

フェムト秒レーザーによる 超高速超伝導電流変調と新量子現象

— 科学技術振興事業団戦略的基礎研究とさきがけ研究 21 —

特集 プロジェクト研究

斗 内 政 吉*

Ultrafast Supercurrent Modulation with Femtosecond Optical Pulses and Novel Quantum Phenomena

Key Words : High-Tc Superconductor, Femtosecond Optical Pulses, Optical Flux Quantum State Control

はじめに

極短光パルスを用いた超伝導状態の評価は古くから行われてきた。しかし、その組み合わせがエレクトロニクス応用に展開されることは以外に少なかった。平成7年、筆者等の研究グループは、フェムト秒レーザーを用いて、高温超伝導体中に流れる超伝導電流を変調することで、テラヘルツ電磁波が放射される現象¹⁾を発見した。この電磁波放射現象を基に、現在では、基礎研究から通信応用などの応用研究までの広範囲におよぶ“超伝導オプトエレクトロニクス”への展開²⁾が期待されるに至っている。ここでは、その展望の一部を研究ターゲットとして著者が参加しているプロジェクト：科学技術振興事業団戦略的基礎研究推進事業「量子効果等の物理現象」(研究統括：川路紳治 学習院大学教授)採択研究「異方的超伝導体の量子効果と新電磁波機能発現の研究」(代表：井口家成 東京工業大学教授、平成9年10月～13年9月)の分担課題“フェムト秒レーザー照射による高温超伝導薄膜からのミリ波、サブミリ波発振の研究”および科学技術振興事業団さきがけ研究21「状態と変革」(領域総括：国府田隆夫 日本女子大学理学部長)採択研究“磁束の量子化

過渡現象と新規物性の解明”(平成10年10月～13年9月)に関連した研究について紹介させていただく。

超伝導電流の高速変調と電磁波放射

超伝導体中で、直流電流を運んでいるのはクーパー対である。フォトンが入射するとこのクーパー対は、2つの準粒子に破壊され、クーパー対密度 n_s は減少する。このことで、超伝導電流 J_s が減少するかに見える。しかし、大きなカイネティックインダクタンスを持つ対粒子は即座に加速され残る対粒子の速度 v_s が増し、電流は一定に保たれる。即ち、電流の時間変化は、

$$\frac{\partial J_s}{\partial t} = e v_s \frac{\partial n_s}{\partial t} + n_s \frac{\partial v_s}{\partial t} = 0$$

と単純に表わされ、第1項で減少したものを第2項が補償するとされる。以上が、古典的な変調原理である。ところが、フェムト秒レーザー等を用いると、その変調時間は極めて高速となり、加速によって電流を一定に保つことができなくなる。その結果、第2項は無視されることになり、電流の時間微分に対応した電磁波が外部に放射される。

図1に超伝導薄膜(ここでは $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ [YBCO] を用いた。)をダイポールアンテナに加工

*Masayoshi TONOUCHI
1959年7月5日生
大阪大学基礎工学研究科博士課程後期修了
現在、大阪大学・超伝導エレクトロニクス研究センター、助教授、工学博士、超伝導エレクトロニクス
TEL 06-6879-7981
FAX 06-6879-7984
E-Mail tonouchi@rcsuper.osaka-u.ac.jp

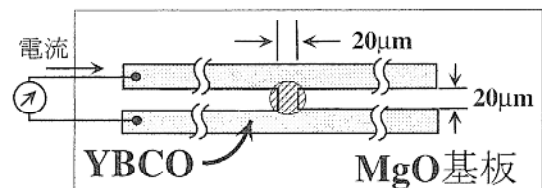


図1 試作素子構造

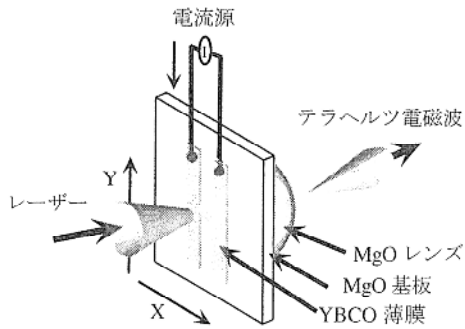


図2 テラヘルツ電磁波放射システム

した素子構造を示す。電流バイアスされたこのアンテナの中心部に、パルス幅約100フェムト秒(fs)、発振波長800nm、繰返し周期82MHz、入射電力1~180mWの光パルスを照射し、図2に示すように外部に放射される電磁波を、半導体光スイッチ或いはボロメーターで観測する³⁾。

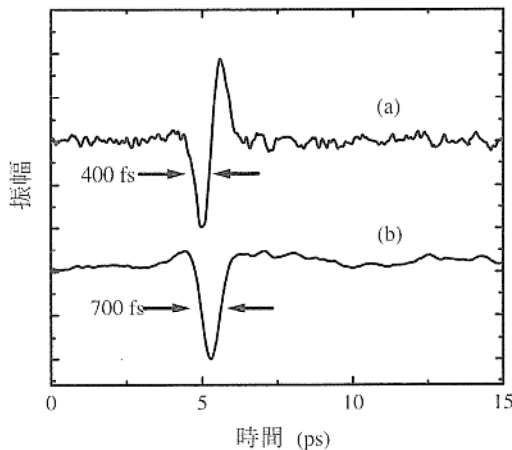


図3 テラヘルツ電磁波の例(a)と、シグナルの積分(b)。

図3に放射される電磁波の一例を示す。まず、光パルス照射と同時に、負の電磁パルスが放射され、続いて正のパルスが観測される。この1サイクルの間に電流が減少し、回復することとなる。電磁パルスの幅は約400fsで、電磁波波形の積分から電流の変調時間は約700fs(半値幅)であることがわかる。この時間は、半導体スイッチでは最も高速とされる低温成長GaAs(LT-GaAs)光スイッチの検出限界で制限されており、実際にはもっと高速であると考えられる。しかも、用いた光のエネルギーは約1.6eVであり、高温超伝導体のエネルギーギャップ(数10meV)に比べると非常に大きく、電流減少時には、

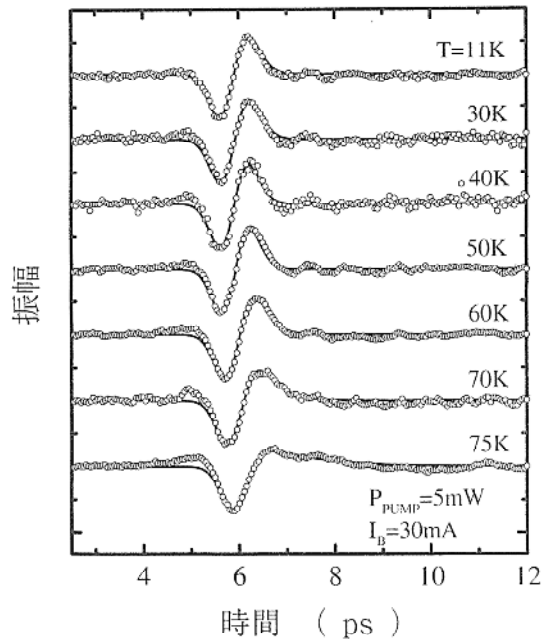


図4 テラヘルツ電磁波放射波形の温度(T)依存性。レーザーパワーは5mW、バイアス電流は30mAである。実線はシミュレーション結果。

雪崩崩壊過程によっていることから、波長制御などにより電流変調速度には、大幅に改善の余地がある。

以上のように、高温超伝導体からのテラヘルツ電磁波放射は、電流変調で説明できる。しかしながら、発現機構の不明な高温超伝導体に対して、実際の電磁波放射機構を理論的に説明することはできない。言い換えれば、このような電磁波放射現象を観測することで、機構解明につながる情報を抽出することも可能かもしれない。図4は電磁波放射波形の温度依存性を示している。温度の上昇に伴って、正のパルス波形が変化していく様子が分かる。一方、負のパルスは温度の影響を受けていない。このことは、雪崩崩壊プロセスは、温度によらないが、電流緩和プロセスは、温度に強く依存し、高温になるにしたがって、遅くなってきていることを示している。簡単なシュミレーション(図4実線)との比較から、光励起された準粒子の再結合時間を見積もることができる⁴⁾。その結果を、図5に示す。温度上昇に伴って緩和時間が増加していることがわかる。また、レーザーパワーにも大きく依存していることから、レーザーヒーティングの効果も観測されている。このようなパルスレーザーによる熱的效果はまだ解明されていない点が多い。このデータからは、温度上昇

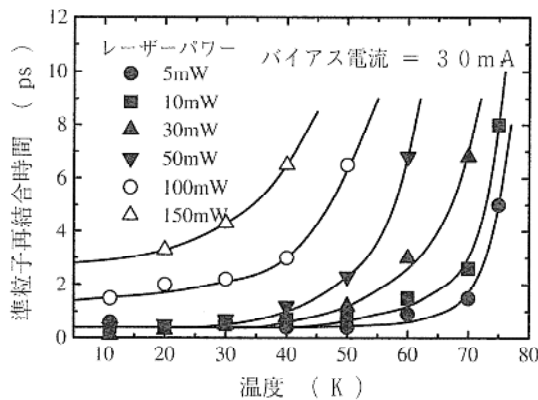


図5 準粒子再結合時間の温度依存性. レーザーパワーをパラメーターとしている.

$\Delta T [K]$ は, $0.2 \times Power [mW]$ で変化することが判明したが, 理論的には, その係数は1.3となり, 説明できない. 実際には, パリスティックフォノンの散逸など興味深い現象が関与していると思われる. また, 熱的効果を除いた, インtrinsicな緩和時間は, $T_c/2$ (T_c は超伝導転移温度)以下の温度で300fs以下であり, LT-GaAs中のそれよりも速く, $T_c/2$ 以上の温度では, $T/(1-T/T_c)$ に比例していることが判明した.

このように, テラヘルツ電磁波放射波形は, 高温超伝導体中の高速キャリアダイナミクスを反映しており, 理論的研究と合わせて, テラヘルツ電磁波放射現象の発現機構を明らかにしていくのが, 戦略的基礎研究における主な研究ターゲットである. また, そのテラヘルツ電磁波を積極的に応用していく観点からも研究を進めており, 分光応用や, 超伝導電流分布可視化システム等の非破壊分析システムの開発も併せて行っている.

超高速超伝導電流変調がもたらす 新しい量子の世界

超伝導状態は, マクロな量子状態が実現される世界であり, その中でも, 磁束の量子化を容易に実現する舞台である. 例えば, 超伝導体で形成したリングの中空に存在が許される磁束量は, 磁束量子 ($2.07 \times 10^{-15} \text{ Wb}$)の整数倍となり, 一度その状態が決まれば, 臨界磁場を超えるような大きな外部磁場を印可するか, リングの一部を弱結合状態(或いは, 常伝導状態)として, その部分を横切ることで磁場の出入りが許されるのみである. これは, 現在

でも常識とされている量子効果である. ところが, 超伝導状態とは, 定常状態で記述された状態(少なくとも, 時間的に統計処理を通して取り扱える状態)であり, 粒子の散乱時間に匹敵するような高速現象が, どのような効果を及ぼすかはまったく未知の世界である. 即ち, 極短光パルスとの組み合わせによって, 新しい量子の世界が見えてくるのではと想像することができる.

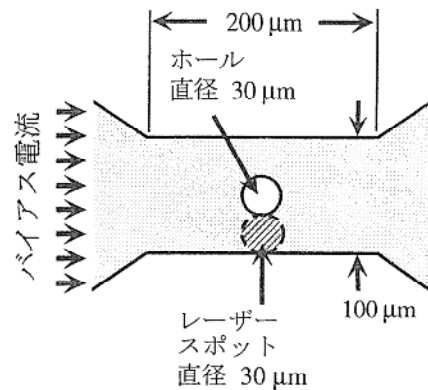


図6 磁束量子の生成・変調実験説明図

このような単純な発想(理論的背景もなく)で取り組んだ研究を紹介しよう⁵⁾. 図6に作製した素子の中心付近を示す. ポータアンテナの中心に幅100 μm , 長さ200 μm のブリッジを形成し, 中心に, 直径約30 μm のホールを空けたものである. 超伝導状態で, 一方からバイアス電流を印可し, その状態で, 一方のブリッジにあるレーザースポットにレーザを照射し, バイアス電流を除いた後, 再びレーザを照射しテラヘルツ電磁波を検出する. この手法により, 超伝導ループに磁束量子が光により育成されているかどうか判断できる.

図7(a)に, そのようなプロセス(ここでは, バイアス電流を200mAとした.)により磁束の制御を試みた結果を示す. 結果は, レーザをデバイス上で捜査することにより得られるテラヘルツ電磁波像を示している. シグナルは, 図3の電磁波振幅で最小値を示す点で時間軸を固定し, 得た結果であり, 中心のホールを挟んで, 逆方向に永久電流が流れていることがわかる. 即ち, 極短光パルスにより超伝導リングに磁束量子が育成されていることが示された. この現象は, 他の構造などを用いることにより, 常伝導転移が発生していないこと, および, 磁束が超伝導領域を横切って入っているのではないことな

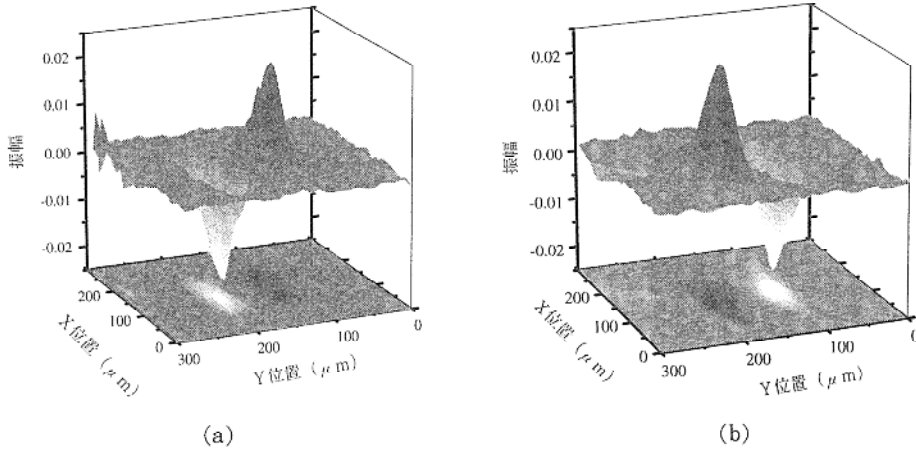


図7 磁束を捕獲した超伝導ループからのテラヘルツ電磁波放射イメージ。(a)バイアス電流200mAで磁束を生成したもので、(b)はバイアス電流を-200mAとして磁束の状態を変調した場合。検出器としてLT-GaAsを用いているため、X方向に偏向した電磁波のみが観測されている。測定温度は16K。

どが証明されており、超伝導状態の“常識”では説明されない現象である。

次に、その状態で逆方向の電流バイアス(ここでは-200mAとした。)を加えて同じプロセスによる磁束制御を試みた結果を、図7(b)に示す。図7(a)に比べて、明らかに、逆方向の電流が、ほぼ同じ大きさで流れており、光により磁束の反転制御がおこなわれていることを示している。捕獲されている磁束量としては、約1000個の磁束量子に対応し、その数量は、光の強度やバイアス電流の大きさに決まる。即ち、極短光パルスにより、超伝導ループ中における磁束の生成・消滅・制御が可能であり、未知の量子化プロセスが観測されている。

さきがけ研究21では、この未知の現象を解明しようとするものであり、また、最終的には、量子状態が変化する過渡現象を観測することで新しい研究の分野を開こうとするものでもある。

おわりに

高温超伝導体は、本来、光学材料として優れた特性を持っており、今回の結果からも、新たな特徴も露になってきた。また、電気(磁気)信号の伝達媒体としても非常に魅力がある。これらの特徴を組み

合わせた“超伝導オプトエレクトロニクス”への展開から、近い将来のキーテクノロジーが創成されることを願っている。

参考文献

- 1) M. Hangyo, S. Tomozawa, Y. Murakami, M. Tonouchi, M. Tani, Z. Wang, K. Sakai and S. Nakashima, Appl. Phys. Lett. 69 (1996) 1948.
- 2) M. Hangyo, N. Wada, M. Tonouchi, M. Tani and K. Sakai, IEICE Trans. Electron. E80-C (1997) 1282.
- 3) M. Tonouchi, M. Tani, Z. Wang, K. Sakai, S. Tomozawa, M. Hangyo, Y. Murakami and S. Nakashima, Jpn. J. Appl. Phys. 35 (1996) 2624.
- 4) M. Tonouchi, M. Tani, Z. Wang, K. Sakai, N. Wada and M. Hangyo, Jpn. J. Appl. Phys. 35 (1996) L1578.
- 5) M. Tonouchi, N. Wada, M. Hangyo, M. Tani and K. Sakai, Appl. Phys. Lett. 71 (1997) 2364.