

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 12 日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K14302

研究課題名(和文) 高効率超伝導電力機器に向けたアシンメトリックピンニングセンター高速最適化技術創製

研究課題名(英文) Development of high-throughput optimization technique in superconductors with asymmetric flux pinning centers aiming to high efficient superconducting power applications

研究代表者

一野 祐亮 (Ichino, Yusuke)

名古屋大学・工学研究科・准教授

研究者番号：90377812

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：磁束量子(FQ)ダイナミクスシミュレーションと磁束ピン止め点(PC)の作製・評価技術を融合させることで、高効率超伝導電力機器に対して最適な非対称PCを高速に探索する技術の創製を試みた。

Nb超伝導薄膜に円形ナノパターンの作製を行った。その結果、円形ナノパターンによるFQ運動のピン止めによって臨界電流密度(J_c)が向上した。また、円形ナノパターンの数密度が多くなるほど J_c が向上する傾向が見られた。また、二次元空間においてFQダイナミクスシミュレーションを行った。その結果、超伝導体の片側に剣山状の切れ込みを入れたモデルにおいて、電流-電圧曲線が原点に対して非対称な挙動が観られた。

研究成果の概要(英文)： We tried to develop high-throughput optimization technique in superconductors with asymmetric flux pinning centers aiming to high efficient superconducting power applications. We fabricated Nb superconducting thin films with nano-seized circles (NSCs), which act as flux pinning centers (PCs). These NSCs contributed to an enhancement of critical current density (J_c) in the Nb films, and J_c increased with increasing number density of the NSCs. We simulated dynamics of flux quantum (FQ) in two-dimensional space. A superconductor model with sawtooth shape in the one side exhibited an asymmetric current-voltage curve.

研究分野：機能性薄膜工学

キーワード：高効率超伝導電力機器 磁束量子運動 非対称ピンニングセンター ナノリソグラフ 磁束量子ダイナミクスシミュレーション

1. 研究開始当初の背景

第二種超伝導体中に侵入した磁束量子 (Flux Quantum: FQ) の運動は、超伝導体中を流れる電気エネルギーを散逸させるため、超低損失送電ケーブルや大規模風力発電機など高効率超伝導電力機器実現のためには FQ をピン止めする点 (Pinning Center: PC) を導入し、FQ の運動を抑制・制御する必要がある。Nb、Al や Pb などの金属系第二種超伝導体薄膜にフォトリソグラフを用いてサブミクロンスケールの非対称な穴を開けた試料、つまり非対称 PC を持った試料に交流電流を印加すると、FQ がある特定の方向にのみ運動する“ラチェット効果”が観察されている [Van de Vondel et al., Phys. Rev. Lett. 94(2005)057003]。このラチェット効果を超伝導ケーブルに応用すれば、超伝導体中からの FQ 排除や外部からの FQ 侵入を抑えることが期待でき、FQ の運動に伴った電気エネルギーの散逸を劇的に軽減出来る可能性がある。

2. 研究の目的

超低損失送電ケーブルや大規模風力発電機など高効率超伝導電力機器実現のためには、PC を導入し FQ の運動を抑制・制御する必要がある。本研究では、計算機を用いた FQ ダイナミクスシミュレーションとナノリソグラフ技術を用いた非対称 PC の作製・評価技術を融合させることで、超伝導電力機器に対して最適な非対称 PC を高速に探索する技術の創製を試みた。

3. 研究の方法

DC マグネトロンスパッタ法を用いて Nb 超伝導薄膜をガラス基板上に室温で作製し、ナノ電極リソグラフ (NEL) 加工技術を用いてナノパターンの作製を行った。図 1 に NEL による Nb 薄膜加工の模式図を示す。NEL は原子間力顕微鏡の拡張機能であり、プローブと試料間に電圧を印加することで試料を局所的に酸化させることができる。酸化物のサイズは、数十～数百ナノメートル程度である。また、CAD などを使って酸化物の配置をデザイン可能である。酸化 Nb は非超伝導体であるため、酸化した箇所は FQ の運動を抑制する PC となる。以上より、NEL によって PC (酸化 Nb) の配置をデザインし、その配置が超伝

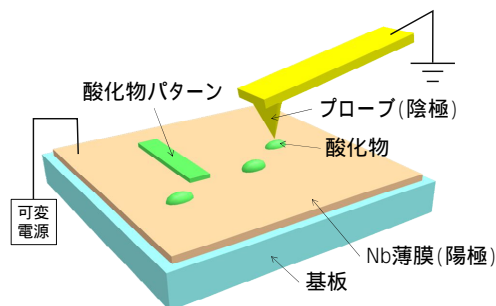


図 1. 原子間力顕微鏡を用いたナノ電極リソグラフ (NEL) の模式図。

導特性に与える影響、特に磁場中における臨界電流密度 (J_c) に与える影響について検討した。磁場中 J_c は直流四端子法を用いて評価し、電場基準 $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ を越える電場が発生した電流密度を J_c と定義した。測定温度は、本研究で得られた Nb 薄膜の T_c 近傍である 6.5 K とした。

超伝導状態にある電子対 (クーパー対) の空間分布は、時間依存 Ginzburg-Landau (TDGL) 方程式によって表される。この TDGL 方程式を解くことで、FQ ダイナミクスを可視化できる。本研究では、非線形な TDGL 方程式を空間的・時間的に差分化し数値計算するシミュレーションコードを開発した。このコードでは、超伝導体内に常伝導部分を意図的に配置することが可能である。また、適当な境界条件を与えることで、磁場や電流などの外部擾乱を課すことができる。このコードを利用して、様々な PC を導入した場合の FQ ダイナミクスについてシミュレーションを行った。

4. 研究成果

Nb 薄膜の T_c は 7 K 程度であり、Nb バルクの 20 K よりも低かった。NEL では表面から数 nm 程度までしか酸化しないため、PC の影響を大きくするために膜厚を 60 nm 程度にしている。その結果、ガラス基板からの歪みや表面の酸化によって T_c が低下したと考えられる。図 2 のように、この Nb 薄膜に NEL によって様々な直径 D の円状 PC を一辺 $1 \mu\text{m}$ の四角格子状に並べて配置した。 6.5 K では FQ の直径がコヒーレンス長 ($110 \text{ nm}@6.5 \text{ K}$) の 2 倍程度であるため、PC はこれより大きな直径 $390 \sim 640 \text{ nm}$ とした。図 3 にこれらの Nb 薄膜の 6.5 K における J_c の磁場依存性を示す。図から、PC が無い試料 (no PC) と比べて PC を持つ試料では全体的に J_c が向上することが確認された。これは、NEL で作製した酸

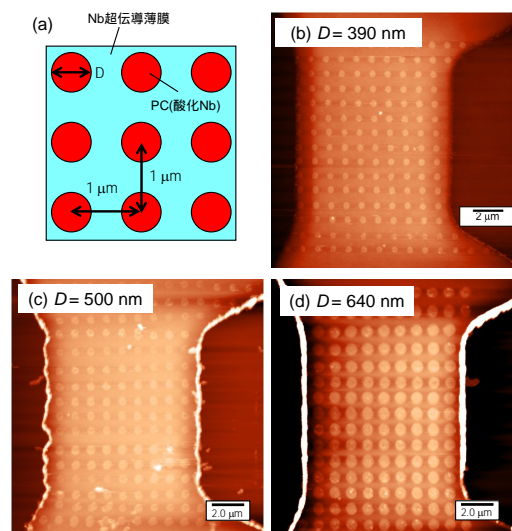


図 2. NEL で加工した Nb 薄膜の (a) 模式図と (b) ~ (d) 原子間力顕微鏡像。白い円が PC (酸化 Nb) で、間隔は $1 \mu\text{m}$ 、直径は (b) 390 nm 、(c) 500 nm そして (d) 640 nm 。

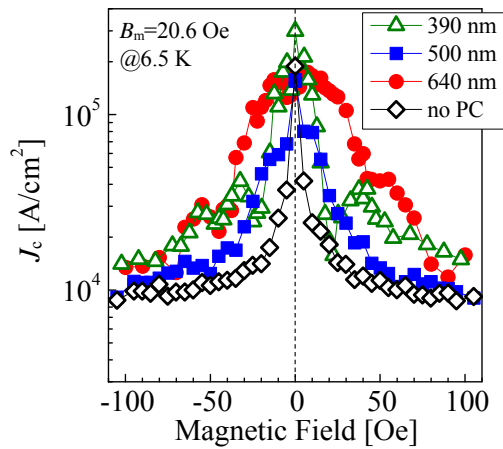


図3. 四角格子 PC を持った Nb 薄膜の 6.5 K における J_c の磁場依存性。

化 Nb が FQ の運動を抑制する PC として機能していることを示している。一方で、PC の直径に対しては明確な傾向は見られなかった。NEL で作製した PC は高さのばらつきが大きかった。一方、FQ のピン止めには PC の

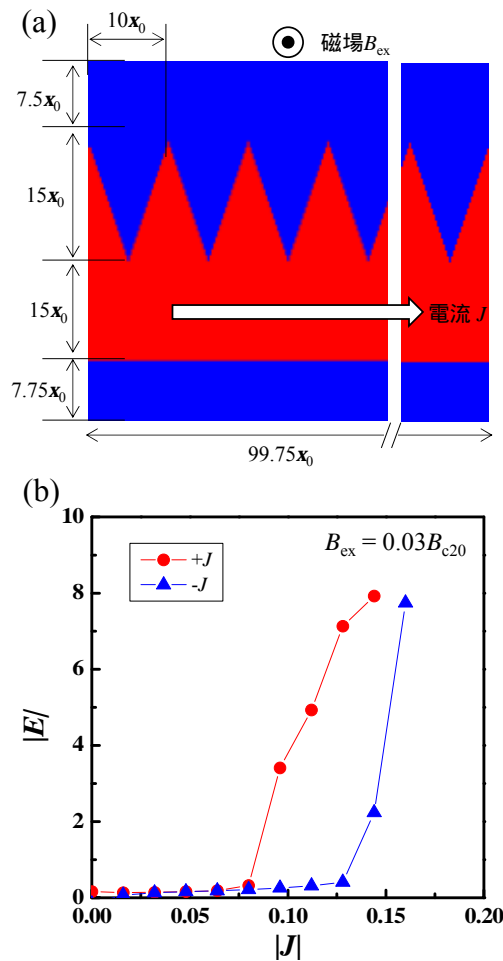


図4. (a) 鋸刃状のエッジを持った二次元超伝導体モデル。赤：超伝導体、青：常伝導体。 ξ_0 は 0 K におけるコヒーレンス長。磁場 B_{ex} は紙面垂直方向、電流 J は紙面水平方向に印加した。(b) $B_{ex} = 0.03B_{c20}$ を印加した際の電流-電圧特性。 B_{c20} は 0 K における上部臨界磁場。特性曲線形状を比較するために、両軸共に絶対値にしている。

体積が効くため、高さのばらつきの影響で、直径に対する明確な傾向が得られなかったと考えられる。高さのばらつきを抑える改善が今後必要である。しかしながら、本研究の結果から NEL によって PC の配置を自在にデザインできることは明らかとなった。

次に、2次元 TDGL シミュレーションによって、非対称な形状を持った超伝導体における電流-電圧特性を求めた。用いたモデルは図 4(a) のように、片側に鋸刃状の切れ込みを持った二次元超伝導体である。この超伝導体に対して垂直方向に磁場を印加し、水平方向に電流を印加した。この際に、電流方向は右向きをプラス(+ J)、左向きをマイナス(- J)と定義した。図 4(b) に、磁場を $0.03B_{c20}$ 印加した際の電流-電圧特性(J - E 曲線)を示す。特性曲線形状を比較するため、両軸共に絶対値にしている。図から、電流方向に対して J - E 曲線の形状が異なっていることがわかる。この差は、超伝導体上下端での FQ の生成の違いに起因している。+ J の場合、FQ には下方向のローレンツ力が働く。鋸刃の先端では FQ が生成しやすくなっているため、生成された FQ がローレンツ力によって次々と下側に流れていった。一方、- J の場合、平坦なエッジでは FQ が生成されにくいいため、より大きなローレンツ力になる高い J まで FQ が生成されなかった。この FQ ダイナミクスの違いによって原点に対して非対称な J - E 曲線が得られた。この 2D-TDGL コードを用いることで、様々な形状の超伝導体に対してその超伝導特性を予測することが可能になった。

超伝導体に印加された電流と磁場が平行な場合を縦磁場状態と呼ぶ。FQ に働くローレンツ力は電流と磁場の外積で表され、縦磁場状態ではゼロとなるため、磁場に対して電流の低下がほとんど無い大容量送電ケーブル

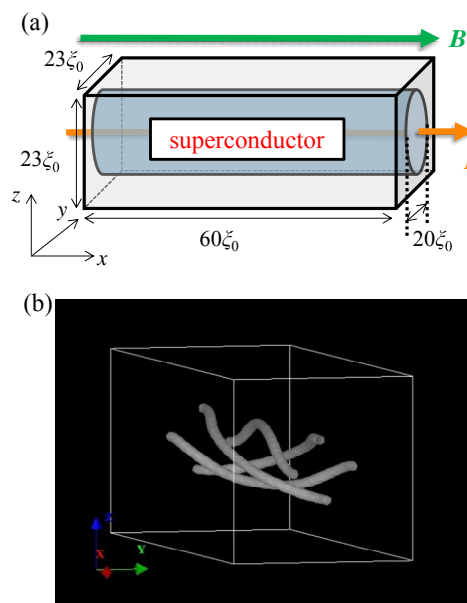


図5. (a) 縦磁場状態の超伝導体モデル。直径 $20\xi_0$ の円筒状超伝導体の中心軸に対して平行に、磁場と電流を印加した。(b) FQ の運動。中心軸を流れる電流に巻き付くように FQ がスパイラル状に変形。

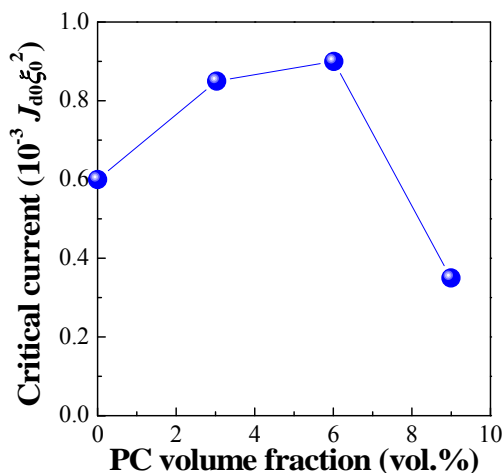


図 6. 超伝導体中粒状 PC (直径 $3\xi_0$) の体積率に対する臨界電流。磁場は $0.2B_{c20}$ を印加。 J_{a0} は 0 K における対破壊電流密度。

ルなどへの応用が期待されている。しかし、実際には縦磁場状態でも FQ は運動し、 J_c を低下させる。この縦磁場状態での FQ ダイナミクスを明らかにするために、2D-TDGL を三次元空間に拡張し、3D-TDGL コードを開発した。この 3D-TDGL コードを用いて、縦磁場における FQ ダイナミクスの可視化と PC の影響について検討を行った。図 5(a)に、シミュレーションに用いたモデルを示す。直径 $20\xi_0$ の円筒状超伝導体の中心軸に対して平行に磁場と電流を印加した。図 5(b)に FQ ダイナミクスの一例を示す。FQ は、中心軸に流れている電流に巻き付くようなスパイラル形状に変形した。これは電流によって生じる自己磁場と外部磁場の合成磁場の方向に FQ が傾くためである。この FQ スパイラルは、中心軸を回転軸として回転運動を続ける様子が観察された。電流と合成磁場は平行ではないため、FQ にローレンツ力が働き、回転運動したと考えられる。次に直径 $3\xi_0$ の粒状 PC を超伝導体中にランダムに分散添加し、その体積率が臨界電流 I_c に与える影響について検討した。図 6 に、粒状 PC の体積率に対する I_c を示す。図より、6 vol.% 付近で I_c が最大値を取ることがわかった。これは、スパイラル FQ の回転運動が粒状 PC によってピン止めされたためである。一方で、6 vol.% 以上では粒状 PC 間距離が近くスパイラル FQ が PC 間を容易にジャンプできるため、反って I_c が低下した。この 3D-TDGL コードによって、縦磁場状態のような FQ が複雑な運動をする系や、三次元的な構造を持った超伝導体における FQ 運動の可視化や超伝導特性の予測が可能となった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 17 件)

S. Ito, Y. Ichino, Y. Yoshida, S. Miura, Physica C, 518, 2015, 40, 査読有り

DOI: 10.1016/j.physc.2015.06.006

Y. Ichino, Y. Yoshida, S. Miura, Jpn. J. Appl. Phys., 56, 2017, 015601, 査読有り

DOI: 10.7567/JJAP.56.015601

〔学会発表〕(計 62 件)

中村貞治, 一野祐亮, 吉田隆, 2015 年第 76 回応用物理学会秋季学術講演会, 2015/9/13~16, 名古屋国際会議場

K. Adachi, Y. Ichino, Y. Tsuchiya, Y. Yoshida, 29th International Symposium on Superconductivity 2016, 2016/12/13~15, 東京国際フォーラム

6. 研究組織

(1)研究代表者

一野 祐亮 (ICHINO, Yusuke)

名古屋大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 90377812

(2)連携研究者

吉田 隆 (YOSHIDA, Yutaka)

名古屋大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 20314049

(3)研究協力者

中村 貞治 (NAKAMURA, Joji)

足立 健人 (ADACHI, Kento)