

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 21 日現在

機関番号：12612

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26600011

研究課題名(和文)超伝導量子渦ビットの創出

研究課題名(英文)Fabrication of superconducting quantum vortex cells

研究代表者

小久保 伸人 (KOKUBO, NOBUHITO)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・准教授

研究者番号：80372340

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)：超伝導膜のアンチドットに閉じ込めた量子渦状態を使って、情報の基本単位を表現する超伝導量子渦ビットを試作し、セル・オートマトンの原理にしたがう機能性論理ゲートの構築を目指した。論理ゲートを構成する各量子渦セルに同数の量子渦を誘起させ、セル状態が揃う初期状態を走査SQUID磁気顕微鏡で直接観測し、最適なアンチドット構造を見出した。電流パルスによる論理状態の制御に課題が残ったが、セル・オートマトンの原理の実証につながる有益な研究成果が得られた。

研究成果の概要(英文)：We have fabricated superconducting quantum-vortex based functional logic gates composed of micro-structured mesoscopic antidot squares, in which a pair of vortices is used as an information bit. We successfully induced the same number of quantum vortices in each quantum vortex cell and observed the initial state of the logic gate with the scanning SQUID magnetic microscope. Although the problem remains in the control of the logic state by a current pulse, our research findings are useful for vortex-based, prospective applications, including the vortex-based cellular automata.

研究分野：数物系科学

キーワード：超伝導材料・素子 量子渦 メゾスコピック系 走査プローブ顕微鏡 低温物性

1. 研究開始当初の背景

ナノサイズの半導体量子ドットを占有する電子配置を使って情報をコード化し、論理状態を遷移させる量子セル・オートマトンは、近年の半導体集積回路の微細化に伴う発熱と量子効果の物理的な問題を抜本的に解決する有力な原理の一つである。量子ドット間のトンネル効果を利用するため、発熱は無視できるほど小さく、量子ドットの配置を変えるだけで基本的な機能性論理ゲートを構築できるとされる。しかし、単一の電子を操作する量子ドットデバイス特有の問題(ゲート制御に要する配線)が残り、実現に多くの課題を抱えていた。

最近、巨視的量子現象である超伝導に着目し、その秩序凝縮相である量子渦状態を使った新しい論理ゲートが理論的に提案された。クーロンの斥力がはたらく量子渦(パル渦)を小さな正方形の超伝導薄膜に閉じ込めることで、上記の量子ドットの電子配置によく似た量子渦配列を創りだすことができる。小さな超伝導体に誘起された微小系特有の量子渦状態はこれまで盛んに調べられてきたが、これを使って論理ゲートの構築を試みる事例は我々の知る限り報告されていなかった。

2. 研究の目的

そこで本研究は、超伝導膜に小さなアンチドット構造を設けた超伝導量子渦セルを提案し、量子渦を使ったセル・オートマトンの原理の実証と簡単な論理ゲートの構築を目指した。

3. 研究の方法

前例のない新しい試みであり、手探りで進めなければならない点が多い。効率よく研究を遂行するためには、セルの論理状態の可視化が必要となる。そこで、

- (1) 量子渦が伴わずかな磁場を捉えられる超伝導量子干渉計(SQUID)素子に着目し、これを使った走査SQUID顕微鏡を用いること、
- (2) 磁気顕微鏡の空間分解能(数ミクロン)を満たす大きさの超伝導量子渦セルとすること、
- (3) 適切な超伝導材料を選定すること

を本研究の条件とした。
我々が提案する超伝導量子渦セルは、基本的に超伝導2層膜(アモルファス MoGe 膜と窒化ニオブ膜)で、上層膜(窒化ニオブ膜)を正方形に取り除いたアンチドット構造をもつ。超伝導体の膜厚差、磁場の集束効果を巧みに利用することにより、各アンチドット内に同数の量子渦を閉じ込めることができる。作製した試料の基本的な超伝導特性やピン止め特性の評価は物理特性測定装置(PPMS)で調べ、量子渦セルの論理状態の可視化に必要な走査SQUID磁気顕微鏡実験は連携研究者である岡安悟博士、野島勉博士の協

力を得て行った。

4. 研究成果

量子渦セル

図1は3連の量子渦セルの模式図とその磁気像である。各アンチドットセルに量子渦ペアが誘起され、その向きが各セルの対角線に揃い、すべて同方向を向いていることがわかる。各セルで期待される右向きと左向きのエネルギー的に等価な量子渦ペアの配列状態を“0”と“1”の論理状態と見なすと、得られた結果はワイヤと呼ばれる論理ゲートの初期状態に相当する。6連まで同様の初期状態を見出したが、その出現の頻度はアンチドットセルの大きさに依存することが分かった。

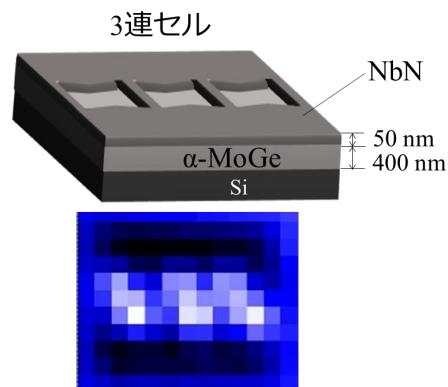


図 1. 量子渦セルの模式図と3連の量子渦セルで得られた磁気像

量子渦数とセル内・セル間相互作用

このような量子渦ペアの向きが揃った状態を見出すには、同一セル内及び隣接するセル間ではたらく量子渦の相互作用が重要となる。また量子渦数の変化をもたらす磁氣的なノイズの影響の低減も応用上重要となる。そこで各セルに誘起された量子渦数と論理状態を示す配列の向きを印加磁場の大きさを変化させながら統計的に調べた。その結果、

- (1) すべてのセルに同数の量子渦(量子渦ペア)が占める磁場の範囲は、アンチドットの大きさが小さくなるにしたがって広がること、
- (2) 各セルに現れる量子渦ペアの向きがセルの対角線に揃うのは、アンチドットの大きさを量子渦の大きさ(有効磁場侵入長 ~数ミクロン)の数倍程度以下に小さくした場合であること、
- (3) 隣接するセルの量子渦ペアの向きが揃うのは、隣接するアンチドット間の間隔を量子渦の大きさ程度以下にした場合であること

がわかった。

電流制御

セル・オートマトンの動作原理を量子渦で実証するには、量子渦セル内の論理状態の制御（“0” “1”あるいはその逆の遷移）が必要である。そこで図2に示すような電流配線を量子渦セルの一端に設け、電流パルスによる論理状態の遷移を試みた。サブ μs ～数msのさまざまな幅をもつ電流パルスを単一の量子渦セルに与えたところ、図2の磁気像のように、セル内の量子渦ペアの向きを遷移させることに成功した。しかし、複数の量子渦セルでは信頼できる論理状態の遷移は確認できなかった。量子渦セル内に流れ込む電流分布の詳細な解析とそれを踏まえたアンチドット構造の見直しが必要となった。

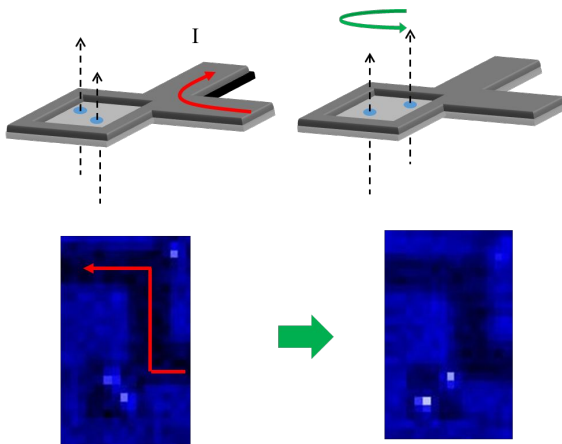


図2 量子渦セルの電流制御の模式図（上図）と磁気像（下図）

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 3件)

1. N. Kokubo, H. Miyahara, S. Okayasu, T. Nojima, Vortex shells in mesoscopic triangles of amorphous superconducting thin films. *Physica C*, 査読有, Vol. 530, 42-45, 2016, 10.1016/j.physc.2016.05.009.
2. 小久保伸人, 幾何学的構造を持つ微小超伝導体に閉じ込めた量子渦配列, 固体物理, 査読有, Vol. 594, No.8, 437-446, 2015.
3. N. Kokubo, H. Miyahara, S. Okayasu, and T. Nojima, Commensurate and incommensurate Vortex States Confined in Mesoscopic Triangles of Weak Pinning Superconducting Thin Films, *Journal of the Physical Society of Japan*, 査読有, Vol. 84 No. 4, 2015, p.043704 (4 pages), 10.7566/JPSJ.84.043704.

〔学会発表〕(計 8件)

1. 望月麟太郎, 小久保伸人, 織田健佑, 岡安悟, 野島勉, 佐々木孝彦: アンチドット構造をもつ超伝導二層膜に閉じ込めた渦糸状態と電流制御 II, 日本物理学会第72回年次大会, 2017年3月18日, 大阪大学(大阪府豊中市)
2. 望月麟太郎, 小久保伸人, 織田健佑, 岡安悟, 野島勉, 佐々木孝彦: アンチドット型超伝導量子渦セルの渦糸状態と相互作用, ナノトライボロジー研究ステーション主催「電通大-理科大合同研究会」, 2017年3月8日, 電気通信大学(東京都調布市)
3. 小久保伸人, 宮原大, 岡安悟, 野島勉, 佐々木孝彦: 三角形の微小超伝導体における多重渦状態と殻構造, 一般講演, 日本物理学会第71回年次大会, 2016年3月21日, 東北学院大学(宮城県仙台市)
4. 小久保伸人, 北野恒平, 望月麟太郎, 岡安悟, 野島勉, 佐々木孝彦: 微細構造を持つ微小超伝導体に閉じ込めた多重渦状態と制御, 第23回渦糸物理国内会議, 2015年12月8日, 休暇村志賀島(福岡県福岡市)
5. 小久保伸人, 宮原大, 岡安悟, 野島勉: 多重渦状態と殻構造, 第23回渦糸物理国内会議, 2015年12月8日, 休暇村志賀島(福岡県福岡市)
6. N. Kokubo, S. Okayasu, T. Nojima, T. Sasaki: Observation of Multi-Vortex States Confined in Mesoscopic Superconductors of Different Geometric Shapes, 28th International Symposium on Superconductivity, 2015, 18 Nov. Tower Hall Funabori(Tokyo, Edogawa)
7. 望月麟太郎, 岡安悟, 野島勉, 佐々木孝彦, 小久保伸人: アンチドット構造をもつ超伝導二層膜に閉じ込めた渦糸状態と電流制御, 日本物理学会2015年秋季大会2015年9月19日, 関西大学(大阪府吹田市)
8. 北野恒平, 望月麟太郎, 小久保伸人: 周期的微細構造をもつアモルファス超伝導膜に誘起された渦糸状態, 日本物理学会2015年秋季大会2015年9月19日, 関西大学(大阪府吹田市)

〔図書〕(計 1件)

1. N. Kokubo, S. Okayasu, K. Kadowaki: MULTI-VORTEX STATES IN MESOSCOPIC SUPERCONDUCTORS, *The Oxford Handbook of Small Superconductors*, Aant Narlikar (Ed.), Oxford University Press, Chapter 3, 2016 (ISBN: 9780198738169). 81-107 (27 pages) DOI:10.1093/acprof:oso/9780198738169.003.0003

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小久保伸人 (Kokubo Nobuhito)
電気通信大学・大学院情報理工学研究科・
准教授
研究者番号：80372340

(1) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

岡安 悟 (Okayasu Satoru)
国立研究開発法人日本原子力研究開発機
構・先端基礎研究センター・研究主幹
研究者番号：50354824
野島 勉 (Nojima Tsutomu)
東北大学・金属材料研究所・准教授
研究者番号：80222199