

レーザー・テラヘルツ波工学の開拓



萩行正憲*

Development of Laser Terahertz Technology

Key Words : THz radiation, ultrashort laser pulse, laser terahertz technology, high-T_c superconductor

1. はじめに

私の所属する超伝導エレクトロニクス研究センターでは、平成7年に高温超伝導薄膜に超短光パルスレーザーを照射することにより、周波数がテラヘルツ(1テラヘルツ=1000ギガヘルツ=10¹²ヘルツ)に達する電磁波が放射されるという新現象を発見した^{1,2)}。この現象は、「高温超伝導体」と未開拓電磁波である「テラヘルツ波」という2つのキーワードに関わることから注目を浴び、基礎物性、量子エレクトロニクス、通信など多方面からの助成を得て多岐にわたる研究プロジェクトを進めている。「生産と技術」誌にもこれまでに2回高温超伝導体からのテラヘルツ波放射関連の記事を書かせていただいている^{3,4)}。表題の「レーザー・テラヘルツ波工学の開拓」は、私が領域代表者となっている平成11~13年度の文部省科研費特定領域研究(B)のプロジェクト名で、レーザーを照射することにより超伝導体を含むいろいろな物質からテラヘルツ波を放射し、また、それを利用する技術を確認しようとするものである。この小文では、我々が行っているテラヘルツ波関連の研究とこのプロジェクトの内容について紹介する。

2. レーザー照射によるテラヘルツ波放射^{1,2)}

レーザー照射によるテラヘルツ波放射は現象としては極めて単純でわかりやすい。図1(a)に米国の

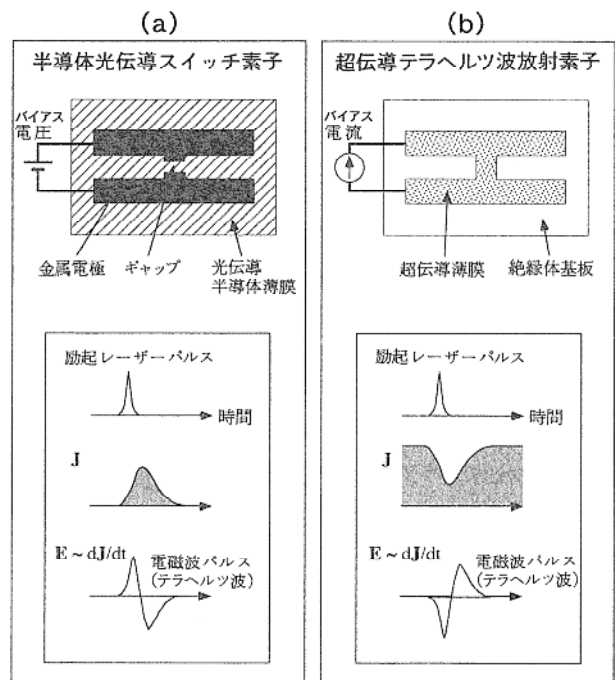


図1 (a) 半導体光伝導スイッチ、及び、
(b) 超伝導テラヘルツ波放射素子の構造と
そのテラヘルツ波放射の原理。

Austonらが用いた半導体光伝導スイッチの構造とそのテラヘルツ波放射原理を示す。光伝導半導体薄膜(最近では光生成キャリアの寿命が極めて短いことから低温成長ガリウムヒ素がよく使われる)上に間隔が5ミクロン程度の金属電極を設け電圧をかけて、この電極間に超短光パルス(モード同期チタンサファイアレーザーの800nm光が良く使われる)を照射すると瞬間的に光生成電流が流れる。この瞬間的な電流により古典的なマックスウェル方程式に従って電磁波パルスが空中に放射される。電流パルスの時間幅が1ピコ秒以下だと放射される電磁波の波形も1ピコ秒以下となるが、周波数領域で見るとテラヘルツに及ぶ広帯域のスペクトルを有することになる。

*Masanori HANGYO
1953年2月21日生
1981年京都大学大学院理学研究科物理学第一専攻修了
現在、大阪大学超伝導エレクトロニクス研究センター、教授、理学博士、超伝導エレクトロニクス、光物性
TEL 06-6879-7980
FAX 06-6879-7984
E-Mail hangyo@rcsuper.osaka-u.ac.jp



我々は、高温超伝導薄膜を用いてこの逆のケースを考えた。超伝導体には大電流を流すことができるが、この電流を担っているのは超伝導電子対である。光パルスによりこの超伝導電子対を瞬時に破壊できれば超伝導電流も瞬時に減少し、その後回復するであろう。この超伝導電流の変調によっても電磁波パルス(テラヘルツ波)が放射されるのではないか。この考えに基づいて図1(b)のような構造の素子を作製し実験を試みた結果、テラヘルツ波の放射に成功した。図2にその波形と周波数スペクトルの一例を示す。

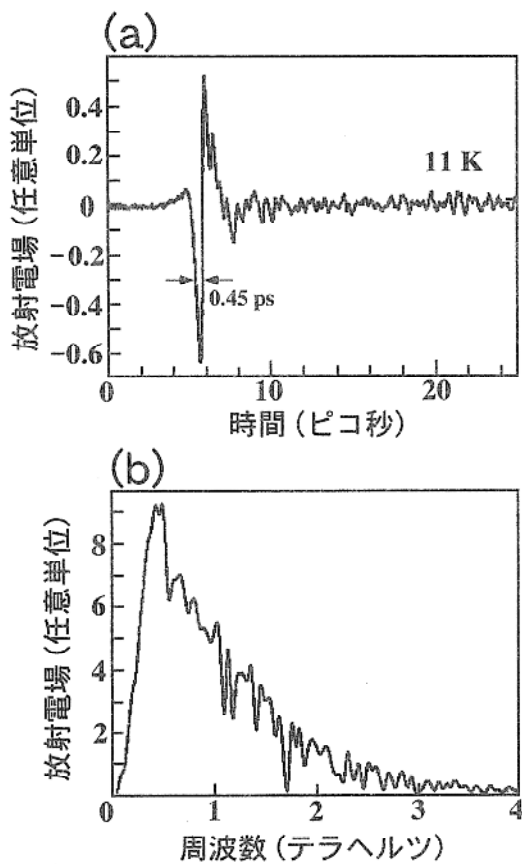


図2 (a)高温超伝導テラヘルツ波放射素子からの放射波形と(b)そのフーリエスペクトル。

3. 高温超伝導体からのテラヘルツ波放射の研究の展開

高温超伝導体からのテラヘルツ波放射現象はとも面白い現象であり、また、超伝導体特有の性質と結びついていろいろな方向に展開している。それらを列挙すると、

- (1) アンテナ構造の工夫による放射強度の増大⁵⁾
- (2) 光パルスによる書き込みとテラヘルツ波放射に

よる読みとりを利用した新型超伝導磁束捕獲メモリの提案と試作⁶⁾

- (3) 光ファイバー通信の1.55 μm 光照射によるテラヘルツ波放射の実現

- (4) 光照射テラヘルツ波放射現象を利用した超伝導電流可視化装置の提案と試作⁷⁾

などである。(1)については、ログペリアンテナ型の素子構造により100mW励起で6 μW 以上を実現している。(2)については、光パルスによる超伝導体中の磁束の制御という物理的にも面白いテーマに発展している。(3)については、将来の光-電波融合通信のための基礎研究として通信・放送機構からの研究委託を受け、平成9~13年度の子定で研究プロジェクトを進めている。(4)の超伝導電流可視化装置は、完全に非接触で超伝導電流の分布を見る装置であり、最近ではその発展型として、放射されるテラヘルツ波の振幅がレーザー照射位置の電流密度に比例し、超伝導電流の方向に偏光していることを利用してベクトルマッピングまで行っている⁸⁾。

図3は、ベクトルマッピング装置を利用して、超伝導体YBCO薄膜中に捕獲された磁束に伴う超伝導電流分布を測定した例である。超伝導状態にあるYBCO薄膜に150ガウスの磁場を印加した後外部磁場を取り除いた状態での測定であるが、超伝導体には一度侵入した磁束を捕捉しておく性質があり、その侵入磁束を巡って超伝導永久電流が流れている。その様子が図3のベクトル分布として現れているわけである。

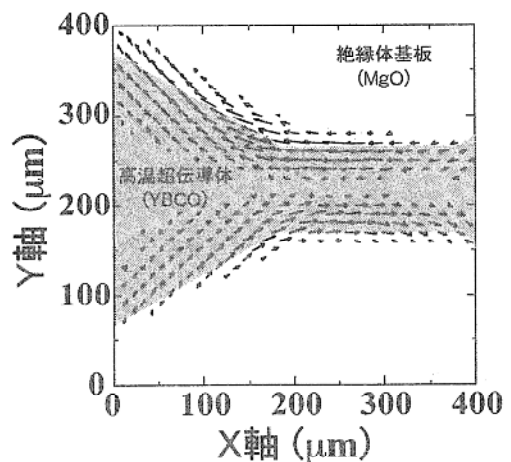


図3 150ガウスの磁場を印加することにより磁束を捕獲させたYBCO薄膜の、テラヘルツ波放射で測定した超伝導電流のベクトル分布。

4. レーザー・テラヘルツ波工学の開拓

先に述べたように、超短パルスレーザーの最近の発達により、これを様々な物質に照射してテラヘルツ領域の電磁波を放射することが可能となった。テラヘルツ波はこれまで適当な光源が少なかったためにその利用が遅れていた。我々は、従来の半導体に加えて高温超伝導体からもテラヘルツ波が放射されることを発見したのを機会に、より強いテラヘルツ波光源を開発し色々な分野に応用することを目的として、文部省科研費特定領域研究(B)「レーザー・テラヘルツ波工学の開拓」を申請し、阪大、分子研、東京理科大、東北大学の4研究グループのプロジェクトとして平成11～13年度の予定で採択された。図4にこのプロジェクトの概要を示す。

プロジェクトはおおまかに、(1)テラヘルツ波光源の開発、(2)テラヘルツ波放射現象を利用した材料・デバイスのプローブ、及び、(3)テラヘルツ波自体の応用の3つに分けられる。(1)では、様々

な材料・デバイスからの様々な発生機構を利用した高性能なテラヘルツ波光源を開発する。我々は、低温・強磁場下でのInAs表面からの放射を調べ、温度40K、磁場2.4テラスでは室温・無磁場下での放射に比べ約300倍の強度の放射が得られることを見いだしている。(2)では、光パルス励起によるテラヘルツ波の放射機構が半導体と超伝導体、また半導体でもその種類やデバイス構造で異なっていることを利用して、光パルス励起テラヘルツ波放射を半導体表面の評価や超格子中の電子の超高速な動きの観察、超伝導電流の分布の測定など従来になかった評価法へ応用する。先に図3に示した結果がその一例である。(3)では、未開拓の電磁波であるテラヘルツ波を、従来の、赤外線、可視光、紫外線、X線などと同様に計測に応用することを目的とする。我々は、これまで高価なチタンサファイアレーザーなどの超短パルスレーザーで光伝導スイッチを励起して広帯域のテラヘルツ波を発生していたのに対し、極めて安価な汎用の連続発振のマルチモード半導体レー

文部省科学研究費補助金 特定領域研究(B)
「レーザー・テラヘルツ波工学の開拓」 (平成11年度～13年度) 領域代表 萩行

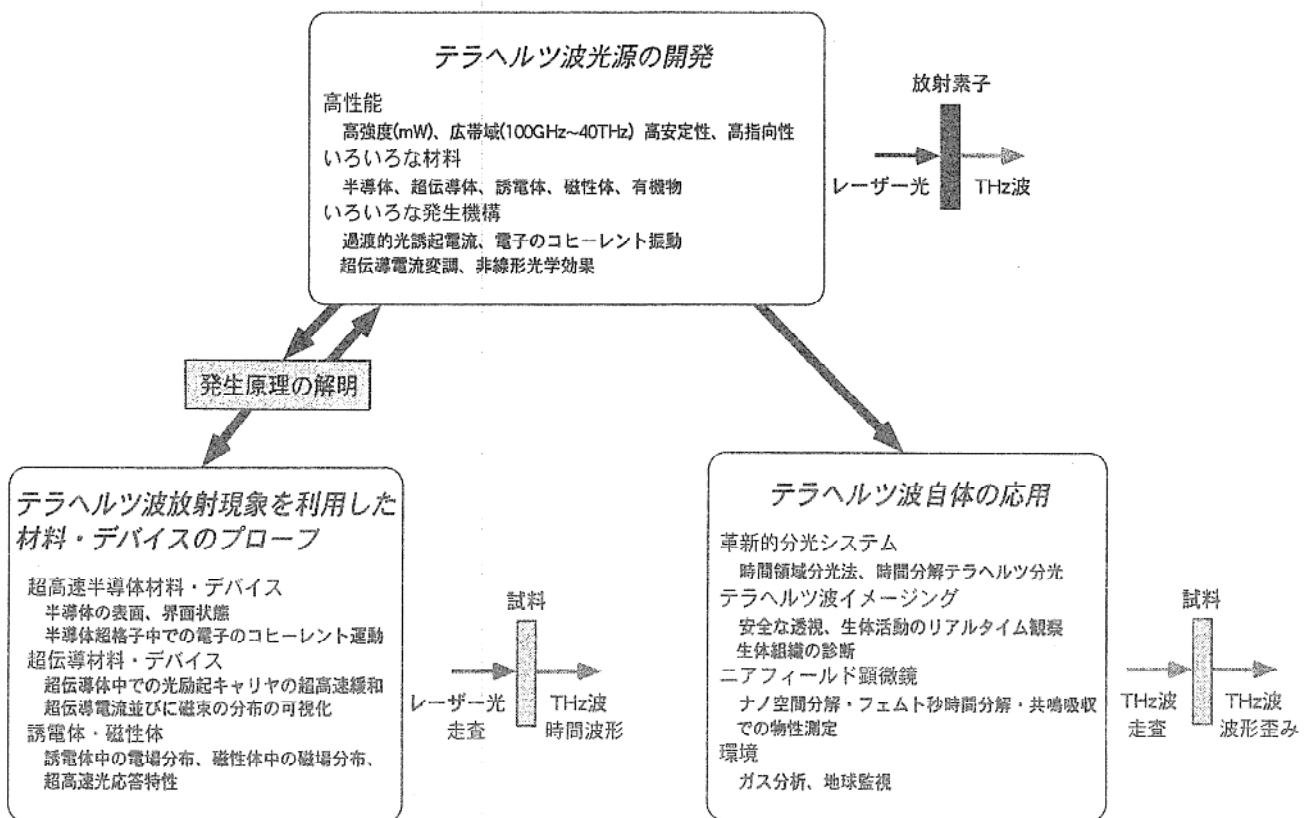


図4 科研費特定領域研究(B)「レーザー・テラヘルツ波工学の開拓」の概要。

ザー励起でサブテラヘルツの電磁波を発生することに成功し^{9,10)}, また, これを用いた新しい分光システムを提案・試作して, パルスレーザーを用いたシステムと同等の情報が得られることを示した^{11,12)}. また, 不純物をドーブした半導体ではテラヘルツ領域に自由キャリアによる吸収が観測されるが, テラヘルツ分光システムを用いてキャリア密度や移動度を非接触で測定できることを示したところ, 新しい非接触半導体評価法として半導体製造メーカーからも興味を持たれている.

5. ま と め

超短パルスレーザー照射による高温超伝導体からのテラヘルツ波の放射とそれを核のひとつとする新分野「レーザー・テラヘルツ波工学」について記した. この分野は, 超短パルスレーザーの発展に伴って出現した新分野であり, 世界的に研究が盛んになってきている. この記事が印刷されるころには終了しているが, 1999年11月にはこの分野を主テーマのひとつとする第7回IEEEテラヘルツエレクトロニクスに関する国際会議(THz'99)が奈良で開催されることになっており, 筆者はそのプログラム委員長を仰せつかっている.

このテラヘルツ波工学と密接に関連するが, 当センターでは従来の「超伝導エレクトロニクス」と「光エレクトロニクス」を融合する新分野「超伝導フォトニクス」を提唱している. 高温超伝導体の超高速光応答とテラヘルツ波放射を介して既製の両分野を結びつけようとするもので, 今年度が10年時限

の最後の年度となる当センターに替わる次期センターの旗印として挙げている. 今後「レーザー・テラヘルツ波工学」と「超伝導フォトニクス」を阪大から世界に発信するオリジナル分野として展開していきたいと考えている.

参 考 文 献

- 1) M. Hangyo et al. : Appl. Phys. Lett., 69, 2122 (1996).
- 2) M. Hangyo et al. : IEICE Trans. Electron., E80-C, 1282 (1997).
- 3) 萩行正憲 : 生産と技術, 49, 60 (1997).
- 4) 萩行正憲 : 生産と技術, 51, 229 (1999).
- 5) M. Tonouchi et al. : IEEE Trans. Appl. Supercond., 7, 1923 (1997).
- 6) M. Tonouchi et al. : Appl. Phys. Lett., 71, 2364 (1997).
- 7) S. Shikii et al. : Appl. Phys. Lett., 74, 1317 (1999).
- 8) O. Morikawa et al. : Appl. Phys. Lett., 75, 3387 (1999).
- 9) M. Tani et al. : IEEE Microwave and Guided Waves Lett., 7, 282 (1997).
- 10) O. Morikawa et al. : Jpn. J. Appl. Phys., 38, 1388 (1999).
- 11) O. Morikawa et al. : Appl. Phys. Lett., に印刷中.
- 12) O. Morikawa et al. : Appl. Phys. Lett., に投稿中.

