酸化物超電導薄膜開発の現状

鈴木 実, 榎本 陽一, 村上 敏明

NTT 研究所 茨城県那珂郡東海村 162

(1987 年 12 月 28 日受理)

Present State of Developments in Superconducting Oxide Thin Film Fabrication

Minoru SUZUKI, Youichi ENOMOTO and Toshiaki MURAKAMI

NTT Laboratories, 162 Tokai, Ibaraki 319-11

(Received December 28, 1987)

Synopsis:

The present state of technologies for thin film preparation of high T_c oxide superconductors, $(\text{La}, \text{Sr})_2\text{CuO}_4$ and $\text{Ba}_2\text{YCu}_3\text{O}_{7-y}$, is reviewed with a special attention to the vacuum evaporation and sputtering method. The epitaxial thin film growth is also stated from the point of view of substrate materials. Finally, some anisotropic properties of epitaxially grown $\text{Ba}_2\text{YCu}_3\text{O}_{7-y}$ thin films are remarked.

1. はじめに

1986 年に Bednorz と Müller が La-Ba-Cu-O 系の複合酸化物において、超電導転移温度 T_c が 30 K 以上の高温超電導の可能性を指摘した¹⁾ことが契機となって、 T_c が液体窒素の沸点 (77.3 K) を越える酸化物超電体 $\text{Ba}_2\text{YCu}_3\text{O}_{7-y}$ が発見されるに至った²⁾。この画期的な発見により、従来特殊な用途にしか応用されなかった超電導技術が、電力関係およびエレクトロニクス関係を中心に広く応用される可能性がでてきた。しかしながら、新しい有用な物質が発見されたからといって、それがそのまま応用できることはほとんどない。応用するためには、これを現有の、あるいは新しく開発した技術によって、実際の応用に際して最低限必要な特性を有する形に加工できる材料にまで仕立て上げる必要がある。たとえば、エレクトロニクス面においては、薄膜化が必須になってくるであろう。線材化もその一つである。

本稿ではこれらのなかから、薄膜化について取り上げ、酸化物超電導薄膜開発の現状について概説する。また、今回発見された酸化物超電導体、すなわち $(\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x)_2\text{CuO}_4$ (以下 LSCO) および $\text{Ba}_2\text{YCu}_3\text{O}_{7-y}$ (BYCO) はその特異な結晶構造^{3,4)}のために、

電氣的磁氣的性質が大きな異方性を有する。そのため、薄膜製作技術のなかでも、とくにエピタキシャル成長技術が大きなウェートを占めるようになることが考えられる。そこで、本稿の最後に、現在得られているエピタキシャル成長 BYCO 薄膜の特性を、とくに異方性という立場から紹介する。

2. 薄膜化技術

2.1 材料面からみた薄膜化の問題点

酸化物の薄膜化の例は、半導体やエレクトロニクス関係のごく一部を除けば比較的少なく、ましてや、酸化物超電導体の薄膜化となると、種類の少ないこともあるが、まさにほとんどないといってよい。しかも、今回の酸化物超電導材料は複合酸化物であることから、これらの材料の薄膜化は複雑かつ新たな問題に直面することになる。

薄膜化の基本は、まず薄膜の組成を化学量論比にすることにある。しかしながら、現実には正確に一致させるのはおよそ不可能で、実際には薄膜の組成をいかに化学量論比に近づけるかということが問題になる。そのとき、薄膜化する対象の物質が、組成に固溶領域を有するか否かがポイントになる。もし、ある程度固溶領域が存在すれば、若干の組成ずれがあったと

しても、薄膜組成がその固溶領域の中にある限り薄膜は単一相となり結晶化が容易になる。もしなければ、組成ずれはすべて第二相となり粒界に析出する。このような場合には薄膜は多結晶となり、エピタキシャル成長などは困難をきわめる。多元系になるほど困難になることも容易に類推される。複合酸化物で従来薄膜化されている材料はほとんどすべてこのような固溶組成を有しているといつてよい^{5,6)}。

酸化物超電導体 LSCO と BYCO に話を限れば、前者には La と Sr の比、および (La, Sr) と Cu の比 (Cu のわずかに多い組成) に少し幅があるという固溶組成が存在する。一方、 T_c が 90 K 級の BYCO においては、Ba : Y : Cu = 2 : 1 : 3 以外に存在せず (Y がランタニド族の場合にはこの限りではない)、固溶組成はほとんどないということが知られている。このことを反映して、LSCO では単結晶薄膜さえ得られているが⁷⁾、BYCO の薄膜化はそれほど簡単ではなく、高品質の薄膜を得ることはかなり困難を強いられているようである。

ただし、固溶組成がないということは、いったん化学量論組成が達成できればその薄膜の特性はバルクに近い優れたものとなることを意味する。一方、固溶領域がある場合には、薄膜化は比較的容易なもの、組成の不均一性などのために特性がバルクよりも劣る傾向があるという欠点がある。このことは、作りやすさと特性のよさとの間のトレードオフとして捉えることができる。

2.2 真空蒸着法

2.2.1 EB 法

薄膜化技術としては種々あるが、真空蒸着法、スパッタ法が一般的であり、今回発見された酸化物超電導体の薄膜化に最も広く応用されており、かつこの 2 種類の方法以外ではまだ十分な特性の薄膜が得られていないので、この 2 種類の方法による薄膜化の現状について紹介する。

真空蒸着法を用いる場合は、Ba と Y が高融点の金属であることなどのために、電子ビーム蒸着法 (EB 法) が多く利用されている^{8~11)}。多元ビームの場合はそれぞれのセルからの蒸発量を膜厚計でモニタすることにより組成制御が行われており比較的簡単である。一方、単一ビームの場合には、Ba, Y, Cu を交互に堆積して、それぞれの膜厚の比を一定の割合にすることにより、薄膜全体の組成を制御する方法が利用されている。ただし、この方法は堆積後に熱処理を行って拡

散させ、膜厚方向に組成を均一化する必要がある。そのため、組成制御にも限界があり、高品質の薄膜を得ることは少々困難である。概して、真空蒸着法は、たとえばスパッタ法と比較して、組成制御がしやすい薄膜製法ということができる。

酸化物の薄膜を得るためには、ベルジャーに約 10^{-4} Torr の酸素ガスを導入して酸素雰囲気中で蒸着を行い、一種の反応性をもたせる必要がある。このとき、酸化反応を促進することなどのために、基板温度をある程度高くしておくことが必要とされている。現在までは主として 400°C 前後の基板温度が選ばれている^{8,9,11)}。基板温度が高すぎる場合には、均一な薄膜が堆積しにくいこと、あるいは組成ずれが著しいなどの問題点がある。このような方法による酸素の導入は多量の酸素欠陥を必然的に伴いやすく、導電性の酸化物薄膜を得るためには酸素雰囲気中で再加熱するなどの後処理が必要となる。

以上のようにして得られる薄膜は、そのままでは非晶質か微結晶で構成されており、もちろん超電導は示さずほとんど絶縁体である。超電導性を得るためには酸素雰囲気中約 900°C で熱処理する必要がある。このような方法で得られる薄膜は多結晶薄膜ではある。この方法で抵抗がゼロになる温度 T_c が 80 K を越える薄膜が多くの研究所で得られている。現在までの報告では、ベル研究所から発表された 91 K が最も高い T_c のようである¹¹⁾。

蒸発源として Ba 金属を用いる場合、堆積後の薄膜は非晶質であることと Ba の酸化物がとくに水分に対して非常に不安定であることから、すぐに熱処理しないと劣化してしまう。また、Ba の蒸発源も酸化するため、再現性が悪いなどの問題がある。Mankiewicz ら¹¹⁾はこれを解決し、特性のよい薄膜を再現性よく得る方法として、蒸発源に BaF₂ を用いる方法を開発した。この方法によれば堆積後の薄膜は F を含んでおり、水に対しても安定で湿式のプロセスを通すことも可能である。最終的に熱処理により F を酸素で全部置換することにより、90 K 以上の薄膜が 90 % 以上の再現性で得られるようになったと報告している。多結晶薄膜に関しては、現在この方法で得られる薄膜が最もよい特性を示しているようである。

前述したように、一般に蒸着法では as-deposited で超電導の薄膜を得ることは困難であるが、最近コーネル大学のグループ¹⁰⁾はこれを達成し T_c が約 75 K の薄膜を得ている。この方法のポイントは、基板温度を

約 700°C に加熱しながら酸素分圧を 1×10^{-3} Torr まで高くして蒸着し、かつ蒸着後 300 Torr の酸素をチェンバに導入することである。いままでは高 T_c の薄膜を得るには約 900°C の熱処理が不可欠という説があったが、この結果はそのような高い温度を経由しなくとも高 T_c の薄膜が得られる可能性を示したという点で大変興味深い。

2.2.2 MBE 法

酸化物薄膜形成という点から見れば MBE 法もいまの段階では EB 法と大差がない。方法としては Ba, Cu の蒸発には K セルを使用し、一方、融点の高い Y の蒸発には EB が使用されたりしている¹²⁾。あるいは Y のかわりに Dy が用いられている例もある⁸⁾。堆積時には 1×10^5 Torr 程度の酸素が導入されているが、酸化物薄膜の成長は不十分であったり、基板に SrTiO₃ (100) を使用した場合には Cu (100) の成長などがみられたりしている⁸⁾。超電導薄膜を得るためには 900°C 前後の温度で熱処理する必要がある。この方法で 89K 程度の T_c が得られている。

2.2.3 レーザ蒸着

レーザ蒸着は酸化物ターゲットに大出力のレーザを集光してターゲット物質を蒸発させ薄膜を堆積させる方法である。以前には BaPb_{1-x}Bi_xO₃ の薄膜形成に応用されたことがある¹³⁾。BYCO 薄膜形成では Bell-core のグループがエキシマパルスレーザを使用して成功している¹⁴⁾。ターゲットにはゾルゲル法で製作した高 T_c の BYCO 磁器 (123 組成) を使用し、レーザ照射中はターゲットを回転させている。ターゲット基板間の距離は約 20 mm 程度である。この方法の特徴は、薄膜の堆積がレーザ照射によって形成されたプラズマ中で起こっていることである。したがって、蒸着法ともスパッタ法とも異なる薄膜形成法であり、堆積のメカニズムなど興味深い。また、レーザを使用することから、大気圧中でも原理的には動作可能で、酸化物薄膜形成には今後威力を発揮する可能性も考えられる。現在知られている欠点の一つとしては粉末が基板に付着することなどがあげられている。

現在とはとくに基板温度を上げていないことから、熱処理して超電導性を得ている。この方法で T_c が約 90 K の薄膜が得られている。Y のかわりに、Eu, Gd, Er の入った試料でもほとんど同じ結果が得られている。

2.3 スパッタ法

この方法は複合酸化物の薄膜製作に最もよく用いられている方法であり、酸化物超電導薄膜製作に関して

もスパッタ法による取組みが圧倒的に多く、かつ品質の高い薄膜もこの方法によって得られている。

スパッタターゲットは単一の場合は普通複合酸化物磁器が使用されている^{15~17)}。また、多元ターゲットの場合には Ba, Y, Cu のメタルターゲットが使用されることが多い¹⁸⁾。後者の場合、それぞれのターゲットへの入力電力を調節することによって薄膜の組成制御が行われている。一方、前者の場合には、薄膜の組成が化学量論比になるようにターゲット組成そのものを調節しているのが普通である。

酸化物のターゲットを使用する場合に問題になるのは、負イオンが陰極シースの電界で加速されて基板を衝撃し、再スパッタされて薄膜堆積が阻害されるという負イオン衝撃効果である¹⁹⁾。この効果はスパッタ条件にも大きく依存するが、一般に酸素分圧が高いほど著しいことが知られている¹⁹⁾。その結果として、薄膜の組成ずれが顕著になったり (BYCO の場合には Ba の欠乏が著しくなったり¹⁹⁾)、ときには薄膜がまったく堆積しなかったりすることがある。この効果を極力減らすために、たとえば、雰囲気ガスには純アルゴンを使用し、酸化のための酸素は基板にふきつけるのみにするなどの工夫がなされている^{18,20)}。また、負イオン(ほとんど O⁻である¹⁹⁾)の衝撃効果を避けるために、基板をターゲットの真向いから外れた所に置きかつ斜めまたは垂直に置くような工夫も払われている²¹⁾。

多元ターゲットを使用する場合には、メタルターゲットが使用されることが多いが、金属のバリウムは非常に酸化されやすいため、雰囲気ガスには Ar を使用し、酸化のための酸素ガスは別系統で基板に直接スプレーするという工夫が払われたりしている^{18,20)}。また、その際、薄膜堆積に先立ってターゲット表面の酸化物はプリスパッタによって除去されている。

金属 Ba は水に対しても非常に不安定であるため、ターゲットが大気に露出すると表面に水和物が形成され、薄膜形成の再現性の点で問題がある。これを解決する一方法として、Scheuermann ら²⁰⁾は Ba と Cu および Y と Cu の 1:1 の合金をターゲットとして安定性を高め、二連ターゲットで組成制御を行っている。

スパッタ法においても、400~500°C あるいはそれ以下の基板温度に設定し、まず非晶質か微結晶の化学量論組成の薄膜を堆積させてから、熱処理して超電導薄膜を得るという手法もとられている^{17,18,20,22)}。しかし、後に述べるエピタキシャル成長(現在までのところ

マグネトロンスパッタ法でのみ達成されている) の場合のように直接結晶性の薄膜を堆積させるには約 600 °C 以上の基板温度が必要である。真空蒸着法の場合には堆積時の圧力が 10^{-4} Torr 程度であるため、たんに基板温度を上げるだけでは酸化物薄膜の結晶性は不十分でかつ酸素欠陥が多くとり込まれ、超電導薄膜を得ることはかなり困難であるが、スパッタ法の場合、 10^{-1} Torr の雰囲気圧力でも十分薄膜堆積が可能であり、酸素欠陥の量も少なくなることから、熱処理を施さなくとも超電導を示す薄膜を得ることが可能である^{7,15,16,23,24)}。このようなスパッタ法による薄膜形成に用いられるターゲットは現在までのところ複合酸化物磁器だけである。

上記のように、複合酸化物磁器をターゲットとし、基板温度を 600°C 以上に上げて LSCO および BYCO の薄膜を形成する場合の特徴は、薄膜から比較的多量の Cu が欠乏しやすいことである。そのため単一のターゲットの場合には LSCO の場合で約 20%, BYCO の場合で約 50% ターゲット中の Cu を過剰にしているか、あるいはターゲットの一部を金属の Cu で覆うなどして不足する Cu を補償している²³⁾。あるいはまた、2 連ターゲットにして一方を金属の Cu にすることにより補償する方法もとられている²⁴⁾。

BYCO 薄膜では基板温度を 600~700°C にすることによって結晶性の薄膜が得られるが、そのままでは T_c は低いか、あるいは半導体である。80 K 以上の高 T_c 薄膜を実現するには現在のところ約 900°C 程度の温度で熱処理する必要がある。ただし、このような高温で熱処理すると薄膜表面の平坦性が悪くなるため、デバイス応用の観点からは好ましくない。そのため熱処理温度を低くするか、あるいは as-deposited で高 T_c の薄膜を得ることが好ましい。as-deposited 薄膜で得られている T_c は現在のところ 80 K まで達しているが^{16,23,24)}、熱処理を施したものにはまだ劣るようである。

2.4 基板材料

触れるのが後まわしになったが、薄膜形成の上で基板材料は非常に重要な役割を占める。とくに高 T_c の酸化物超電導材料では高温処理が現在のところ不可欠のために、薄膜と反応しない材料が要求される。また次節に述べるエピタキシャル成長の場合には上のような化学的な安定性ととともに、基板材料の結晶構造および格子定数の適当なものが要求される。多くの材料のなかから適切な基板を選びだすことが薄膜製作上の一つのポイントともなる。

現在まで検討されているおもな基板材料を Table 1 に示す。Si は 600°C 以上で薄膜との反応が著しいため基板材料には適していない。サファイア (α - Al_2O_3) は当初反応のため特性が悪かったが、最近では熱処理の工夫 (rapid thermal annealing)¹⁰⁾ などにより、80 K 以上の T_c を有する薄膜も得られるようになった^{10,20,23,24)}。ただし、特性はまだ十分満足できるものではない。現在までのところ比較的良好な特性をもたらしてきている基板材料は YSZ (yttria stabilized zirconia— ZrO_2)、MgO および SrTiO_3 である。とくに、 SrTiO_3 は結晶構造が高温超電導体とほぼ同じペロブスカイト構造を有していること、ならびに格子定数が近いことのために最もよい特性を実現している。 SrTiO_3 はペロブスカイト型の酸化物超電導体 $\text{BaPb}_{1-x}\text{Bi}_x\text{O}_3$ の単結晶薄膜を成長させるときの基板としても用いられており⁹⁾、高 T_c 超電導体でもエピタキシャル成長に用いられている^{7,15,16)}。

2.5 エピタキシャル成長

適当な単結晶基板を使用し、かつ基板温度をある程度高くすることで、LSCO および BYCO 薄膜のエピタキシャル成長が可能であることがわかってきた^{7,15,16)}。このような方法とは別に、単結晶基板上に非晶質薄膜を堆積させ、その後熱処理して得られる高配向多結晶薄膜をエピタキシャル薄膜または多結晶エピタキシャル薄膜と主張している場合もある。これは

Table 1 Substrate materials.

Material	Crystal structure	Lattice constant (Å)	Remarks
Si	diamond structure	$a = 5.430$	reactive
α - Al_2O_3	hexagonal	$a = 4.76, c = 12.95$	reactive
BaF_2	fluorite structure	$a = 6.20$	
MgO	rocksalt structure	$a = 4.213$	less reactive
ZrO_2 (YSZ)	fluorite structure	$a = 5.140$	less reactive
SrTiO_3	perovskite structure	$a = 3.905$	less reactive

固相エピタキシャル成長の範囲に入るのかもしれないが、薄膜はモザイク状の多結晶であり結晶性も十分ではなく、本来のエピタキシャル成長とは異なるのでここでは触れない。

現在までのところ、エピタキシャル成長の達成されている方法はマグネトロンスパッタ法のみである。真空蒸着法ではまだ成功していないようである。使用されている単結晶基板は SrTiO_3 あるいは MgO である。とくに SrTiO_3 は酸化物超電導体と同じペロブスカイト構造を有し、かつ格子定数がほとんど同じ (BYCO の場合 a 軸で 0.6 %, b 軸で 2 %, c 軸の $\frac{1}{3}$ で 0.2 % のミスマッチ) ことから、現在最も特性の優れた薄膜の得られる基板材料である。

エピタキシャル成長では熱処理を施さなくとも超電導性の薄膜が得られる。ただし、 T_c は LSCO の場合約 15 K, BYCO の場合には 40~60 K と低く転移幅も広いために高 T_c 薄膜を得るためには依然として熱処理が必要である。ただ $\text{Ba}_2\text{ErCu}_3\text{O}_{7-y}$ のエピタキシャル成長では as-deposited で 80 K の薄膜が得られており¹⁶⁾ ($\text{Ba}_2\text{YCu}_3\text{O}_{7-y}$ では多結晶であるが as-deposited で 80 K¹⁷⁾), 今後スパッタ条件を詳細に検討することで特性が向上する可能性は残されている。

3. BYCO エピタキシャル薄膜の特性

BYCO は酸素欠損三層ペロブスカイト構造を有することから電気的磁気的性質が大きな異方性を有する。本章では、われわれが得た BYCO エピタキシャル薄膜の異方性について紹介する¹⁵⁾。

薄膜製作には単一ターゲットの高周波マグネトロンスパッタ法を使用している。薄膜組成を化学量論組成

にするため、Cu が薄膜から欠乏しやすいことを考慮してターゲットは Cu を 1.5 倍の組成にした焼結磁器である。雰囲気ガスには Ar と酸素 (50 %) の混合ガスを使用し、スパッタ圧力 8×10^{-2} Torr, 陽極電圧 1.4 kV, 基板温度 600~700°C の条件で薄膜成長させる。as-deposited の薄膜は T_c が 40~60 K と低いため酸素雰囲気中約 900°C で 2 時間熱処理を施し 80 K 以上の T_c を得ている。

SrTiO_3 (110) 面上に成長した BYCO エピタキシャル薄膜の X 線回折図形を Fig. 1 に示す。得られた薄膜の RHEED のパターンには、電子ビームを [110] 方向から入射したときに三層の周期構造を示す規則正しいスポットが観察され、BYCO の (110) 面がエピタキシャル成長していることがわかる。

このエピタキシャル薄膜の面内には [110] 方向 (Cu-O 面内) と [001] 方向の互いに直交する二つの結晶方位が存在し、 c 軸と a - b 軸の間の異方性を測

Fig. 2 Temperature dependence of resistivity along the [110] direction for a BYCO film annealed at 920°C for 2 h in an oxygen flow.

Fig. 1 X-ray diffraction pattern for a BYCO thin film epitaxially grown on SrTiO_3 (110) substrate.

Fig. 3 Temperature dependence of resistivity along the c -axis for the same film in Fig. 2.

定することができる。Fig. 2 および Fig. 3 はそれぞれ $[110]$ と $[001]$ 方向の抵抗率温度依存性を示す。抵抗率の異方性は 100 K で 34 あり、温度の上昇とともに減少し 300 K で約 17 となる。 $[110]$ 方向では金属的な温度依存性を示すが、 $[001]$ 方向ではほとんど平坦な特性を示し、両方向における電気伝導の違いを示唆している。これらの特性は BYCO における電子構造の二次元性を反映したものである。

Fig. 4 Temperature dependence of critical current density parallel to the basal plane.

Fig. 5 Temperature dependence of critical current density perpendicular to the basal plane. Solid line shows the relation between Josephson current and temperature given by Ambegaokar and Baratoff.

応用上重要な性質である臨界電流 J_c にも大きな異方性がみられる。Fig. 4 および Fig. 5 はそれぞれ $[110]$ および $[001]$ 方向の J_c の温度依存性である。 J_c の測定は線幅 $13\mu\text{m}$ (実測値) のパタンを形成し、 $I-V$ 特性を測定することにより行われた。 c

軸方向の J_c は予想どおり小さく、液体窒素の沸点 77.3 K でたかだか $5 \times 10^3 \text{ A/cm}^2$ にすぎない。しかも $I-V$ 特性上には粒界ジョセフソン接合の特性が観察され、さらに温度依存性はトンネル型ジョセフソン電流の特性とほぼ合致する。このことは c 軸方向では、CuO 面に平行なジョセフソン接合が形成されていることを示す。 c 軸方向のコヒーレンス長は約 0.4 nm と非常に短く、かつ c 軸方向には積層欠陥などの面欠陥が生じやすく、これらのことがジョセフソン接合形成の原因として考えられる。

一方、Cu-O 面内の J_c は c 軸方向に比較して約 2 桁大きく J_c にも大きな異方性が存在することがわかる。77.3 K における値は $1.8 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$ と各種の応用に十分な値を有している。BYCO 発見の当初、磁器試料を用いて測定された小さな J_c の結果はこの異方性によるものであることが以上の結果から明らかであろう。今後この酸化物超電導材料を応用する際にはこれらの異方性を十分考慮に入れ、結晶方位を揃えるような技術を開発することが重要と考えられる。その意味でもエピタキシャル技術は重要なポイントである。

4. まとめと今後の課題

しばらく前までは高 T_c 薄膜の膜厚は約 $1\mu\text{m}$ とエレクトロニクスへの応用を考えるには非常に厚いものであったが、最近になって約 $1,000 \text{ \AA}$ でも T_c が 80 K を越える薄膜が得られつつあるようである。高 T_c を得るには約 900°C の高温で熱処理することがまだ必要とされているが、これも応用に際して一つの障害になると考えられる。やはり、 400°C 以下の基板温度で薄膜を堆積して、熱処理なしに高 T_c を実現できるようにするのが今後の課題となろう。さらにまた基板材料も現在の SrTiO_3 からもう少し廉価で面積の広い材料も使用可能にしたいところである。

参考文献

- 1) J. G. Bednorz and K. A. Müller: Z. Phys. **B64** (1986) 189
- 2) M. K. Wu, J. R. Ashburn, C. J. Trong, P. H. Hor, R. L. Meng, L. Gao, Z. J. Huang, Y. Q. Wang and C. W. Chu: Phys. Rev. Lett. **58** (1987) 908
- 3) H. Takagi, S. Uchida, K. Kitazawa and S. Tanaka: Jpn. J. Appl. Phys. **26** (1987) L123
- 4) F. Izumi, H. Asano, E. Takayama-Muro

- machi, Y. Uchida, N. Watanabe and T. Nishizaki: Jpn. J. Appl. Phys. **26** (1987) L649
- 5) M. Ishida, S. Tsuji, K. Kimura, H. Matsunami and T. Tanaka: J. Cryst. Growth **45** (1978) 393
 - 6) M. Suzuki and T. Murakami: J. Appl. Phys. **56** (1984) 2330
 - 7) M. Suzuki and T. Murakami: Jpn. J. Appl. Phys. **26** (1987) L524
 - 8) A. Kapitulnik, B. Oh, M. Naito, K. Char, A. D. Kent, N. Missert, E. Hellman, S. Arnason, J.W.P. Hsu, M.R. Hahn, P. Rosenthal, R. Barton, M.R. Beasley, T. H. Geballe and R.H. Hammond: Proc. of "High T_c Superconductors" ICTP, Trieste, Italy, World Scientific Publishing Co. Inc., Singapore, July (1987)
 - 9) P. Chaudhari, R.H. Koch, R.B. Raibowitz, T.R. McGuire and R.J. Gambino: Phys. Rev. Lett. **58** (1987) 2684
 - 10) D. K. Lathrop, S. E. Russek and R. A. Buhrman: Appl. Phys. Lett. **51** (1987) 1554
 - 11) R.M. Mankiewich, J.H. Scofield, W. J. Scocpol, R.E. Howard, A.H. Dayem and E. Good.: Appl. Phys. Lett. **51** (1987) 1753
 - 12) J. Kwo, T. C. Hsieh, R. M. Fleming, M. Hong, S.H. Liou, B.A. Davidson and L. C. Feldman: Phys. Rev. **B 36** (1987) 4039
 - 13) S. V. Zaitsev-Zotov, A. N. Martynuk and E. A. Protasov: Sov. Phys. Solid State **25** (1983) 184
 - 14) T. Venkatesan: Talk at the American Vacuum Society Symposium on High, T_c Superconducting Thin Films, AT & T Bell Laboratories, November (1987)
 - 15) Y. Enomoto, T. Murakami, M. Suzuki and K. Moriwaki: Jpn. J. Appl. Phys. **26** (1987) L1248
 - 16) H. Adachi, K. Setsune and K. Wasa: Proc. 18th Int. Conf. on Low Temperature Physics, Kyoto (1987) 1139
 - 17) M. Kawasaki, S. Magata, Y. Sata, M. Funabashi, T. Hasegawa, K. Kishio, K. Kitazawa, K. Fueki and H. Koinuma: Jpn. J. Appl. Phys. **26** (1987) L738
 - 18) K. Char, A.D. Kent, A. Kapitulnik, M.R. Beasley and T.H. Geballe: Appl. Phys. Lett. **51** (1987) 1370
 - 19) S.M. Rossnagel and J.J. Cuomo: to be published in J. Vac. Sci. Tech.
 - 20) M. Scheuermann, C. C. Chi, C. C. Tsuei, D.S. Yee, J.J. Cuomo, R. B. Laibowitz, R. Koch, B. Braren, R. Srinivasan and M.M. Plechaty: Appl. Phys. Lett. **51** (1987) 1951
 - 21) R.L. Sandstrom, T.R. Dinger, W.J. Gallagher, R. B. Laibowitz and R.J. Gambino: to be published in J. Vac. Sci. Tech.
 - 22) M. Hong, S.H. Liou, J. Kwo and B.A. Davidson: Appl. Phys. Lett. **51** (1987) 694
 - 23) O. Michikami, H. Asano, Y. Katoh, S. Kubo and K. Tanabe: Jpn. J. Appl. Phys. **26** (1987) L1199
 - 24) H. Asano, K. Tanabe, Y. Katoh, S. Kubo and O. Michikami: Jpn. J. Appl. Phys. **26** (1987) L1221