

# 幅広い応用が期待される テラヘルツ波

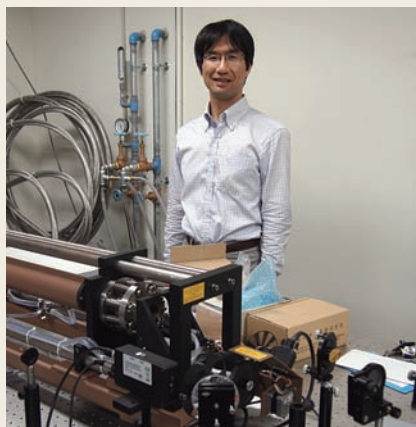
## —解像度や感度の向上が着々と進む

テラヘルツ波の有用性は古くから認識されており、物性、生体観察、通信、セキュリティなどあらゆる方面から発生・検出への挑戦が続いてきた。近年さらにその取り組みは活発になっており、画像の解像度や検出感度の向上が報告されている。

テラヘルツ波は周波数でいうと0.1～10THz、波長に換算すると3mm～30μm程度で、電波と可視光・赤外光の間にあたる領域の電磁波である。プラスチックや紙等に対する透過率が高いことや生体に害を与えない、材料物性を調べるのに有用であるなどさまざまな特性をもつ。しかし光源・検出ともに適切なものがなかったため、電磁波利用における谷間とも呼ばれてきた。

光源における可視光・赤外光側からのアプローチではレーザーの利用が試みられてきた。ところが、通常の半導体レーザーでは、レーザー光発生に利用する電子のエネルギー準位間隔は可視光や近赤外光周辺のエネルギーに等しく、電磁波のエネルギーはテラヘルツ帯に向けて低くなるため、一般にレーザー発振は困難になる。いっぽう電波の側からは電子の高速制御によるテラヘルツ波の発振が試みられているが高周波になるにつれて発振パワーは下がってしまう。日本では1950年代からテラヘルツ波の重要性が指摘されており、江崎玲於奈氏によるブロッホ発振器の提案、西澤潤一氏によるラマンレーザー、霜田光一氏によるガスレーザーなどの取り組みがあった。

近年、電波側からの発振器としては、共鳴トンネルダイオード等の利用があ



東京工業大学の河野行雄准教授とテラヘルツ実験装置

る。2010年には東京工業大学の鈴木左文氏、浅田雅洋氏らが、共鳴トンネルダイオードを使い、初めて室温で1.04THzのテラヘルツ波を発生させることに成功している。この時の出力は7μWだった。一方、光側からのアプローチとしては、2つの赤外レーザーによる差周波発生、量子カスケードレーザーなどが注目されている。量子カスケードレーザーについては動作温度は100～200Kと低いものの研究開発向けに販売されており、化学分析や工業検査などに使われているという。またこういった要素技術の開発研究とともに、理化学研究所と情報通信機構(NICT)により、テラヘルツ領域におけるさまざまな材料の吸収スペクトルの膨大なデータベース

を作製するなどの取り組みも進んでいる。

発生と並ぶもう1つの主要技術である検出器については、室温での動作実現を目指すものと、低温のまま感度やスピードなどの性能を追求する方向に分かれると東京工業大学 量子ナノエレクトロニクス研究センターの河野行雄准教授はいう。従来からの検出器は、冷却が必要なボロメータや室温動作の焦電検出器、室温動作のショットキーバリアダイオードなどがある。

有望だと見られているものの一つが超伝導検出器だ。主に2つのタイプがあり、1つは、入射したテラヘルツ波によって発生する超伝導体におけるトンネル効果を利用するジョセフソン接合素子である。もう1つは、微小な超伝導素子を用いたボロメータであり、とくに超伝導を発現する付近の温度を維持しておく、わずかな電磁波の吸収によって抵抗が大きく変化するため感度が高くなる。また別の検出機構として半導体におけるプラズモンを使う手法も研究されている。通常の電子を励起するよりもプラズモンの電気振動を読み出すため高感度になる。

### 近接場光利用とパッシブ顕微計測

河野氏の研究室では、テラヘルツ波の検出器や画像化技術について、常温動作に限らず極限性能の追求をテーマに研究を行っている。具体的には、画像計測の解像度、検出感度の追求、そして分光システムの3つの主要な要素技術の開発に取り組んでいる。

河野氏が2008年に発表したのが、開口、プローブ、2次元電子ガス(2DEG)からなる、近接場イメージングのためのテラヘルツ波検出器である(図1)。近接場光技術を用いることで、波長による解像度の制限を突破することが可能

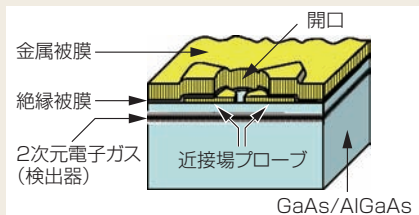


図1 近接場テラヘルツイメージングのための一体型検出器の模式図

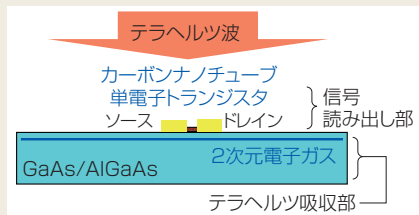


図2 超高感度テラヘルツ波検出のための一体型検出器の模式図

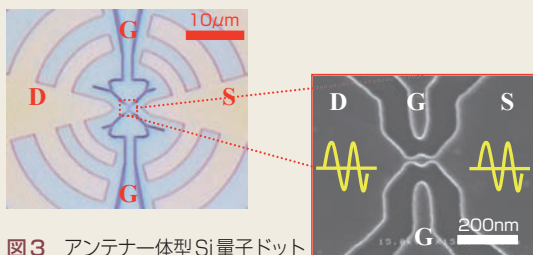


図3 アンテナ型Si量子ドット

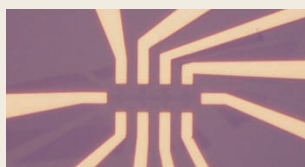


図4 グラフェンを利用した分光機能を一体化した検出器。中央に細く見えるのがグラフェン。

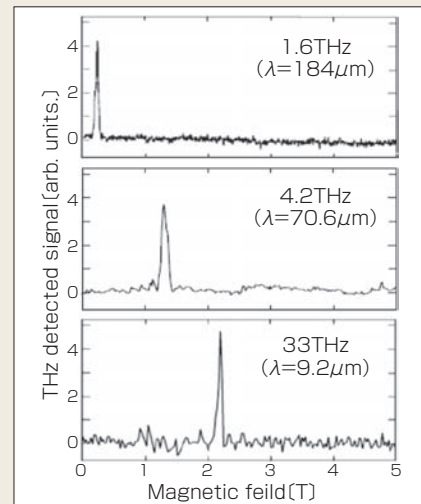


図5 磁場の変動に応じたテラヘルツ波・赤外光のチューナブル検出

である。河野氏の技術は、半導体プロセスによって近接場テラヘルツ検出のための機能をすべて一体化して作り込むため小型で使用するたびにアライメントを行う必要もない。近接場検出の感度向上のポイントは、本来微弱な近接場光をプローブで広げて、すぐ下に2DEGによる信号読み取り機構を配置するアイデアだ。このデバイス構造を用いて、2008年に8μm径の開口において9μmの解像度を達成した。さらに現在は400nm径の開口で400nmの解像度を得ている。この値は波長の約540分の1に相当し、きわめて高い解像度を実現した。これにより「テラヘルツナノイメージング」とも言える技術が創出された。この技術を利用して、外部テラヘルツ光源なしで(パッシブ顕微計測)半導体における電子の伝導現象の可視化に成功した。「解像度は開口サイズでほぼ決まるため、さらに開口を小さくすることで解像度を上げていきたい。ナノ電子材料や生体高分子1つ1つをテラヘルツ画像・分光解析するのが次の目標」(河野氏)。

第2の検出感度については、2009年

にカーボンナノチューブによる単電子トランジスタを2DEG上に作り込んで感度を格段にアップさせた(図2)。2DEGがテラヘルツ光を吸収し電気的分極が発生。その信号を単電子トランジスタが読み出す。上記の機構により、感度の面では、雑音等価パワーで $10^{-19}$ W/Hz<sup>1/2</sup>程度を達成している。さらに河野氏は、ブロードバンドアンテナを単電子トランジスタに取り付けたユニークな構造を作製し、広い周波数帯域においてテラヘルツ光を高い効率で単電子トランジスタに集光する試みを行っている(図3)。

### 磁場中グラフェンで広帯域分光

第3の取組みは分光機能である。従来から使われてきた代表的な分光技術としてフーリエ分光と時間領域分光がある。だがフーリエ分光器は赤外領域が主でありテラヘルツ波領域では信号-雑音比が3桁ほど落ちる。一方時間領域分光は高速に分光できるため測定効率がよく、テラヘルツ分光の研究を加速させることになった装置でもある。ただし必要となるフェムト秒レー

ザが高価で大きいという欠点がある。さらに信号-雑音比が赤外領域に向けて大きく落ちていく。そこで河野氏が検討したのが、検出器自体にチューナビリティを持たせてワンチップ化した素子だ。検出部に単原子膜のグラフェンを用いるのが特長である(図4)。磁場中のグラフェンはランダウ準位のエネルギー間隔が数meV~数百meVレベルであり、テラヘルツ波から赤外領域のきわめて幅広い波長領域にまで達する。さらに磁場を変化させることによって特定の波長を選択することができる。図5のグラフのように、磁場を変化させることによって異なる波長のテラヘルツ波・赤外光を選択的に検出することに成功した。

「テラヘルツ波は発生も検出も十分確立されていないため、さまざまな手法を試していくのがだいご味」だと河野氏はいう。自由な発想から生み出される成果が身近に応用される日ももうすぐかもしれない。

#### 訪問した研究室

東京工業大学 量子ナノエレクトロニクス研究センター