

| | |
|--------------|---|
| Title | テラヘルツ動作デバイス開発に向けた超伝導フォトニクスの展開：「テラヘルツデバイス・システム開発ユニット」の研究から |
| Author(s) | 川山, 巖 |
| Citation | 大阪大学低温センターだより. 2009, 148, p. 13-18 |
| Version Type | VoR |
| URL | https://hdl.handle.net/11094/6644 |
| rights | |
| Note | |

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

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

Osaka University

「次世代電子デバイス教育研究開発拠点」

拠点リーダー：谷口 研二（工学研究科）

事業推進者

| 氏名 | 所属・役職 | GCOEでの役割 |
|-------|------------------------|---------------------------------------|
| 谷口 研二 | 工学研究科（電気電子情報工学専攻）・教授 | 拠点リーダー、インテグレーション支援部門長 |
| 松岡 俊匡 | 工学研究科（電気電子情報工学専攻）・准教授 | インテグレーション支援部門 デバイスデザイン |
| 尾崎 雅則 | 工学研究科（電気電子情報工学専攻）・教授 | 材料開発支援部門長 教育実践支援室長 |
| 大森 裕 | 先端科学イノベーションセンター・教授 | 材料開発支援部門 フレキシブルデバイス材料 |
| 北岡 康夫 | 工学研究科（フロンティア研究センター）・教授 | 材料開発支援部門 高品質結晶育成 連携推進支援室長 兼 産学連携担当 |
| 吉村 政志 | 工学研究科（電気電子情報工学専攻）・准教授 | 材料開発支援部門 高品質結晶育成 |
| 森 伸也 | 工学研究科（電気電子情報工学専攻）・准教授 | 評価解析支援部門長 |
| 阿部 真之 | 工学研究科（電気電子情報工学専攻）・准教授 | 評価解析支援部門 極限計測評価 |
| 伊瀬 敏史 | 工学研究科（電気電子情報工学専攻）・教授 | パワーデバイス部門長 |
| 伊藤 利道 | 工学研究科（電気電子情報工学専攻）・教授 | パワーデバイス部門 半導体パワー |
| 葛原 正明 | 福井大学工学研究科（電気電子工学専攻）・教授 | パワーデバイス部門 パワーデバイス設計 |
| 片山 光浩 | 工学研究科（電気電子情報工学専攻）・教授 | センシングデバイス部門長 戦略研究推進室長 |
| 糸崎 秀夫 | 基礎工学研究科（システム創成専攻）・教授 | センシングデバイス部門 超伝導磁気センサー |
| 杉野 隆 | 工学研究科（電気電子情報工学専攻）・教授 | センシングデバイス部門 半導体バイオセンサー |
| 斗内 政吉 | レーザーエネルギー学研究センター・教授 | センシングデバイス部門 テラヘルツイメージング |
| 永妻 忠夫 | 基礎工学研究科（システム創成専攻）・教授 | センシングデバイス部門 テラヘルツイメージング |
| 奥野 弘嗣 | 工学研究科（電気電子情報工学専攻）・助教 | センシングデバイス部門 生体センサ |
| 兒玉 了祐 | 工学研究科（電気電子情報工学専攻）・教授 | フォトニックデバイス部門長 連携推進支援室 国際連携担当 |
| 井上 恭 | 工学研究科（電気電子情報工学専攻）・教授 | フォトニックデバイス部門 量子光デバイス |
| 岡村 康行 | 基礎工学研究科（システム創成専攻）・教授 | フォトニックデバイス部門 光制御デバイス |
| 北山 研一 | 工学研究科（電気電子情報工学専攻）・教授 | フォトニックデバイス部門 フォトニックデバイス |
| 近藤 正彦 | 工学研究科（電気電子情報工学専攻）・教授 | フォトニックデバイス部門 次世代レーザーデバイス |
| 栖原 敏明 | 工学研究科（電気電子情報工学専攻）・教授 | フォトニックデバイス部門 集積レーザーデバイス |

印：本号で紹介する研究者及び研究グループ関係者
太字：低温センターから支援を受けている事業推進者

テラヘルツ動作デバイス開発に向けた 超伝導フォトリクスの展開

- 「テラヘルツデバイス・システム開発ユニット」の研究から -

レーザーエネルギー学研究センター 川山 巖 (内線7983)

1. はじめに

グローバルCOEプログラム「次世代電子デバイス教育研究開発拠点」では、従来の研究室間の壁を取り払い、若手研究者をリーダーとして共通の目的で再構成されたInnovation-oriented Dynamic Education and Research (IDER) ユニットを基盤として教育研究が行われている。筆者はその一つである「テラヘルツデバイス・システム開発ユニット」(以後テラヘルツユニットと略称する)のユニットリーダーとして、新たなテラヘルツ光源・検出器およびテラヘルツ動作デバイス開発を推進している。IDERユニットは原則として2つ以上のGCOE推進研究室の若手研究者(助教、ポスドク、博士後期課程学生等)から構成されており、また国内外の研究機関および企業と積極的に連携することが推奨されている。テラヘルツユニットでは、レーザーエネルギー学研究センター・斗内研究室から筆者やポスドク、学生等6名が参加し、工学研究科・電子情報工学専攻・森研究室から2名の学生が参加している。また、国内では岡山大学、名古屋大学、情報通信機構と、海外ではライス大学(米国)および南京大學(中国)と連携し、学生または研究員が数週間から数ヶ月間お互いに滞在するなど、頻繁に人員交流を行い共同研究体制の強化を図っている。

テラヘルツユニットの目的は、「超伝導テラヘルツデバイス開発」、「新規テラヘルツ材料探索」および「テラヘルツ応用システム開発」を柱として、それぞれのグループが連携して研究開発を行い、新たなテラヘルツ応用分野を開拓することである。「テラヘルツ応用システム開発」では、工学研究科・森研究室が有する高品質な非線形光学材料の育成技術と、斗内研究室が有するテラヘルツ波計測技術を融合した、広帯域テラヘルツ光源開発や^[1]、岡山大学と共同でテラヘルツ放射顕微鏡の新たな応用展開として、溶液中の生体関連物質の分析を目的としたテラヘルツケミカル顕微鏡の開発^[2]、等を行っている。また、このようにして開発したテラヘルツ波計測システムを「新規テラヘルツ材料探索」に利用し、強誘電体、マルチフェロイック材料およびカーボンナノチューブと言った材料のテラヘルツ波機能探索を行っている^[3-5]。このように、システム開発により構築したシステムを材料物性計測に用い、その結果をまたフィードバックしてシステム開発に生かす

というように、ユニット内で密に連携をとっている。月に一回程度は主要なユニットメンバーが集まり現状を報告すると共に、現場レベルで「このような試料を作ってほしい」「このような計測は出来ないか？」と言った意見交換を行っている。このように、従来の研究室の体制ではどうしてもトップダウン的な傾向が強くなるが、IDERユニットではボトムアップ的な方法で研究を進めることを心がけている。

上記が我々の推進しているテラヘルツユニットの概要であるが、本稿ではその中でも低温研究にもっとも関連の深い、超伝導を用いた「超伝導テラヘルツデバイス開発」にテーマを絞って詳しく述べたい。

2. 「超伝導フォトンクス」を利用したテラヘルツ動作デバイス開発

情報通信におけるトラフィックは増加の一途をたどっており、光通信における信号処理速度の向上が非常に重要な課題となっている。しかしながら、CMOSを代表とするシリコンデバイスは、発熱及び遅延時間等の問題が深刻化しており、また素子の微細化による動作速度向上も限界に達しつつある。これに対して、超伝導回路を高速に走行する磁束量子をキャリアとして用いる単一磁束量子(SFQ)論理回路では、ゲート当たりの消費電力は半導体素子に比べて3桁程度小さくすることが可能である。動作周波数の上限は超伝導ギャップの大きさで制限されるが、ギャップの大きな銅酸化物超伝導体を用いれば原理的には数テラヘルツでの動作が可能である。しかしながらこのような高周波領域では、回路をつなぐインターコネクションや外部半導体機器とのインターフェイスが高速化のボトルネックとなるため、その開発が非常に重要な課題となる。従来の電氣的な接続では、信号の損失やインピーダンス整合といった問題があるため、テラヘルツ帯域で高速動作するデバイスは、光信号を直接取り扱うことが出来る、つまり高速な光インターフェイスが必須であると我々は考えている。さらには、我々が長年取り組んでいる「超伝導フォトンクス」に関連する技術により、光を用いて磁束量子を自在に制御する「光制御SFQデバイス」へと展開したいと考えている。

「超伝導フォトンクス」とは、超伝導エレクトロニクスとオプトエレクトロニクスを融合した、新しいテクノロジーを意味する我々の造語である。我々は高温超伝導体と、主にフェムト秒パルスレーザーとの相互作用に関する一連の研究から、超伝導とテラヘルツ技術が高い親和性を持ち、双方の特性を生かした高速光デバイス開発や、これに伴う物理現象の解明が重要であると主張してきた。歴史的な経緯やその詳細は参考文献系を参照していただきたい^[6-7]。

図1は我々が目指す“光制御SFQ回路”の概念図である。通常のSFQ回路の場合は電流パルスをジョセフソン接合に入力し磁束量子を発生させる。これに対して、我々の提案ではサブピコ秒のパルス幅の超短パルスレーザーを、超伝導ループを構成しているジョセフソン接合もしくは

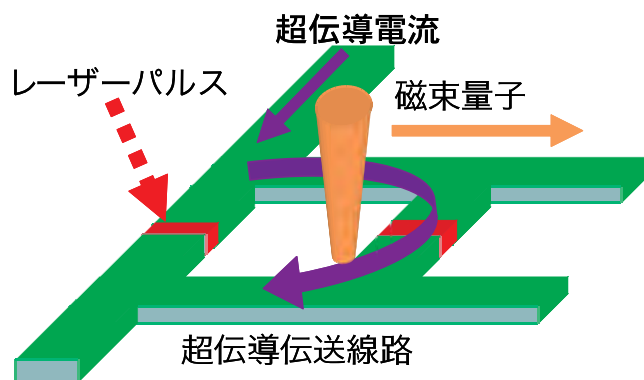


図1 光制御SFQデバイスの概念図

ナノブリッジに照射し、超伝導電子対を破壊することにより、超伝導電流を高速に変調させる。その結果として超伝導回路中に渦電流が生じ磁束量子が生成される。同様な手法で、発生させた磁束の消去も可能である。我々はこのようにして発生させた磁束を「光生成磁束」と呼んでおり、この光生成磁束のダイナミクスを定量的に解析することが光制御SFQデバイス開発の第一歩となる。次章においては、これに関する最近の成果を報告する。

3. ジョセフソン接合の超短パルス光応答

ジョセフソン接合に超短パルス光を照射した場合の応答を調べるため、図2に示すようなジョセフソン接合の並列アレイと磁場印加用の制御電流ラインからなる、いわゆるジョセフソン磁束フロートランジスタ (JVFT) とされる素子構造を作製し、その光応答を計測した。制御電流ラインに磁場印加用の電流を流し、接合にバイアス電流を流した状態でパルス光をジョセフソン接合に照射することにより、光生成磁束が接合を横切り電磁誘導により電圧が誘起される^[8]。図3は制御電流ラインに振幅3.5 mAのパルス電流を流した時 (太線)、および同時にジョセフソン接合にパワーが7 mW、

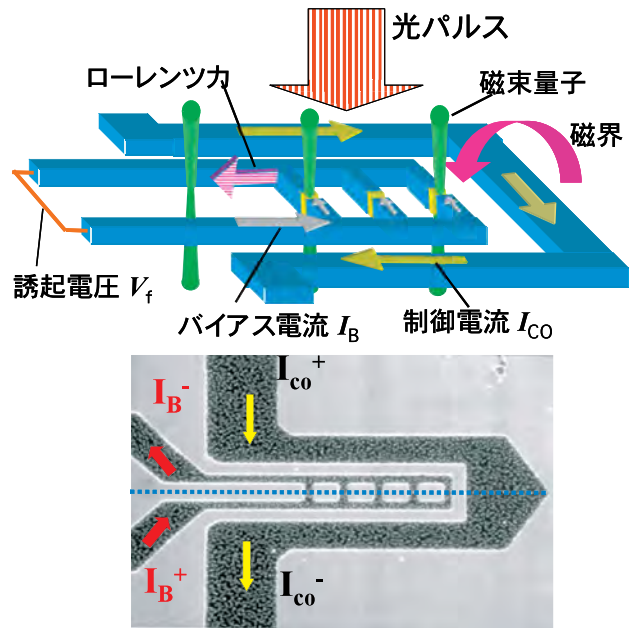


図2 ジョセフソン磁束フロートランジスタ(JVFT)の模式図および実際に作製したデバイスの顕微鏡写真

変調周波数が4 kHzのレーザービートを照射した時 (細線) の出力電圧の時間変化である。制御電流ラインに流れる電流により、ジョセフソン接合をフローする磁束密度が変化し、フロー電圧が変調している。また光照射によってもジョセフソン接合における超伝導電流が変調され、出力電圧が変化する。その結果として、図3の矢印で示すように電流のON/OFFと光信号のON/OFFの組み合わせにより4つの異なる出力レベルが観測された。この様に回路中をフローする磁束密度を、電流だけでなく光によっても制御可能である。この様な現象を利用して、光信号および電気信号のANDやOR等の論理演算を行ったり、多値回路への対応など機能の付加が可能であると考えている。ただし、この計測では変調周波数は4 kHzと低いため、作成したJVFTが光パルスに対してどの程度高速に応答し

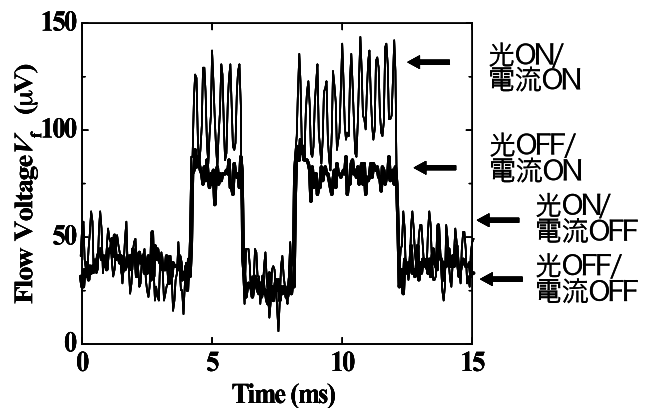


図3 パルス電流入力および光照射を独立に制御したときのJVFTの出力波形

ているかは不明である。そこで我々は、図4に示すようなレーザーパルスを2つに分岐し、その一方を遅延ステージに通すことにより光パルスを照射する間隔を制御できるダブルパルス計測システムを構築した。光照射に対する出力電圧のレーザーパワー依存性には強い非線形性があるため（図5挿入図参照）、光応答の自己相関を計測することにより、応答時間を見積もることが可能である。すなわち、入射する光パルスのパワー

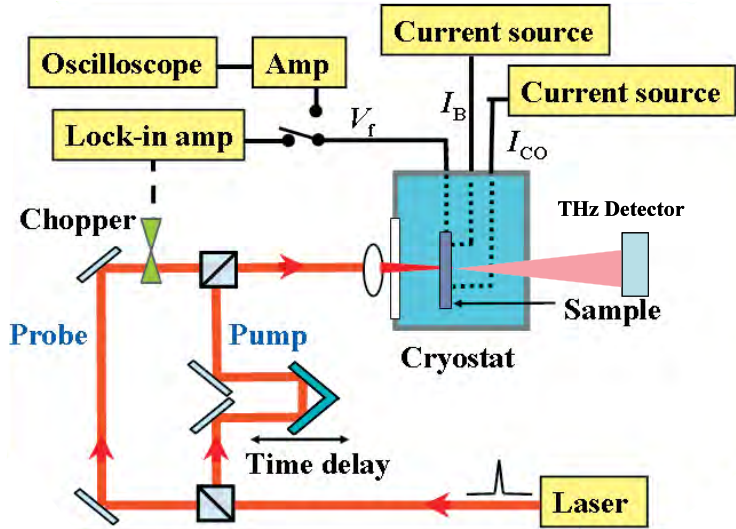


図4 ダブルパルスを用いた光パルス応答時間計測システム

がそれぞれ電圧の発生する閾値以下で、かつ合計すると閾値以上になるように設定すると、パルスの間隔がデバイスの応答時間よりも短いときのみ電圧が発生する。このような手法で精密に応答時間を計測した結果が図5である。挿入図から分かるように、光照射によって電圧が発生する閾値は約23 mWである。実際に、一方のレーザーパルスパワーを13 mWに固定し、もう一方のパルス光のパワーを5 mWから22.5 mW

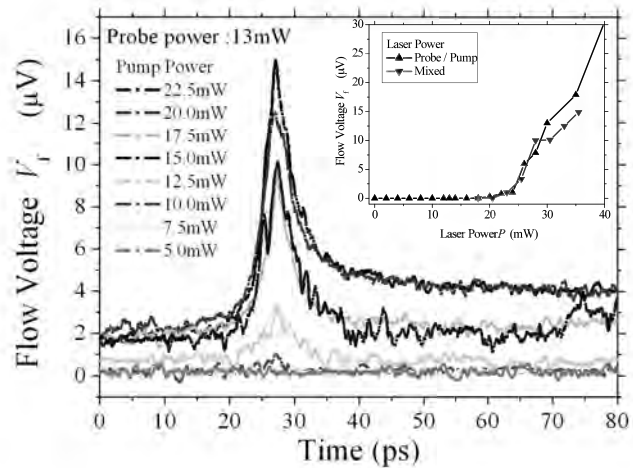


図5 JVFTの光パルス応答の自己相関波形

まで変化させたとき、二つのパルス光のパワーが23 mW以上の時にのみピークが観測され、その半値幅は約5 psであった。この結果は、今回作製したJVFTの応答時間は約5 psであり、200 GHz程度の動作周波数を持つことを示している。JVFTの応答時間は、磁束がジョセフソン接合を横切るに要する時間と考えられるため、素子サイズを微細化することによりさらなる高速化が可能であると考えている。

4. まとめと展望

本稿では、グローバルCOEプログラム「次世代電子デバイス教育研究開発拠点」における教育研究基盤であるIDERユニットの一つ「テラヘルツデバイス・システム開発ユニット」を紹介し、その研究の中から低温に関連深いトピックとして、超伝導を用いたテラヘルツ動作デバイスに関する研究について述べた。テラヘルツ研究は、近年急速に発展しており、本稿でも述べたとおり我々も様々な研究機関と連携して研究開発を進めている。テラヘルツ技術の概略は他稿に譲るが^[9]、

「テラヘルツ波研究」では、電波工学におけるミリ波・サブミリ波と分光学における遠赤外領域の境界に位置しているため、電子・光デバイス等の工学研究と、物性・光学等の基礎科学との境界があまりないと感じている。また一方、新しい研究分野であるため、いわゆる「この道一筋の専門家」という人は極めて少なく、皆それぞれが、高周波デバイス、材料物性および分光計測など、異なる分野から参入してきた人々である。多くの場合、他のグループ、研究機関との連携し、それぞれが他分野で培った技術・経験を元にテラヘルツ分野で研究を進展させている。本稿を読まれた諸氏が少しでもテラヘルツ波研究に興味を持たれたならば、上記のように新規参入に対する門戸は常に開かれているので、是非新しい技術・アイデアを持ってこの分野に参入していただきたい。

また、後半の超伝導テラヘルツデバイス開発に関しては、「超伝導フォトニクス」という言葉をこのような括弧付きではなく広く受け入れられる名称となるように、我々は努力していかねば行けないと思っている。今後の方向性としては、超伝導ナノ構造と光との相互作用の解明、および磁束量子を高速に光検出する技術の開発が重要であると考えている。

最後に、本稿で紹介した研究はIDERユニット「テラヘルツデバイス・システム開発ユニット」に参加していただいている研究者、研究機関との共同研究の結果である。また、超伝導フォトニクス研究については、レーザーエネルギー学研究中心・斗内研究室で長年培われた超伝導デバイスおよびテラヘルツ技術を土台として行われており、関係諸氏に深く感謝する。

参考文献

- [1] T.Matsukawa *et al.*, J. Cryst. Growth 311, pp.568-571 (2008)
- [2] T. Kiwa *et al.*, Appl. Optics 47, pp.3324-3327 (2008)
- [3] R. Kinjo *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys, in press
- [4] D. S. Rana *et al.*, Advanced Materials, Vol. 21, pp. 2881-2885 (2009)
- [5] L. Ren *et al.*, Nano Lett. Vol. 9, pp. 2610-2613 (2009)
- [6] 斗内政吉, 電子情報通信学会論文誌, VOL.J85-C No.5, pp.323-322 (2002)
- [7] I. Kawayama *et al.*, IEICE Trans.Electron., E90C (3), pp.588-594 (2007)
- [8] Y. Doda *et al.*, Jpn, J. Appl. Phys., Vol. 46, No. 4B, pp. 2381-2384 (2007)
- [9] M.Tonouchi, Nature Photonics 1 (2), pp.97 - 105 (2007)