

量子化磁束のダイナミクス制御と物質科学への展開

Control of Dynamics of Quantized Vortices and
Progressing to Materials Science

松本 要 (MATSUMOTO KANAME)

九州工業大学・大学院工学研究院・教授



研究の概要

本研究では、ナノ複合・ヘテロエピタキシャル薄膜技術を発展させ、超伝導電流の上限を理論限界近傍にまで高めるための道筋を明らかにするとともに、得られた知見の様々な機能性材料の物質科学への展開も目指す。

研究分野：理工系・工学・材料工学・無機材料・物性

科研費の分科・細目：材料工学・無機材料・物性

キーワード：結晶構造・組織制御

1. 研究開始当初の背景

2つ以上の物質からなるナノ複合・ヘテロエピタキシャル薄膜はまったく新しい機能性材料を生み出す可能性に満ちている。例えばゼロ抵抗超伝導電流の上限を極限にまで高めた高性能超伝導薄膜、磁性相と強誘電体相を同一膜中に共存・制御するマルチフェロイック薄膜、変換効率を飛躍的に高めた量子ドット型太陽電池薄膜など多くの有望なターゲットがある。この技術は異なる物質相や秩序相、異種結晶界面や局所ひずみ、結晶構造や電子状態の急峻な変化・パターン、等々をエピ膜中に作り出し、相固有の特徴的長さ・量子効果と物質との最適な相互作用を引き出すことを可能とする。

2. 研究の目的

本研究では、ナノ複合・ヘテロエピタキシャル薄膜技術を発展させ、超伝導電流の上限を理論限界近傍にまで高めるための道筋を明らかにするとともに、得られた知見の様々な機能性材料への展開も目指す。

3. 研究の方法

超伝導秩序相を規定する重要な熱力学的パラメータとして、臨界温度 T_c 、上部臨界磁場 B_{c2} 、および対破壊電流密度 J_0 がある。 T_c と B_{c2} は小さな電流密度下で実測できるためよく理解されているが、 J_0 の実測には大電流通電が必要である。しかし J_0 に達するはるか以前に、ローレンツ力に耐え切れず量子化磁

束のピン止めがはずれてしまうので、熱力学的上限に近い臨界電流密度 J_c は実現されたためではない。本研究では応用の可能性を飛躍的に拡大することを念頭に、現状の $J/J_0=1\sim 10\%$ の限界を超え、 $J/J_0=30\sim 50\%$ という大きなローレンツ力下の磁束物理という新分野を開拓する。そのため、①最適ピン構造の設計、②ナノ複合・ヘテロエピ薄膜作製技術、③ミクロ構造および物性キャラクターゼーションの3つの観点から研究を進め、量子化磁束の強力なピン止め構造を超伝導体中に導入する。

4. これまでの成果

① 最適人工ピン構造の設計

人工的な量子化磁束のピン止め点(人工ピン)導入による臨界電流密度の最適化を進めてきた。2次元時間依存ギンツブルグ・ランダウ(TDGL)シミュレーションによればコヒーレンス長と同等サイズの常伝導物質からなる

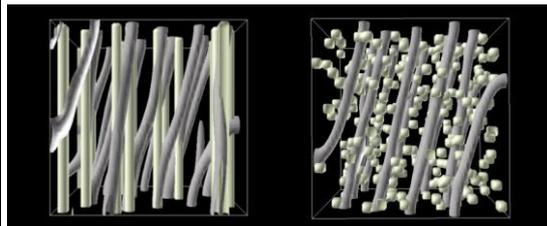


図1 ピン止めの TDGL シミュレーション

ランダムピンを 20%程度導入することで、対破壊電流 J_0 の 20%程度まで臨界電流値 J_c を増大させることが可能なが示された。異方的なピン止めを導入すれば、臨界電流値は 30%程度に上昇することも明らかになった。大規模な 3次元の TDGL シミュレーションも開発中であり、量子化磁束がナノロッドやナノドットからピン止めからはずれるデピンニング過程の可視化に成功した。

② ナノ複合・ヘテロエピ薄膜作製技術

SmBCO 薄膜に 1次元の BaHfO₃ 人工ピンを導入することで 77 K において 15 T の不可逆磁場を得るとともに、28 GN/m³ の巨視的ピン止め力を達成した。ナノ構造や結晶欠陥に関しては原子・分子レベルから、YBCO ヘテロエピ薄膜への自在なナノ構造導入の研究も進めてきた。ナノロッドが薄膜面に対して垂直に十分に成長した場合、大きなピン止め力を得ることができた。ナノロッドと超伝導との界面においてはファセット面が現れることも確認された。これは原子レベル分解能の TEM によって確かめられた。また、MD 計算によって界面エネルギーが低いファセット面が現れることも示された。さらには、ナノロッドと超伝導体との歪みについても VASP や X 線回折を用いた解析も行っており、ナノ領域で材料の複合則が成り立つことが分かった。

③ ミクロ構造及びその物性

人工ピンを導入した REBCO (RE: 希土類) 膜に対し、強磁場中での臨界電流密度 J_c 及び不可逆磁場特性の評価及び、磁化による低温強磁場臨界電流密度特性評価を実施した。その結果、ナノロッド導入プロセス改善により、成長方向の揃ったナノロッドを導入することで、非常に高い J_c 特性と不可逆磁場特性が実現できることを明らかにした。BaHfO₃ ナノロッドを制御して導入した SmBCO 膜では、77.3 K の J_c 値がゼロ磁場で 6 MA/cm² となり、実用線材の 2.5 倍となった。この場合 4.2 K, 0 T における J_c 値は約 100 MA/cm² となり、対破壊電流 J_0 の 33% に達すると予想された。また低温走査型トンネル顕微鏡 (低温 STM) を用いて、SmBCO/BaHfO₃ 界面の超伝導ギャップエネルギーのスキャン測定を実施した。低温 STM を用いたナノロッドのギャップエネルギーの観測は世界で初めての結果であり、今後さらにナノロッド近傍の局所状態密度の空間変化が明らかにしていく。

5. 今後の計画

本研究では従来にない総合的かつ詳細な解析法を実現していく。ここで得られた知見は人工ピン構造と薄膜作製に反映させ、より高性能な超伝導薄膜を実際に作製する手法を確立する。最終的には、原子・分子レベルからの自在なナノ複合・ヘテロエピ薄膜技術を駆使して、熱力学的上限 J_0 にせまるとともに、新しい磁束物理分野の開拓と物質科学への展開を進めていきたいと考えている。

6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

発表論文

1. "The influence of the geometric characteristics of nanorods on the flux pinning in high-performance BaMO₃-doped SmBa₂Cu₃O_y films (M = Hf, Sn)", A. Tsuruta*, Y. Yoshida, Y. Ichino, A. Ichinose, K. Matsumoto, S. Awaji, *Supercond. Sci. Technol.* 2014, in press.
2. "Variation of *c*-axis correlation on vortex pinning by *ab*-plane non-superconducting layers in YBa₂Cu₃O₇ films", T. Horide*, T. Murayama, K. Takata, K. Matsumoto, P. Mele, Y. Yoshida, Y. Ichino, S. Awaji, *J. Appl. Phys.* **114**, 073903-073909, 2013.
3. " J_c improvement by double artificial pinning centers of BaSnO₃ nanorods and Y₂O₃ nanoparticles in YBa₂Cu₃O₇ coated conductors", T. Horide*, T. Kawamura, K. Matsumoto, A. Ichinose, M. Yoshizumi, T. Izum, Y. Shiohara, *Supercond. Sci. Technol.* **26**, 075019-075026, 2013.
4. "Evaluation of vortex pinning across low angle grain boundary in YBa₂Cu₃O₇ film", T. Horide*, K. Matsumoto, *Appl. Phys. Lett.* **101**, 112604-112607, 2012.

その他 70 報

ホームページ等

<http://w3.matsc.kyutech.ac.jp/energy/index.html>