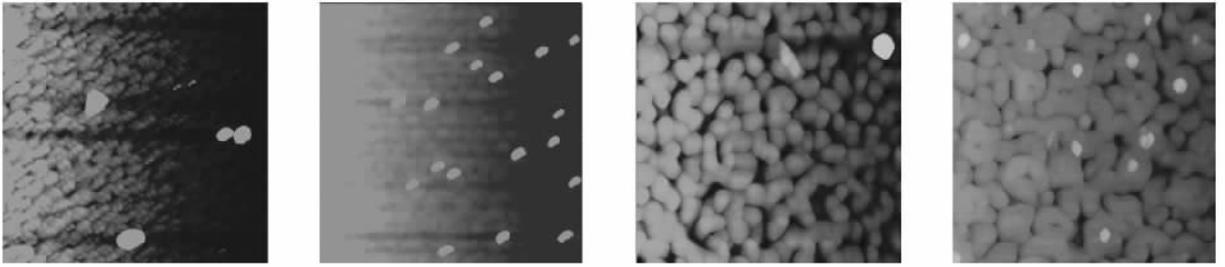


图5 四个样品的 AFM 照片( $5\ \mu\text{m} \times 5\ \mu\text{m}$ ) 从左到右,依次为 NY1, NY2, NY3 和 NY4)

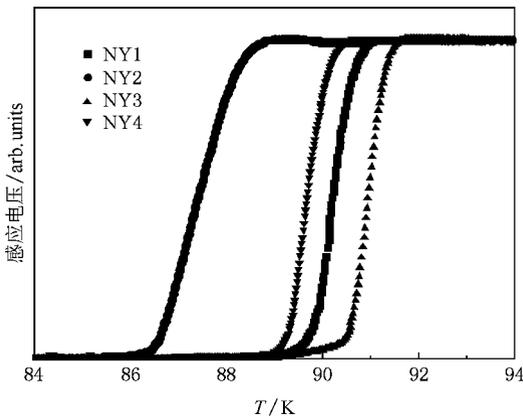


图6 由交流磁化率的方法测得的四个样品的超导转变

## 4. 超导转变温度

图6给出感应法测量得到的次级线圈上的感应电压跟样品温度的变化关系曲线.除NY2多层膜样品( $T_c \approx 87.2\ \text{K}$ ,  $\Delta T_c \approx 1.5\ \text{K}$ )外,其他样品都具有较高的转变温度和较窄的转变宽度( $T_c > 90\ \text{K}$ ,  $\Delta T_c < 1\ \text{K}$ ).此处的 $T_c$ 采用的是90%标准,此值一般比传输法测量的起始转变温度要低,原因在于传输法测量存在了电流的穿透效应, $\Delta T_c$ 为90%标准和10%标准之间的差值.超导多层膜样品的转变温度跟界面处晶格失配产生的应力场密切相关,应力场是高度局域化<sup>[17]</sup>的,它的空间分布按照 $1/r^6$ 的规律衰减.对于块材或厚膜而言,局域的应力场对体系可能没有什么影响,所以样品NY1和NY4因为相对较厚的单元层而表现出相对较高的转变温度.但是对于单元层比较薄的薄膜就可能产生很大的影响,由于单元层厚度小,外延应力得不到释放,在这种受内应力的状态下,界面附近的 $\text{CuO}_2$ 面发生扭曲从而引起载流子从 $\text{CuO}_2$ 面到 $\text{CuO}$ 链的转移, $\text{CuO}_2$ 面的载

流子浓度相应减少甚至出现耗尽最终导致了超导转变温度的减低.针对 $(\text{Gd}_{123}_d/\text{Nd}_{123}_d/\text{Eu}_{123}_d) \times n$ 多层膜体系,Cai等人<sup>[7]</sup>的研究表明当单元层的厚度 $d$ 小于4个单胞时,体系的 $T_c$ 会受到明显的抑制,对于NY1[50×(30/30)]样品,按照一个脉冲对应 $1\ \text{\AA}$ 的厚度来估算,单元层的厚度不到3个单胞,这也许就是该样品转变温度较低的主要原因.准多层膜样品NY3[40×(75/5)]中,完整的Nd123/Y123界面并不存在,只是非连贯分布的纳米尺度的Y123的岛被周围的Nd123基体所包裹,整个样品好比是在Nd123的薄膜中弥散分布着一些Y123的粒子,也许由于Nd123本身就有着比Y123高的转变温度,因而决定了这个样品具有较高的转变温度.

## 5. 磁传输特性

### 5.1. 不同温度下的临界电流密度对磁场的依赖性

图7显示了这些样品在不同的温度下(50 K, 70 K和77 K)临界电流密度 $J_c$ 对外磁场 $H$ 的依赖关系.准多层膜样品NY3[40×(75/5)]具有较大的临界电流密度跟它具有较高的超导转变温度相一致,即使在77 K的温度下,自场临界电流密度仍然高于 $4 \times 10^6\ \text{A}/\text{cm}^2$ .由于临界电流密度 $J_c$ 取决于体钉扎力密度 $F_p$ , $F_p$ 是元钉扎力 $f_p$ 和钉扎中心密度 $n_p$ 的函数.一般说来,单位体积中钉扎中心越多( $n_p$ 越大)和每个钉扎中心的钉扎力 $f_p$ 越大, $F_p$ 就越大, $J_c$ 就越高.图8显示了77 K下样品钉扎力密度随磁场的变化,准多层结构样品NY3具有最高的钉扎力密度,这可能是由于它具有较多的岛状界面, $c$ 轴方向上的Y123/Nd123界面应力场比其他样品要多得多,使其在较高的磁场下钉扎力密度远远高于其他几个样品.

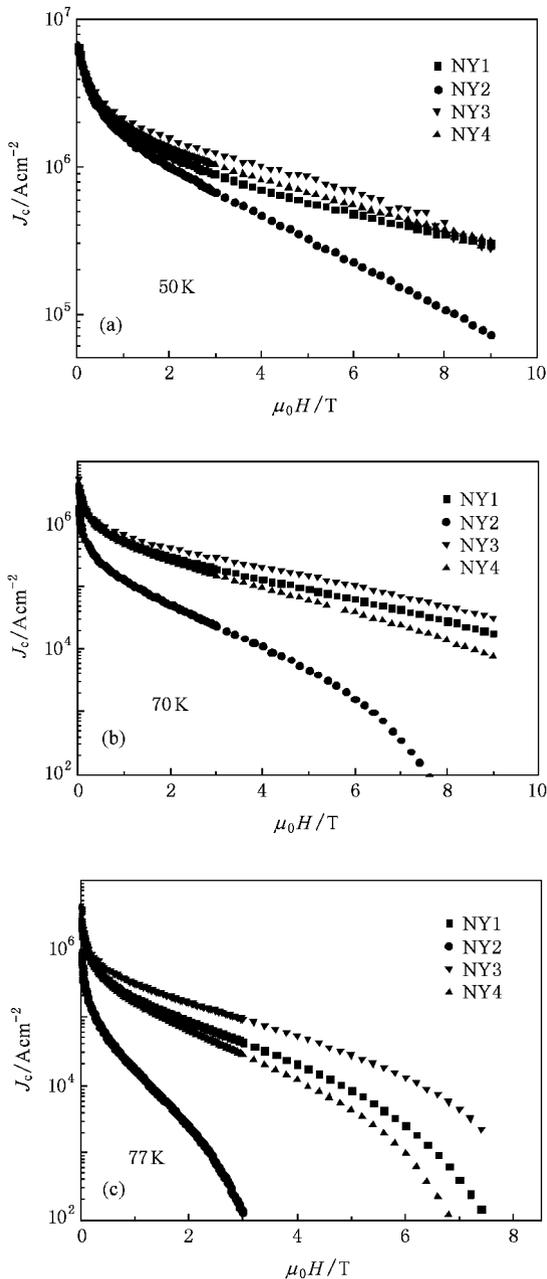


图 7 在不同的温度下, 样品的临界电流密度和外磁场的依赖关系 (a) 50 K (b) 70 K (c) 77 K

多层膜样品 NY2 在整个磁场范围 (0—9 T) 具有较低的临界电流密度和较差的磁传输特性, 这跟它具有最低的超导转变温度是相一致的. 我们注意到这样一个事实, NY2 样品在 77 K 自场下临界电流密度非常低, 不足  $1 \times 10^6$  A/cm<sup>2</sup>, 并且磁场特性也特别差, 不可逆场只有 3T 左右. 根据磁通玻璃融化理论<sup>[18]</sup>,  $H_{irr} \propto (1 - T/T_c)^\beta$ , 指数  $\beta$  的实验取值一般在 1.33—1.60 范围<sup>[19, 20]</sup>. 对于 NY2 样品, 由于相对较低的  $T_c$ ,  $H_{irr}$  相应较小, 尤其是在高温下更为明显, 这

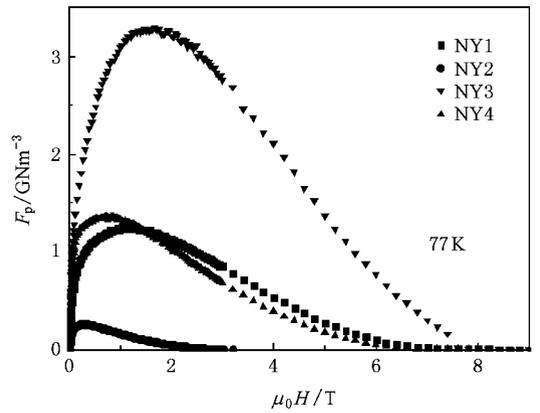


图 8 77 K 下不同样品磁通钉扎力密度对外磁场的依赖关系

也许就是该样品磁传输特性较差的主要原因. 在图 7 中, 样品 NY2 [ $2 \times (750/750)$ ] 和 NY4 [ $40 \times (75/20)$ ] 由于超导转变温度相近, 自场下临界电流密度相差无几. 低温下两条曲线比较靠近, 高温下才明显分开, 仔细的观察就会发现随着温度的升高, 两条曲线之间存在明显的交叉现象, 在下面的小节中我们将对此进行分析.

## 5.2. 跳跃的磁通钉扎行为

为了更好的看清楚 NY1 和 NY4 升温过程中  $J_c - H$  曲线交叉现象, 我们作出了归一化的  $J_c - H$  图 (见图 9). 低温低场下, NY4 的磁场性能明显优越于 NY1, 但是随着温度的升高, 低场下这种优势逐渐消失, 当温度到达 77 K 时, 在整个磁场范围, NY4 磁场性能都不如 NY1 样品. 要理解这种跳跃行为, 就必须考虑到涡旋-涡旋之间相互作用受外加磁场的影响. 外加磁场增大使磁通钉扎的方式可能会从强的个体钉扎向弱的集体钉扎转变, 这种转变可从双对数坐标下的  $J_c - H$  曲线的低场平台看得非常明显 (见图 10). 低场下涡旋-涡旋之间的相互作用可以忽略, 对应的是强的个体钉扎, 此时  $J_c$  几乎独立于外场, 伴之而生的是一个平台. 在中等磁场区域, 随着外场的增加,  $J_c$  减小, 二者之间满足幂函数关系  $J_c \propto H^{-\alpha}$ , 这一段对应的是集体钉扎, 不同的  $\alpha$  值对应不同的钉扎机理. 低场下平台的终结处所对应的磁场是单磁通钉扎匹配场<sup>[20, 21]</sup>, 记为  $H_{acc}$ , 它和薄膜中的关联缺陷 (主要是薄膜生长过程中产生的位错) 密切相关. 在一定程度上,  $H_{acc}$  的值反应了薄膜中关联缺陷密度的大小<sup>[22]</sup>. 由于低场下这种关联缺陷是最主要的钉扎源, 为此我们给出了这两个样品在不同

温度下的  $H_{acc}$  (90% 标准), 见图 9 中的插图. 该图的结果与样品在低场下的行为是完全符合的. 低温 (50 K) 下, NY4 样品的  $H_{acc}$  比 NY1 大得多, 相应的其低场下磁场性能明显优越于 NY1, 70 K 时, 二者相近, 低场的曲线几乎完全重合, 高温下 NY4 的  $H_{acc}$  比 NY1 样品小, 相应的其低场下磁场性能也不如 NY1.

现在我们来讨论在较高磁场中性能的差异以及依赖于温度的变化行为. 由图 9 可见, 重复周期较多的 NY4 样品的高场性能不如双膜样品 NY1. NY4 由于单元层较薄, 在生长过程中为了维持电中性和化学计量比, 最小的生长单元是一个完整的单胞而不是一个原子层, 其生长方式可能是一种二维 block-by-block 模式<sup>[23]</sup>, 由于  $Nd^{3+}$  离子和  $Y^{3+}$  离子半径不同, Y123 和 Nd123 体系存在了晶格的不匹配, 在 Y123/Nd123 界面处产生了额外的局域应力场, 应力场的释放从而导致了以面外刃位错形式存在的额外钉扎中心的形成. 在高温超导薄膜中这种扩展类型的缺陷是最强的钉扎中心之一<sup>[22]</sup>, 在这个体系中可能仍然如此. 低温下当涡旋芯的半径  $\xi(T) = \xi(0) [(1 + T/T_c)(1 - T/T_c)]^{1/2}$  ( $\xi(0) \approx 1.5$  nm,  $\xi(50$  K)  $\approx 2$  nm)<sup>[24]</sup> 跟刃位错芯的半径 (1 nm 左右) 相差不大时, 刃位错的钉扎较强. 在  $T = 77$  K 时,  $\xi(77$  K)  $\approx 4.1$  nm, 是位错芯半径的四倍以上, 意味钉扎强度的大幅度削弱. 此时, 在位错附近由于弹性应力的存在超导序参量减小意味着位错仍然能够钉扎涡旋, 只不过是弱钉扎而已. 所不同的是, NY1 由于重复周期较少 ( $n = 2$ ), 单层厚度 75 nm, 界面影响可以忽略, 三维螺旋式生长是超导厚膜的主要生长方式, 相应的位错除刃位错外还有螺旋位错. Gao 等人<sup>[25]</sup> TEM 的观察表明, 螺旋位错的柏氏向量直接沿着  $c$  轴, 尺寸是刃型位错的 3 倍左右 (即约 3 nm), 即使在 77 K 下, 钉扎仍然很强从而表现出较好的磁场依赖关系.

## 6. 结 论

采用脉冲激光沉积技术, 我们在单晶  $SrTiO_3$  基底上制备出一系列的 Nd123/Y123 多层和准多层的人工调制结构. 样品超导转变温度 (87—91 K 之间) 和织构状况与调制周期和单元结构紧密相关, Nd123/Y123 完整界面多的样品超导转变温度明显

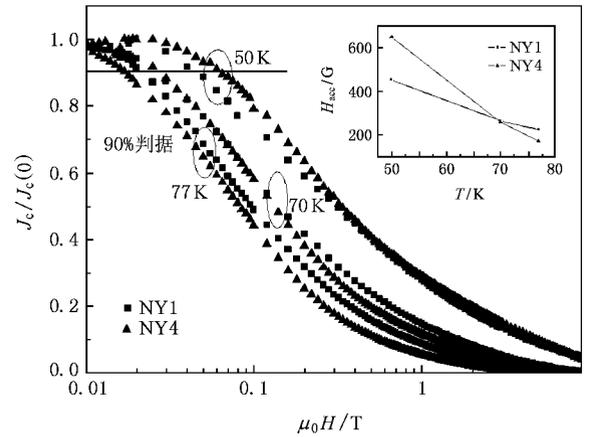


图 9 典型的双膜 NY1 和多层膜 NY4 样品归一化的临界电流密度和外磁场的依赖关系 (插图给出的是二者的单磁通钉扎匹配场随温度的变化,  $1$  G =  $10^{-4}$  T)

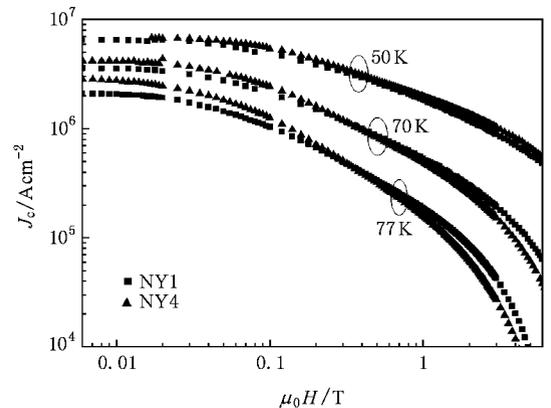


图 10 典型的双膜 NY1 和多层膜 NY4 样品在双对数坐标下的  $J_c$ - $H$  曲线 (该曲线清楚地显示出强的个体钉扎到弱的集体钉扎的转变)

低于其他界面少的样品, 织构状况也相对较差. 不同温度下的磁场传输测量表明, 具有准多层结构的样品在高场下具有最好的磁通钉扎性能, 零场下临界电流密度也高达  $4 \times 10^6$  A/cm<sup>2</sup>. 一般而言, 在保持膜厚不变的情况下, 插入岛状异质相可望获得超导临界温度和磁传输性能均为优良的超导层, 这为提高和改善涂层导体的超导性能提供了明确的指导.

本工作所使用的部分样品和相关性能测试在德国德累斯顿固体与材料研究所 (IFW Dresden) 完成, 在实验过程中得到了 Bernhard Holzapfel 和 Ludig Schultz 两位教授的指导和有益讨论, 论文撰写和数据分析时得到了张金仓和曹世勋教授的热情帮助, 在此表示谢意.

- [ 1 ] Li Q, Kwon C, Xi X X, Bhattacharya S, Walkenhorst A, Venkatesan T, Hagen S J, Jiang W, Greene R L 1992 *Phys. Rev. Lett.* **69** 2713
- [ 2 ] Holzapfel B, Kreiselmeier G, Kraus M, Saemann-Ischenko G, Bouffard S, Klaumünzer S, Schultz L 1993 *Phys. Rev. B* **48** 600
- [ 3 ] Hammerl G, Schmehl A, Schultz R R, Goetz B, Bielefeldt H, Scheider C W, Hilgenkamp H, Mannhart J 2000 *Nature* **407** 162
- [ 4 ] Obara H, Andersson M, Fábrega L, Fivat P, Triscone J M, Decroux M, Fischer Ø 1995 *Phys. Rev. Lett.* **74** 3041
- [ 5 ] Cai C B, Pan C Y, Liu Z Y, Lu Y M, Shi D L 2007 *Progress in Physics* **27** 467 (in Chinese) [ 蔡传兵、潘成远、刘志勇、鲁玉明、时东陆 2007 物理学进展 **27** 467 ]
- [ 6 ] Triscone J M, Fischer Ø, Antognaza L, Brunner O, Kent A D, Mieville L, Karkut M G 1990 *Science and Technology of Thin Film Superconductors* ( New York : Plenum Press ) p13
- [ 7 ] Cai C, Holzapfel B, Hänisch J, Schultz L 2004 *Phys. Rev. B* **70** 064504
- [ 8 ] Cai C, Holzapfel B, Hänisch J, Schultz L 2004 *Phys. Rev. B* **70** 212501
- [ 9 ] Haugan T, Barnes P N, Wheeler R, Meisenkothen F, Sumption M 2004 *Nature* **430** 867
- [ 10 ] Cai C, Hänisch J, Hühne R, Stehr V, Mickel C, Gemming T, Holzapfel B 2005 *J. Appl. Phys.* **98** 123906
- [ 11 ] Cai Y Q, Yao X, Li G 2006 *Acta. Phys. Sin.* **55** 844 (in Chinese) [ 蔡衍卿、姚 忻、李 刚 2006 物理学报 **55** 844 ]
- [ 12 ] Schuller I K 1980 *Phys. Rev. Lett.* **44** 1597
- [ 13 ] Yao S W, Zhao J, Wang H Z, Dong D W 2006 *Acta. Phys. Chim. Sin.* **19** 892 [ 姚素薇、赵 瑾、王宏智、董大为 2006 理化学学报 **19** 892 ]
- [ 14 ] Jacob G, Przyslupski P, Stölzel C, Tome-rosa C, Walkenhorst A, Schmitt M, Adrian H 1991 *Physica C* **185-189** 2087
- [ 15 ] Hänisch J, Cai C, Stehr V, Hühne R, Lyubina J, Nenkov K, Fuchs G, Schultz L, Holzapfel B 2006 *Supercond. Sci. Technol.* **19** 534
- [ 16 ] Hänisch J, Cai C, Hühne R, Schultz L, Holzapfel B 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 122508
- [ 17 ] Wen H H, Zhao Z X, Wang R L, Li H C, Yin B 1996 *Physica C* **262** 81
- [ 18 ] Tinkham M 1996 *Introduction to Superconductivity* ( New York : McGraw-Hill )
- [ 19 ] Blatter G, Feigel 'man M V, Geshkenbein V B, Larkin A, Vinokur V M 1994 *Rev. Mod. Phys.* **66** 1125
- [ 20 ] Cai C, Holzapfel B, Hänisch J, Fernández, Schultz L 2004 *Phys. Rev. B* **69** 104531
- [ 21 ] Cai C, Holzapfel B, Hänisch J, Fernández, Schultz L 2004 *Appl. Phys. Lett.* **84** 377
- [ 22 ] Dam B, Huijbregtse J M, Klaassen F C, van der Geest R C F, Doombos G, Rector J H, Testa A M, Freisem S, Martinezk J C, Stäuble-Pümpin B, Griessen R 1999 *Nature* **399** 439
- [ 23 ] Varela M, Grogger W, Arias D, Sefrioui Z, León C, Ballesteros C, Krishnan K M, Santamaría J 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 5156
- [ 24 ] Klaassen F C, Doombos G, Huijbregtse J M, van der Geest R C F, Dam B, Griessen R 2001 *Phys. Rev. B* **64** 184523
- [ 25 ] Gao Y, Merkle K L, Bai G, Chang H L, Lam D J 1991 *Physica C* **174** 1

# On epitaxial structure and flux pinning of $\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}/\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ superconducting multilayers<sup>\*</sup>

Chen Chang-Zhao Cai Chuan-Bing<sup>†</sup> Liu Zhi-Yong Ying Li-Liang Gao Bo Liu Jin-Lei Lu Yu-Ming

(*Department of Physics, Shanghai University, Shanghai 200444, China*)

(Received 19 July 2007; revised manuscript received 7 December 2007)

## Abstract

By using pulsed-laser deposition technique, a series of multilayers of  $\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}/\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ , namely with the structures of  $p \times [\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}(m) \text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}(n)]$ , are prepared on single-crystal  $\text{SrTiO}_3$ , where  $m$  and  $n$  denotes the number of laser pulses and  $p$  is the number of repetitions. XRD patterns indicate that all samples are highly  $c$ -axis oriented, and the superconducting transition temperatures of these samples are in the range of 87—91 K, depending on different modulating structures. The larger the modulation period  $p$  and consequently the more the interfacial surfaces, the lower the superconducting transition temperature. Magneto-transport measurements reveal that the quasi-multilayers such as  $\text{NY}3[40 \times (75/5)]$  (island-like  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  distributed in  $\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  films) exhibit not only the highest  $T_c$ , but also the best magnetic properties. The critical current density of such a quasi-multilayers can be as high as  $4 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$  under self fields, showing the promising potential application for coated conductors.

**Keywords** :  $\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ , multilayering films, flux pinning, critical current density

**PACC** : 6150C, 7475

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 50672057, 10774098) the Key Science and Technology Project of Shanghai (Grant No. 055211003), the Project Based Personnel Exchange Programme with China and Germany (PPP X Grant No. [2006] 3139), the Shanghai Pujiang Program (Grant No. 5PJ14048) and the Shanghai Leading Academic Discipline Program (Grant No. T0104).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail : cbcai@staff.shu.edu.cn