

テラヘルツ光子の検出とその応用

河野 行雄

Detection and Application of Terahertz Photons

Yukio KAWANO

This article represents a review of photon detection and its application in the terahertz region, in which technology is increasingly developing. The study on the terahertz photon detection has two important aspects: basic research on quantum optics and applied research on highly sensitive spectroscopy and imaging. I introduce three major topics: (i) ultra-high sensitive terahertz detector, (ii) terahertz quantum optics, and (iii) terahertz photons in evanescent field and their application to near-field imaging.

Key words: terahertz, photon detection, GaAs/AlGaAs heterostructure, carbon nanotube, quantum optics, evanescent field, near-field imaging

テラヘルツ帯での光子計測にはどのような意義と面白さがあるだろうか。テラヘルツ技術全般は、最近になって、固体物理学、高分子化学、電波天文学などの基礎科学から、セキュリティー・医療・情報通信の応用に至るまで、潜在的な活用性から大きな注目を集めている^{1,2)}。ところが、テラヘルツ波は電波領域と光領域に挟まれた帯域に位置しており、他周波数領域と比べて、発生・検出技術そのものが未成熟である。したがって、テラヘルツ光子検出によって今後どのような物理が明らかになるか、どのような技術が生まれるか、これらは全く新しく、興味深い挑戦的課題である。現時点での筆者の独断になるが、今後の方向性を以下の3点に整理する。

1つ目は、テラヘルツ検出器としての究極感度の達成である。光子は電磁波の最小単位であるため、光子検出は(検出効率の問題を抜きにすれば)最高感度の達成を意味する。これは、高感度検出器が不足しているテラヘルツ領域では応用上非常に意義が高い。分光計測でもイメージング計測でも、微弱光検出のための強力な手段として活用できる。これは、電波天文学、高分子化学、固体物理学などへの波及効果が期待できる。

2つ目は、量子光学研究への応用である。可視・近赤外光領域では、単一光子発生・検出技術が大きく発達してお

り、共振器内の量子電磁力学(cavity-QED)の探求やその量子情報通信への応用等、高度な研究が展開されている。一方、テラヘルツ帯での量子光学実験は端緒についたばかりである。テラヘルツ波を使用する利点のひとつは、波長の長さであると考えられる。したがって、可視・近赤外光領域に比べて、それほど微細な加工を必要とせず、量子光学の実験が可能である。まだ数は少ないが、テラヘルツ量子光学の研究がいくつか報告されている。

3つ目は、エバネセント場(サブ波長空間)でのテラヘルツ光子である。波長よりも小さい空間での電磁場—エバネセント場—中で、光子の振る舞いをどのように理解し、それをいかに利用するかは、他波長領域にも共通する興味深い問題である。これはまた、高感度(高コントラスト比)・高分解能な近接場イメージングという応用上の意義もある。

本稿では、以上について、筆者らの研究を中心に現在の状況を解説する。誌面の都合上、すべての研究を網羅できないことはご容赦願いたい。おもなポイントはまとめたつもりである。

1. テラヘルツ光子検出

1.1 概 論

前述の通り、テラヘルツ領域では、検出技術そのものが発展途上であるため、必然的に光子検出器も種類が限られる。可視光と比べた場合のテラヘルツ光子検出の難しさは、光子エネルギーの低さにある。テラヘルツ光子のエネルギーは数 meV であり、可視光の光子エネルギーに比べると、3桁ほど低い。一般に光検出器は光子吸収による熱エネルギー発生や電子励起（量子準位間遷移）を利用するため、光子エネルギーが低くなるほど検出が困難になる。例えば真空紫外域から近赤外域で使用される光電子倍增管のように、何度も光電子を発生させて増倍させるプロセスは、エネルギーの低いテラヘルツ光子では難しい。

研究開発レベルでの高感度テラヘルツ検出器はいくつかあるが、中でも「光子」をとらえられるとする検出器は、筆者の知る限り、半導体量子ドット³⁾、超伝導体ナノボロメーター⁴⁾、カーボンナノチューブ (carbon nanotube, 以下 CNT と略す)^{5,6)} の3つのみである。半導体量子ドットは 50 mK で雑音等価パワー (NEP) $\sim 10^{-22}$ W/Hz^{1/2}, 超伝導体ナノボロメーターは 65 mK で NEP $\sim 10^{-20}$ W/Hz^{1/2} が報告されている。

テラヘルツ光子検出器はすべて素子を冷却する必要があるが、これはテラヘルツ光子のエネルギーが室温の熱エネルギー (約 26 meV) よりも小さいためである。したがって、冷却装置の開発も重要な要素のひとつである。数百 mK 以下の冷却には、³He (⁴He の同位体) を必要とするため、高価で多少大がかりな装置を必要とする。³He は ⁴He に比べて冷却能力が非常に低く、あまり強いテラヘルツ波を導入できないというボトルネックも存在する。したがって、動作温度の向上も応用上大きな課題のひとつである。

例えば動作温度が上がって ⁴He による冷却 (目安として 1 K 以上) ですむようになるだけでも大きな進展である。現在、液体ヘリウムフリーの機械式冷凍器 (GM 式やパルスチューブ式) が市販されているが、機械的振動や消費電力の大きさが課題となっている。今後のテラヘルツ検出器の高性能化に向けては、例えば、最低温度の冷却部から効率よく検出器まで熱を伝えるための、熱伝導率の高いケーブルの開発など、冷却機構の改善も重要な開発課題である。

1.2 カーボンナノチューブを用いたテラヘルツ光子検出

ここでは、筆者らが開発した、CNT によるテラヘルツ光子検出器^{5,6)} について紹介する。

一般に、半導体や超伝導体などの固体素子には、テラヘルツ光子のエネルギー (\sim meV) に相当する電子のエネルギー準位をもつものが多い (半導体では不純物準位や電子

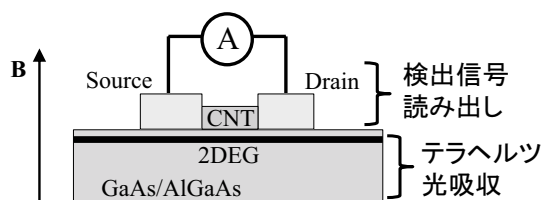


図1 CNT/2DEG 複合素子によるテラヘルツ光子検出器の概念図。

閉じ込めによる量子準位など、超伝導体ではエネルギーギャップ)。したがってこれらの固体素子にテラヘルツ光を照射すると、量子効率を 100% とすれば光子の個数と同数の電子が励起される。通常は、この励起電子がもたらす何らかの電気信号を検出する。前述の通り、テラヘルツ光子のエネルギーは低いため、低いエネルギーでいかに大きな検出信号 (電流や電圧) 変化を得るかがポイントとなる。

この観点から、新たな構造の検出器を作製した。図1に示したように、CNT 単電子トランジスタ (SET) が GaAs/AlGaAs 単一ヘテロ構造基板表面上に作り込まれた構造になっている。CNT-SET は、ソース・ドレイン・ゲートの3電極構造になっている。GaAs/AlGaAs ヘテロ構造の界面に二次元電子ガス (2 dimensional electron gas, 以下 2DEG と略す) が存在する。この複合構造は、CNT-SET に対して (CNT がもともと持っているゲート電極とは別に) 2DEG が第2のゲート電極としての役割を担っている。2DEG をテラヘルツ吸収部、CNT-SET を検出信号読み出し部として用いる。具体的なテラヘルツ検出機構は以下の通りである。テラヘルツ波がこの素子に照射されると、2DEG 中でテラヘルツ吸収励起によって電子-正孔ペアが生じる。図2 (a) に描いたように、2DEG 中では不純物等による不規則ポテンシャルが存在するため、生成された電子-正孔はお互い逆方向の電場に応答し、ポテンシャル極小にトラップされる⁷⁾。この状況は 2DEG 中に電気的な分極を生み出すことになる。CNT-SET 間近の 2DEG 内で電気的分極が発生すれば、これは SET にとって実効的に余分のゲート電圧が印加されたことに相当する。SET は単一電荷レベルの電荷検出感度をもつため⁸⁾、原理的には単一 THz 励起キャリアを CNT-SET で読み出せるはずである。これは、テラヘルツ検出器としては、単一光子検出感度をもつことを意味する。

この CNT/2DEG 複合素子のテラヘルツ波に対する応答を測定した結果を図2 (b) に示す。この結果の縦軸は、2DEG ではなく、CNT を流れるドレイン電流であることに注意されたい。一般に、SET のドレイン電流はゲート電圧

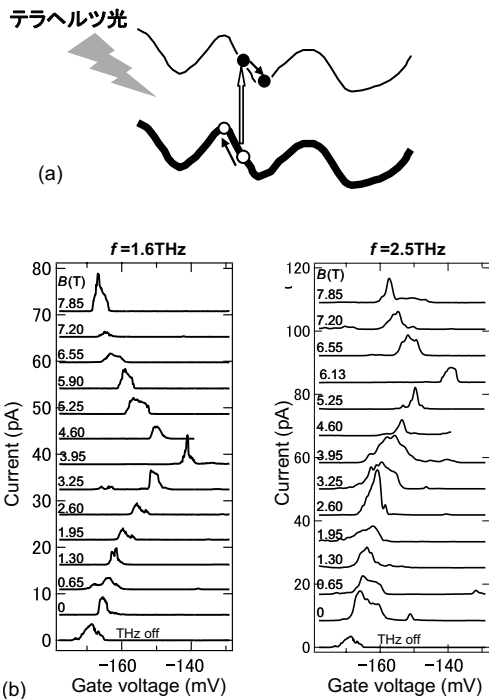


図2 (a) 2DEGにおけるテラヘルツ励起キャリアのダイナミクス概念図、(b) CNT-SETにおけるドレイン電流対ゲート電圧の印加磁場依存性。一番下のデータ以外はテラヘルツ光照射下における結果。見やすさのため、各データはY軸方向にオフセットをかけている。照射テラヘルツ光の周波数は $f = 1.6$ THz (左図)、 $f = 2.5$ THz (右図)。

変化によって、電流ピークと電流オフの状態を交互に示すことが知られている(クーロン振動)。図2(b)の各データは、クーロン振動の1つの電流ピークと電流オフ状態を示している。

図2(b)で、テラヘルツ光周波数 $f = 1.6$ THz、 $f = 2.5$ THzいずれの結果においても、一番下のデータがテラヘルツ光照射なしの場合、それ以上のデータはすべてテラヘルツ光照射ありの場合に相当する。見やすいように、それぞれのデータには縦軸に対してオフセットをかけている。テラヘルツ光照射ありの場合では、2DEG面に対して垂直に印加した磁場 B に対する依存性も測定した。テラヘルツ光照射なしとありの場合とで比較した場合、 $f = 1.6$ THz、 $f = 2.5$ THzいずれも $B = 0$ において、テラヘルツ光の照射によって、CNT-SETの電流ピーク位置が正のゲート電圧方向にシフトすることがわかる。さらに、この電流ピーク位置のシフト量は印加磁場に大きく依存することが示されている。電流ピークシフト量が最大となる磁場値があり、 $f = 1.6$ THzでは $B = 3.95$ T、 $f = 2.5$ THzでは $B = 6.13$ Tになっている。

以上の結果の物理的な意味を以下で説明しよう。2DEGに垂直磁場を印加すると、電子のエネルギーがランダウ準

位に分離する。この準位間隔が吸収する電磁波の光子エネルギーに等しい場合、大きな電磁波吸収が起こることが知られている(サイクロトロン共鳴)。半導体の典型的なサイクロトロン共鳴における電磁波の光子エネルギーは数meV、つまりテラヘルツ領域に相当する。2DEGのサイクロトロン共鳴は、以下の式で記述できる。

$$hf \text{ (光子エネルギー)} = \hbar e B / m^* \text{ (ランダウ準位のエネルギー間隔)}$$

ここで、 B は磁場、 m^* は母体結晶内の2DEGの有効質量である。照射テラヘルツ光の周波数、ならびに電流ピークシフト量が最大となる磁場値、 $f = 1.6$ THz、 $B = 3.95$ Tと $f = 2.5$ THz、 $B = 6.13$ Tを比較すると、 f が B に対して比例していることがわかる。これは上式に合致する。また、これらの値を上式に代入すると、 $m^* = 0.066 m_0$ (m_0 :自由電子の質量)が得られる。この値はGaAs中の電子の有効質量に等しい⁹⁾。これらの事実は、2DEG中でサイクロトロン共鳴によって励起されたキャリアに対して、CNT-SETが電気的に応答していることを示している。いにかえるならば、2DEG内のテラヘルツ励起キャリアによる電気的な分極が、CNT-SETに対する実効的なゲート電圧として働いたことを意味する。この結果は、CNT-SETに対して2DEGを第2のゲート電極として用いるという、上記の検出機構が正しいことへの直接的な証拠を与えている。

ここで、微弱なテラヘルツ光照射によって2DEG内に単一の電子-ホール対が生成した状況を想定して、それによってどれほどのSET電流のピークシフトが起こるかを考察しよう。上述の通り、2DEG内にはイオン化不純物に起因する不規則ポテンシャルが存在し、そのポテンシャル勾配によって励起電子とホールは空間的に別々の方向に引き離されることが知られている⁸⁾。その典型的な距離は20~100 nmである¹⁰⁾。この値と、CNT-SETと真下の2DEG間距離120 nm、GaAsの比誘電率13を考慮すると、CNT-SET真下において、単一の励起電子-ホール対が作り出す電気的分極によって発生する実効的なゲート電圧変化は0.4~10 meVと見積もることができる。CNT-SETの電流ピークの典型的な半値幅は3 meV程度であるため、計算上はこの分極を、CNT-SETの電流変化として検出可能である。いにかえるならば、きわめて微弱なテラヘルツ光に対しても応答することができる。

以上の考察に基づいて、3 mm²程度の面積から放射されるサブfWの極微弱テラヘルツ光($f = 1.6$ THz)を照射したところ、バンド幅1 Hz、S/N(信号-雑音比)約10で検出された(温度2.5 K)。CNT-SET部が受光するテラヘルツ光のパワーは、放射面積3 mm²と波長184 μ mを

考慮すると $10^{-17} \sim 10^{-18}$ W と見積もることができる。この値は、NEP で $10^{-18} \sim 10^{-19}$ W/Hz^{1/2}、比検出能力で $\sim 10^{16}$ cmHz^{1/2}/W に相当する (温度 2.5 K)。

われわれの検出器も含めて、現在のテラヘルツ光子検出器の最大の課題は検出効率の低さである。すべての検出器 (半導体量子ドット, 超伝導体, CNT) において、テラヘルツ受光部のサイズは波長よりも 2, 3 桁小さい。これは検出機構から避けられない構造であるが、低い検出効率 (集光効率) の原因にもなっている。これを解決する有望な試みは、アンテナ構造あるいはメタマテリアル構造との組み合わせだと考えられる。どちらの構造でも、テラヘルツ電界が波長以下の領域に集中する。ここに検出素子を置けば、高い検出効率が得られると期待できる。現在、われわれのグループで、ブロードバンド検出可能なマイクロアンテナと結合した量子ドット構造を作製し、電磁界シミュレーション・実験両面から、周波数特性も含めて、光子検出に最適化された構造を開発している¹¹⁾。

また、メタマテリアルも検出効率向上に有効な構造である。例えば、よく使用される金属開口の周期構造を用いると、全体のテラヘルツ光透過率をそれほど落とさず (実験的には約 30%, 理論上は約 80%), かつ波長よりも小さな開口のエッジ部分にテラヘルツ電界を集中させることができる¹²⁾。

2. テラヘルツ量子光学

本テーマを、テラヘルツ光と物質との相互作用における量子力学的効果という広い意味にとれば、多くの興味深い成果が報告されている。特に最近、MV/cm に達する高い電場強度をもつテラヘルツ電磁波パルスが発生可能になって以来^{13,14)}、テラヘルツ電場による ZnSe/ZnMgSSe 量子井戸の格子状態の変形¹⁵⁾、CNT のインパクト励起によるエキシトン生成¹⁶⁾、GaAs/AlGaAs 多重量子井戸におけるインパクトイオン化・キャリア増幅の増大に伴う発光強度増強¹⁷⁾ 等、多彩な研究が展開されている。さらに、テラヘルツ電磁波の磁場成分 (テラヘルツ磁場) によって磁性材料中のスピン状態をコヒーレントに制御することも可能になっている^{18,19)}。これらによって、「テラヘルツ非線形分光」という新たな研究領域が生み出されている。

以上を強極限とすれば、一方の弱極限である、テラヘルツ光子と電子の量子力学的相互作用 (最たる例がテラヘルツ cavity-QED) という点に絞ると、筆者の知る限り、報告例はないようである。いくつかの研究グループが取り組んでおり、レーゲンスブルク大学の Rupert Huber らのグループは、近赤外光でポンプし、テラヘルツ光でプローブ

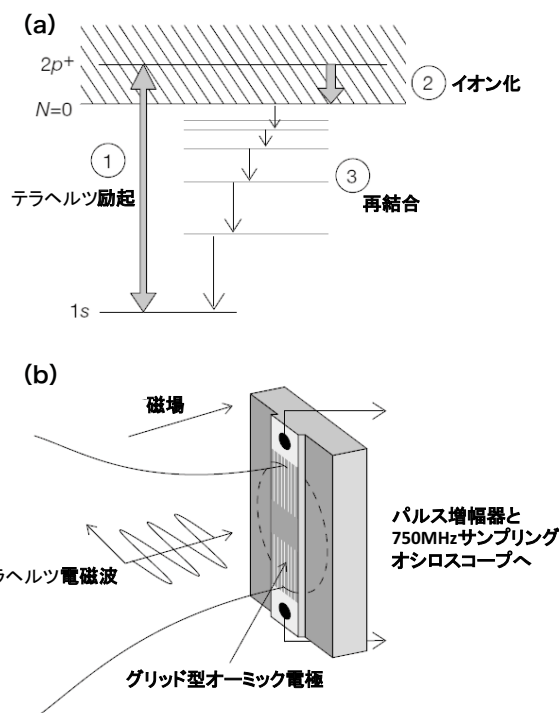


図3 (a) n型 GaAs 試料でのテラヘルツ励起電子による光電流の生成と電子緩和過程, (b) n型 GaAs 試料の構造と測定の概念図. (文献 21 より転載, Copyright: Nature Publishing Group.)

するという実験手法であるが、GaAs 量子井戸中における真空ラビ分裂とそのフェムト秒領域での高速ダイナミクスを観測している²⁰⁾。個人的に聞いたところでは、やはり今後はテラヘルツ cavity-QED に向けた研究を進めていくとのことである。また、カリフォルニア大学サンタバーバラ校のグループが、端緒となる実験 (テラヘルツパルスによる半導体量子ビットのコヒーレント操作) を報告している²¹⁾。2001 年の少々古い論文であるが、テラヘルツ量子光学の重要なステップとなる研究であるため、以下で簡単に紹介する。

さまざまな量子ビット操作が実現されている今となつては、実験系はいたってシンプルである。図3に示したように、n型 GaAs 試料に対して磁場を印加し、自由電子レーザー (周波数 2.52 THz) を照射する。ここでは量子ビットとして、GaAs 中ドナー (Si) に束縛された電子の水素原子的な量子準位を利用する。2.52 THz に相当するテラヘルツ光子エネルギーは、束縛準位の 1s と 2p+ 間のエネルギー間隔に相当する。2p+ 準位は GaAs の伝導帯に入るため、テラヘルツ光子によって励起された (イオン化された) 電子は伝導することで、光電流をもたらす。テラヘルツパルス照射によって生じる光電流の過渡応答の時間的な積分値を測定する。ここで磁場の役目は、ランダウ準位を形成させることで、伝導帯の底 (基底ランダウ準位) の位置を変

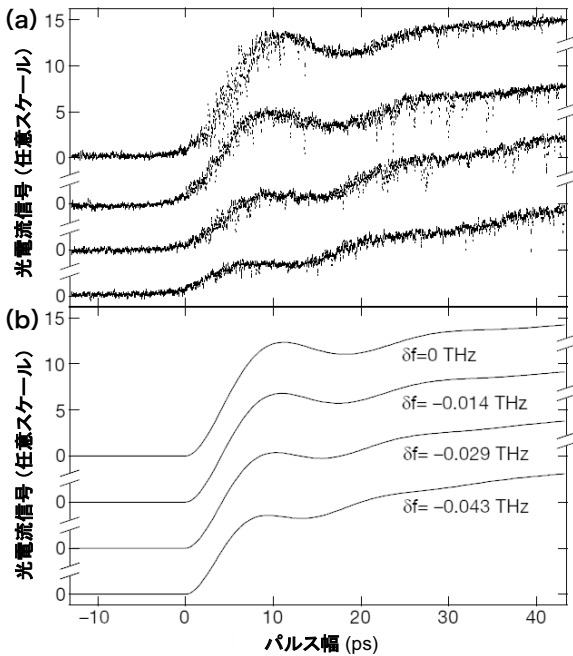


図4 (a) 図3 (b) のセットアップで測定された、照射テラヘルツパルスのパルス幅に対する光電流の大きさ。異なる4つの結果は印加磁場 B を変えており、上から $B = 3.54$ T, 3.58 T, 3.61 T, 3.64 T. (b) (a) に対するモデル計算の結果。 δf はラビ振動の共鳴周波数からのずれ (磁場によってチューニング可能) を表しており、対応する磁場値は (a) と同じ. (文献 21 より転載, Copyright: Nature Publishing Group.)

化させることである。周波数 2.52 THz に対しては磁場 3.54 T で共鳴する。

図4に、テラヘルツパルスのパルス幅に対する光電流の依存性の結果を示す。(a) で4本のデータは磁場を変化させており、一番上のデータが共鳴 (磁場 3.54 T), 下のデータになるにつれて共鳴からずれている。明瞭とはいえないがラビ振動が観測されており、共鳴からずれるに従って振幅が小さくなる様子も示されている。(b) はモデル計算による結果を示しており、完全ではないものの実験結果をよく再現している。これらは、テラヘルツパルスによる、半導体不純物中に束縛された電子の量子コヒーレント制御を示す結果である。

以上で紹介した半導体不純物準位だけでなく、固体物性では、多くの物性エネルギーがしばしば meV 領域に位置する (超伝導体のエネルギーギャップ, 半導体量子閉じ込め準位, フォノンエネルギーなど)。これらは、テラヘルツ光子による量子光学研究の可能性を示すものである。今後は、上記のような光電流の積分値ではなく、1光子・1電子によるリアルタイム計測がテラヘルツ領域で確立すれば、弱極限でのテラヘルツ量子光学の研究が一気に展開するだろう。

3. エバネセント場中のテラヘルツ光子

波長以下の空間 (例えば単純な構造としては、波長以下のサイズの穴) には、エバネセント場が生成する。この場の中におけるテラヘルツ光子を理解することは、学術的にも応用上も意義深い。以前、生嶋らによって、マイクロストリップラインと光子検出器を結合させ、ストリップラインを伝搬するテラヘルツ波を光子に変換して検出する、という面白い試みが報告されている²²⁾。ストリップラインと検出器の接合部はエバネセント場という見方もできるため、「エバネセント場中のテラヘルツ光子」を探求する、優れた実験舞台となっている。今後、半導体・金属微細加工を駆使して、この課題に関する研究が大きく発展すると期待される。

序章にも記したように、本テーマは、高感度な近接場イメージングという応用上の重要性もある。テラヘルツ波は可視・近赤外光領域に比べて、低い光子エネルギーとともに、長い波長 (0.1~1 mm) という特徴もある。これはイメージング計測には不利な短所であり、低い空間分解能 (画像の解像度) を意味する。波長による分解能の制限を突破する強力な手段が、近接場イメージングである^{23,24)}。近接場イメージングは、エバネセント場の発生箇所を、被測定試料に対して高精度に走査しながら、エバネセント場と試料との相互作用により発生する何らかの信号を検知して、高分解能画像を得る技術である。一般に、エバネセント場は微弱であるため、近接場イメージングは高感度な検出器を必要とする。したがって、高分解能イメージングと高感度検出は車の両輪である。以下では、高感度テラヘルツエバネセント場検出とその画像イメージング応用について、われわれの成果を紹介する。

近接場イメージングには、可視・近赤外光領域では、先鋭化された光ファイバー²⁵⁾あるいは金属探針²⁶⁾などを用いた、微小開口や微小散乱体を利用して確立された技術がある。テラヘルツ領域では、金属開口²⁷⁾、金属探針^{28,29)}、サブ波長光源^{30,31)} という3つのタイプが報告されているが、他波長領域に比べると成熟しておらず、まだ発展途上の段階である。

われわれは、ファイバーや探針を用いる従来のやり方から発想を変えて、近接場テラヘルツ検出に必要なすべての要素—サブ波長アパチャー、平面プローブ、検出器—が半導体 (GaAs/AlGaAs ヘテロ構造) ワンチップに集積化されたデバイスを作製した^{32,33)} (図5)。近接場光測定 of 成否は、本来局在しており、かつ強度の弱い近接場光をいかに効率よく検出器まで導くかが鍵となる。このデバイスは、(1) サブ波長アパチャーのすぐ背後に近接場平面プローブ

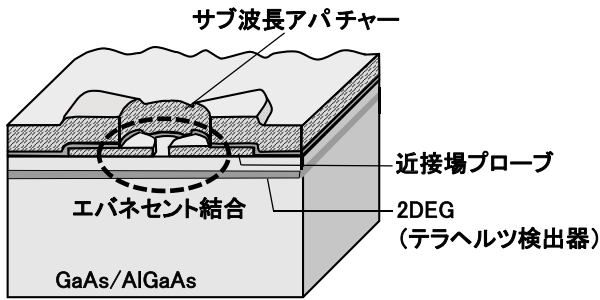


図5 近接場テラヘルツイメージング素子の概念図。

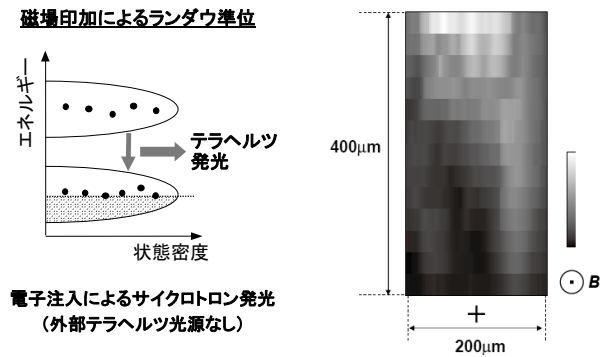


図7 図5の素子を用いて得られた、別の2DEG試料からのテラヘルツ発光(サイクロトロン発光)分布の近接場画像(右図)。左図は、ランダウ量子化におけるサイクロトロン発光の概念図。ここでは外部テラヘルツ光源なしで、電流注入による発光観測(パッシブ顕微観測)を行っている。

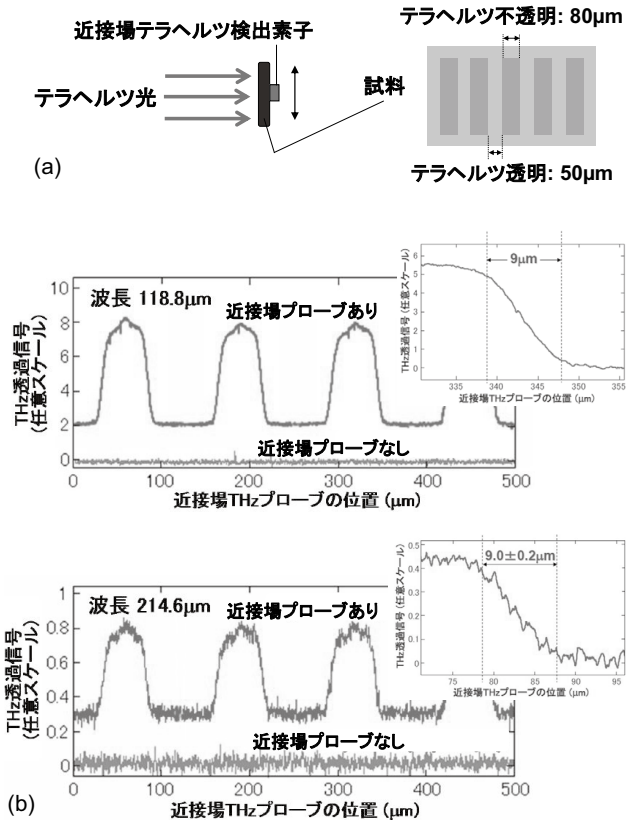


図6 (a) 近接場テラヘルツイメージングの測定方法。比較のため、近接場プローブなしとありの2種類の素子を用いた。(b) (a)に示した測定によって得られたテラヘルツ光透過分布。赤線が近接場プローブありに対する結果で、青線が近接場プローブなしに対する結果。照射テラヘルツ光の波長は118.8 μm(上図)ならびに214.6 μm(下図)。挿入図は、テラヘルツ光透過分布の減衰部を拡大した図。信号強度の最大値に対して90%から10%に変化するまでの距離(2つの点線間の距離)から空間分解能9 μmが得られた。

を配置し、エバネセント場の電場分布(本来は一部分に局在)を遠方まで拡大、(2)拡大されたエバネセント場は、プローブからすぐ下(数十nm下)に存在する2DEGと直接的に結合、という2つの工夫がなされている。したがって、エバネセント場を伝搬光に変換して遠方の検出器で検出する従来技術とは異なり、エバネセント場の直接検出技術である。

図6(a)に描いたように、テラヘルツ光透過/不透明領域(透過部の幅:50 μm, 不透明部の幅:80 μm)が規則的に並んだ試料に(近接場検出器と反対側から)テラヘルツレーザーを照射した状態で、本検出デバイスを近接させながら走査することで、テラヘルツ光透過強度分布を測定した。図6(b)からわかるように、近接場プローブありでは明確な信号が観測されているのに対して、近接場プローブなしの場合では信号がみられない。この特徴は、照射テラヘルツ光の波長(118.8 μm, 214.6 μm)に関係しない。図6(b)は、プローブによるテラヘルツ電場の大きな空間変調効果とその結果として2DEGとエバネセント場の結合効率向上を実証した結果である。

図6(b)の挿入図に示したように、信号減衰部分から空間分解能約9 μmが得られた。この値は、(1)照射テラヘルツ光の波長(118.8 μm, 214.6 μm)に依存しない、(2)214.6 μmの波長に対して約24分の1に相当し、回折限界を突破している、(3)サブ波長アパチャー径(8 μm)にほぼ一致する。以上の3つの特徴は近接場特有の効果である。したがってここでの実験結果は、今回開発した検出素子によって近接場テラヘルツ検出が実現されたことを示している。

図7は、この素子によるイメージング応用の例を示しており、別の2DEG試料における近接場テラヘルツ発光分布である(2DEG長さ:400 μm, 幅:200 μm, 電流:160 μA)³⁴。この測定では外部テラヘルツ光源は用いておらず、2DEG試料に電流を流したときのランダウ準位間の電子遷移による発光—サイクロトロン発光—の観測である(パッシブ測定)。したがって、ここでのテラヘルツ発光の強度分布は、等価的に励起電子の密度分布が可視化されたことに相当する。

現在、可動ステージの安定化や近接場プローブ形状の改善を行うことで、約 400 nm の分解能（波長の約 540 分の 1 に相当）にまで到達している。さらに最近、別の二次元層材料としてグラフェンを用いることで、検出周波数帯域を格段に拡大（1~30 THz 程度）することに成功した³⁵⁾。画像イメージングと分光計測を組み合わせることで、物質同定や化学分析が可能になるため、今後、ナノ電子材料、さらには少数分子系や高分子のテラヘルツ画像・分光解析に大きな威力を発揮するだろう。

上述の通り、ここで用いた構造は、エバネセント場の直接検出技術である。2DEG 検出器は光子検出レベルまで到達していないが、代わりに光子検出器を置くことで、エバネセント場中におけるテラヘルツ光子の振る舞いを調べることが可能になる。例えば、テラヘルツ光子の統計性や時間・空間相関を調べることで、被測定試料の性質について、光子レベルからの深い理解が進むと期待できる。

4. まとめと今後の展望

イントロで述べたように、「テラヘルツ光子の物理と応用」は、テラヘルツ技術の中でも新しいテーマである。アインシュタインによる光量子仮説とミリカンによる実験的証明以来、光子の探求が新しい物理や技術を生み出したことは歴史が示すところである。非常に高度な研究が展開されている可視・近赤外領域の研究者からは、「より波長の長い中赤外・テラヘルツ領域でどうなるかは面白いテーマ」という話をよく聞く。一方、高速エレクトロニクス（マイクロ波領域）の側では、超伝導量子ビットによる cavity-QED の研究が盛んに行われているが、興味深いことに、こちらの領域でも今後は周波数の高いテラヘルツへという意識を、一部の研究者はもっているようである。量子光学の分野でも、テラヘルツは「谷」の領域なのである。

テラヘルツ領域に重要な特性が隠されているとされる系は、半導体、超伝導体、有機導体、高分子、生体系など幅広い。これらの系でテラヘルツ光子計測による精密な光子相関実験などが行われるようになると、単なる高感度・高分解能計測という枠を超えた、質的に新しい研究が可能となろう。テラヘルツ領域でも光子計測のためのいくつかのデバイスが揃いつつあるが、時間・空間・位相軸上においてテラヘルツ光子を高度に制御した系で精度の高い量子光学実験を行うには、何段階かのブレイクスルーが必要と思われる。今後も計測・デバイスのたゆまぬ開発と、テラヘルツ物性の知見を積み上げていくことで、新しい展開があることを期待したい。

本稿で紹介した研究は、日本学術振興会・最先端・次世

代研究開発支援プログラム、科学技術振興機構・研究成果最適展開支援事業、キヤノン財団・「産業基盤の創生」研究助成、三菱財団・自然科学研究助成の支援を受けて行われたものである。

文 献

- 1) M. Tonouchi: "Cutting-edge terahertz technology," *Nat. Photonics*, **1** (2007) 97-105.
- 2) B. Ferguson and X.-C. Zhang: "Materials for terahertz science and technology," *Nat. Mater.*, **1** (2002) 26-33.
- 3) S. Komiyama, O. Astafiev, V. Antonov, H. Hirai and T. Kutsuwa: "A single-photon detector in the far-infrared range," *Nature*, **403** (2000) 405-407.
- 4) J. Wei, D. Olaya, B. S. Karasik, S. V. Pereverzev, A. V. Sergeev and M. E. Gershenson: "Ultrasensitive hot-electron nanobolometers for terahertz astrophysics," *Nat. Nanotechnol.*, **3** (2008) 496-500.
- 5) Y. Kawano, T. Uchida and K. Ishibashi: "Terahertz sensing with a carbon nanotube/two-dimensional electron gas hybrid transistor," *Appl. Phys. Lett.*, **95** (2009) 083123.
- 6) Y. Kawano: "Terahertz sensing and imaging based on nanostructured semiconductors and carbon materials," *Laser Photonics Rev.*, **6** (2012) 246-257.
- 7) Y. Kawano, Y. Hisanaga, H. Takenouchi and S. Komiyama: "Highly sensitive and tunable detection of far-infrared radiation by quantum hall devices," *J. Appl. Phys.* **89** (2001) 4037-4048.
- 8) R. J. Schoelkopf, P. Wahlgren, A. A. Kozhevnikov, P. Delsing and D. E. Prober: "The radio-frequency single-electron transistor (RF-SET): A fast and ultrasensitive electrometer," *Science*, **280** (1998) 1238-1242.
- 9) F. Thiele, U. Merkt, J. P. Kotthaus, G. Lommer, F. Malcher, U. Rossler and G. Weimann: "Cyclotron masses in n-GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs heterojunctions," *Solid State Commun.*, **62** (1987) 841-844.
- 10) S. H. Tessmer, P. I. Glicofridis, R. C. Ashoori, L. S. Levitov and M. R. Melloch: "Subsurface charge accumulation imaging of a quantum Hall liquid," *Nature*, **392** (1998) 51-54.
- 11) L. Crespi, T. Kodera, S. Oda and Y. Kawano: "Terahertz radiation detection through a micro-scale antenna and a silicon-based quantum dot," *Proceedings of 37th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves* (in press).
- 12) F. Miyamaru, M. Kamijyo, K. Takano, M. Hangyo, H. Miyazaki and M. W. Takeda: "Characteristics and generation process of surface waves excited on a perfect conductor surface," *Opt. Exp.*, **18** (2010) 17576-17583.
- 13) F. Junginger, A. Sell, O. Schubert, B. Mayer, D. Brida, M. Marangoni, G. Cerullo, A. Leitenstorfer and R. Huber: "Single-cycle multiterahertz transients with peak fields above 10 MV/cm," *Opt. Lett.*, **35** (2010) 2645-2647.
- 14) H. Hirori, A. Doi, F. Blanchard and K. Tanaka: "Single-cycle terahertz pulses with amplitudes exceeding 1 MV/cm generated by optical rectification in LiNbO₃," *Appl. Phys. Lett.*, **98** (2011) 091106.
- 15) H. Hirori, M. Nagai and K. Tanaka: "Excitonic interactions with intense terahertz pulses in ZnSe/ZnMgSSe multiple quantum wells," *Phys. Rev.*, **B 81** (2010) 081305 (R).
- 16) S. Watanabe, N. Minami and R. Shimano: "Intense terahertz pulse induced exciton generation in carbon nanotubes," *Opt. Exp.*, **19** (2011) 1528-1538.
- 17) H. Hirori, K. Shinokita, M. Shirai, S. Tani, Y. Kadoya and K.

- Tanaka: "Extraordinary carrier multiplication gated by a picosecond electric field pulse," *Nat. Commun.*, **2** (2011) 594.
- 18) K. Yamaguchi, M. Nakajima and T. Suemoto: "Coherent control of spin precession motion with impulsive magnetic fields of half-cycle terahertz radiation," *Phys. Rev. Lett.*, **105** (2010) 237201.
 - 19) T. Kampftrath, A. Sell, G. Klatt, A. Pashkin, S. Mährlein, T. Dekorsy, M. Wolf, M. Fiebig, A. Leitenstorfer and R. Huber: "Coherent terahertz control of antiferromagnetic spin waves," *Nat. Photonics*, **5** (2011) 31-34.
 - 20) G. Günter, A. A. Anappara, J. Hees, A. Sell, G. Biasiol, L. Sorba, S. De Liberato, C. Ciuti, A. Tredicucci, A. Leitenstorfer and R. Huber: "Sub-cycle switch-on of ultrastrong light-matter interaction," *Nature*, **458** (2009) 178-181.
 - 21) B. E. Cole, J. B. Williams, B. T. King, M. S. Sherwin and C. R. Stanley: "Coherent manipulation of semiconductor quantum bits with terahertz radiation," *Nature*, **410** (2001) 60-63.
 - 22) K. Ikushima, D. Asaoka, S. Komiyama, T. Ueda and K. Hirakawa: "Manipulating terahertz photons on a quantum Hall effect device," *Physica E*, **42** (2010) 1034-1037.
 - 23) M. A. Paesler and P. J. Moyer: *Near-Field Optics* (Wiley, New York, 1996).
 - 24) M. Ohtsu (ed.): *Near-Field Nano/Atom Optics and Technology* (Springer, Berlin, 1998).
 - 25) T. Saiki, S. Mononobe, M. Ohtsu, N. Saito and J. Kusano: "Tailoring a high-transmission fiber probe for photon scanning tunneling microscope," *Appl. Phys. Lett.*, **68** (1996) 2612-2614.
 - 26) F. Zenhausern, Y. Martin and H. K. Wickramasinghe: "Scanning interferometric apertureless microscopy: Optical imaging at 10 angstrom resolution," *Science*, **269** (1995) 1083-1085.
 - 27) S. Hunsche, M. Koch, I. Brener and M. C. Nuss: "THz near-field imaging," *Opt. Commun.*, **150** (1998) 22-26.
 - 28) N. C. J. van der Valk and P. C. M. Planken: "Electro-optic detection of subwavelength terahertz spot sizes in the near field of a metal tip," *Appl. Phys. Lett.*, **81** (2002) 1558-1560.
 - 29) H. T. Chen, R. Kersting and G. C. Cho: "Terahertz imaging with nanometer resolution," *Appl. Phys. Lett.*, **83** (2003) 3009-3011.
 - 30) R. Lecaque, S. Gresillon, N. Barbey, R. Peretti, J.-C. Rivoal and C. Boccara: "THz near-field optical imaging by a local source," *Opt. Commun.*, **262** (2006) 125-128.
 - 31) A. Doi, F. Blanchard, H. Hirori and K. Tanaka: "Near-field THz imaging of free induction decay from a tyrosine crystal," *Opt. Exp.*, **18** (2010) 18419-18424.
 - 32) Y. Kawano and K. Ishibashi: "An on-chip near-field terahertz probe and detector," *Nat. Photonics*, **2** (2008) 618-621.
 - 33) Y. Kawano: "Highly sensitive detector for on-chip near-field THz imaging," *J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **17** (2011) 67-78.
 - 34) Y. Kawano and K. Ishibashi: "On-chip near-field terahertz detection based on a two-dimensional electron gas," *Physica E*, **42** (2010) 1188-1191.
 - 35) 河野行雄: "テラヘルツ波によるグラフェン物性評価と素子応用", 第72回応用物理学会学術講演会講演(シンポジウム)予稿集(2011) 29p-ZE-1.

(2012年7月26日受理)