研究論文

電子ビーム蒸着法により作製した MgB₂ 薄膜における
ピンニング特性の印加磁場角度依存性春田 正和[†], 藤吉 孝則, 末吉 哲郎, 宮原 邦幸,
土井 俊哉^{*1}, 北口 仁^{*2}, 淡路 智^{*3}, 渡辺 和雄^{*3}Angular Dependence of Pinning Properties of MgB₂ Thin Films
Prepared by an Electron-beam Evaporation MethodMasakazu HARUTA[†], Takanori FUJIYOSHI, Tetsuro SUEYOSHI, Kuniyuki MIYAHARA,
Toshiya DOI^{*1}, Hitoshi KITAGUCHI^{*2}, Satoshi AWAJI^{*3} and Kazuo WATANABE^{*3}

Synopsis: As-grown MgB₂ thin films were prepared by an electron-beam evaporation method. In order to enhance the critical current density J_c in magnetic fields, the MgB₂ thin film was deposited in an O₂ atmosphere. E - J characteristics were measured in magnetic fields that were applied in various directions to investigate O₂ doping effect and the angular dependence of pinning properties. The values of J_c and the glass-liquid transition temperature T_g of the O₂-doped sample were larger than those of the non-doped sample and had peaks in the magnetic field applied parallel to the c -axis. It was found that c -axis correlated pinning centers were introduced by the deposition of the MgB₂ thin film in an O₂ atmosphere. The distributions of the local critical current density J_{cl} were derived by fitting obtained E - J characteristics with the theoretical expression based on the percolation transition model. As a result, it was found that the distribution of J_{cl} of the O₂-doped sample became broad and shifted to the high current density region as compared to that of the non-doped sample. This is because pinning centers with strong pinning force were introduced by the deposition in the O₂ atmosphere.

Keywords: MgB₂ thin film, critical current density, pinning properties

1. はじめに

2001 年に MgB₂ の超伝導性が発見されて¹⁾以来, 金属系超伝導体の中で最高の超伝導転移温度($T_c = 39$ K)を有する MgB₂ は基礎研究と応用の両面において大きな注目を集めている. MgB₂ は高い T_c に加え, 安価な材料費, 単純な結

晶構造の 2 元化合物であること, 弱結合が存在しないことから²⁾, その応用が期待されている.

高特性を有する薄膜の作製はデバイス応用, 基礎特性の評価に重要である. 高い転移温度 $T_c \sim 39$ K 及び臨界電流密度 $J_c \sim 10^7$ A/cm² を持った MgB₂ 薄膜が hybrid physical-chemical vapor deposition (HPCVD) 法³⁾や ex-situ での熱処理を行う two-step 法^{4,5)}によって作製されている. これらの方法で作製された MgB₂ 薄膜は自己磁場においては高い J_c を有するが, 外部磁場の増加に伴い J_c は急激に減少してしまう. このため, MgB₂ の高磁場応用においては J_c の磁場特性の向上が必要不可欠である. この磁場中での J_c の減少に対する対策として, 不純物ドーピングが有効であることが報告されている. HPCVD 法におけるカーボンドーピング⁶⁾, ex-situ 熱処理による MgO の混入^{7,8)}によって J_c の磁場特性が大きく改善している. また, MgB₂ の上部臨界磁場 B_{c2} は, clean な MgB₂ 薄膜においては従来の金属系超伝導体である Nb₃Sn($B_{c2} \sim 30$ T)と比較してあまり高くない. しかし, 不純物をドーピングした dirty な MgB₂ 薄膜においては非常に高い B_{c2} が報告されている^{9,10)}.

Received August 31, 2005

熊本大学工学部

〒860-8555 熊本市黒髪 2-39-1

Faculty of Engineering, Kumamoto University, 2-39-1 Kurokami,
Kumamoto 860-8555, Japan

^{*1} 鹿児島大学工学部

〒890-0065 鹿児島市郡元 1-21-40

Faculty of Engineering, Kagoshima University, 1-21-40
Korimoto, Kagoshima 890-0065, Japan

^{*2} 物質材料研究機構

〒305-0047 つくば市千現 1-2-1

National Institute for Materials Science, 1-2-1 Sengen, Tsukuba
305-0047, Japan

^{*3} 東北大学金属材料研究所

〒980-8577 仙台市青葉区片平 2-1-1

Institute for Materials Research, Tohoku University, 2-1-1
Katahira, Aoba-ku, Sendai 980-8577, Japan

[†] E-mail: haruta@st.eecs.kumamoto-u.ac.jp

我々は電子ビーム蒸着法で作製した MgB_2 薄膜が、熱処理なしの as-grown 薄膜の中で非常に高い J_c を有していることを報告している^{11,12)}。しかしながら、この MgB_2 薄膜においても高磁場領域では J_c が急激に減少してしまう。そこで、本研究では人工的にピンニングセンターを導入することにより、 J_c の磁場依存性の改善を試みた。酸素雰囲気中で成膜することにより、 MgO のような酸化物がピンニングセンターとして導入されることを期待して、酸素雰囲気中において電子ビーム蒸着を行った。そして、 MgB_2 薄膜における酸素導入効果と、そのピンニング特性を把握するために、電圧 - 電流特性(E - J 特性)の印加磁場角度依存性を調べた。

2. 実験

電子ビーム蒸着法を用いて MgB_2 薄膜を Al_2O_3 基板(0001)面上に堆積させた¹¹⁾。成膜時のベース圧力は 2×10^{-7} Pa で、ハロゲンランプヒータを用いて基板を 230°C に加熱した。蒸着源には Mg ブロック(99.9%)と B 粉末(99.5%)を固めた B バルクを用いた。 Mg と B の蒸発速度をそれぞれ水晶モニタ(QCM)からのフィードバックにより独立に制御し、成膜後の組成が $\text{Mg}:\text{B}=1:2$ となるようにした。

また、 J_c の向上を目的として、成膜時に酸素を導入した試料を作製した¹³⁾。ベース圧力が 2×10^{-7} Pa に到達した後、酸素を導入し(酸素分圧: 1×10^{-5} Pa)、酸素導入なしの試料と同条件で成膜を行った。成膜後の組成は、誘導結合プラズマ(ICP)発光分析の結果から、 Mg の割合が多い状態($\text{Mg}:\text{B}=1:1.4$)になっていた。

酸素導入なし及び酸素導入試料(以下、non-dope 及び O_2 -dope 試料とする)の膜厚は、それぞれ 280 nm, 300 nm であった。また、non-dope 及び O_2 -dope 試料の超伝導転移温度 T_c は、それぞれ 31.3 K 及び 32.3 K であった。なお、X 線回折の結果、どちらの薄膜も c 軸配向していた。

成膜後の試料を、フォトリソグラフィーにより幅 50 μm 、長さ 1 mm のブリッジ形状にパターニングした。なお、エッチング液には硝酸を用いた。さらに、電極端子の接触抵抗を低減させるためにアルゴンプリスパッタを行った後、金電極を RF スパッタにより蒸着した。そして、電流・電圧リードを In 圧着した。

磁場中における E - J 特性を直流四端子法により測定した。測定には、東北大学金属材料研究所強磁場超伝導材料研究センターの 20 T 超伝導マグネットを用いた。通電特性より電界基準を 10 $\mu\text{V}/\text{cm}$ として J_c を評価した。測定においてサンプルホルダーを回転させることにより磁場の印加方向を変化させた。 c 軸と磁場のなす角を θ とし、 $\theta=0^\circ$ から 90° まで変化させ測定を行った。このとき電流と磁場の方向は常に直角になるようにした。また、測定時の温度精度は ± 0.01 K であった。

3. 実験及び考察

Fig. 1 に non-dope 及び O_2 -dope 試料における J_c の磁場角度依存性を示す。(a)は磁場 $B=1$ T, 温度 $T=10$ K 及び 20 K の低温領域における J_c の特性である。non-dope 試料と O_2 -dope 試料の両方において、 $\theta=0^\circ$ (磁場を c 軸に平行に印加)及び 90° (磁場を c 軸と垂直に印加)において J_c のピークが観測された。 $\theta=0^\circ$ における J_c のピークは c 軸方向に沿って磁束線をピン止めするピンニングセンターの存在を示している。

北口らは本研究における試料と同じく電子ビーム蒸着法により作製した MgB_2 薄膜の TEM 観測を行い、 MgB_2 が c 軸方向に沿って円柱状の結晶粒の集まりとして結晶成長していくことを報告している¹⁴⁾。この円柱状結晶の結晶粒界が c 軸方向に沿って磁束線をピン止めする有効なピンニングセンターとして働いていると考えられる。

また、 O_2 -dope 試料の J_c は non-dope 試料に比べ、全ての磁場角度において大きくなっている。これより、酸素中での成膜により有効なピンニングセンターが導入されたことが分かる。おそらく MgO が全ての角度において有効である等方的なピンニングセンターとして働いていると考えられる。なお、(b)に示すように高温領域においては、 O_2 -dope 試料における $\theta=0^\circ$ のピークは観測されるが、non-dope 試料における $\theta=0^\circ$ のピークは消失している。これより、酸素雰囲気中での成膜により、結晶粒界によるピンニングセンターが強化されたことが分かる。

Fig. 1 Angular dependences of J_c in (a) low-temperature region and (b) high-temperature region.

局所的臨界電流密度の分布の印加磁場角度依存性を調べるため、 E - J 特性の磁場角度依存性を測定した。Fig. 2 に O_2 -dope 試料における $\theta=0^\circ$ での E - J 特性を示す。なお、印加磁場は $B=1$ T である。両対数プロットした E - J 特性は、低温領域では上に凸の曲線となっているが、温度の上昇に伴いある温度を境として下に凸の曲線へと変化している。この境となる温度は磁束ガラス - 液体転移温度 T_g と呼ばれる。このような特徴的な E - J 特性の振る舞いは $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ などの高温超伝導体が有する特徴と同じである。

高温超伝導体の E - J 特性はピン力の統計的分布を考慮したパーコレーション遷移モデル(ディピンングモデル)によって定量的に記述できることが分かってきている¹⁵⁻¹⁷⁾。さらに我々は、 MgB_2 薄膜における E - J 特性もパーコレーション遷移モデルによって表せることを報告している¹²⁾。パーコレーション遷移モデルでは、分布した要素的ピン力に基く局所的な臨界電流密度 J_{cl} の確率密度分布関数 $P(J_{cl})$ は、信頼性工学で用いられる次式のような Weibull 関数で与えられる。

$$P(J_{cl}) = \frac{m}{\Delta J_c} \left(\frac{J_{cl} - J_{cm}}{\Delta J_c} \right)^{m-1} \exp \left[- \left(\frac{J_{cl} - J_{cm}}{\Delta J_c} \right)^m \right] \quad (1)$$

このモデルにおいて、 J_{cl} の分布は三つのピンニングパラメータ J_{cm} , ΔJ_c , m によって特徴づけられる。ここで、 J_{cm} は局所的臨界電流密度の分布の最小値、 ΔJ_c は分布の幅、 m は分布の形を特徴付けるパラメータである。なおピン止め力がばらついていると J_{cl} の分布は立ち上がりが緩やかでなだらかな分布となり m が小さくなる。一方ピン止め力がそろっていると、立ち上がりが急で鋭い分布となり m は大きくなる。この局所的臨界電流密度の分布関数 $P(J_{cl})$ を用いると E - J 特性は次式のように表される。

$$E = \rho_{FF} \int_{J_{cm}}^J (J - J_{cl}) P(J_{cl}) dJ_{cl} = \begin{cases} \frac{\rho_{FF} \Delta J_c}{m+1} \left(\frac{J - J_{cm}}{\Delta J_c} \right)^{m+1} & \text{for } T < T_g \\ \frac{\rho_{FF} \Delta J_c}{m+1} \left(\frac{J}{\Delta J_c} \right)^{m+1} & \text{for } T = T_g \\ \frac{\rho_{FF} \Delta J_c}{m+1} \left\{ \left(\frac{J + |J_{cm}|}{\Delta J_c} \right)^{m+1} - \left(\frac{|J_{cm}|}{\Delta J_c} \right)^{m+1} \right\} & \text{for } T > T_g \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 ρ_{FF} は磁束フロー抵抗である。実験より得られた E - J 特性をパーコレーション遷移モデルによる式(2)とフィッティングを行った。フィッティングでは実験値と理論値の誤差が最も小さくなるようにピンニングパラメータ J_{cm} , ΔJ_c , m を決定した。なお、 $\rho_{FF} = 1 \times 10^{-7} \Omega m$ とした^{18,19)}。Fig. 2 において丸印が実験値、実線が理論値であり、両者はよく一致している。

印加磁場 $B=1$ T の角度を変化させて測定したそれぞれの E - J 特性から得られた T_g と m の磁場角度依存性を Fig.

3(a), (b)にそれぞれ示す。 O_2 -dope 試料の T_g は non-dope 試料のそれに比べ大きくなっている。これは酸素雰囲気中での成膜により、強いピン止め力を持ったピンニングセンターが導入され、 $J_c \neq 0$ の磁束ガラス領域が高温領域まで広がったことを示している。また、 O_2 -dope 試料では $\theta=0^\circ$ で T_g にピークが見られる。これは、 J_c の磁場角度依存性でもピークが見られるように、結晶粒界によるピンニングのためである。一方、non-dope 試料においては $\theta=0^\circ$ において T_g のピークは見られない。Fig. 1(b)に示したように、 T_g 付近の高温領域では non-dope 試料の J_c には $\theta=0^\circ$ でピークが見られず、この領域では結晶粒界によるピンニングは有効でない。 O_2 -dope 試料では高温領域でも J_c のピークが観測され、酸素導入による J_c の増加は $\theta=0^\circ$ で非常に大きくなっている。これらのことより、酸素導入によって特に c 軸方向に沿って磁束線をピンニングする強いピンニングセ

Fig. 2 E - J characteristics in the magnetic field of $B=1$ T.

Fig. 3 Angular dependences of (a) T_g and (b) m .

ンターが導入されたことが分かる。

m は局所的臨界電流密度の分布を特徴付けるパラメータであり、また式(2)から分かるように $m+1$ は、 E - J 特性の対数プロットにおける $T=T_g$ での傾きを表している。酸素の導入により m は、non-dope 試料の m よりも小さくなっている。これは酸素の導入によって、 E - J 特性の傾きが緩やかになったこと、すなわち J_{cl} の分布の立ち上がりが緩やかでなだらかな分布になったことを示している。

次に、 O_2 -dope 試料の m の磁場角度依存性を見てみると、 m は $\theta=0^\circ$ に近いほど大きくなっている。これは、 $\theta=0^\circ$ 付近で磁束線は、主にピン止め力のそろった結晶粒界によってピンニングされるため、 J_{cl} の分布が鋭くなり、 m が大きくなったと考えられる。

パーコレーション遷移モデルとのフィッティングから得られたピンニングパラメータ J_{cm} 、 ΔJ_c 、 m を使って、式(1)より局所的臨界電流密度の分布を見積もることができる。

Fig. 4 に規格化温度 $T/T_g = 0.96$ における局所的臨界電流密度の分布を示す。なお、グラフの縦軸は $P(J_{cl})$ をその最大値 $P(J_{cl})_{max}$ で規格化している。 O_2 -dope 試料の J_{cl} の分布(実線)は non-dope 試料(破線)よりも立ち上がりが緩やかでなだら

Fig. 4 Distributions of the local critical current density derived by fitting obtained E - J characteristics with the theoretical expression based on the percolation transition model at $T/T_g = 0.96$ and (a) $\theta = 0^\circ$, (b) 50° and (c) 90° .

かな分布となっている。また、酸素の導入により分布の最小値 J_{cm} が大きくなり、分布全体が高電流密度側へ移動している。これより、酸素の導入による J_c の向上が説明できる。

Fig. 5 に $B=9$ T における O_2 -dope 試料の E - J 特性を示す。なお、グラフの破線は実験データを結んだものである。この高い磁場での E - J 特性は Fig. 2 に示す低い磁場での E - J 特性と異なり、グラフ中に矢印で示した点において曲率が変わって、上に凸の曲線へ 2 段階的に変化している。

酸素の導入によるこのような E - J 特性の変化は次のように考えられる。 J_{cl} の分布関数の ΔJ_c が小さくなったために、 $J \gg J_{cm} + \Delta J_c$ において、式(1)で示されるような Weibull 関数が冪乗近似からはずれる。この時、 $P(J_{cl})$ がピークを持つため、この領域で E - J 特性は上に凸になる。しかし、式

Fig. 5 E - J characteristics in the magnetic field of $B = 9$ T.

Fig. 6 Schematic illustrations of distributions of the local critical current density in (a) a low-magnetic-field region and (b) a high-magnetic-field region.

(1)のような単純な Weibull 関数を用いた場合、分布のピークを超えたところで E - J 特性の傾きが急激に小さくなるため、Fig.5 で示されるような E - J 特性を説明できない。

そこで、Fig. 6 に示すような c 軸に平行に磁場を印加した場合の J_c の分布を考える。破線が酸素を導入しない場合 (non-dope 試料) の分布である。ここで、酸素雰囲気中で成膜した場合には等方的なピンニングセンターが導入されるに加え、結晶粒界による c 軸方向に働くピンニングセンターが強化されるため、点線で示すようにもともとの分布よりも離れた高電流密度側に分布ができると考えられる。したがって、低磁場領域においては(a)に示すように、本来弱いピンニングセンターにピンニングされていた磁束線も磁束線間の相互作用により、導入された強いピンニングセンターで支えられ、より高電流密度までディピンニングしなくなる。このため、合成によって得られる J_c の分布は高電流密度側へ移動し、実線で示す Weibull 関数のような分布になると考えられる。よって、分布の立ち上がりは緩やかで広い分布幅を有するため、 m が小さくなったと考えられる。一方、高磁場領域では磁束線格子の剪断定数 C_{66} が小さくなるため、磁束バンドルが小さくなり、強いピンニングセンターによる支えの効果が小さくなる。このため J_c の分布は、(b)に示すように低電流密度側にもピークを持つようになる。したがって、このピークを境に E - J 特性に上に凸の領域が現れ、2 段階的に変化すると考えられる。このような磁場領域では、 E - J 特性から T_g の判別は困難である。

4. まとめ

電子ビーム蒸着法を用いて MgB_2 薄膜を作製した。 J_c の向上及び J_c の磁場特性の改善を目的として、人工的にピンニングセンターの導入を行った。ピンニングセンターとして働く MgO 等が導入されることを期待し、酸素雰囲気中において MgB_2 薄膜の成膜を行った。

酸素導入の効果と、そのピンニング特性を調べるために、印加磁場角度を変化させ E - J 特性の測定を行った。通電特性より評価した J_c の磁場角度依存性において、 O_2 -dope 試料の J_c が全ての角度において non-dope 試料よりも大きくなっていた。また、酸素の導入により T_g も大きくなっていた。これらのことより、酸素雰囲気中での成膜により有効なピンニングセンターが導入されたことが分かった。 J_c 及び T_g の増加は $\theta=0^\circ$ で最も大きくなっており、 c 軸方向に沿って特に有効なピンニングセンターが導入されたことが分かった。

測定により得られた E - J 特性をパーコレーション遷移モデルによる理論式とフッティングを行い、局所的臨界電流密度の分布を導出した。 O_2 -dope 試料の分布は non-dope 試料に比べ、立ち上がりが緩やかでなだらかな分布となり、

m が小さくなった。また、分布が高電流密度側に移動することにより、 J_c が向上した。これらのことは、酸素雰囲気中での成膜により強いピン力を持ったピンニングセンターが導入されたことに起因している。

本研究に用いた MgB_2 薄膜の作製は、文部科学省科学技術振興費委託研究、16 文科振第 554 号の一環として行われた。

参 考 文 献

- 1) J. Nagamatsu, N. Nakagawa, T. Muranaka, Y. Zenitani and J. Akimitsu: "Superconductivity at 39 K in magnesium diboride," *Nature* **410** (2001) 63-64
- 2) D.C. Larbalestier, L.D. Cooley, M.O. Rikel, A.A. Polyanskii, J. Jiang, S. Patnaik, X.Y. Cai, D.M. Feldmann, A. Gurevich, A.A. Squitieri, M.T. Naus, C.B. Eom, E.E. Hellstrom, R.J. Cava, K.A. Regan, N. Rogado, M.A. Hayward, T. He, J.S. Slusky, P. Khalifah, K. Inumaru and M. Haas: "Strongly linked current flow in polycrystalline forms of the superconductor MgB_2 ," *Nature* **410** (2001) 186-189
- 3) X. Zeng, A.V. Pogrebnyakov, A. Kotcharov, J.E. Jones, X.X. Xi, E.M. Lysczek, J.M. Redwing, S. Xu, Q. Li, J. Lettieri, D.G. Schlom, W. Tian, X. Pan and Z.K. Liu: "In situ epitaxial MgB_2 thin films for superconducting electronics," *Nature Mater.* **1** (2002) 35-38
- 4) W.N. Kang, E.M. Choi, H.J. Kim, H.J. Kim and S.I. Lee: "Growth of superconducting MgB_2 thin films via postannealing techniques," *Physica C* **385** (2003) 24-30
- 5) S.H. Moon, H.M. Kim, S.S. Yim, K.B. Kim, Y.W. Kim, S.I. Yoo and H.N. Lee: "Superconducting properties and microstructures of MgB_2 thin films prepared by the *ex situ* annealing process," *Supercond. Sci. Technol.* **17** (2004) S15-S19
- 6) A.V. Pogrebnyakov, X.X. Xi, J.M. Redwing, V. Vaithyanathan, D.G. Schlom, A. Soukiassian, S.B. Mi, C.L. Jia, J.E. Giencke, C.B. Eom, J. Chen, Y.F. Hu and Q. Li: "Properties of MgB_2 thin films with carbon doping" *Appl. Phys. Lett.* **85** (2004) 2017-2019
- 7) C.B. Eom, M.K. Lee, J.H. Choi, L.J. Belenky, X. Song, L.D. Cooley, M.T. Naus, S. Patnaik, J. Jiang, M. Rikel, A. Polyanskii, A. Gurevich, X.Y. Cai, S.D. Bu, S.E. Babcock, E.E. Hellstrom, D.C. Larbalestier, N. Rogado, K.A. Regan, M.A. Hayward, T. He, J.S. Slusky, K. Inumaru, M.K. Haas and R.J. Cava: "High critical current density and enhanced irreversibility field in superconducting MgB_2 thin films," *Nature* **411** (2001) 558-560
- 8) Y. Zhao, M. Ionescu, J. Horvat and S.X. Dou: "Comparative study of *in situ* and *ex situ* MgB_2 films prepared by pulsed laser deposition," *Supercond. Sci. Technol.* **17** (2004) S482-S485
- 9) V. Braccini, A. Gurevich, J.E. Giencke, M.C. Jewell, C.B. Eom, D.C. Larbalestier, A. Pogrebnyakov, Y. Cui, B.T. Liu, Y.F. Hu, J.M. Redwing, Q. Li, X.X. Xi, R.K. Singh, R. Gandikota, J. Kim, B. Wilkens, N. Newman, J. Rowell, B. Moeckly, V. Ferrando, C. Tarantini, D. Marre, M. Putti, C. Ferdeghini, R. Vaglio and E. Haanappel: "High-field superconductivity in alloyed MgB_2 thin films," *Phys. Rev. B* **71** (2005) 012504
- 10) A. Gurevich, S. Patnaik, V. Braccini, K.H. Kim, C. Mielke, X.

- Song, L.D. Cooley, S.D. Bu, D.M. Kim, J.H. Choi, L.J. Belenky, J. Giencke, M.K. Lee, W. Tian, X.Q. Pan, A. Siri, E.E. Hellstrom, C.B. Eom and D.C. Larbalestier: "Very high upper critical fields in MgB_2 produced by selective tuning of impurity scattering," *Supercond. Sci. Technol.* **17** (2004) 278-286
- 11) M. Okuzono, T. Doi, Y. Ishizaki, Y. Kobayashi, Y. Hakuraku and H. Kitaguchi: "As-grown superconducting MgB_2 films prepared by electron beam deposition," *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **15** (2005) 3253-3256
- 12) M. Haruta, T. Fujiyoshi, T. Sueyoshi, K. Miyahara, T. Doi and H. Kitaguchi: "The E - J characteristics of MgB_2 thin film prepared by electron beam evaporation method," *Physica C* **426-431** (2005) 174
- 13) M. Haruta, T. Fujiyoshi, T. Sueyoshi, K. Miyahara, T. Doi, H. Kitaguchi, S. Awaji and K. Watanabe: "Critical current density of MgB_2 thin film with pinning centres introduced by deposition in oxygen atmosphere," *Supercond. Sci. Technol.* **18** (2005) 1460-1463
- 14) H. Kitaguchi, A. Matsumoto, H. Kumakura, T. Doi, H. Yamamoto, K. Saitoh, H. Sotiati and S. Hata: " MgB_2 films with very high critical current density due to strong grain boundary pinning," *Appl. Phys. Lett.* **85** (2004) 2842-2844
- 15) K. Yamafuji and T. Kiss: "A new interpretation of the glass-liquid transition of pinned fluxoids in high- T_c superconductors," *Physica C* **258** (1996) 197-212
- 16) K. Yamafuji and T. Kiss: "Current-voltage characteristics near the glass-liquid transition in high- T_c superconductors," *Physica C* **290** (1997) 9-22
- 17) K. Yamafuji, T. Fujiyoshi and T. Kiss: "A theory of the thermal depinning transition in type-2 superconductors," *Physica C* **397** (2003) 132-150
- 18) W.N. Kang, H.J. Kim, E.M. Choi, K.H.P. Kim and S.I. Lee: "Growth and transport properties of c -axis-oriented MgB_2 thin films," *Physica C* **378-381** (2002) 1246-1251
- 19) S.K. Gupta, S. Sen, A. Singh, D.K. Aswal, J.V. Yakhmi, E.M. Choi, H.J. Kim, K.H.P. Kim, S. Choi, H.S. Lee, W.N. Kang and S.I. Lee: " I - V characteristics measurements to study the nature of the vortex state and dissipation in MgB_2 thin films," *Phys. Rev. B* **66** (2002) 104525

春田 正和 1979年7月生。2004年3月熊本大学大学院自然科学研究科博士前期課程(電気システム専攻)修了。同年4月同大学大学院自然科学研究科博士後期課程(システム情報科学専攻)進学。現在、RE123系超伝導体及び MgB_2 超伝導体のピンニング特性に関する研究に従事。低温工学協会、電気学会会員。

藤吉 孝則 1962年8月生。1985年3月九州大学工学部電子工学科卒業。1990年3月同大学大学院工学研究科博士課程修了。同年4月熊本大学助手、現在同大学助教授。主に電気・電子材料に関する研究に従事。低温工学協会、電気学会、電子情報通信学会、応用物理学会、生物物理学会会員。工学博士。

末吉 哲郎 1972年1月生。1994年3月熊本大学工学部電気情報工学科卒業。1999年同大学大学院自然科学研究科博士課程(システム科学専攻)修了。同年4月同大学助手。主に高温超伝導材料の磁束ピンニング特性に関する研究に従事。低温工学協会、電気学会、日本物理学会会員。学術博士。

宮原 邦幸 1942年1月生。1964年3月九州大学工学部電子工学科卒業。1966年同大学大学院工学研究科修士課程修了。1967年4月より同大学助手。熊本大学講師、助教授を経て1987年より同大学教授。主に超伝導材料に関する研究に従事。低温工学協会、電気学会、電子情報通信学会、日本物理学会、応用物理学会会員。工学博士。

土井 俊哉 1962年4月生。1985年3月京都大学工学部卒業。1987年3月同大学大学院工学研究科終了。同年4月(株)日立製作所入社。1999年4月より鹿児島大学工学部助教授。現在、超伝導、電子材料、金属材料の研究に従事。低温工学協会、応用物理学会、電気学会、日本金属学会会員。工学博士。

北口 仁 1960年9月生。1990年岡山大学大学院自然科学研究科物質材料専攻博士課程修了。同年10月より金属材料研究所(現 独立行政法人物質材料研究所)に勤務し、現在、主席研究員。主として酸化物超伝導材料の研究開発に従事。低温工学協会、日本金属学会、応用物理学会、粉体粉末冶金学会、日本マイクログラビティー応用学会会員。学術博士。

淡路 智 1965年7月生。1988年広島大学理学部物理学科卒業。1990年同大学理学研究科物理学専攻博士前期課程修了。同年4月より東北大学金属材料研究所に勤務。同研究所助手を経て、現在同助教授。主に超伝導材料の基礎物性研究および強磁場マグネットの開発に従事。低温工学協会、応用物理学会、日本金属学会、応用磁気学会会員。工学博士。

渡辺 和雄 1950年5月生。1975年東北大学理学部物理学科卒業。1977年同大学大学院修士課程(物理学専攻)修了。真空冶金(株)勤務。1981年4月から東北大学金属材料研究所助手。講師、助教授を経て2001年4月から同研究所教授。低温工学協会、日本金属学会、応用物理学会、応用磁気学会会員。工学博士。