

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月10日現在

機関番号：15501

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22560297

研究課題名（和文） 超伝導整流素子の実現に向けた非対称人工ピンの導入と特性向上に関する研究

研究課題名（英文） Study of introduction of asymmetry artificial pinning centers and improvement of superconducting characteristics for realization of superconducting rectifying device

研究代表者

原田 直幸 (HARADA NAOYUKI)

山口大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号：00222232

研究成果の概要（和文）：超伝導体に電流を流すと、超伝導体内部の磁束線にローレンツ力が働き、ミクロな不均質部分との相互作用により、量子化磁束がピン止めされ、臨界電流（無損失で流すことができる電流）密度が決まる。塑性加工により線材に導入する人工ピンの考えを発展させ、微細加工技術を用いて非対称人工ピンを導入し、通電方向によって臨界電流密度が異なる超伝導素子の製作を目標として、厚さ $0.5\mu\text{m}$ の Nb 膜に非対称人工ピンの導入を行った。

研究成果の概要（英文）：When the current flow through a superconductor, the Lorentz forces will act on the vortices and make them move. The pinning centers are irregularly introduced into the superconductor, resulting in a symmetric pinning potential, which is not anisotropic according to the direction of the Lorentz force. If it is able to generate asymmetry in the pinning potential, it becomes possible to produce a superconductor with an anisotropic critical current density according to the flow direction of the current. Therefore the realizations of new rectifying superconducting devices are expected. In order to investigate the critical current properties for the superconducting device using asymmetric artificial pinning centers, triangle-shaped patterns were introduced as APCs in a $0.5\text{-}\mu\text{m}$ -thick Nb film by using a lithographic technique.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
2012年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	2,900,000	870,000	3,770,000

研究分野：超伝導工学

科研費の分科・細目：電気電子工学、電子・電気材料工学

キーワード：超伝導、臨界電流、磁束ピンニング、人工ピン、非対称、微細加工、Nb膜

1. 研究開始当初の背景

超伝導材料は、温度、磁場、電流密度で囲まれた臨界面の内側で超伝導状態を示す。実

用超伝導線材に用いる第2種超伝導体に電流を流すと、超伝導体内部で量子化された磁束線にローレンツ力が働く。このローレンツ

力が作用する量子化磁束と、超伝導体内部のミクロな不均質部分との相互作用により、量子化磁束がピン止めされ、臨界電流が決まる。(臨界電流とは無損失で流すことができる電流)超伝導体の臨界温度や臨界磁場は材料によって決まるが、臨界電流密度は効果的なピンニングセンターの導入によって改善することができる。

従来、このピンニングセンターは熱処理や圧延加工により超伝導線材に経験的に導入された結晶粒界や析出物などであったが、人工的に導入する方法も開発されてきた。研究代表者は、塑性加工により線材に導入する人工ピンの考えを発展させ、微細加工技術を用いて溝状の人工ピンを導入し、人工ピンとして作用することを確認した。一方、ローレンツ力が作用する方向に対して、その断面形状を変化させることで、磁束線に作用するピンニングポテンシャルの形状も変えることができる。そこで、人工ピンの断面形状を非対称にすることでピンニングポテンシャルを非対称にし、通電方向に対して臨界電流密度が異なる特性(順方向には電流を流しやすく、逆方向には電流を流しにくい特性)を持つ超伝導体を作製することができると考えた。この原理を確認するため、図1に示すようなステップ状非対称人工ピンを超伝導 Nb 膜に導入し、磁気光学効果を用いた MO 磁束観察法により、磁束密度の分布に非対称性があること、すなわち臨界電流密度特性が非対称であることをはじめて確認した。

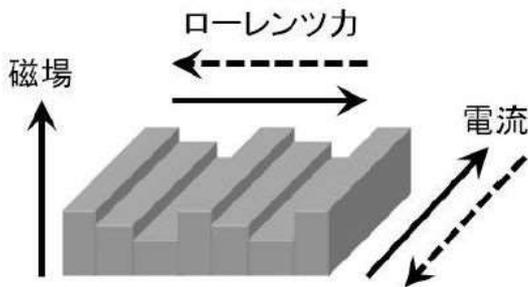


図1 これまでに検討を行ってきたステップ状の非対称人工ピン

2. 研究の目的

これまでに確認した臨界電流密度の非対称性は小さいため、さらに高密度の非対称人工ピンの導入、臨界電流密度特性の向上、整流素子の作製方法の検討などが必要である。また、整流素子として用いるためには、図2に示すように順方向の電流を大きくし、逆方向の電流を小さくする必要がある。

そこで本研究では、これまで実験を行ってきたステップ状人工ピンに代り、導入が容易

な非対称人工ピンの検討、高密度の非対称人工ピンの導入方法や特性を向上させることを目的とした。

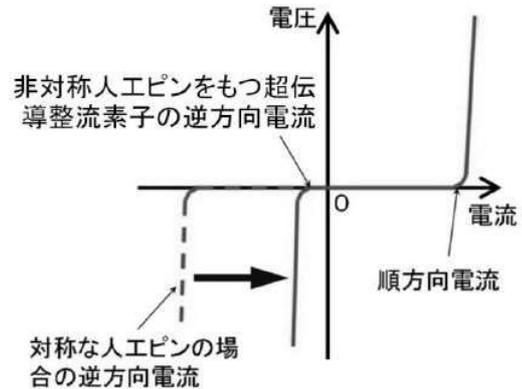


図2 非対称人工ピンを用いた超伝導整流素子の特性を表した模式図

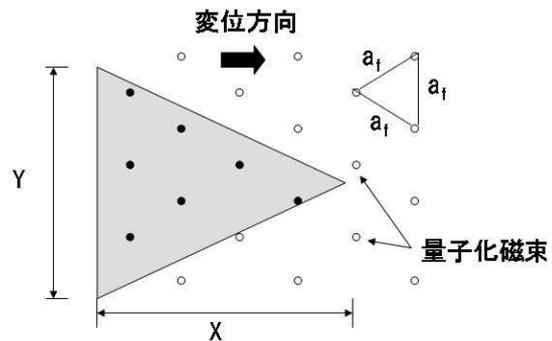


図3 解析に用いた三角形の形状の非対称人工ピンのモデル

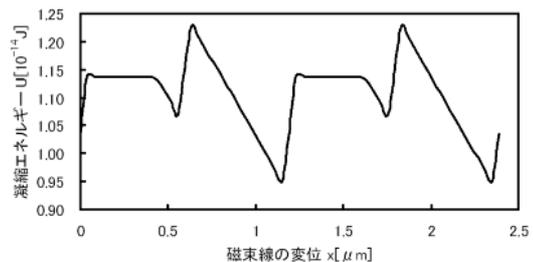


図4 量子化磁束の変位に対する凝縮エネルギーの変化の予測の一例

3. 研究の方法

以下の(1)~(3)について、検討を行った。

(1) ステップ状人工ピンの代わりとなる新しい非対称人工ピンの提案

ステップ状の人工ピンは、微細加工を繰り返して導入するため、作製の効率や加工精度がよくなかった。このことを改善するため、

三角形の形状の人工ピンを提案する。

(2) 新しい非対称人工ピンの特性

三角形の形状の人工ピンのモデル化を行い、量子化磁束との相互作用について数値計算を行い、凝縮エネルギーの変化を求め、人工ピンとしての効果を予測する。

(3) 高密度の非対称人工ピンの導入や設計通りに人工ピンを導入する方法

①Nb 膜に人工ピンのパターンを直接描画し、その後ドライエッチングにより微細加工を行う方法を確立する。

②人工ピンの大きさや間隔を変えて、微細加工を行う。

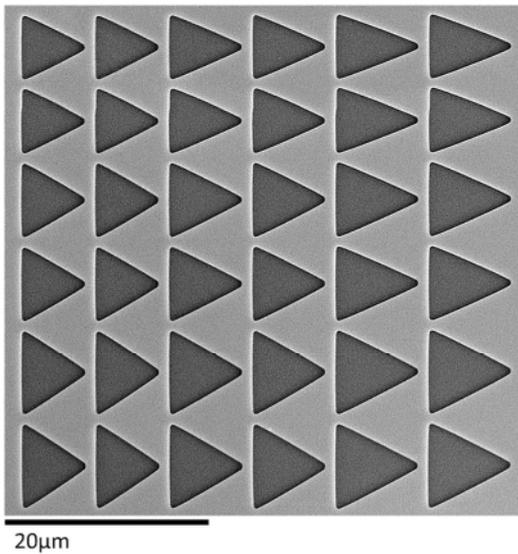


図5 大きさを変えて Nb 膜に導入した非対称人工ピン

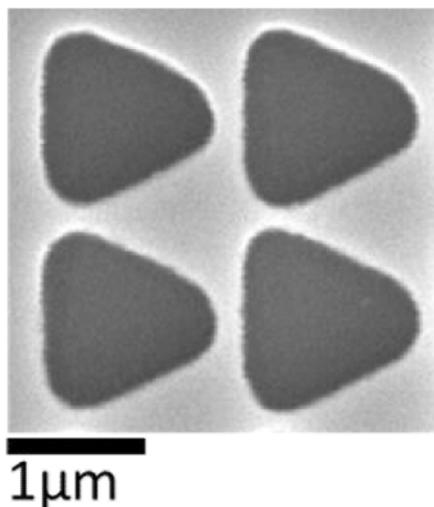


図6 Nb 膜に導入した非対称人工ピン

4. 研究成果

(1) ステップ状の人工ピンに代り、導入が比較的容易な三角形の形状の人工ピンを図3に示すようにモデル化し、非対称性を予測するため数値計算を行った。この結果、図4に示すように非対称人工ピンとして作用する予測結果が得られた。

(2) 人工ピンの導入方法を改善するため、直接描画法により厚さ $0.5\mu\text{m}$ の Nb 膜に人工ピンのパターンを直接描画し、ドライエッチングにより図5と図6に示す三角形の形状の非対称人工ピンを導入した。この結果、 $1\mu\text{m}$ ~ $3\mu\text{m}$ 程度の大きさの人工ピンの導入も可能であることがわかった。

(3) 今後は、ドライエッチングにより導入した人工ピンの効果を磁化や臨界電流密度の測定で確認し、非対称人工ピンとして実際に作用する素子の作製を試みる。

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)

[学会発表] (計4件)

①岩村崇宏, 原田直幸, 諸橋信一, 浅田裕法, 「非対称な磁束ピンニングセンターを導入した超伝導素子の研究」, 第14回 IEEE 広島支部学生シンポジウム, 2012年11月17日, 岡山県立大学(総社市)

②藤原圭太, 白川悠, 原田直幸, 内藤裕志, 浅田裕法, 「微細加工による非対称人工ピンの導入と特性の検討」, 平成23年度(第62回)電気・情報関連学会中国支部連合大会講演論文集, p. 402, 2011年10月22日, 広島工業大学(広島市)

③藤原圭太, 原田直幸, 内藤裕志, 「ラチェット形状の人工ピンを導入した超伝導膜の特性に関する検討」, 平成22年度(第61回)電気・情報関連学会中国支部連合大会講演論文集, p. 583, 2010年10月23日, 岡山県立大学(総社市)

④白川悠, 藤原圭太, 原田直幸, 浅田裕法, 内藤裕志, 「非対称人工ピンの導入と特性の検討」, 平成22年度(第61回)電気・情報関連学会中国支部連合大会講演論文集, p. 584, 2010年10月23日, 岡山県立大学(総社市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

原田 直幸 (HARADA NAOYUKI)

山口大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号: 00222232

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

石橋 隆幸 (ISHIBASHI TAKAYUKI)

長岡技術科学大学・工学部・准教授

研究者番号：20272635