

Title	極短光パルスで操る磁束量子
Author(s)	斗内, 政吉
Citation	大阪大学低温センターだより. 2002, 119, p. 16-20
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/6034
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

極短光パルスで操る磁束量子

超伝導フォトンクス研究センター 斗内政吉 (内線7981)

E-mail: tonouchi@rcsuper.osaka-u.ac.jp

1. はじめに

超高速電荷変調を誘起・観測することは、固体物理学の本質的研究テーマの一つである。近年のフェムト秒レーザー開発の進展により、その研究対象が急速に拡大され、様々な発見^[1,2]がもたらされている。一方、超伝導状態は、マクロ領域におけるコヒーレント量子状態であり、統計的にエネルギーが最小となることで維持されている。また、ジョセフソン発振やSFQ回路の高速動作状態においても、その量子状態が維持される、優れた特徴も有している。しかしながら、この量子状態に対する非マルコフ散乱過程での研究展開はまだなく、超高速電荷ダイナミクスの解明のみならず、量子化過程の過渡現象も含めた壮大な未開拓研究領域が存在している。

ここでは、その扉を開く萌芽的研究として、極短光パルスを用いて、超伝導体中における磁束量子の生成と制御^[3-9]を実現した結果について報告する。通常、マイスナー状態では、磁束が外部から侵入できないために超伝導内部に磁束量子を生成できない。本研究では、極短光パルスを用いることで、侵入という過程を経ることなく、自由に生成・制御できることを証明し、フェムト秒レーザーを用いた磁束文字の生成をデモンストレートする。

2. 光磁束生成の基本的アイデア

基本的アイデアを図1により説明する。最初の図では超伝導薄膜ストリップラインに電流が流れている状態を考える。この時、マイスナー状態においても膜中に超伝導電流が流れる。その状態で、フェムト秒レーザーを薄膜の一部に照射すると、対粒子の一部が破壊され、超伝導電流が運べなくなる。通常の状態では、その減少分を、他の対粒子が加速されることで補われるが、高速過程ゆえ、補償が間に合わず、実質的に電流が減少することになる。この過程を経て、インダクタンスを通して蓄えられているエネルギーの一部が、テラヘルツ電磁波^[10,11]として外部に放射される。この超伝導電流変調量は、光の強度に比例し、結果的に、図に示すように、レーザー

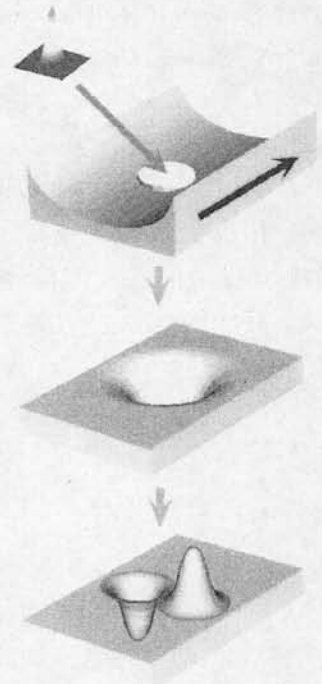


図1 光励起による超伝導薄膜ストリップライン内における磁束量子生成過程

ビームプロファイルに対応した電流減少状態が瞬時に形成される。一方、光子が到達していない領域では、超伝導電流の再分布化へと粒子が動き始める。この瞬間、超伝導電流が減少している領域には、その周辺が作る磁界が存在している。即ち、多くの粒子が超伝導粒子として存在するが、一方では磁界の存在を許しており、超伝導状態・常伝導状態が区別されない時間スケールに位置することとなる。これは、磁界が存在するという、初期条件に瞬時変化させたことに対応し、その次の瞬間から、磁界を感じた対粒子が過渡的に渦電流を誘起し、磁束へと量子化する。その結果、生成された磁束量子は、近いピン止めセンターにトラップされる。磁束粒子分布は、フェムト秒レーザービームプロファイルが転写された形となり、この現象が実現されれば、フェムト秒レーザーに対するイメージングプレートや、光メモリー、更には、単一ボルトクス状態を利用した光プロセッシングなどへの展開も期待される。

3. 実験方法^[9,12]

図2に実験システム構成例を示す。パルス幅約50fsの光パルスをパルスセレクターに導き、パルサーによりバーストパルスを発生し、AOMにトリガーをかけることで、単一フェムト秒パルスを取り出すことができる。そのパルスを、超伝導ストリップラインの一部に照射し、その後、超伝導電流をテラヘルツ電磁波イメージングにより観測する。試料(図3)としては、厚さ100nmのYBCO薄膜から幅400 μm 、長さ約500 μm のブリッジにピニングセンターとして、全領域に、直径約1 μm 、ドット間約4 μm のアンチドットアレーを作成している。これは、生成された磁束量子をその場で凍結させるために導入している。実際には、アンチドットが存在しない場合でも磁束量子生成が可能であることが確認されている^[9]。この試料に電流100–700mAを印加し、ストリップライン内部に単一パルスエネルギー1.8nJで磁束を生成した。この時、ビーム径は約15 μm 程度であった。

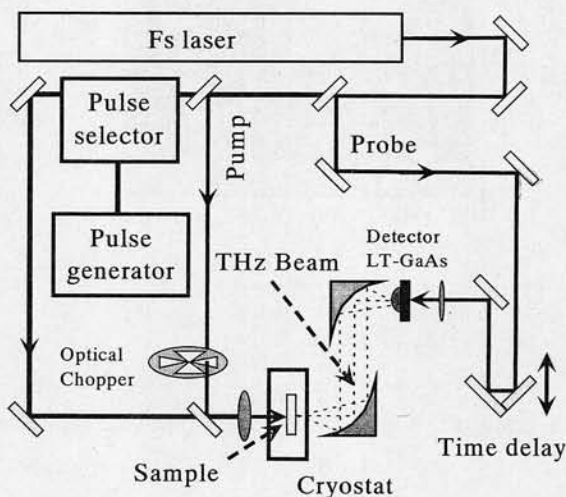


図2 磁束量子生成・観測システム

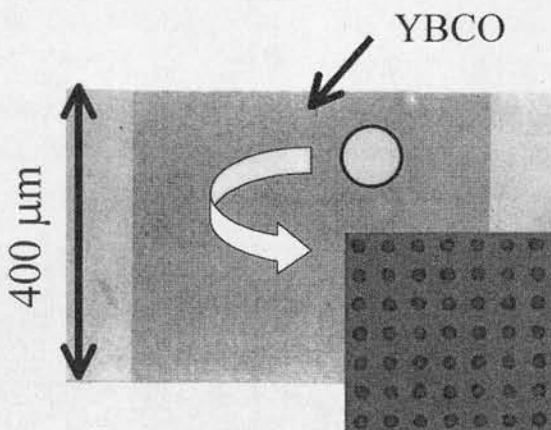


図3 アンチドットアレー型サンプル

4. 結果及び考察

電流を印加した状態で、単一フェムト秒パルスを、各点で、一度照射した後、バイ

アス電流のない状態で超伝導電流分布を観測した結果を図4に示す。ここでは、THz電磁波イメージングによる、 x 方向成分のみの電流分布を示している。明瞭に 3×4 のパターンが観測され、磁束量子が生成されていることがわかる。白い部分が正の電流、黒い部分が負の電流を意味し、各ドットの上に周回する電流が生成されていると思われる。ここ超伝導電流から磁束量子がボルテックスバンドルおよびアンチボルテックスバンドルとして、存在している。その磁束量子数は、これまでの経験から、数10から100個程度と推察される。上下に線状に見られる電流は、バイアス電流を印加したときに、エッジから侵入したボルテックスによるもので、残留磁化として、侵入長 $1 \mu\text{m}$ 以下で存在している。

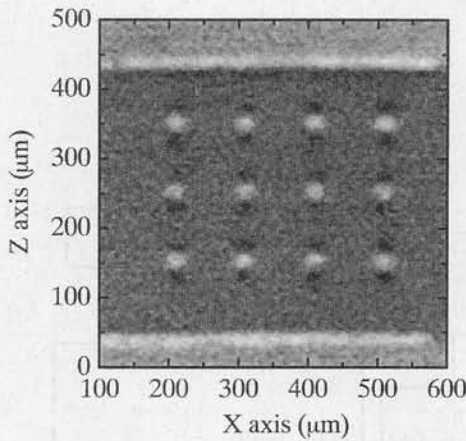


図4 YBCO ストリップライン中に生成した磁束量子バンドル

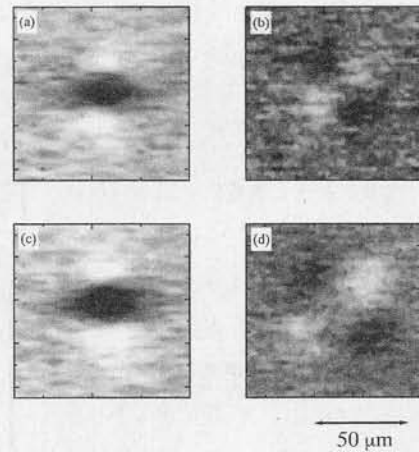


図5 異なるビーム径で生成した磁束バンドル。(a)は(c)より小さな径とした。(b)、(d)はそれぞれに対応する z 方向電流。

超伝導電流が周回していることは、LT-GaAs 検出器を90度回転させることで検証することができる。図5(a)は x 方向成分の分布で、(b)は対応する z 方向成分である。この結果、生成した磁束の周囲には、周回電流が存在すること証明された。また、集光レンズの位置を変えることで、ビーム径を変化させることができる。図5(c)及び(d)はその時の観測結果で、ビーム径が大きくなるにつれて、磁束分布も大きくなっていることが観測されている。即ち、フェムト秒レーザープロファイルの2次元情報が磁束量子分として転写されていることが示唆される。

以上、この技術を用いて磁束文字を作成した結果を図6に示す。明瞭に“SUPER”と書かれており、単一フェムト秒光パルスを用いて、磁束量子文字の形成をデモンストレーションすることができた。また、この文字の認識は、電流を除去しなくても同様に観測可能である。このことから、2次元デバイ

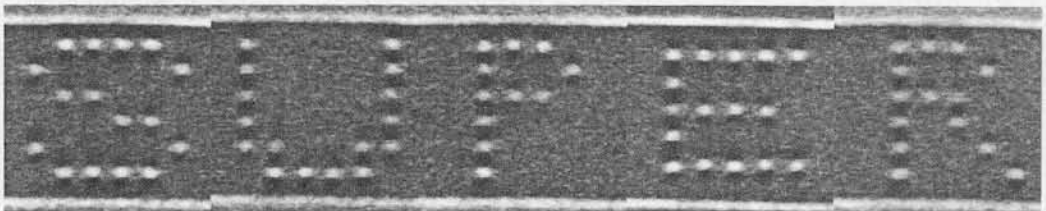


図6 フェムト秒パルスで生成した磁束文字。それぞれのドットは、単一光パルスで生成されている。

スへの展開も大いに期待される。また、この磁束文字は70Kまで観測された。消去には、常伝導転位を用いたが、 J_c 程度の電流を流すことでも、消去可能であった。

5. 将来への応用展開

全く新しい現象の発見で始まった萌芽的研究であるが、単一フェムト秒光パルスの2次元情報を磁束分布に変換できる可能性があり、光信号処理の観点から様々な応用展開の可能性はある(図7参照)。

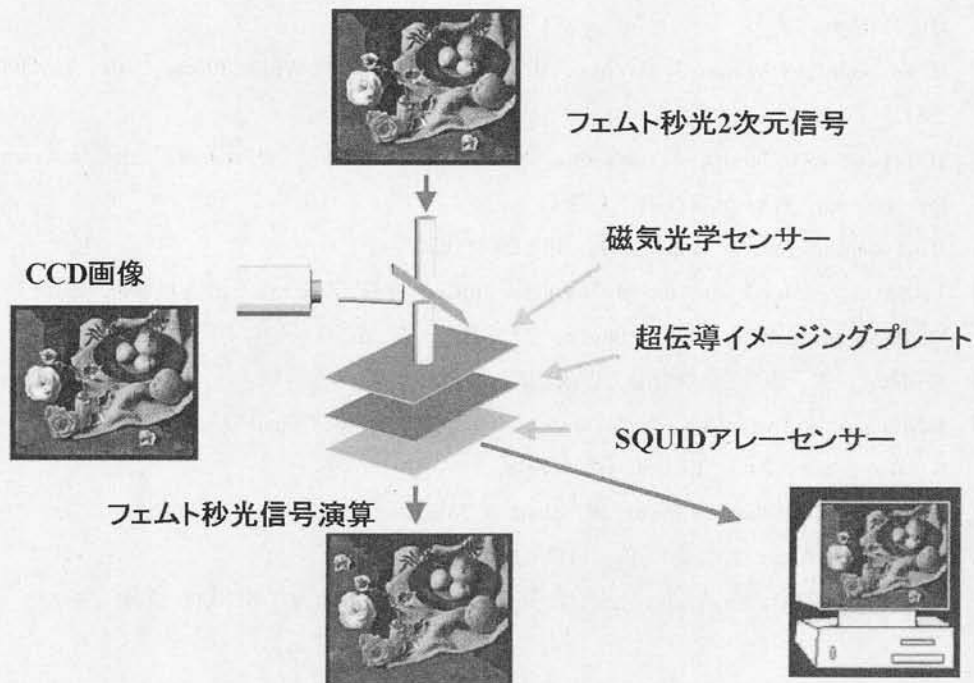


図7 光磁束生成現象を応用した将来展望

まず、最も確実なものは、現在の読み出し方式をテラヘルツ電磁波放射イメージング法から CCD 読み出しの磁気光学イメージング法に変換することで、ある程度高速な、フェムト秒光2次元信号検出システムが構築できる。また、この高温超伝導イメージングプレートを、SQUIDアレーや、単一磁束量子論理回路と組み合わせることで、超高速2次元光信号インターフェイスも構築できることが期待される。最も壮大な展開は、例えばアンチドットに上向きの磁束・下向きの磁束・空孔と3つの信号レベルを利用した2次元量子ビット演算回路や、2次元光信号プロセッシングなどが挙げられる。

6. まとめ

今回、単一フェムト秒パルスを用いて、超伝導体中に磁束量子を生成できることを証明した。この時、磁束量子分布は、レーザービームプロファイルに依存することから、フェムト秒レーザーイメージングシステムや光演算などへの応用も期待される。

本研究は、超伝導フォトンクス研究センター福井隆氏ならびに村上博成博士との共同研究の成果である。本研究の一部は、科学技術振興事業団さきがけ研究21の援助を受け行われた。

参考文献

- [1] R.Huber, F.Tauser, A.Brodschelm, M.Bichler, G.Abstreiter, and A.Leitenstorfer, *Nature*, 414(2001) 286.
- [2] M.U.Wehner, M.H.Ulm, D.S.Chemla, and M.Wegener, *Phys. Stat. Sol. (b)*, 206(1998) 281.
- [3] M.Tonouchi, M.Tani, Z.Wang, K.Sakai, N.Wada, and M.Hangyo, *Jpn. J. Appl. Phys.* 36 (1997) L93.
- [4] M.Tonouchi, N.Wada, M.Hangyo, M.Tani and K.Sakai, *Appl. Phys. Lett.*, 71 (1997) 2364.
- [5] M.Tonouchi, S.Shikii, M.Yamashita, K.Shikita, T.Kondo, O.Morikawa, and M.Hangyo, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 37(1998) L1301.
- [6] M. Tonouchi, *Jpn. J. Appl. Phys.* 40 (2001) L542.
- [7] T. Fukui, H.Murakami, and M.Tonouchi, *IEICE Trans. Electron.*, E85-C (2002) 818.
- [8] M. Tonouchi and K. Shikita, *Physica C*, 367 (2002) 37.
- [9] 斗内政吉, 電子情報通信学会論文誌 C, J85-C (2002) 323.
- [10] M.Hangyo, S.Tomozawa, Y.Murakami, S.Nakashima, M.Tonouchi, M.Tani, Z.Wang and K.Sakai, *Appl. Phys. Lett.* 69(1996)1948.
- [11] M.Tonouchi, M.Tani, Z.Wang, K.Sakai, S.Tomozawa, M.Hangyo, Y.Murakami, and S.Nakashima, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 35(1996)2624.
- [12] M. Tonouchi, M. Yamashita, and M. Hangyo, *J. Appl. Phys.*, 87(2000) 7366.