CVD-酸化物高温超伝導膜の最近の研究

山根久典* 平井敏雄**

1. はじめに

化学気相析出法(CVD)によるY-Ba-Cu-O(YBCO)高温超伝導体の作製が最初に報告されてから2年が過ぎ、YBCO系をはじめBi-Sr-Ca-Cu-O(BSCCO)系やTl-Ba-Ca-Cu-O(TBCCO)系の酸化物高温超伝導膜のCVD合成やCVD膜の特性および応用の研究が幅広く行われるようになった。

筆者らは、昨年(1989年)9月にCVD酸化物高温超伝導膜に関する研究をまとめて解説した⁽¹⁾。その後、CVDの特長である成膜の高速化や大面積化などに関する報告がなされ、プラズマCVDによる析出温度の低温化やYBa₂Cu₃O_y(124相)の合成などが発表された。また、透過型電子顕微鏡によるCVD膜の組織観察も進められている。

そこで本稿では、有機金属錯体を主なCVD原料とするCVD酸化物高温超伝導膜の作製と超伝導特性に関する最近の研究を紹介する。

2. CVD-YBCO膜

(1) 成膜の高速化と大面積化

Lackeyらは、Y(thd)₃, Ba(thd)₂およびCu(thd)₂(thd: 2,2,6,6-tetramethyl-3,5-heptanedionate, C₁₁H₁₉O₂)のβ-ジケトン錯体の混合粉末を振動粉末導入装置を用いて粉末のままCVD炉内に送り込み、CVD炉内の熱により基板到達前に混合粉末をガス化させてCVDを行った。その結果、最大67 nm/sの析出速度が達成された⁽²⁾。MgO単結晶基板を使用し析出温度1148 Kで、電気抵抗がゼロとなる超伝導転移温度($T_c(R=0)$)が84 Kの膜が得られてい

る。気化室で蒸発させた原料をキャリアーガスを用いてCVD炉内に導入する一般的なCVDでは、析出速度が早いもので約8 nm/sであったことから⁽³⁾、成膜速度が約一倍向上されたことになる。

成膜の大面積化の例として、2000 s⁻¹で回転する直径127 mmの基板保持台を備えることにより一度に多数の基板上へYBCO膜が作製できることが、Nohらにより報告された⁽⁴⁾。析出温度773 Kで得られた厚さ約1 μmの膜を、後に1253 Kで熱処理することによりSrTiO₃(100)基板上に $T_c(R=0)$ が88 Kの膜が合成されている。

(2) 析出温度

図1にBormannとNoltingが電気化学的な方法で測定した相境界⁽⁵⁾を、物理蒸着法における成膜時の析出温度と酸素分圧のいくつかの例⁽⁶⁾⁻⁽⁸⁾とともに示す。物理蒸着法では、高 T_c で臨界電流密度(J_c)の高い膜が作製される酸素分圧と析出温度が、YBa₂Cu₃O_y(123相)がCu₂OとBaCuO₂およびY₂BaCuO₅の3相に分解する温度と酸素分圧⁽⁵⁾に近い場合が多い。

著者らがホットウォール型CVD炉を用い酸素分圧470 Paの条件で析出温度を873 Kから1173 Kに変化させて成膜を行ったところ、最も優れた特性

図1 123相の安定温度酸素分圧⁽⁵⁾と高 T_c - J_c YBCO膜の析出条件⁽⁶⁾⁻⁽¹⁴⁾。

* 東北大学助手; 金属材料研究所

** 東北大学教授; 金属材料研究所

Recent Investigation of CVD-Superconducting Oxide Films; Hisanori Yamane, Toshio Hirai (Institute for Materials Research, Tohoku University, Sendai)

Keywords: chemical vapor deposition, beta-diketone metal chelates, superconducting oxide films, yttrium-barium-copper-oxygen, bismuth-strontium-calcium-copper-oxygen, thallium-barium-calcium-copper-oxygen, critical current density in magnetic field, electron microscopy observation, single crystal and polycrystal substrates, device application
1990年6月1日受理

($T_c(R=0) > 90$ K, $J_c(77$ K, 0 T) $> 1 \times 10^{10}$ A/m²)

を示した膜は、析出温度 1123 K で得られた⁽⁹⁾⁻⁽¹¹⁾。この条件は、図 1 に示すように Bormann と Nolting が報告した相境界線の延長上にある。

Kanehori らは、ホットウォール型 CVD 装置で析出温度を 973 K と一定とし、炉内全圧力を 1300 Pa から 200 Pa へ減少させることにより、 $T_c(R=0)$ が 66 K から 83 K へ向上することを報告した⁽¹²⁾。このときの酸素分圧は 530 Pa から 80 Pa であった。図 1 にこれらの条件をプロットすると、境界線の条件に近づくにつれて特性が向上していることがわかる。

このようにホットウォール型炉を用いた CVD による高 T_c 高 J_c YBCO 膜の合成条件も物理蒸着法で高 T_c で高 J_c の膜が得られる条件と同様、相境界に近いところにあるのではないと思われる。

最近、Kanehori らは CVD にプラズマを導入することにより析出温度の低温化に成功した⁽¹³⁾。彼らは ECR プラズマ CVD 装置を用い、酸素分圧 4.6 Pa、マイクロ波出力 200 W の条件で、析出温度 788 K の場合 $T_c(R=0) = 60$ K の、また 853 K では $T_c(R=0) = 85$ K の YBCO 膜を作製した。析出温度 853 K で合成された膜では、77 K, 0 T で 1.0×10^9 A/m² の J_c が測定された。プラズマがない場合には、 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (123 相) は得られず、超伝導特性も見られなかった。

この方法では、酸素だけがプラズマ室でプラズマ化され、原料ガスはプラズマ室の外側から直接基板に吹き付けられている。また、雰囲気圧力が 40 Pa と高いことから、ECR プラズマ状態になっているかどうかは明らかではない。

このプラズマ CVD における析出温度と酸素分圧の条件は図 1 に示した相境界からは外れている。しかし、プラズマにより活性化された酸素を用いた反応性蒸着の成膜条件⁽¹⁴⁾に近くなっている。このことは、プラズマ活性酸素の存在が、熱平衡に近い成膜過程に比べ高 T_c 膜の析出温度の低下をもたらしていると考えられる。

(3) 124 相の合成

$\text{YBa}_2\text{Cu}_4\text{O}_y$ (124 相) は、最初、物理蒸着法により作製されたアモルファスの膜を 0.1 MPa の酸素下でアニールすることにより合成された⁽¹⁵⁾。124 相は 123 相と異なり 1070 K 付近まで結晶構造が変化せず、Y の一部を Ca で置き換えることにより T_c が 80 K から 90 K に上昇することが報告されている⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾。

Hayashi らは、コールドウォール型の CVD 炉を用い 1023, 1073, 1123 K の析出温度で膜を合成した結果、MgO(100) 基板上に 1073 K で作製した膜の X 線回折パターンにおいて図 2 に示すように 123 相のピークの外に $c = 2.7247$ nm の 124 相の (00 l) 回折ピークを観察した⁽¹⁸⁾。彼らは、124 相が 1073 K 以外の温度で得られなかった理

図 2 124 相を含む CVD-YBCO 膜の X 線回折パターン⁽¹⁸⁾。

由として、1023 K は 124 相の生成には温度が低すぎることと 1123 K では CuO と 123 相に分解することを挙げている。

(4) SrTiO_3 単結晶基板上的膜の微細構造と J_c

SrTiO_3 単結晶基板に作製された CVD 膜の膜面に垂直方向から撮影した透過型電子顕微鏡写真を図 3 に示す。

図 3 CVD-YBCO 膜の透過型電子顕微鏡像。歪ミコントラストと a-b 面に介在している析出物を示す。(a) は c 軸方向、(b) は a 軸方向からの写真⁽¹⁹⁾。

図 3(a)は膜のマトリックスを構成する c 軸配向した123相の写真で、内部に大きさ約 25 nm の歪コントラストが多数観察される⁽¹⁹⁾。

図 3(b)の写真は膜内に含まれる c 軸が基板に平行に配向(おそらく a 軸配向)した123相の粒の部分で、図 3(a)でみられる歪みコントラストの大きさとほぼ同じ長さの板状の析出物(厚さ数 nm)が a - b 面内に取り込まれていることがわかる。この析出物が何であるかは現時点では明らかではないが、高 J_c の膜が $Y:Ba:Cu=1:2:3$ 組成よりも Cu 成分過剰であることと⁽²⁰⁾、析出部分のコントラストが明るいことなどから、著者らはこの析出物が CuO 過剰成分に関連したものではないかと想像している。

c 軸配向の部分で見られる歪みコントラストと a - b 面内にみられる析出物の関係についても現在研究中であるが、歪みコントラストが a - b 面内に見られる析出物によりもたらされたものと仮定すると、径が約 25 nm、厚さ数 nm の円盤状析出物が膜内に存在することになる。

Watanabe らは、この析出物の大きさと分布をもとにして計算を行い、この膜が 77 K、16 T の磁場中においても 1.0×10^9 A/m² の J_c を持つことを理論的に示した⁽¹⁹⁾。

図 4 には、 c 軸配向を主とする CVD 膜の各磁場方向における J_c の磁場依存性を 77 K で測定した一例を示す⁽²¹⁾。磁場の方向が膜面に平行の場合には 10 T 以上の磁場下においても J_c の低下が少ないのに対し、磁場の方向が膜面に垂直の場合には 3 T で降急激に J_c が減少した。

CVD-YBCO 膜について J_c の磁場方向の角度依存性を測定したところ、図 5 に示すように J_c の値に大きな異方性がみられた⁽²¹⁾。これと類似した J_c の磁場方向の角度依存性は、レーザー蒸着法で作製された YBCO 膜について既

図 4 各磁場方向における CVD-YBCO 膜の J_c - B 特性⁽²¹⁾。

図 5 CVD-YBCO 膜の 77 K における J_c と磁場方向 θ との関係⁽²¹⁾。

に報告されている⁽²²⁾。 J_c は磁場が膜面に平行な方向 ($\theta=90^\circ$) からずれるに従って急激に減少する。Tachiki らは真性ピンと双晶面の 2 つのピンセンターを仮定して J_c の磁場方向の角度依存性を説明した⁽²³⁾。CVD 膜における J_c の異方性も、先に示した析出物の他に真性ピンや双晶面などによるピン機構の観点から詳細な測定と検討を行う必要がある。

(5) 多結晶基板上への成膜と超伝導特性

CVD-YBCO 膜を線材へ応用するためには、長尺化の可能な多結晶セラミックス基板や金属基板上へ成膜する必要がある。著者らのグループは析出温度 1123 K で Y_2O_3 安定化 ZrO_2 (YSZ) 多結晶基板上に T_c ($R=0$) が 89 K の膜を作製した⁽²⁴⁾。この膜の J_c は 77 K、0 T で 8.0×10^7 A/m² で、 $SrTiO_3$ (100) 単結晶基板上に作製された膜の J_c に比べると 2 桁小さい値であった。この YSZ 多結晶基板上に作製された膜は c 軸配向していることから、基板の形状などを工夫することにより a - b 軸方向の配列を揃えることができれば J_c の値が向上する可能性がある。

金属基板上に膜が作製された例としては、Yamaguchi らの報告がある⁽³⁾。彼らは、ハステロイ基板上に T_c ($R=0$) が 81 K の膜を、また、多結晶の $SrTiO_3$ をバッファ層とした場合には T_c ($R=0$) = 84 K で 77 K、0 T での J_c が 8.0×10^5 A/m² の膜を得ている⁽²⁵⁾。

(6) 素子への応用と膜組織

MgO (100) 単結晶基板上に得られた厚さ約 1 μ m の CVD-YBCO 膜について、ケミカルエッチングにより幅 1 μ m、長さ 1 μ m に加工されたブリッジ部の電磁波応答特性が研究されている⁽²⁶⁾。減圧液体窒素により 57 K に冷却されたブリッジに周波数 101 GHz のミリ波を照射することにより、200 μ V 幅のステップが 6 次まで観察され、ステップ電圧の最大値は約 1.2 mV であった。このことからミリボルト付近の基準電圧としての応用が検討されている。

また、同じケミカルエッチング技術により直流超伝導量

子干渉計(dc-SQUID)も作製された。4.2 K では従来の金属超伝導体で作製された素子に匹敵する特性が得られており、60 K においても作動することが確認された⁽²⁷⁾⁽²⁸⁾。

ブリッジ部の電子顕微鏡観察の結果、MgO 基板上に作製された膜は c 軸配向した123相の約 0.5 μm の粒より構成され、それらの粒が数度以内の小角粒界で接していることが明らかにされた⁽²⁹⁾。膜内に存在する小角粒界がジョセフソン接合となって、電磁波特性や量子干渉効果がもたらされていると考えられている。

3. CVD-BSCCO 膜と TBCCO 膜

BSCCO 膜の CVD では、析出時の炉内圧力は、Berry らの大気圧の条件⁽³⁰⁾を除けば、6.7 kPa 以下の減圧下で成膜が行われている。大きく分けて 770~870 K 前後で析出後、1073~1173 K で熱処理を行う方法⁽³⁰⁾⁻⁽³²⁾と、基板温度を 1023~1163 K として直接超伝導相を析出させる方法⁽³³⁾⁻⁽³⁶⁾の 2 種類が報告されている。これらの膜の基板には MgO(100)単結晶が用いられている。

得られた膜は、いずれの方法においても c 軸が基板に垂直に配向した T_c が 80 K の $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ ($c=3.0$ nm ; 2212相)、もしくは2212相に T_c が 110 K の $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ ($c=3.7$ nm ; 2223相)が混在するもので、さらにその他の BSCCO 系内の化合物を含むことがある。これらの膜について報告されている T_c は、オンセットで 110 K 付近を示すものが得られているが、抵抗がゼロとなる温度はいずれも 70~80 K 程度である。

最近、Endo らはキャリアガス流量などを変化させることにより、Bi : Sr : Ca : Cu = 2.00 : 2.11 : 1.91 : 3.98 の組成を有する膜を 1073 K で合成した⁽³⁷⁾。この膜は、X 線回折パターンでは2223相単相であったが、 $T_c(R=0)$ は 74 K であった。

酸化ガスとして O_2 に H_2O を加えて反応を活性化することも試みられている⁽³¹⁾。また、Zhang らは酸化ガスとして N_2O を使用し、析出温度 898 K で BSCCO 膜の合成を報告した⁽³⁸⁾。彼らは、銀基板を用い酸素気流中 1138 K で熱処理することにより、 T_c オンセットが 80 K で c 軸配向した2212相の膜を得ている。5.5 K において磁化率から見積られたこの膜の J_c の値は 3.9×10^9 A/m² であった。

Kobayashi らは、r.f. プラズマを用いることにより $\text{Bi}(\text{phy})_3$ の分解を促進し、基板温度 923 K で SrTiO_3 (100) 基板上に c 軸配向の2212相を合成した⁽³⁹⁾。炉内全圧力 100 Pa で作製された膜の T_c (オンセット)は 60 K であった。

BSCCO 膜に鉛を添加して高 T_c 相の形成や超伝導特性の向上をめざした研究も行われている⁽⁴⁰⁾。鉛の原料に、テトラフェニル鉛($\text{Pb}(\text{C}_6\text{H}_5)_4$)を用い CVD で BSCCO 相と PbO 相の多層膜を作製後、熱処理を行うことにより BSCCO 膜に鉛が添加された。得られた結晶相の大部分は

c 軸配向の2212相で高 T_c の2223相がわずかに含まれていた。この膜の T_c (オンセット)は 110 K で、 $T_c(R=0)$ は 80 K 程度であった。

ハライドを原料とする CVD-BSCCO 膜では、98 K で抵抗がゼロとなることが既に報告されている⁽⁴¹⁾。これに対し β -ジケトン金属錯体を主な原料とする CVD-BSCCO 膜では、 $T_c(R=0)$ が 100 K 付近の膜が得られていない。この違いが何に起因しているのかは現在のところ明らかでない。

Tl 系の CVD では、構成金属をすべて β -ジケトン錯体で供給する方法⁽⁴²⁾と、Ba, Ca, Cu を β -ジケトン錯体で供給し、Tl 源に $\text{Tl}(\text{C}_5\text{H}_5)$ を用いる方法が報告されている⁽⁴³⁾。また、CVD で Ba-Ca-Cu-O 膜を作製し、Tl-Ba-Ca-Cu-O を Tl 源とする気相拡散法で Tl を供給する方法⁽⁴³⁾や、物理蒸着法で Ba-Ca-Cu-O 膜を作製後 $\text{Tl}(\text{C}_5\text{H}_5)$ を原料とする CVD で Tl を析出させ Tl 系超伝導膜を作製する方法⁽⁴⁴⁾も行われている。

Tl 系の膜では $T_c(R=0)$ が 94 K から 104 K の値が報告されているが、現在のところ J_c の値は報告されていない。

4. お わ り に

以上のように CVD-YBCO 膜がナノ・メートルサイズの微細分散層を含むナノ・コンポジットや数多くの要素を分散相とするファイナ・コンポジット⁽⁴⁵⁾であることが最近の研究により明らかにされてきた。今後、分散相の構造解析や制御によるピンニング機構の解明や配向制御による磁場中での J_c の異方性緩和などが期待される。

また、セラミックス間やセラミックスと金属の接合技術や、最近注目されている傾斜機能材料の概念⁽⁴⁶⁾を適用することにより、CVD 膜の超伝導線材への応用に不可欠な多結晶セラミックスや金属基板上への成膜と特性向上も期待される。

文 献

- (1) 平井敏雄, 山根久典: 応用物理, **59**(1990), 134.
- (2) W. J. Lackey, W. B. Carter, J. A. Hanigofsky, D. N. Hill, E. K. Barefield, G. Neumeier, D. F. O'Brien, M. J. Shapiro, J. R. Thompson, A. J. Green, T. S. Moss, R. A. Jake and K. R. Efferson: Appl. Phys. Lett., **56**(1990), 1175.
- (3) T. Yamaguchi, S. Aoki, N. Sadakata, O. Kohno and H. Osanai: Appl. Phys. Lett., **55**(1989), 1581.
- (4) D. W. Noh, B. Gallois, C. S. Chern, R. Caracciolo, B. H. Kear, P. A. Zawadzki, G. S. Tompa and P. E. Norris: J. Appl. Phys., **66**(1989), 5099.
- (5) R. Bormann and J. Nolting: Appl. Phys. Lett., **54**(1989), 2148.
- (6) X. X. Xi, G. Linker, O. Meyer, E. Nold, B. Obst, F. Ratzel, R. Smithey, B. Strehlau, F. Weschenfelder and J. Geerk: Z. Phys. B, **74**(1989), 13.
- (7) B. Roas, L. Schultz and G. Endres: Appl. Phys. Lett., **53**(1988), 1557.

- (8) A. Inam, M. S. Hegde, X. D. Wu, T. Venkatesan, P. England, P. F. Miceli, E. W. Chase, C. C. Chang, J. M. Tarascon and J. B. Wachtman: Appl. Phys. Lett., **53**(1988), 908.
- (9) H. Yamane, H. Masumoto, T. Hirai, H. Iwasaki, K. Watanabe, N. Kobayashi, Y. Muto and H. Kurosawa: Appl. Phys. Lett., **53**(1988), 1548.
- (10) H. Yamane, H. Kurosawa, T. Hirai, K. Watanabe, H. Iwasaki and Y. Muto: Supercond. Sci. Technol., **2**(1989), 115.
- (11) H. Yamane, H. Kurosawa, T. Hirai, K. Watanabe, H. Iwasaki, N. Kobayashi and Y. Muto: J. Cryst. Growth, **98**(1989), 860.
- (12) K. Kanehori, N. Sugii, T. Fukazawa and K. Miyauchi: Thin Solid Films, **182**(1989), 265.
- (13) K. Kanehori, N. Sugii and K. Miyauchi: Proc. MRS 1989 Fall Meeting, in press.
- (14) T. Terashima, K. Iijima, K. Yamamoto, Y. Bando and H. Mazaki: Jpn. J. Appl. Phys., **27**(1988), L91.
- (15) K. Char, M. Lee, R. W. Barton, A. F. Marshall, I. Bozovic, R. H. Hammond, M. R. Beasley, T. H. Geballe, A. Kapitulnik and S. S. Laderman: Phys. Rev. B, **38**(1988), 834.
- (16) J. Karpinski, E. Kaldis, E. Jilek, S. Rusiecki and B. Bucher: Nature, **336**(1988), 660.
- (17) T. Miyatake, S. Gotoh, N. Koshizuka and S. Tanaka: Nature, **341**(1989), 41.
- (18) H. Hayashi, T. Sugimoto, K. Kikuchi, S. Yuha, Y. Yamada, M. Yoshida, K. Sugawara and Y. Shinohara: Proc. 2nd Int. Symp. on Superconductivity (ISS'89), Tsukuba, Springer-Verlag Tokyo, (1989), 431.
- (19) K. Watanabe, T. Matsushita, N. Kobayashi, H. Kawabe, E. Aoyagi, K. Hiraga, H. Yamane, H. Kurosawa, T. Hirai and Y. Muto: Appl. Phys. Lett., **56**(1990), 1490.
- (20) H. Yamane, T. Hirai, H. Kurosawa, A. Suhara, K. Watanabe, N. Kobayashi, H. Iwasaki, E. Aoyagi, K. Hiraga and Y. Muto: Proc. 2nd Int. Symp. on Superconductivity (ISS'89), Tsukuba, Springer-Verlag Tokyo, (1989), 767.
- (21) K. Watanabe, N. Kobayashi, H. Yamane, T. Hirai, Y. Muto, H. Kawabe and H. Kurosawa: Proc. ICMC '90 Topical Conference, Garmisch-Partenkirchen, (1990), 767.
- (22) B. Roas, L. Shultz and G. Saemann-Ischenko: Phys. Rev. Lett., **64**(1990), 479.
- (23) M. Tachiki and S. Takahashi: Solid State Commun., **72**(1989), 1083.
- (24) 黒沢秀行, 山根久典, 平井敏雄, 岩崎秀夫, 渡辺和雄, 小林典男, 武藤芳雄: 日本金属学会春期講演概要, (1990), 163.
- (25) S. Aoki, T. Yamaguchi, N. Sadakata, A. Kagawa and O. Kohno: Proc. 2nd Int. Symp. on Superconductivity (ISS'89), Tsukuba, Springer-Verlag Tokyo, (1989), 439.
- (26) S. Noge, T. Yamashita, Z. Wang, T. Matsui, H. Kurosawa, H. Yamane and T. Hirai: Jpn. J. Appl. Phys., **28**(1989), L1581.
- (27) A. Irie, M. Era, T. Yamashita, H. Kurosawa, H. Yamane and T. Hirai: Jpn. J. Appl. Phys., **28**(1989), L1816.
- (28) T. Yamashita, M. Era, S. Noge, A. Irie, H. Yamane, T. Hirai, H. Kurosawa and T. Matsui: Jpn. J. Appl. Phys., **29**(1990), 74.
- (29) H. Suzuki, H. Kurosawa, K. Miyagawa, Y. Hirotsu, M. Era, T. Yamashita, H. Yamane and T. Hirai: submitted to Jpn. J. Appl. Phys.
- (30) A. D. Berry, R. T. Holm, E. J. Cukauskas, M. Fatemi, D. K. Gaskill, R. Kaplan and W. B. Fox: J. Cryst. Growth, **92**(1988), 344.
- (31) J. Zhang, J. Zhao, H. O. Marcy, L. M. Tonge, B. W. Wessels, T. J. Marks and C. R. Kannewurf: Appl. Phys. Lett., **54**(1989), 1166.
- (32) M. Nemoto and M. Yamanaka: J. Mater. Res., **5**(1990), 1.
- (33) H. Yamane, H. Kurosawa, H. Iwasaki, T. Hirai, N. Kobayashi and Y. Muto: Jpn. J. Appl. Phys., **28**(1989), L827.
- (34) K. Natori, S. Yoshizawa, J. Yoshino and H. Kukimoto: Jpn. J. Appl. Phys., **28**(1989), L1578.
- (35) K. Saikusa, T. Sugihara, T. Takeshita: Proc. 2nd Int. Symp. on Superconductivity (ISS'89), Tsukuba, Springer-Verlag Tokyo, (1989), 899.
- (36) T. Sugimoto, S. Yuha, Y. Yamada, H. Hayashi, K. Kikuchi, M. Yoshida, K. Sugawara and Y. Shinohara: Proc. 2nd Int. Symp. on Superconductivity (ISS'89), Tsukuba, Springer-Verlag Tokyo, (1989), 907.
- (37) K. Endo, S. Hayashida, J. Ishiai, Y. Matsuki, Y. Ikeda, S. Misawa and S. Yoshida: Jpn. J. Appl. Phys., **29**(1990), L294.
- (38) J. M. Zhang, B. W. Wessels, L. M. Tonge and T. J. Marks: Appl. Phys. Lett., **56**(1990), 976.
- (39) K. Kobayashi, S. Ichikawa and G. Okada: Jpn. J. Appl. Phys. Lett., **28**(1989), L2165.
- (40) J. M. Zhang, H. O. Marcy, L. M. Tonge, B. W. Wessels, T. J. Marks and C. R. Kannewurf: Appl. Phys. Lett., **55**(1989), 1906.
- (41) T. Kimura, M. Ihara, H. Yamawaki, K. Ikeda and M. Ozeki: Proc. 1st Int. Symp. on Superconductivity (ISS'88), Nagoya, Springer-Verlag Tokyo, (1988), 495.
- (42) K. Zhang, E. P. Boyd, B. S. Kwak, A. C. Wright and A. Erbil: Appl. Phys. Lett., **55**(1989), 1258.
- (43) D. S. Richeson, L. M. Tonge, J. Zhao, J. Zhang, H. O. Marcy, T. J. Marks, B. W. Wessels and C. R. Kannewurf: Appl. Phys. Lett., **54**(1989), 2154.
- (44) D. S. Richeson, L. M. Tonge, X. K. Wang, H. O. Marcy, T. J. Marks, J. B. Ketterson, R. P. H. Chang and C. R. Kannewurf: Appl. Phys. Lett., **55**(1989), 2778.
- (45) 平井敏雄, 後藤 孝: 日本金属学会会報, **28**(1989), 960.
- (46) 新野正之, 平井敏雄, 渡辺龍三: 日本複合材料学会誌, **13**(1987), 257.