

2.2.4 テラヘルツイメージング

斗内政吉

レーザーエネルギー学研究中心・教授

2.2.4.1 超伝導フォトニックデバイスの開発

現在、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、素子の微細化による動作速度向上が限界に達しつつある。さらに、間接遷移半導体でありかつバンドギャップが約1.2eVと光通信等に利用されている波長 $1.55\ \mu\text{m}$ (約0.8 eV)の光信号に対する感度が低く、フォトニックデバイスとしては期待できない。これに対して、超伝導デバイスにおいては、バイアス電圧は基本的にゼロまたは非常に小さく、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。また、超伝導ギャップエネルギーは高々数十eVであり、通信波長帯レーザーで直接超伝導キャリアを制御することが可能である。現在、我々が発見したフェムト秒パルスレーザーによる磁束の発生・制御技術を発展させ、光入出力、光演算、および光メモリ機能などをもつ超伝導フォトニックデバイスの開発を進めている[1]。図2.2.4.1はジョセフソン磁束フロートランジスタにパルスレーザーおよびパルス磁場を入力したときの出力電圧であるが、磁場および光信号にそれぞれ独立に応答しており、多値回路として機能することを実証した。現在デバイスの高速性の検証、およびさらなる高機能化を目指した研究開発を行っている。

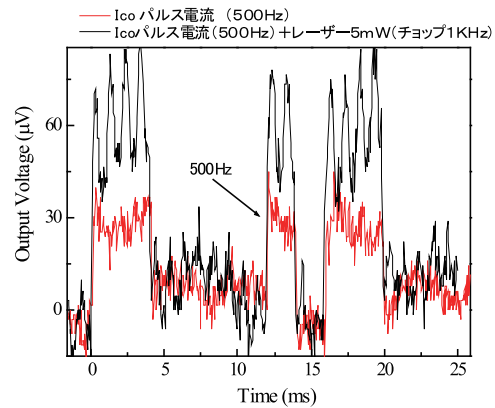


図 2.2.4.1 ジョセフソン磁束フロートランジスタにパルス電流およびパルス光を入力したときの出力電圧。

2.2.4.2 レーザー磁気光学顕微鏡の開発

磁束の分布およびダイナミクスを高速かつ高感度で観測するため、新規な磁気光学(MO)顕微鏡の開発を行っている[2]。MO顕微鏡は、ファラデー素子を伝播する光の偏光面が磁界により回転する磁気ファラデー効果を利用しており、磁束の動的振る舞いを観測するのに適した手法である。我々は、光源にレーザーを用い、高速かつ高感度で動的な磁束を観察可能なレーザーMO顕微鏡(LMOM)を独自に開発しており、これまでに、超伝導デバイス中の交流磁場の観測などに成功している。図2.2.4.2は超伝導デバイスの光学顕微鏡写真と、デバイス中の超伝導ループにトラップされた磁束をLMOMを用いて観測した結果である。またこの技術を発展させることにより、高速で磁気情報を光信号に変換できることから、超伝導デバイスやスピントロニクスデバイスなどの光出力インターフェイスとして応用可能であると考えている。

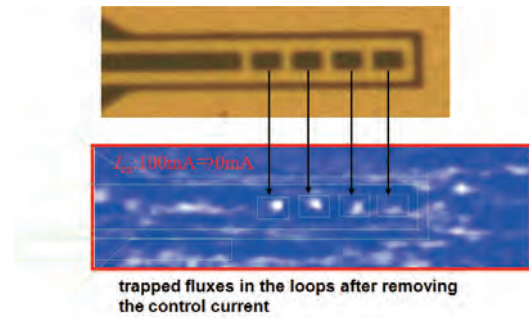


図 2.2.4.2 レーザー MO 顕微鏡による、超伝導ループにトラップされた磁束の観察。

2.2.4.3 レーザーテラヘルツ放射顕微鏡の開発

フェムト秒レーザー照射により試料表面付近で発生したテラヘルツ電磁波パルスの強度は単純な形

状を持つ試料の場合、フェムト秒光パルスを照射する領域の局所的な電界や電流の大きさに比例する。このため、このフェムト秒レーザーの照射位置を二次元的に走査させながら放射されるテラヘルツ電磁波パルス強度をモニタリングすることにより、試料内の電界分布や電流分布を観察可能な顕微鏡（レーザーテラヘルツ放射顕微鏡：LTEM）として機能させることができる。現在我々は $1.5\mu\text{m}$ 以下の分解能を持つLTEMの開発に成功している[3]。LTEMの産業利用として、半導体集積回路の故障解析に有効であると考えている。図2.2.4.3はOPアンプの光学顕微鏡像とLTEM像であるが、

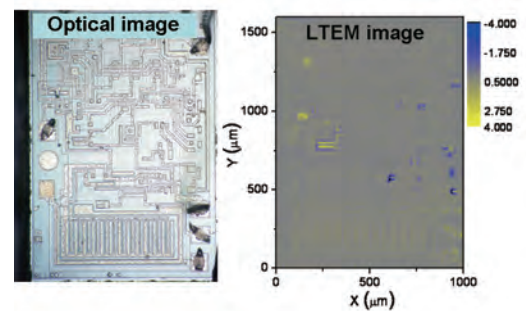


図 2.2.4.3 OP アンプの光学顕微鏡像と LTEM 像。

LTEM像ではOPアンプ中の局所的なPN接合等に由来するビルトイン電界の大きさと符号が観測されている。つまり、デバイスに存在する断線や接合不良に電界の変化を非接触で計測することが可能であることを示している。現在さらなる高分解能化および高速化を目指し開発を進めている。

2.2.4.4 強相関電子材料のテラヘルツ波機能の創製

3d遷移金属酸化物を代表とする、電子間のクーロン反発が大きく、従来のバンド理論では説明できない特性を持つ物質群は強相関電子材料と呼ばれ、高温超伝導、巨大磁気抵抗効果、マルチフェロイック特性など様々な興味深い現象が発見されている。我々はこれら強相関電子材料に発現する物性とテラヘルツ応答との関連を実験的に明らかにし、新奇なテラヘルツ波機能の開拓を目指している。近年では、テラヘルツ放射をプローブとして、強誘電体の分極構造のイメージング、光アシスト分極反転の観測等の成果が得られている[4-5]。

2.2.4.5 テラヘルツイメージングシステムの開発

テラヘルツ技術の産業応用に向けて、よりコンパクトかつ高速なテラヘルツイメージングシステムの開発を行っている。テラヘルツシステムのコンパクト化には光源励起用としてコンパクトかつ安定なファイバーレーザーを用いることが有効であるが、そのためには基本波長である $1.5\mu\text{m}$ のレーザー光で効率よくテラヘルツ波を発生可能な光源開発が重要である。我々はInGaAsやInPなどを用いた半導体光スイッチや、DAST等を用いた非線形光学材料により $1.5\mu\text{m}$ ファイバーレーザー励起によるテラヘルツ波の発生に成功している。図2.2.4.4はDASTとp-InAsからのテラヘルツ放射スペクトルを比較したものであるが、DASTが高強度かつ広帯域のテラヘルツ波光源として有望であることを示している。

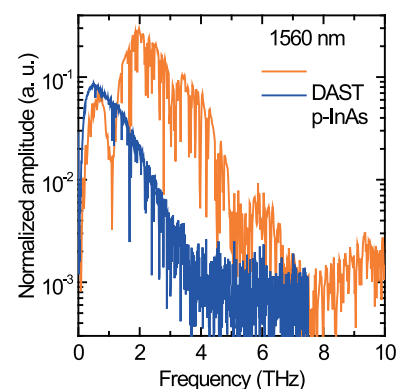


図 2.2.4.4 DAST および p-InAs からの放射電磁波スペクトル。

- [1] I. Kawayama et al., IEICE Trans. Electron., Vol. 90-C, 588 (2007)
- [2] H. Murakami et al., Supercond. Sci. Technol., Vol. 19, 941 (2006)
- [3] S. Kim et al., IEEE J. Sel. Topics Quant. Electron. Vol. 14, 498 (2008)
- [4] D. S. Rana et al., Appl. Phys. Lett. Vol. 91, 031909 (2007)
- [5] K. Takahashi et al., Appl. Phys. Lett., Vol. 90, 052908 (2007)