

# 極短光パルスによる磁束量子の生成・制御

大阪大学 レーザー科学研究所

斗内 政吉

## 1. はじめに

量子コンピュータや高速超伝導回路の実現に向けて、磁束量子や磁束渦が再び注目を集めている。光による磁束量子の制御、発生、検出は、そのような研究の進展を加速するための重要な課題である。そのため、超伝導体の超高速光応答のさらなる研究が必要である。フェムト秒レーザー照射によるテラヘルツ放射分光とイメージングにより、超伝導体の超高速光応答について、放射時間領域波形を観測することでより深い知見を得ることができる<sup>1)</sup>。超伝導体に極短光パルスを照射することで、超伝導ループ<sup>2)</sup>や超伝導ストリップ<sup>3)</sup>に磁束量子バンドルを生成・制御が可能である。ここでは、そのような光応答<sup>4)</sup>をレビューする。

## 2. 磁束量子の光生成

図1に磁束量子バンドルの生成概念を示す。その手順は次の通りである。1) 超伝導薄膜に電流を流す。この時表面付近に超伝導電流が分布する。2) フェムト秒光パルス照射による超高速対粒子破壊より、相転移の無い電流変調を誘発する。3) 電流変調は、入射光子密度に依存した超伝導電流の減少として現れる。4) 瞬間的な部分電流減少は、外部からの磁場の侵入のない状況で、磁界が存在する初期条件を実現できる。5) 磁界は量子化された磁束量子に緩和し、欠陥などによってピン止めされることで、電流減少を反映した形で磁束量子が分布する。つまり、フェムト秒レーザーのビームプロファイルを反映した分布磁束量子が生成されることになる。

実際にYBCO薄膜の中央付近に磁束量子束を生成した例を図2に示す。超伝導電流のX方向成分とZ方向成分が可視化されている。下図はそのモデル図で、上下に向きの異なる二つの磁束が薄膜面に垂直に存在していることがわかる。これは図1で想定した磁束量子分布となっている。単一のフェムト秒パルスで、磁束量子バンドル生成が可能で、磁束文字を刻印した例を図3に示す<sup>5)</sup>。黒点と白点はX方向成分の超伝導電流を示し、黒白黒で一つのバンド対を表している。

超伝導ループを用いることでループ内の磁束量

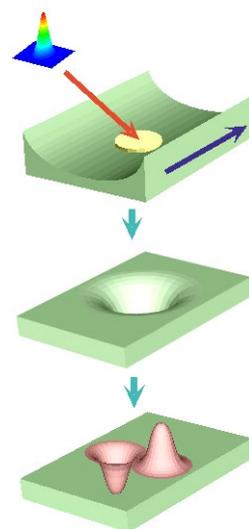


図1 極短光パルスによる磁束量子バンドルの生成概念。

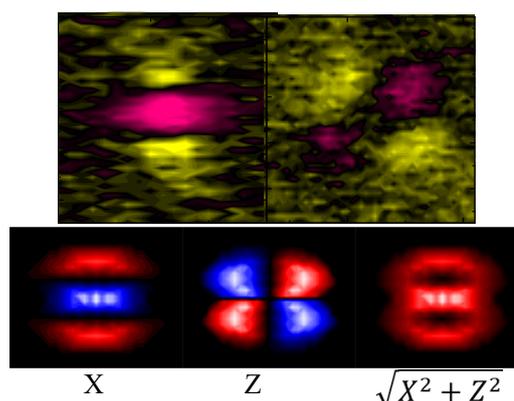


図2 実際の超伝導電流分布イメージとそのモデル。

子数も制御可能である。図4にYBCOプロタイプに30 $\mu\text{m}$ のホールを開け、その一部にレーザーを照射する概略図を示す。下図には異なる超伝導電流で生成した時の、パルス数と生成される磁束量子数の関係を示している。単一パルスで約数十個の磁束量子が制御できていることがわかる。

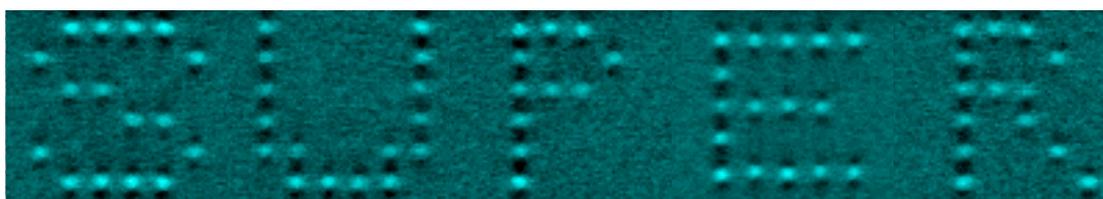


図3 単一パルスで一点ずつ刻印した磁束文字。

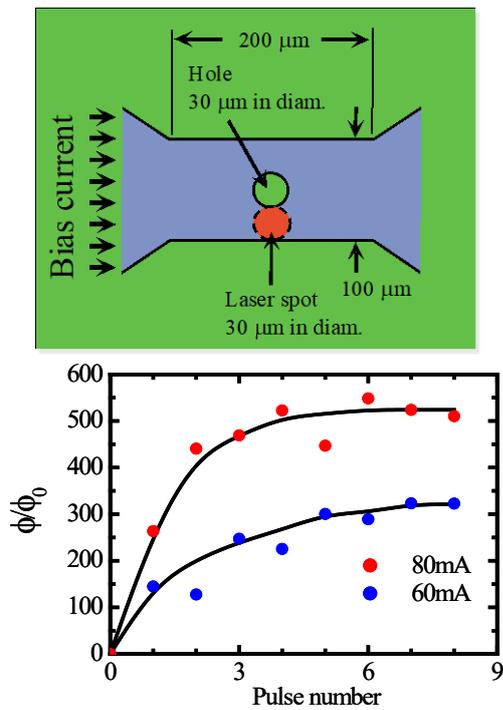


図4 超伝導ループ中への磁束量子生成と実験結果。

### 3. 超伝導フォトニックデバイス

以上の磁束量子制御は超伝導電流の高速変調で実現されているが、ポンププローブ法を用いたテラヘルツ放射時間領域放射分光から、そのダイナミクスを科学することができる<sup>6)</sup>。その変化の時間スケールは、約 10 ps 程度で、このことから 100GHz 程度で動作する超伝導フォトニックデバイスの実現が可能であると考えられる。

ここでは、フォトニックデバイスの一例として、YBCO で作成したジョセフソンボルテックスフロートランジスタ (JVFT) を用いて、光パルス信号と電気信号のアンドを実現した結果を図 5(a) に示す<sup>7)</sup>。(b) には光のダブルパルスの時間差を掃引して、その出力電圧を観測した結果であり、約 10 ps 程度で緩和しており、テラヘルツ放射から見たダイナミクスと良い一致を示した。

その他ジョセフソンフォトミキサーなどの応用も期待される<sup>8)</sup>。

### 4. まとめ

フェムト秒光パルスを用いた超伝導電流変調により、磁束量子が生成・制御や超伝導フォトニックデ

バイスへの展開が可能であることを示した。これは、相転移を伴わない高速現象で超伝導体の物性の一つとして、量子化の過渡現象などの観測が期待されることから、今後も研究対象となればと願っている。

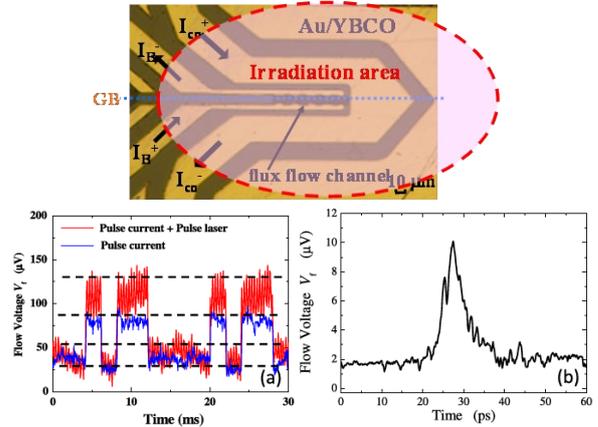


図5 (上) 粒界 (GB) 上の試作 JVFT とその実験手法。下図(a)は光パルスとバイアス信号のアンド結果と(b)ダブルパルス応答。

### 5. 謝辞

本研究は、村上博成博士、川山巖博士、並びに多くの研究室卒業生の協力で得られた結果を紹介したものである。ここ感謝の意を表します。

### 6. 参考文献

- 1) DS. Rana, M. Tonouchi: Adv. Opt. Mater. **8** (2020) 1900892
- 2) M. Tonouchi et al.: Appl. Phys. Lett. **71** (1997) 2364
- 3) T. Fukui, H. Murakami, M. Tonouchi: IEICE Transactions on Electronics **E85-C** (2002) 818
- 4) M. Tonouchi: Studies of High Temperature Superconductors No. 42 ed. A. V. Narlikar, Nova Science Publishers, New York (2002) 109-138
- 5) M. Tonouchi et al.: Jpn. J. Appl. Phys. **44** (2005) 7735
- 6) 斗内政吉: 電子情報通信学会論文誌 C **J85-C** (2002) 323
- 7) I. Kawayama et al.: Supercond. Sci. Tech, **26** (2013) 093002
- 8) 紀和利彦, 斗内政吉: 低温工学 **38** (2003) 9