

酸化物高温超伝導体の超高速光応答を用いた
テラヘルツ帯電磁波発振器の研究

郵政省通信総合研究所
関西先端研究センター主任研究官

谷 正彦

酸化物高温超伝導体の超高速光応答を用いた テラヘルツ帯電磁波発振器の研究

1. 研究の背景と目的

酸化物高温超伝導体の発見以来10年近くが経過し、その特異な物性が次第に明らかにされるとともに、エレクトロニクス分野やエネルギー分野への応用が渴望されている。しかしながら、エレクトロニクス応用分野については、液体窒素温度でも動作可能という利点を有しながらも、従来の金属超伝導体をしのぐ性能のデバイスの開発は、期待されたほどには進展していない。この理由のひとつは、超伝導のコヒーレンス長が極端に短く、予想どおりの性能を発揮するには接合界面の精密な制御が必要であることである。これまでの酸化物高温超伝導デバイスは従来の金属超伝導体で提供されていたものをそのまま移し替えたものがほとんどで、コヒーレンス長が短いというデメリットがデバイス特性に如実に反映されている。

本研究では従来の金属超伝導体では試みられていなかった、酸化物超伝導体の特徴を生かした新しい発想の素子を提案開発するものである。提案する素子は光パルスにより超伝導電流を高速に変調し、テラヘルツ帯の電磁波を発振させるもので、超高速オプトエレクトロニクスと高速、低消費電力の超伝導素子を直接連結する手段としても利用できる。すなわち、従来は光コンピューティングなどとジョセフソンコンピュータなどは別々に研究対象となってきたわけであるが、超伝導電流の超高速光応答を利用すれば、両者を直接連結する新しい発想の複合コンピュータシステムの構築に応用できる。

我々は最近、フェムト秒光パルス励起により電流バイアス下で半値幅600フェムト秒以下のテラヘルツ電磁波が発振されることを世界に先駆けて確認しており、酸化物高温超伝導体の一部の半導体に匹敵する超高速光応答を示すことを明らかにした。この発振器は酸化物超伝導体の特徴、すなわち、

- i) 可視領域の反射率が低いため、ポンプ光が有効に吸収される（約50%）、
 - ii) 臨界温度が高く、温度上昇範囲に余裕があるためポンプ光を強くすることができる、
 - iii) キャリヤー密度が低いため、超伝導体と外部とのインピーダンス不整合が緩和され、金属超伝導体を用いるよりも多くの電磁波を外部に取り出すことができる、
 - iv) キャリヤーの緩和時間が本質的に短く、超高速光応答が可能である、
- など従来の金属超伝導体にはない性質を利用するものである。

本研究の目的は、

- a. 高温超伝導体を用いて従来の半導体製の光伝導スイッチを用いたテラヘルツ波発振器の性能を（発振強度及び発振周波数帯域において）凌駕する性能の発振器を開発すること、
- b. その電磁波のパルス波形、温度依存性などから高温超伝導体光スイッチ素子の電磁波発生特性を明らかにし、将来、オプトエレクトロニクスと超伝導エレクトロニクスを結合するための基礎的データを得ること、
- c. 超伝導電流の時間変化の直接測定が（電磁波のパルス波形から）可能なことから、超伝導エレクトロニクスで重要な役割を担っている非平衡超伝導に関する基礎物理を明らかにすること、

などである。

2. 研究方法・研究内容

従来の超短パルスレーザーを用いたテラヘルツ電磁波発生では、バイアス電圧を印加した半導体光スイッチ素子を励起し、それによって生じる高速の光伝導電流の変調（電流パルスの発生）によるものであった。このとき電気双極子放射により電流変化の時間微分に比例した振幅の電磁波が（基板裏面より）放射がされる。

$$E_r \propto \frac{\partial i(t)}{\partial t} \quad E(t): \text{放射電場} \quad i(t): \text{電流} \quad (1)$$

したがって、光伝導電流パルスがサブピコ秒であれば、サブピコ秒の電磁波パルス、すなわちテラヘルツ電磁波（1ピコ秒の逆数が、1テラヘルツ）が得られる。一方、高温超伝導体を用いたテラヘルツ電磁波発生では、超短パルスレーザーで超伝導体に流れる超伝導電流を変調（電流の遮断）することによるものである（図1. (a)参照）。超伝導電流の減少及び回復過程がサブピコ秒であれば、半導体の場合と同様、テラヘルツ電磁波が得られる。半導体の場合はスイッチオンによる電磁波発生とすれば、高温超伝導体の場合はその反対のスイッチオフによる電磁波発生といえる。

図2に酸化物高温超伝導体（YBCO膜）によるテラヘルツ電磁波発生と検出のための実験装置の模式図を示す。励起用の超短パルスレーザーとしてはモード同期のチタンサファイアレーザーを用いる（光パルス幅約80フェムト秒、波長約800nm、繰返し周期82MHz）。電磁波の波形は、超高速光応答する半導体（低温成長GaAs）で作られた光スイッチ素子をサンプリング検出器として用いる。半導体光スイッチ素子に、励起パルスの一部を分岐し（ゲート光）、適当な時間遅延をかけて光伝導ギャップを照射すると、電子・正孔対のキャリアが生成され、電磁波の電場がバイアスとなり、電磁波振幅に比例した直流電流が流れる（図1. (b)）。ゲート光の時間遅延を変化させながら検出器の直流電流信号を測定することにより、電磁波の波形（電場）が時間分解検出される。このとき時間分解能は検出器の応答時間、すなわちキャリア減衰時間（<0.5ps）で制限される。

検出された波形は放射素子のアンテナ形状による効果を見捨てる、超伝導電流の時間微分に比例すると考えてよいので、電磁波の波形を時間積分することにより、変調される超伝導電流の時間変化をサブピコ秒の時間分解能で観測できる。したがって、電流が超伝導キャリア（クーパー対）密度に比例するとすれば、電磁波の波形から高温超伝導体中の非平衡キャリアダイナミクスを探ることができる（目的c）。

一方、ポンプ光強度、バイアス電流、及び素子温度を変化させることにより、酸化物高温超伝導体の電磁波発振の特性を調べることができる。特に温度変化により、高温超伝導体の複素誘電率が超伝導キャリア密度の変化に伴って変化するため、高温超伝導体テラヘルツ素子と自由空間との間のインピーダンス整合が変化する効果を観測できる。インピーダンス整合は他の超伝導エレクトロニクスデバイスとの結合を考えた場合にも重要である（目的b）。

電磁波放射の高効率化を計るために（目的a）、我々は素子のアンテナ形状

として、これまで用いていた共鳴型のダイポールアンテナ（図1．（a））の代りに、広帯域のアンテナ利得をもつボウタイ型アンテナ（図1．（c））を用いることにした。また、基板（酸化マグネシウムMgO）と自由空間境界面での反射ロスを減少させ、さらに方向利得(directive gain)を上げるために、超半球型のMgOレンズを基板（裏面）に取り付けた。

また、電磁波の放射効率を上げるためには、自由空間とのインピーダンス不整合をできるだけ低下させることが必要であるが、高温超伝導体のYBCOのc軸方向(CuO₂面に垂直方向)の複素誘電率がa軸方向(CuO₂面に平行方向)よりも2桁程度低いことに着目し、c軸が膜表面に平行であるような素子を作製し、その放射特性を評価した。

3．研究結果

図3にYBCO光スイッチ素子により発生された電磁波の波形（図3(a)）及びそのフーリエ変換スペクトル（図3(b)）を示す。スペクトルから0～3THzに分布を持つ超広帯域テラヘルツ電磁波であることが分かる。電磁波波形とともにその積分波形が点線で示されているが、この積分波形が電流変化に相当することから、超伝導電流が非常に高速に変調されているのが分かる。超伝導電流の変調は以下のようなメカニズムで起こると考えられる[1]。

- i) 最初にレーザーパルスにより、クーパー対が壊され、且つ非常に高いエネルギー状態 ($\Delta E \sim 1.5\text{eV}$) の準粒子へと励起される。
- ii) 高いエネルギーを持った準粒子はさらに他のクーパー対も次々と準粒子へと励起し、雪崩的にクーパー対の準粒子への励起を生じる（その結果超伝導電流は減少する）。
- iii) その後、準粒子はまたクーパー対へと再結合する（超伝導電流の回復）。電流波形から超伝導電流の回復が数ピコ秒程度のスケールで起こっていることが分かる。波形データに基づく、非平衡キャリアダイナミクスの詳細な解析結果は文献[2]に報告している。

図4に電磁波振幅のポンプ光強度、バイアス電流、及び温度依存のデータを示す。バイアス電流に対しては電磁波振幅はほぼ比例して増加する（図4（b））が（臨界電流以下で）、ポンプ光強度が増加するとだんだん電磁波放射強度が飽和する（図4（a））のが分かる。また、電磁波振幅は臨界温度（約80K）の少し下で最大値を示す（図4（c））。これらのデータを解析することにより、高温超伝導体の場合、電磁波の放射効率を強く制限しているのは、高温超伝導体をもつ非常に大きな複素誘電率による、自由空間とのインピーダンス不整合であり、励起された全放射電力の約0.1-0.2%程度しか自由空間に放射されていないことが示された[3]。

放射効率を上げるために作成したボウタイ型YBCOアンテナ素子では、約1桁以上の放射パワーの増加が確認された[4]。ボウタイアンテナによるテラヘルツ電磁波のスペクトル分布はダイポールアンテナ型の場合と比べて、低周波数側にシフトしており、放射パワーの増加は主に低周波数 (< 1 THz) 成分の増加によることが理解された。

YBCO膜のc軸が膜表面に平行であるような素子の放射特性を調べると、臨界バイアス電流は低下したが、通常のYBCO膜（c軸が膜表面に垂直）の場合に比して約数倍の放射効率の増大が確認された[5]。

その他、興味深い研究結果として、電流バイアスなしでも、高温超伝導体

(YBCO) に磁場を印加するだけで、効率良くテラヘルツ電磁波が発生されることを発見した[6]。超伝導体中にトラップされた磁束による遮蔽渦電流がその原因と考えられるが、詳しいメカニズムは現在検討中である。

以上の結果から、酸化物高温超伝導体を用いた光スイッチ素子はテラヘルツ帯の広帯域発振器として非常に、有望であることが示された。

4. 研究がもたらす効果および波及効果

これまでに超伝導体を利用した発振器としては、ジョセフソンアレー発振器やフラックスフロー発振器等が金属超伝導体、酸化物超伝導体の両方で研究されてきた。これらは、発振原理としては目新しさはなく、主としてプロセス研究が中心であった。これに対し、本研究で開発された発振器は従来にない発想に基づいたものであり、その発振機構そのものも物理的に非常に興味深い。また、オプトエレクトロニクスと超伝導エレクトロニクスとを直接結合する技術であり、新しい産業応用を提供する可能性もある。さらに、これまで測定が困難であった超高速（サブピコ秒）の非平衡超伝導のダイナミクスを解明する測定手段を提供することにもなり、種々の励起の緩和過程から酸化物高温超伝導体の超伝導機構に対し、従来とは違った角度から光をあてることが可能となる。以上のことから本研究の成果は超伝導エレクトロニクスの実用化に大きなインパクトを与えるものであり、新たな研究領域を切り開くものであることを確信する。

発表論文リスト

- [1] M. Hangyo, S. Tomozawa, Y. Murakami, M. Tonouchi, M. Tani, Z. Wang, K. Sakai, and S. Nakashima: Appl. Phys. Lett. Vol. 69, No. 14, 2122-4 (1996).
- [2] M. Tonouchi, M. Tani, Z. Wang, K. Sakai, N. Wada, and M. Hangyo: Japanese J. Appl. Phys. Vol. 35, Part 2, No. 12A, L1578-81 (1996).
- [3] M. Tani, M. Tonouchi, M. Hangyo, Z. Wang, N. Onodera, and K. Sakai: Japanese J. Appl. Phys. Vol. 36, Part 1, No. 3B, pp.1984-9 (1997).
- [4] M. Tani, M. Tonouchi, Z. Wang, K. Sakai, M. Hangyo, S. Tomozawa, and Y. Murakami: Japanese J. Appl. Phys. Vol. 35, Part 2, No. 9B, pp. L1184-7, (1996).
- [5] 春季第44回応用物理学会関係連合講演会(1997), 30a-SQ-4. (論文準備中)
- [6] M. Tonouchi, M. Tani, Z. Wang, K. Sakai, N. Wada, and M. Hangyo: Japanese J. Appl. Phys. Vol. 36, Part 2, No. 2A, pp. L93-5, (1997).

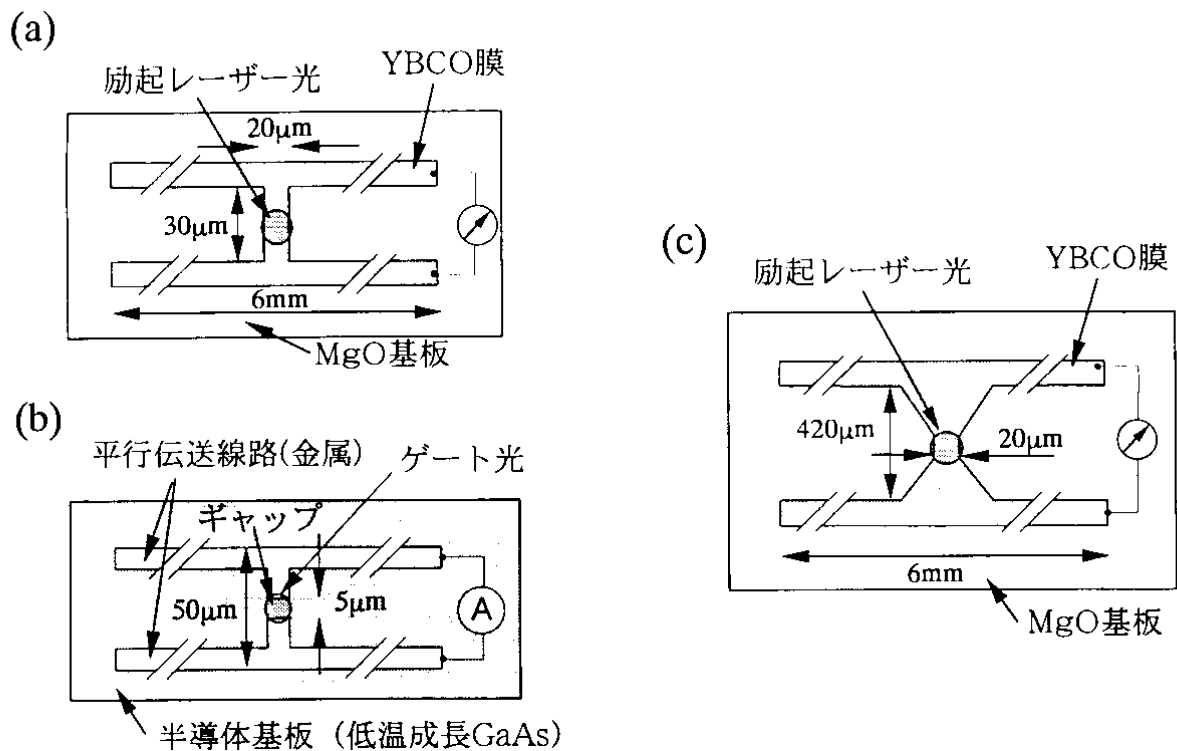


図1. (a) ダイポールアンテナ型YBCO光スイッチ素子、(b) 半導体光伝導スイッチ検出器、(c) ボウタイアンテナ型YBCO光スイッチ素子

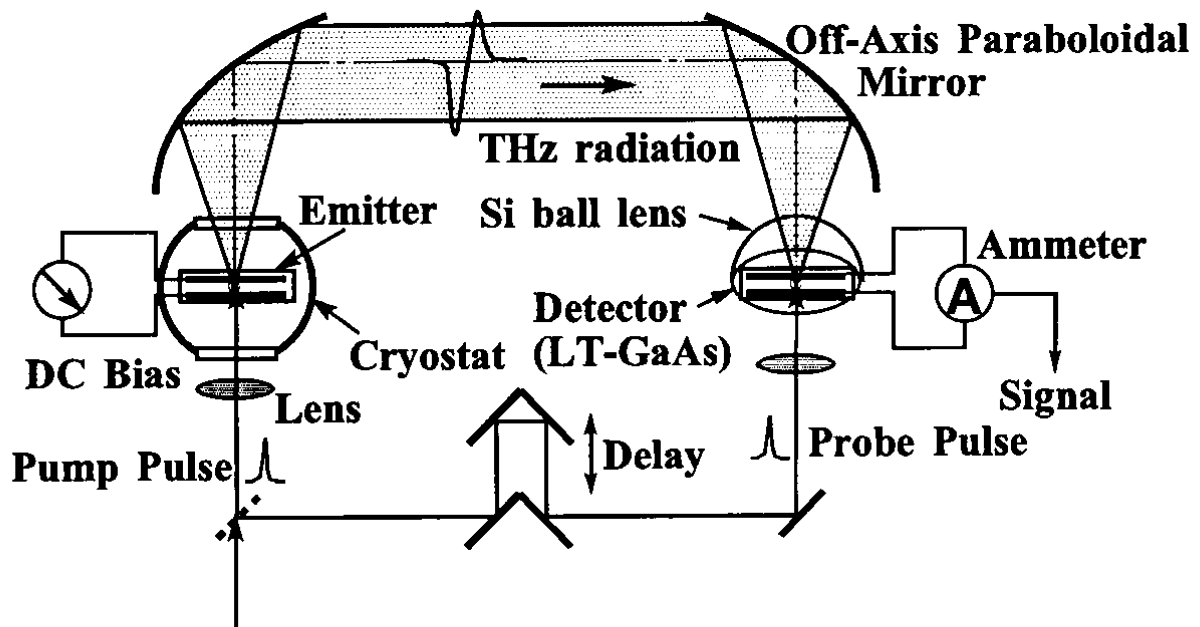


図2. 酸化物高温超伝導体(YBCO)光スイッチ素子によるテラヘルツ電磁波発生と検出実験の装置模式図。

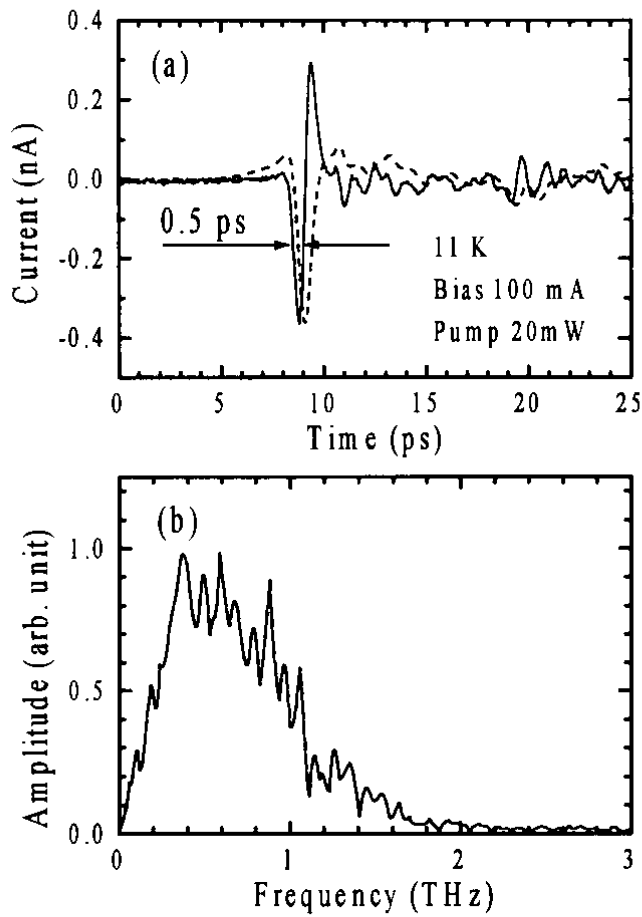


図3. YBCOダイポールアンテナ型光スイッチ素子による(a)電磁波波形及びその(b)フーリエ変換スペクトル。図(a)中の点線は時間積分したときの波形(電流変化に相当)。

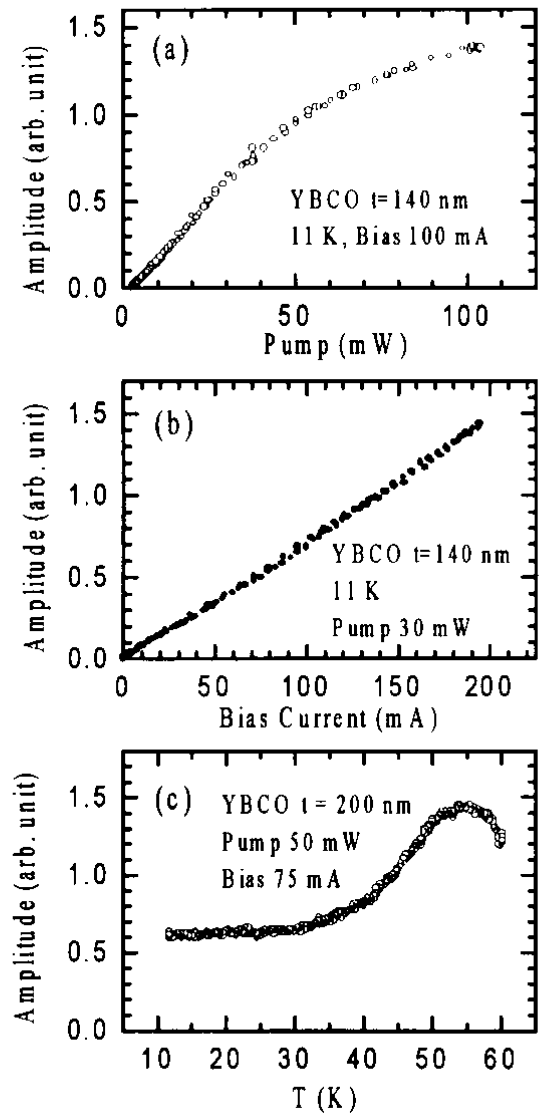


図4. (a)電磁波振幅の励起光強 (b)バイアス電流依存、及び(c)温度依存性。