

Title	高温超伝導体からのテラヘルツ電磁波放射
Author(s)	萩行, 正憲
Citation	大阪大学低温センターだより. 113 p14-p.20
Issue Date	2001-01
oaire:version	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/12217
DOI	
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

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

Osaka University

高温超伝導体からのテラヘルツ電磁波放射

超伝導フォトンクス研究センター 萩行 正憲 (内線 7980)

E-mail:hangyo@rcsuper.osaka-u.ac.jp

1. はじめに

旧超伝導エレクトロニクス研究センターの我々のグループは、郵政省通信総合研究所関西先端研究センターと共同で、平成7年6月に光パルス励起により高温超伝導薄膜からのテラヘルツ電磁波放射に成功した^[1]。この発見は、研究としてとても面白くまた話題にもなったが、それに附随して私並びに私の所属するセンターに起こった出来事は、研究自体よりもさらに劇的で、個人的にも大変貴重な体験をさせていただいた。研究ノートとしては相応しくないが、新春の軽い読み物ということで、はじめにそのことについて述べたい。

私はもともと光物性の研究者で、工学部応用物理学科でラマン散乱分光や各種分光法の開発を行っていた。分光というのは重要ではあるが地味な分野で、私自身はなんとなく行き詰まりを感じていた(元々大した業績を挙げていたわけではないが...)。平成2年に、旧工学部附属超伝導工学実験センターが改組されて、全学組織の超伝導エレクトロニクス研究センターが新設され、応用物理学科から助手のポスト(センターでは助教授のポスト)を出したということで、私に移らないかという誘いがあった。研究に行き詰まっていたこともあり、助教授になれるならという不純な気持ち(?)で承諾した。センターには移ったものの、それまで電力貯蔵を主とした研究を行っていたセンターには材料物性やエレクトロニクス関係の装置は殆どなく、応用物理学科の装置を使いながら糊口を凌ぐ日々であった。センターにある2つのポストのうち、教授は電力貯蔵関連の研究を続行され、世界的規模で進展していた高温超伝導物性関連の研究を私ひとりでやるということで、初めから見込みのない船出のように感じられた。それでも、応用物理学科にいた時に始めた、我が国初のミリ波干渉分光計(75~170ギガヘルツ)の開発とそれを用いた高温超伝導薄膜の高周波物性の研究を続行していたが、その研究過程でIBMのグループが超短光パルスを半導体光伝導スイッチに照射し0~2テラヘルツの分光を行っている文献を見つけた。未開拓電磁波であるテラヘルツ波の分光をこのような広帯域で行っているのは驚くべきことであり、当時応用物理学科におられた遠赤外分光が専門の阪井先生に知らせた。阪井先生は、その文献はご存じなかったが、後に、国際学会でそのような講演があったことを思い出されたようである。阪井先生はその後通信総合研究所に移られ、この半導体光伝導スイッチを用いたテラヘルツ波放射のプロジェクトを始められた。私は高温超伝導体から光パルス励起でテラヘルツ波を放射する提案を行い、共同研究により平成7年6月に実験に成功したわけである。

この成果は、高温超伝導体、超高速光応答、テラヘルツ波という魅力的なキーワードに関連している

ことからただちに評価され、平成8年度から3年間の科研費基盤研究(A)をいただき、また、同年に当時の興地センター長、金森総長のご努力もあり文部省の研究基盤重点設備費をいただいた。平成8年3月で教授の村上先生が退官され、7月からは私が教授に昇任し（ついでに、長期に働ける職場が決まったということで、公務員宿舎から一戸建てに移った）、11月には通信総合研究所から斗内さんに助教として来ていただいた。平成9、10年度には志水、辻センター長のもとで外部評価委員会を実施し、センターの研究は高い評価を得、平成11年度末の10年時限満了以後も規模を拡張して現在の研究を続行すべしとの提言を得た。両センター長とともに阪大事務や文部省と次期センターについて折衝を行ったが、これもまた研究とは別の意味で貴重な経験であった。幸い文部省から、教授1、助教1を純増、さらに外国人客員教授をつけていただき、電気系と応用物理学専攻からは助手のポストを各1人づつ出していただき、平成12年4月から2部門1客員部門（教授2、助教2、助手2、外国人客員教授1）の超伝導フォトンクス研究センターがスタートした。平成11年度からは3年計画で、私を領域代表者とする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」がスタートし、新しく教授に昇任された斗内さんもさきがけ21のプロジェクトを推進されている。ここ5年間程の間にセンターに投資された外部資金は？億円で達し、5年前を振り返るとまさに今昔の思いである。

というわけで、半分手柄話になってしまったが、研究者も歌手や役者と同じく、無名から一夜にして「ブレイク」することがあるということを実感した次第である。以下は、まじめな研究の話である。

2. 高温超伝導体からのテラヘルツ電磁波放射^[2]

図1は高温超伝導薄膜素子からのテラヘルツ波放射の原理を模式的に示したものである。絶縁性基板上のブリッジ状に加工された超伝導薄膜にバイアス電流を流し、ブリッジ部に時間幅が100フェムト秒程度の超短光パルスを照射する。超伝導電流はクーパー対と呼ばれる超伝導特有の電子（超伝導電子）によって担われているが、この超伝導電子は通常の金属と異なり格子振動や不純物イオンの散乱を受けない（これが電圧ゼロで電流が流れる原因である）。超短光パルスの照射により超伝導電子の一部は一瞬にして常伝導電子に変身し、通常の金属中の電子と同様の散乱を受けるようになる。この特徴的な時間は100フェムト秒オーダーなので、超伝導電子は短時間で停止し超伝導電流が減少することになる。いわば、光で電子を瞬時に止めるわけである。古典電磁気学に従えば、電流が時間変化すればその電流の時間微分に比例した振幅

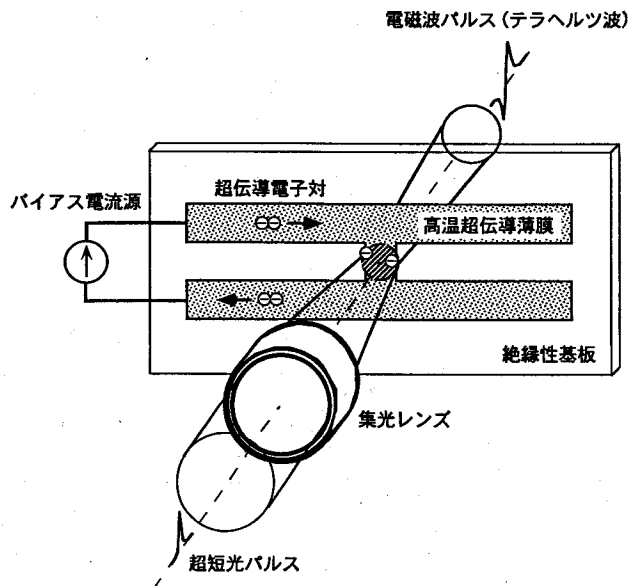
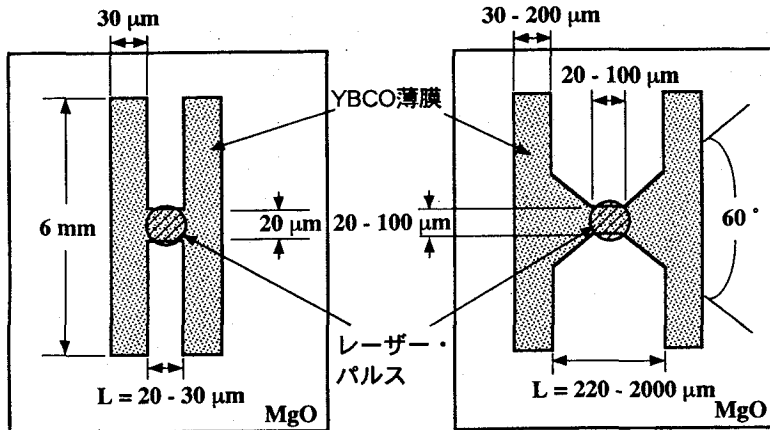


図1 高温超伝導薄膜素子からのテラヘルツ波放射の原理。

の電磁波パルスが放射されるため、1ピコ秒以下で電流の減少が起これば1ピコ秒以下の時間幅の電磁波パルスが放射されることになる。

具体的な素子の例を図2に示す。後に特に素子に加工しなくてもテラヘルツ波が放射されることがわかったが、図のようにアンテナ型に加工することにより特定の周波数領域の放射効率を増大したり、放射指向性を改善したりできる。図2(a)はダイポール・アンテナ型、(b)はボウタイ・アンテナ型と呼ばれ



(a) ダイポール・アンテナ型素子 (b) ボウタイ・アンテナ型素子

図2 高温超伝導テラヘルツ放射素子の構造。

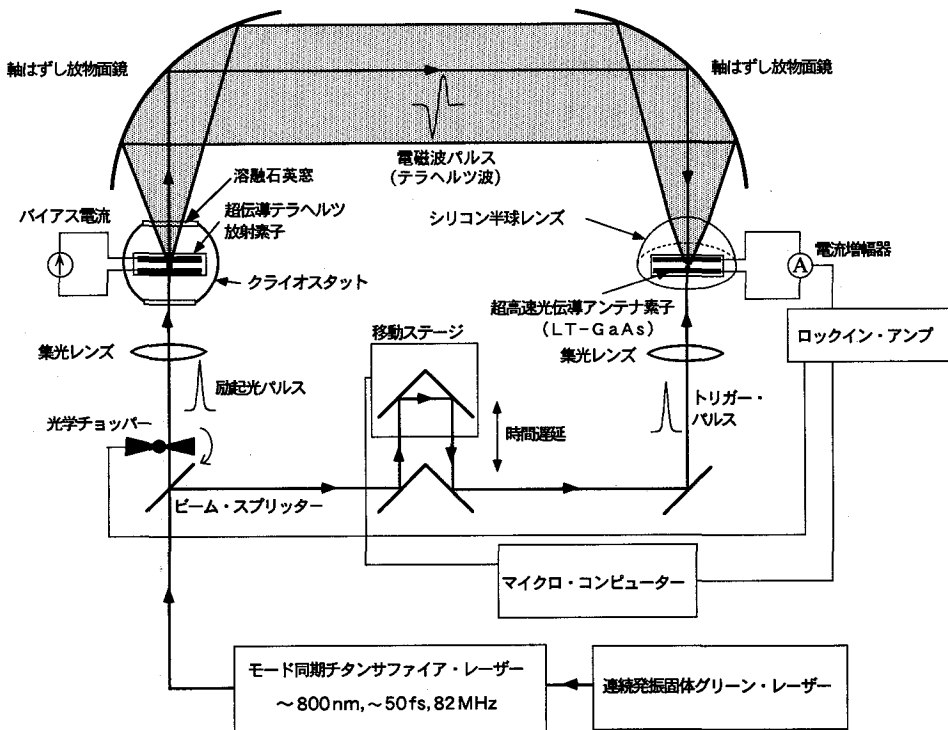


図3 テラヘルツ波励起・検出システム。

る構造で、それぞれ、高周波および広帯域用である。高温超伝導体としては最もポピュラーな $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (YBCO) 薄膜をパルスレーザー・デポジション法で MgO (100) 基板上に作製し、リンググラフィとウェットエッチングでアンテナ状に加工した。膜厚は、レーザー光の侵入長が数十 nm、電磁波の侵入長が約 150 nmであることを考慮して約 100 nmとした。

図3にテラヘルツ波励起・検出システムを示す。テラヘルツ波の励起には、モード同期チタンサファイア・レーザーからの中心波長約 800 nm、時間幅 100 フェムト秒以下、繰り返し周波数 82 MHzの超短光パルスを用いた。超伝導テラヘルツ波放射素子は低振動タイプのヘリウム循環式冷凍機内の試料ホルダーにマウントした。基板側から放射されたテラヘルツ波は一对の放物面鏡とシリコン超半球レンズで検出素子に集光される。検出素子は低温成長ガリウムヒ素 (LT-GaAs) 薄膜上の光伝導アンテナで、チタンサファイア・レーザーからの光を一部分けて時間遅延を与えたパルスでトリガーされる。トリガー光で LT-GaAs 中に生成されたキャリアは約 300 フェムト秒の寿命を持ち、テラヘルツ波の電場により加速されて電流として取り出される。時間遅延を変えることによりテラヘルツ波の波形そのものが測定できるのがこの測定法のみである。

図4にダイポール・アンテナ型 YBCO 素子から放射されたテラヘルツ波の波形を示す。図中の①は基板を通過して空中に放射されたパルス、②は基板内を1往復してきたパルスに対応している。パルスは正負に一回振れる形状をしておりパルス幅は 0.6 ピコ秒である。パルス波形はバイアス電流を反転すると正負が反転し、電流を流さないとパルスは観測されない。パルス波形をフーリエ変換し電場振幅の周波数スペクトルにすると図4(c)となり、100 GHz~2 THz程度まで周波数成分が広がっていることがわかる。テラヘルツ波と呼ばれるのはこのためである。バイアス電流を増加すると、ある電流値までは波形は相似のまま振幅

が線形に増大する。また、放射電磁波はバイアス電流の方向に偏光している。これらの性質は、このテラヘルツ波の放射機構が超伝導電流の時間変化に起因することを意味している。古典電磁気学によれば、放射される電磁波の電場 E は電流の時間微分 dI/dt に比例するので、測定された電場を時間積分すれば電流の時間変

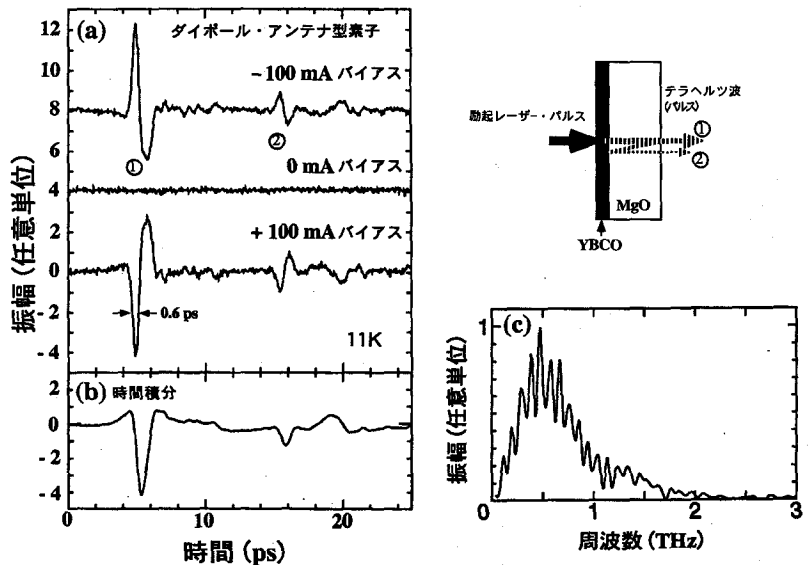


図4 (a)ダイポール・アンテナ型素子から放射されたテラヘルツ波の電場の波形、(b)積分波形(電流の時間変化に相当)、および、(c)電場の周波数スペクトル。

化に対応することになる。その結果を図4(b)に示したが、超短光パルスの照射により超伝導電流の減少と回復が1ピコ秒のオーダーで起こることがわかる。

次に、磁場に関連した放射について述べる。これまで述べてきた結果は全て外部からバイアス電流を流した場合である。超伝導に関する知識を少しお持ちの方は、超伝導と磁場との面白い関係をご存知であろう。超伝導体にある値以下の磁場を印加すると磁場は試料外部にはじき出されるが、これに伴い試料表面には超伝導遮蔽電流が流れる。これは、マイスナー効果として知られているものである。また、ある値以上の磁場を印加すると磁場（磁束）が超伝導体内部に侵入し、これを巡って超伝導電流が流れる。さらに、外部磁場をとり除いても超伝導体は磁束を捕獲する性質があるので、この磁束を巡って超伝導永久電流が流れる。これから述べるのは、この磁場に伴う永久電流を光パルスで変調してテラヘルツ波を出す話である。外部バイアス電流（輸送電流とも呼ばれる）は流さない。図5(a)は150ガウスの外部磁場をかけた場合で、テラヘルツ波が観測され、磁場を反転すると波形も反転する。これは、外部磁場に対する遮蔽電流もしくは侵入磁場に伴う超伝導電流を光で高速変調しているのが放射機構と考えられる。また、(b)は外部磁場

を印加した後、磁場を取り除いた場合で、磁場除去後もテラヘルツ波が観測される。しかも、波形は磁場を印加している場合とは正負が逆転する。このテラヘルツ波は、光パルスを照射し続けてもあまり光の強度が強くない限りは減衰しない。この現象は、先に述べたように、外部磁場が超伝導薄膜内部に侵入し、外部磁場を除去しても磁束として超伝導体内部に捕獲されている

ため、この磁束に伴う永久電流を光パルスで変調することによりテラヘルツ波が放射されるわけである。光パルスを照射して過渡的な非平衡超伝導状態を作り出すわけであるが、緩和後に超伝導電流が流れている元の状態に戻っていくのが物理的に面白いところである。残念ながら、これらの現象に対する理論的な解析はまだない。

3. 光パルス励起テラヘルツ波放射を利用した超伝導電流分布の可視化

先に、超伝導体からのテラヘルツ波の電場振幅は電流に比例し、電流の方向に偏光していると述べた。我々は光照射した場所の局所的超伝導電流が変調され、その結果としてその場所からテラヘルツ波が放射されると考えている。これは、デバイス加工しない薄膜からもテラヘルツ波が放射され、しかも、その強度が光照射位置によって変化することから推測されたものである。もし、レーザー光を十分に絞っ

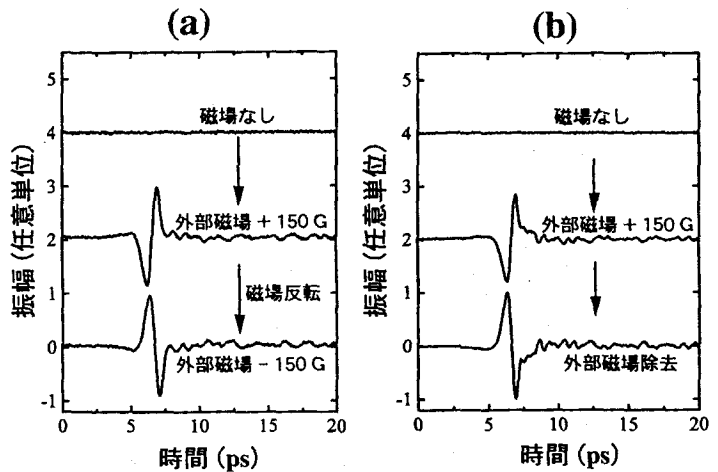


図5 (a)外部磁場を印加した場合の放射、および、(b)磁束捕獲状態での放射。

て試料に照射し、試料を2次的に動かしつつ放射されるテラヘルツ波を測定すれば超伝導電流分布が得られるはずである。このような考えに基づいて、ポウタイ・アンテナ型素子にバイアス電流を流したものを試料として、レーザー光を試料上で直径30ミクロン程度に絞り、放射電場の2次元分布を測定した結果が図6である。超伝導電流がYBCO薄膜の端を流れている様子が良くわかる。図7(a)は、テラヘルツ波放射から得られたブリッジ中央付近の電流分布で、MgO半球レンズを付加して中央付近の集光効率を上げている。図7(b)はA-Bで示される断面の電流分布で、超伝導電流が主に薄膜の端に集中していることがわかる。この分布は、超伝導体中の磁束の振る舞いを説明する典型的なモデルである「ビーン・モデル」による計算と定性的に一致する。

4. まとめ

ここでは、紙数の関係で高温超伝導体からの光パルス励起テラヘルツ波放射についてのみ紹介したが、テラヘルツ波は半導体や誘電体からも放射される。我々は、種々の半導体表面からの放射やアモルファス半導体で作製した光伝導スイッチからの放射などの研究も行っている^[3]。テラヘルツ域にはプラズモンや超伝導体のエネルギーギャップなどの固体の素励起や液体の緩和モード、気体の回転準位などがあり、分光光源としても期待されるが、我々は光源と検出法の特徴を生かしたテラヘルツ時間領域分光法やイメージング法の開発と応用の研究も行っている^[4]。また、高価な超短光パルス（フェムト秒レーザー）ではなく、極めて安価なCWマルチモードレーザーダイオードを用いて、サブテラヘルツ波を放射し分光に用いる新しい手法も開発している^{[5],[6]}。以上述べてきたテラヘルツ波放射と検出は、私自身の経験では極めて筋のいい技術である。世界的にも研究が活発化している。通信、センシング、材料評価、
図7 生体などへの応用が期待される21世紀の技術基盤と

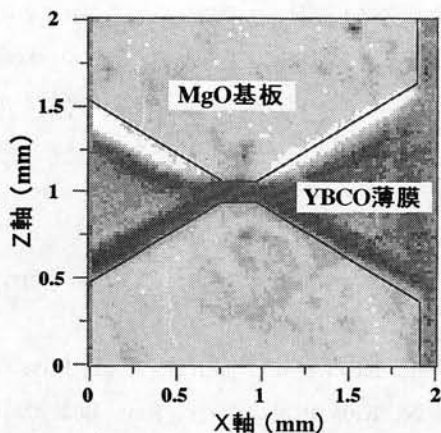


図6 テラヘルツ波放射で測定したバイアス電流を流した状態でのポウタイ・アンテナ型素子中を流れる超伝導電流の分布。

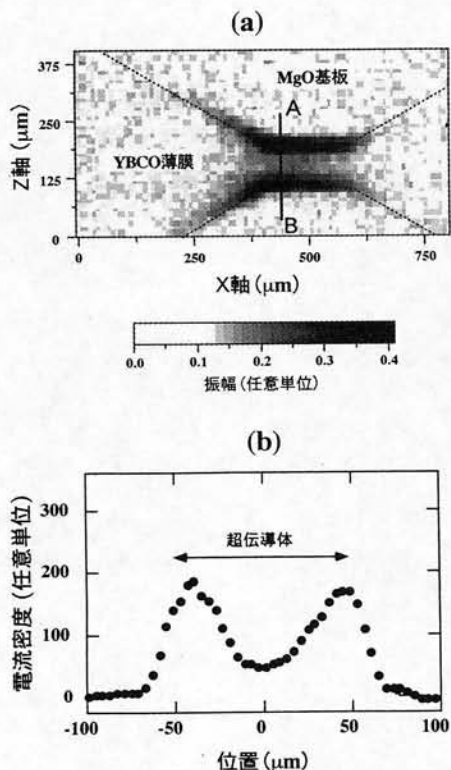


図7 (a)ブリッジ付近の超伝導電流分布と、(b)その断面図。

考えられるため、我が国も米国やEUに遅れをとらないように開発を進めるべきである。

幸い先にも述べたように、研究スタッフと研究資金には比較的恵まれるようになってきたが、建屋の増築がまだで、現在、基準面積の三分の一程度しかなく、深刻な状況となっている。どこにこの窮状を訴えてよいかわからないが、せつかく新設がかなったこのセンターを生かすために何とか超法規的措置(?)をお願いしたいものである。

参考文献

- [1] M. Hangyo *et al.*, Appl. Phys. Lett. **69**(1996)2122.
- [2] 萩行正憲, O plus E **22**(2000)51.
- [3] T. Kiwa *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **39**(2000)6304.
- [4] N. Kida *et al.*, Phys. Rev. **B62**(2000)R11965.
- [5] O. Morikawa *et al.*, Appl. Phys. Lett. **75**(1999)3772.
- [6] O. Morikawa *et al.*, Appl. Phys. Lett. **76**(2000)1519.