

# 半導体・超伝導ハイブリッド光-磁束変換素子に関する研究開発 (032107012)

## Semiconductor-superconductor hybrid optical-to-magnetical signal converter

川山 巖 大阪大学レーザーエネルギー学研究中心  
Iwao Kawayama Institute of Laser Engineering, Osaka University

研究期間 平成 15 年度～平成 17 年度

### 概要

将来の大容量・高速光通信における基幹デバイスとして、従来の半導体に比べて 3 桁以上低い消費電力で数十 GHz から数百 GHz におよぶ動作速度をもつ単一磁束量子論理回路の研究が精力的に進められている。現在、このような高い周波数で動作する入力インターフェイスの開発が急務となっている。しかしながらこのような高周波領域では、電気的な入力方式では扱いにくいいため、信号の伝送方式として、光信号入力が主体となると考えられる。本研究では半導体光伝導素子およびフォトミキシングを用いたサブテラヘルツ電磁波発生システムや磁束量子フロー素子などを基盤技術開発し、それらを統合して動作速度が数十 GHz から 100GHz を超えるサブテラヘルツ領域の半導体・超伝導ハイブリッド光-磁束変換型超高速光入力インターフェイスの研究開発を行うことが目的である。

### Abstract

Single-flux-quantum (SFQ) logic circuits are expected to be operative at a clock rate above 100GHz. As the sophisticated SFQ circuits being realized, an interface between conventional electronic systems at room temperature and the SFQ circuits at cryogenic temperatures is becoming a bottleneck for the high speed operation, because both of the large signal loss and impedance mismatch between them are inevitable at such a high clock rate. As one of the approaches to solve the problems, we have tried to build an optical interface that can convert optical signals to SFQ signals.

### 1. まえがき

超伝導デバイスは高速かつ低消費電力で動作するため、今後の大容量・高速情報処理システムにおいて、大きな役割を果たすことを期待されている。中でも、単一磁束量子(SFQ)論理回路は 100GHz を越える高い周波数での動作が可能であり、実用化に向けたシステム開発が精力的に行われている。この様な状況において、既存システムとのインターフェイスを中心とした、周辺技術開発が急務となっている。とりわけ、この様な高速演算デバイスにおいては、電気的な信号を用いた入出力は困難であるため、光インターフェイスの開発が重要である。この様な認識から、私は本研究において、100GHz を超える周波数帯域で動作する光入力インターフェイスの中核である、高速光-磁束変換素子の開発を行った。具体的には、酸化物超伝導体とハイブリッド化が可能であり、かつ通信帯域波長で高速に応答する半導体光伝導材料の物性評価、CW レーザーを用いた高周波信号発生・検出素子の開発、フェムト秒レーザーパルス用光/SFQ 変換回路の開発、および超伝導トランジスタを用いた光-磁束変換回路の開発である。これらそれぞれ取り組みの成果を報告する。

### 2. 研究内容及び成果

最初に、光インターフェイス用半導体材料の特性評価について述べる。高速に光応答する半導体材料としては、低温成長 GaAs や半絶縁性 GaAs などの GaAs 系の半導体が広く用いられている。しかしながら、これらはバンドギャップが約 1.5eV 程度であるため、光ファイバー通信で一般的に使用されている  $1.5\mu\text{m}$ (0.8eV)帯の波長を持つ光を用いた場合は、光電流の生成効率が非常に小さい。そのため本研究では、バンドギャップが約 0.8eV である非晶質(a-)Ge 薄膜を、光スイッチ材料として選んだ。a-Ge はバンドギャップが小さいだけでなく、室温で成膜することが可能であるため、加熱により特性劣化の可能性がある YBCO などの高温超伝導体との集積化およびハイブリッド化にも非常に有利である。本研究では、a-Ge 薄膜をレ

ーザーアブレーション法を用いて作製し、その光応答を、時間領域テラヘルツ電磁波放射測定、ポンプ・プローブテラヘルツ電磁波測定、およびポンププローブ反射率測定により評価した。その結果、a-Ge 光スイッチは 1ps 以下で応答しかつ液体窒素温度以下の低温領域まで特性が変化しないことが明らかになった。また、実際に YBCO の伝送線路上に a-Ge 光スイッチを作成しその特性を測定した結果、特性は劣化するものの応答速度が 2~3ps 程度と 100GHz を十分超える動作速度が可能であることが分かった(文献[3]参照)。

次に、CW レーザー用光入力システムの開発について述べる。SFQ 論理回路用インターフェイスの方式の一つとして、光信号の周波数をダウンコンバートして、テラヘルツ領域の電気および磁気信号として取り出すシステムを提案している。2 台のシングルモードレーザーから出力された CW レーザー光を、光ファイバーカプラへと入力すると、その差周波数で振幅変調されるレーザービートが出力される。そのレーザービートをフォトダイオード等の光伝導素子へと入力することにより、その差周波数に対応した電磁波が発生する。この様な、フォトミキシング技術により発生した電磁波を、高温超伝導体を用いたジョセフソン接合へ入力し、接合の電流-電圧特性に現れるシャピロステップから、発生した電磁波の周波数を精度よく計測する。フォトミキシングにより発生した高周波信号を、アンテナにより空間放射させる空間放射型システムと、同軸ケーブルおよび導波路により、ジョセフソン接合近傍まで導入する導波路結合型システムの 2 種類のシステムを構築し、その特性を検証した。このシステムの特徴は、入力される光信号およびミキシングにより発生した電磁波の周波数を、高速かつ高精度に検出できることである。空間放射型システムはテラヘルツ受信機等への応用が可能であり、また、導波路結合型システムは、入力した高周波信号とジョセフソン接合を磁気結合させているため、SFQ 用のインターフェイスとして容易に拡張可能である。これら

のシステムを作製し、特性評価を行った結果、図1に示すように空間放射型で最大 161GHz の電磁波検出に成功した。また、導波路結合型において 95GHz で動作させることに成功した

前節で述べたフォトミキシングなどの周波数変調信号の検出技術は今後非常に重要となると考えるが、SFQ 回路自体はパルス論理であり、現在の光通信に用いられている信号方式も主に強度変調信号であることから、100fs 程度のパルス幅のパルス光を光源とした光信号入力回路の開発も重要である。当面の目標である数十 GHz 程度の光信号入力の実現を目指して、SFQ 光インターフェイスのプロトタイプおよび測定システムを作製した。このインターフェイスの動作原理は以下のようなものである。電流入力ラインに組み込まれた半導体光スイッチにフェムト秒レーザーパルスを照射し、発生した光電流をジョセフソン接合に注入することにより、最初の超伝導ループ内に SFQ パルスを発生させる。生成した SFQ パルスは次々とジョセフソン接合ループを伝播して行き、ジョセフソン伝送線の最終段である右端のループに捕捉される。続いてリセット用の SFQ パルスを入力し、細くされた SFQ を消去する。この際の磁場変化を近傍に組み込んだ SQUID センサーで検出する。電気パルス入力信号を用いた実験において、同回路が設計通りに動作することを確認した。現在フェムト秒パルスレーザーを用いた、光信号による動作実証を行っている。

また、我々は発生した高周波電気信号を、単一磁束量子に変換し、SFQ 論理回路へと伝送する機構として、磁束量子フロートランジスタ(FFT)構造の利用を提案している。FFT は制御電流ラインに電流を流すことによって外部磁場を発生させ、その結果超伝導ブリッジまたはジョセフソン接合(磁束フローチャンネル)に生じた磁束量子が、

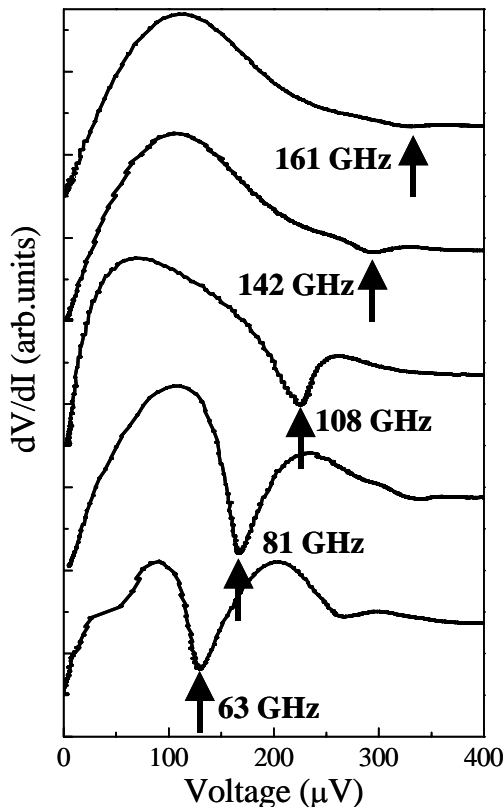


図1 空間放射型システムの電磁波検出結果

チャンネルを横切るときの誘導起電力を出力するものである。我々はこの構造を応用し、フローチャンネルにパルス光を照射し、磁束のフロー速度を変調することによって出力変調する、光-磁束変換素子の開発を行ってきた。EO 変換による光電流とは独立に、制御電流によっても磁束を制御可能であり、高機能な光インターフェイスとして有望であると考えている。本研究において、250kHz 程度の低い周波数領域ではあるが、パルス電気信号による応答を初めて確認することに成功した。また、磁束フローチャンネルにフェムト秒レーザーを直接照射し、出力電圧の変化を計測した。その結果、出力電圧の光応答が明瞭に観測された。これは、光信号により直接磁束量子のダイナミクスを制御することが可能であることを示しており、従来にない高速かつ低消費電力なインターフェイス開発への大きな一歩であると考えている。

### 3. むすび

本研究において光インターフェイスの中核技術である、光-磁束変換素子を開発し、いくつかの光入力システムを提案・実証を行いその有効性を示したことは、今後の超伝導デバイスの実用化に向けて道筋を開いたと考えている。実際、昨年度より複数の研究機関において、UTC-PD や Ge 光スイッチ等を用いた、SFQ 論理回路用光入力システムの開発が開始されている。今後さらにこのような研究が広がり、光通信の基幹システムや両高速デジタル回路など先進的なシステムへの応用が実現されると考えている。今後は早期実用化を目指し、SFQ デバイスを専門とする研究チームと連携し、既存のデバイスに対する優位性を実証したい。また、これとは別に、量子コンピュータや量子通信などへの応用を念頭において、高速・高感度なより先進的なシステムを提案して、新しい技術を開拓していきたいと考えている。

### 【誌上发表リスト】

- [1] I. Kawayama, T. Miyadera, T. Kiwa, K. Tsukada and M. Tonouchi, "A Tunable Sub-Terahertz Wave Generation and Detection System with a Photomixer and a High-Tc Josephson Junction", *Superconductor Science and Technology* Vol. 19 pp403-406 (March 23, 2006)
- [2] Y. Doda, I. Kawayama, H. Murakami, M. Tonouchi, "DC and AC Responses of Josephson Vortex Flow Transistors with High Tc Superconducting Thin Films", *IEICE Trans. Electron.* Vol. E89-C No.2 pp177-181 (February 1, 2006)
- [3] I. Kawayama, T. Miyadera, Y. Doda, T. Kiwa, H. Murakami, and M. Tonouchi "Optical response of amorphous Ge photoconductive switches with YBCO transmission lines" *Superconductor Science and Technology* Vol.16 pp1475-1478 (7 November 2003)

### 【申請特許リスト】

- [1] 川山巖、斗内政吉、藤巻朗、光-磁束変換型入力インターフェイス回路、日本、平成 15 年 6 月 9 日
- [2] 川山巖、堂田泰史、斗内政吉、超伝導光演算素子 (申請準備中)

### 【受賞リスト】

- [1] T. Miyadera (共同研究者 T. Kiwa, I. Kawayama, H. Murakami, M. Tonouchi), Excellent Presentation Award at East Asia Symposium on Superconductive Electronics 2003, "Optical properties of amorphous Ge for semiconductor-superconductor hybrid devices", Nov. 18, 2003.