

# 高感度テラヘルツ波検出器

## —— 近接場イメージングへの応用 ——

河 野 行 雄

### Highly Sensitive Terahertz Detector: Application to Near-Field Imaging

Yukio KAWANO

In this article, I review terahertz (THz) detectors that have been previously developed, and then introduce our THz detectors based on a two-dimensional electron gas (2DEG) in a GaAs/AlGaAs heterostructure and a carbon nanotube (CNT). The unique properties of the quantum Hall effect, which appears in the 2DEG under magnetic field, have led to the development of a highly sensitive and frequency-tunable THz detector. Moreover, we have fabricated a hybrid device of a 2DEG and a CNT single-electron transistor, and have achieved much higher sensitivity; detection level of a few photons. Based on the 2DEG THz detector, we have further developed a new integrated detection device for THz near-field imaging in which all the necessary detection components: an aperture, a probe, and a THz detector are integrated on one GaAs/AlGaAs chip. This scheme allows highly sensitive, high-resolution detection of the evanescent field alone and promises new capabilities for high-resolution THz imaging.

**Key words:** terahertz detector, GaAs/AlGaAs heterostructure, two-dimensional electron gas, quantum Hall effect, carbon nanotube, near-field imaging

テラヘルツ (テラヘルツ) 計測, とりわけ分光ならびにイメージングは, 無機・有機材料, 生体系, 宇宙・天体系など自然界や産業・医療の多岐にわたる分野で強力な計測ツールとなることが期待されている<sup>1)</sup>. テラヘルツ帯に限らず電磁波計測の最も基本となる素子は, いうまでもなく光源と検出器である. ところが, テラヘルツ電磁波は電波領域と光領域に挟まれた帯域に位置しており, 既存の技術をそのまま活用すればよい, というわけにはいかない. この状況は, 半導体テクノロジーによる電子・光デバイスの周波数 (波長) 限界を例にとるとわかりやすい. すなわち, テラヘルツ帯は, トランジスタ等の電子デバイス動作速度の (現時点での) 高周波限界であり, 発光ダイオード等, バルク半導体による光デバイスにおけるバンドギャップ (光子エネルギーに相当) の低エネルギー限界でもある. したがって, 固体デバイスによるテラヘルツ光の発生や検出は, 新しい物理やデバイス構造に基づく新奇な発想が要求されるが, 逆に研究者にとってはその点が面白く,

エキサイティングな研究・開発分野であるといえる.

本稿では, テラヘルツ帯の検出器について, これまでに開発された技術のレビューと, 最近われわれが開発した技術の紹介を行う. 後者についてのキーワードは, 「低次元電子デバイス」である. 「低次元電子デバイス」と「テラヘルツ」の組み合わせは, Esaki らによる半導体超格子とブロッホ発振器 (テラヘルツ発振器) の提案にまで遡る<sup>2)</sup>. この提案は, 半導体中の電子の波動関数を人工的に制御することによって, 電子のテラヘルツ帯コヒーレント振動を発生させようというアイデアに基づいている. このブロッホ発振器は現在のところまだ実現していないが, ここで生み出された概念は, 現在のテラヘルツデバイス開発研究の大きな流れのひとつになっていると思われる. 例えば, テラヘルツ量子カスケードレーザー<sup>3,4)</sup> や共鳴トンネルダイオード構造によるテラヘルツ発振<sup>5)</sup> などは, 電子の低次元化によるエネルギー構造を巧みに利用したテラヘルツデバイス応用の好例である.

理化学研究所基幹研究所 (〒351-0198 和光市広沢 2-1) E-mail: ykawano@riken.jp  
科学技術振興機構 (JST) さきがけ (〒102-8666 東京都千代田区四番町 5-3)

本研究では、低次元電子材料として、GaAs/AlGaAs ヘテロ界面の高移動度二次元電子ガス (2DEG) ならびに一次元電子材料であるカーボンナノチューブ (CNT) を用いた。2DEG は量子ホール効果<sup>6,7)</sup> やメゾスコピック物理 (電子波の量子干渉効果など)、CNT<sup>8)</sup> は一次元電子系特有の強相関効果など、興味深い現象が見いだされており、基礎的な物性科学の研究対象としても面白い舞台を提供し続けてきた系でもある。本研究では、これら低次元電子材料の特性や発現する物理現象をうまく利用することで、(1) 高感度・周波数可変テラヘルツ検出器<sup>9,10)</sup>、(2) 超高感度テラヘルツ光子検出器<sup>11)</sup>、(3) 近接場イメージングへの応用が可能なエバネセントテラヘルツ検出器<sup>12)</sup> という3種の新たな検出器の開発に成功した。特に (3) は、長年の課題であった近接場 (エバネセント) テラヘルツ光の高感度な検出を可能にした。以下では、第1章でこれまでに開発された既存のテラヘルツ検出器、第2章で2DEGならびにCNT/2DEG ハイブリッド素子によるテラヘルツ検出器 (上記 (1), (2))、第3章で2DEG による近接場テラヘルツ検出器 (上記 (3)) について解説する。最後に第4章で今後の展開について述べ、全体のまとめとする。

## 1. これまでに開発されたテラヘルツ検出器

既存のテラヘルツ検出器は、市販されているものから研究開発レベルのものまでいくつか存在し、それぞれに一長一短がある。テラヘルツ光の強度を一般的に検出するものとしては、熱型、電子デバイス型、量子型の3つに大別される。そのほかに、やや特定の用途向けになるが、光伝導アンテナ、電気光学結晶、ミキサによるヘテロダイン検出を用いたものなどがある。すべての検出器の性能を詳述することは、紙面が限られている都合上不可能であるため、以下の4つのカテゴリーに分けておもな特徴を紹介する。

① 熱型：テラヘルツ光の吸収による素子の温度上昇を利用する原理である。室温で使用できるタイプと、シリコンやゲルマニウムなどの結晶を液体ヘリウム温度以下にまで冷やすタイプとがある。後者は冷やすことで室温タイプよりも高感度になるが、応答速度は遅い (ミリ秒程度)。検出信号の読み出しとして、固体素子の電気信号ではなく、熱膨張したガス圧を測定する検出器 (ゴーレイセル) もある。ゴーレイセル検出器は室温でも動作可能で、室温の焦電型検出器よりも感度は高いが応答速度は遅い (ミリ秒)。熱型は温度上昇を利用するため、テラヘルツ帯だけでなくかなり幅広い周波数帯の電磁波に応答する。そのため、実際に使用する際には、電磁波フィルターが必要である。以上

の検出器はいずれも市販されている。

② 電子デバイス型：電波としての性質を利用するアプローチである。代表的な検出器はショットキーバリアダイオードであり、市販されている。検出電磁波の周波数の増大とともに感度が低下するため、どちらかといえば、サブテラヘルツ領域の検出器として用いられることが多い。室温動作、高速検出 (ナノ秒) が利点である。

③ 量子型：電子デバイス型とは対照的に、電磁波の量子 (光子) を利用するアプローチである。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 ( $\sim \text{meV}$ ) に相当する電子のエネルギー準位をもつものが多い。したがって、これらの固体素子にテラヘルツ波を照射すると、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。この励起電子がもたらす何らかの電気信号を検出するという原理である。半導体では不純物準位や電子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を利用する。これらの素子では、微小なアイランド状の伝導体 (サイズ：数十 nm $\sim$ 数百 nm) に、電流を流すための2つの電極を近接させる (超伝導体ではトンネル接合<sup>13,14)</sup>、半導体では量子ドット<sup>15)</sup> とよばれる) ことで、光子レベルでの検出が可能である。ただし、動作原理から検出器を0.3 $\sim$ 0.4 K 以下の極低温に冷やす必要がある。

④ その他：近年、テラヘルツ時間領域分光法というテラヘルツ波の振動電場の実時間観測が可能な計測法が盛んに用いられている。このための検出器として、光伝導アンテナ、電気光学結晶がある。前者では、フェムト秒レーザーによって半導体中にキャリアを生成させ、半導体基板上に張り付いているアンテナによって検出したテラヘルツ波の振動電場によって、そのキャリアを振動させる。そのキャリアの振動を電流として測定するという手法である。後者は、ZnTe など閃亜鉛構造の結晶にテラヘルツ光を照射し、そこでの電気光学効果によるプローブ光の位相差を測定する。この時間領域分光測定では、テラヘルツ光の位相情報も同時に得られるため、試料の屈折率の実部と虚部が直接的に得られるという利点がある。これらの検出器は室温で動作するが、高価なフェムト秒レーザーを必要とする。テラヘルツ時間領域測定にはこれ以外にも、自己相関測定という自己相関関数のフーリエスペクトルを利用した手法もある。時間領域測定用の検出器のほかに、非線形結晶による可視光への波長変換

や超伝導ミキサを用いて局部発振器との周波数差に対応したビート信号を観測する手法がある。後者は、電波天文学や地球環境計測でよく使用される。

以上の4タイプとも、現在も性能改善に向けて材料・デバイス構造あるいは検出原理の探索が続けられている。決定的な“定番”といえるものはまだなく、ユーザーそれぞれが測定条件に合うものを選んで使用しているのが現状である。研究開発の流れとしては、ユーザーの要望に従って、(1)室温動作を絶対条件として、使い勝手がよく感度が高いものを目指す、(2)冷却を前提としても構わないので、極限の性能まで追求する、という2つの方向に二極化されている感がある。ユーザーの使用条件にもよるが、「高感度」だけに焦点を絞るならば、量子型の中に光子検出レベルまで到達するものがある。このタイプではほぼすべて検出器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(数 meV)が室温の熱エネルギー(約 26 meV)よりも小さいことに起因する。特に超伝導トンネル接合<sup>13,14)</sup>や半導体量子ドット<sup>15)</sup>による光子検出器は、冷却に<sup>3</sup>He(<sup>4</sup>He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。<sup>3</sup>Heは<sup>4</sup>Heに比べて冷却能力が非常に低く、あまり強いテラヘルツ光を導入できないというボトルネックが存在する。したがって、動作温度が1桁上がって<sup>4</sup>Heによる冷却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。今後の高感度テラヘルツ検出器の高性能化に向けては、検出器自体の動作温度向上と同時に、低振動・低消費電力・コンパクトな冷却装置の開発が欠かせないと考えられる。

## 2. 半導体 2DEG (量子ホール素子) による高感度・周波数可変テラヘルツ検出器

本章と次章で、われわれが開発した半導体 2DEG によるテラヘルツ検出器について紹介する。この章では、2DEG のサイクロトロン吸収による検出器<sup>9,10)</sup>と、その発展版として CNT/2DEG ハイブリッド構造を用いたより高感度な検出器<sup>11)</sup>について解説する。

### 2.1 量子ホール素子によるテラヘルツ検出器

量子ホール効果は、Si-MOS, GaAs/AlGaAs, グラフェンなど、二次元の電子系に垂直に磁場を印加したときに、ある特定の磁場あるいはゲート電圧領域で  $R_{xx}$  が 0 に消失し、 $R_H$  が量子化値  $h/ie^2$  ( $h$ : プランク定数,  $i$ : 整数あるいは分数,  $e$ : 素電荷) に高精度に一致する現象である。量子ホール効果の研究は 30 年近くの蓄積があり、

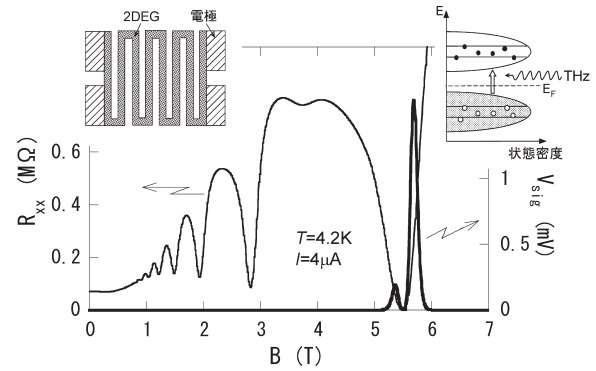


図1 量子ホール素子の縦抵抗  $R_{xx}$  とテラヘルツ検出信号  $V_{sig}(=\Delta R_{xx}I)$  の磁場依存性(電流  $I=4\mu A$ )。挿入図右: 半導体 2DEG (量子ホール素子) のサイクロトロン共鳴によるテラヘルツ検出の概念図。挿入図左: 用いた素子の形状。細長い 2DEG チャンネルをジグザグ状に折り畳んでいる。

85 年, 98 年の 2 度のノーベル物理学賞の対象になっている。そのため、もはや低次元半導体物理における大きな「歴史」として語られる分野である。本稿は量子ホール効果の解説が目的でないため、詳細はすぐれた教科書(文献 6, 7)を参照されたい。この現象に対する説明はいくつかあるが、磁場中でのランダウ量子化(電子のサイクロトロン軌道の量子化)による離散的なエネルギー準位の形成が基本となる。

図 1 挿入図右に描かれているように、量子ホール素子によるテラヘルツ検出は、サイクロトロン吸収によってフェルミ準位以上のランダウ準位に励起されたキャリアがもたらす縦抵抗変化による。以下で示す実験では、GaAs/AlGaAs ヘテロ構造 (4.2 K での電子移動度  $80\text{ m}^2/\text{Vs}$ , 電子密度  $2.6 \times 10^{15}$ ) から加工され、長さ  $L=167\text{ }\mu\text{m}$ , 幅  $W=50\text{ }\mu\text{m}$  という細長い 2DEG チャンネルがジグザグ状に折り畳まれた形状をもつデバイスを用いた(図 1 挿入図左)。これは、縦抵抗が 2 DEG チャンネルの縦横比  $L/W$  に比例するため、大きな  $L/W$  は強い検出信号をもたらす、という考えに基づく。図 1 に、照射テラヘルツ光として n 型 InSb 結晶からのサイクロトロン発光を用いて、検出信号  $V_{sig}$  と縦抵抗  $R_{xx}$  の磁場依存性を調べた結果を示している(温度は 4.2 K)。この結果からわかるように、信号は、量子ホール効果プラトー近傍のみで発生し、2つのピーク構造を示す。この特徴は、ウェハーの種類や 2DEG チャンネルの形状にほぼよらない量子ホール素子固有のものである。ダブルピークの背景には、サイクロトロン吸収によるゆっくりとした電子温度上昇がある<sup>9)</sup>。

この光応答を利用した検出器は、高感度 ( $10^8\text{ V/W}$ ), 狭帯域検出(フーリエスペクトルから得られた半値幅: 2%)→図 2 挿入図, 分光可能(2 DEG の電子密度と磁場を

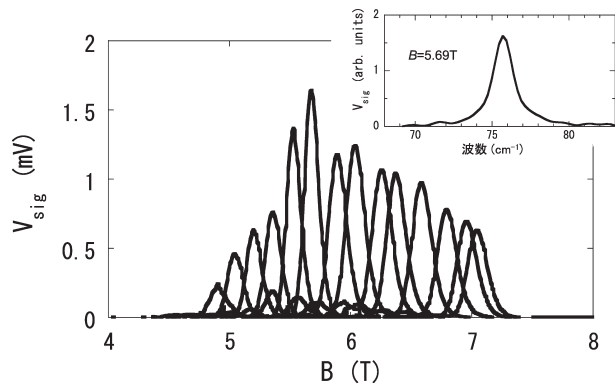


図2 磁場と2DEGの連動を変化させることによるテラヘルツ分光測定の実例。挿入図： $B=5.69\text{ T}$ における検出信号  $V_{\text{sig}}$  のフーリエスペクトル。

連動させることにより、現在のところ  $100\sim 150\ \mu\text{m}$  の波長範囲)→図2 という特徴をもつ。これらは、特にテラヘルツ分光測定を(室温の分光器を通さずに)すべて低温下で行いたい場合に、威力を発揮する。感度やスペクトルの線幅は電子移動度に著しく依存することがわかっている<sup>9,10)</sup> ため、さらに高移動度の基板から作製するなどの工夫を加えれば大幅な改善が可能である。

## 2.2 CNT/2DEG ハイブリッド構造によるテラヘルツ検出

2章1節で紹介したテラヘルツ検出器は、第1章の分類では照射テラヘルツ光による電子励起を利用した「量子型」である。量子ホール効果という特異な現象を利用してある程度の高感度性を達成したとはいえ、量子型では(量子効率を100%としても)光子1個に電子1個の励起である。したがって、マクロな電流あるいは電圧を測定する限りは、検出にある程度の光量を必要とする。では、わずかな個数の励起電子でも検出可能な機構を作り出せるだろうか? 答えはイエスである。単電子トランジスタ (SET) という電子1個の動きでも検出可能なセンサー (エレクトロメーター) がある。このSETを2DEGの間近に置いて、2DEG中でテラヘルツ励起された電子をSETで読み取ってやれば、原理的には少数個電子、いいかえると光子の検出が可能になるはずである。

このアイデアに基づいて、カーボンナノチューブ (CNT) 量子ドットによるSETをGaAs/AlGaAsヘテロ構造基板上に作製した(図3(a))。SETの材料としてCNTを用いた理由は、通常のSET、特にGaAs横型量子ドットに比べて、1桁近く高い電子帯電エネルギーをもつことから、より高温でSETとして動作するためである。このCNT/2DEGハイブリッド素子にテラヘルツ光(波長  $184\ \mu\text{m}$ , 周波数  $1.6\ \text{THz}$ )を照射して、CNTを流れる電流を測定した実験結果を図3(b)に示す(2章1節

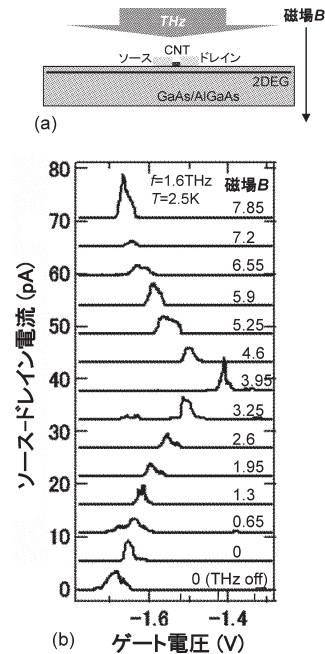


図3 (a) CNT/2DEGハイブリッド素子の概念図。(b) CNTを流れるソース-ドレイン電流対ゲート電圧の印加磁場依存性。一番下のデータ以外はテラヘルツ光(周波数  $f=1.6\ \text{THz}$ )を照射しながらの測定。見やすさのため、各データはY軸方向にオフセットをかけている。

とは異なり2DEGにおける電圧測定ではないことに注意)。テラヘルツ光の照射によって、クーロン振動が正のゲート電圧方向にシフトすることがわかる。これは、テラヘルツ光によって励起された過剰の電子によってSETが静電ポテンシャルの変化を感じ、それが実効的なゲート電圧として働いた結果である。ここで本当に2DEG中で励起された電子による効果なのかどうかを調べるために、2DEG面に対して垂直に磁場を印加した状態で同様の測定を行った。興味深いことに、磁場を増大させるにつれてクーロンピークのシフト量が大きくなるが、 $3.95\ \text{T}$ を境に減少していくことがわかった。この振る舞いもし2DEGのサイクロトロン共鳴に起因するものであれば、以下の式が成り立つ。

$$hf(\text{光子エネルギー}) = \hbar e B / m^* (\text{ランダウ準位のエネルギー間隔}) \quad (1)$$

ここで、 $B$ は磁場、 $m^*$ は結晶内の電子の有効質量である。式(1)に照射テラヘルツ光の周波数  $f=1.6\ \text{THz}$ 、ピークシフト量が最大となる磁場値  $B=3.95\ \text{T}$ を代入すると、 $m^*=0.066\ m_0$  ( $m_0$ :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ほぼ一致する。したがって、この結果は、2DEG中でサイクロトロン共鳴によって励起された電子をCNT-SETが読み取っていることを

意味する。さらに照射テラヘルツ光を 2.5 THz にして同様の測定を行ったところ、ピークシフト量が最大となる磁場値が 6.13 T になり、周波数に比例して増大することが確認された。この結果は、上記の検出メカニズムが正しいことの直接的な証明を与えている。

プレリミナリーな結果であるため図を割愛したが、数 fW の極微弱テラヘルツ光照射に対して、電流が時間に対してオン-オフのスイッチングを示すこと（少数個の光子を検出）が観測された。テラヘルツ領域での光子検出器は、これまでに超伝導トンネル接合<sup>14)</sup>、半導体量子ドット<sup>15)</sup>を用いて開発されたものがある。ただし、前述の通り、これらは 0.3~0.4 K の極低温を必要とする。本研究で開発された CNT/2DEG ハイブリッド素子は、5~6 K 程度でも動作することが確認されている。したがって、高価な <sup>3</sup>He を必要とせず、より自由度の高い測定が可能である。

### 3. 半導体 2DEG によるオールインワンチップ近接場テラヘルツ検出器

高感度テラヘルツ検出器が最も活躍できる応用のひとつが、イメージングである。本章では、半導体 2DEG を用いて最近開発に成功した、高空間分解能イメージング用の新しい近接場（エバネセント場）テラヘルツ検出器について紹介する<sup>12)</sup>。

#### 3.1 テラヘルツイメージングの空間分解能の向上—近接場光学の利用

第 1 章でも触れたように、テラヘルツイメージングの用途は非常に多岐にわたって期待されており、したがってイメージングに必要な要素技術の高性能化は必須である。ところが、この技術の実用化を推進するうえで、空間分解能と検出感度をいかに向上するかという大きな課題に現在直面している。高空間分解能イメージングを実現するための有効な手段として、回折限界による制限を突破し、サブ波長分解能を可能にする近接場光学<sup>16,17)</sup>の利用が考えられる。可視光・近赤外光領域では、先鋭化された光ファイバー<sup>18)</sup>あるいは STM/AFM 探針<sup>19)</sup>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。ところがテラヘルツ領域では、可視光と比較して波長が 2~3 桁長いこと等の理由から、その技術的確立は容易ではなく、光科学技術の中のチャレンジングな課題となっている。

従来の近接場イメージングは、図 4 に描いたように大きく開口型<sup>20)</sup>と無開口（散乱）型<sup>21,22)</sup>の 2 つに分けられる。前者は波長よりも小さな穴に光を通して検出器まで導く手法だが、穴を通過後に光の強度が急激に減少するという問

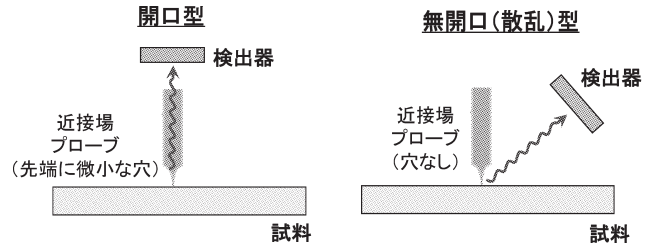


図 4 近接場イメージングのための従来手法（開口型と無開口（散乱）型）。

題がある。後者は先鋭化された金属探針で近接場光（エバネセント場）を散乱させ、検出器まで導く手法である。しかしながら、このやり方では、far field 光が大きな背景光として検出器に入射するため、大きなバックグラウンド信号として現れることがある。これと近接場光との区別がしばしば問題になる。これを回避するため探針を空間的に変動させ、変調成分のみをロックイン検出することがあるが、これは装置全体とその操作を複雑にする。また、一般的に近接場光の強度は非常に弱いため、高感度な検出機構が必要となるが、開口型、無開口（散乱）型に限らず、検出器が離れた位置にあることがそれを妨げていた。

#### 3.2 近接場テラヘルツ検出器のデバイス構造—全検出要素の半導体ワンチップ集積化

本研究では、従来のやり方から発想を全く変えて、近接場測定に必要なすべてのコンポーネント—アパーチャー、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考案・開発した<sup>12)</sup>（図 5）。前述の通り近接場光測定の成否は、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。今回作製したデバイスは、以下の 2 つの巧妙な工夫がなされている。1 つ目は、アパーチャーのすぐ背後に近接場平面プローブを配置したことである。このプローブの存在により、波長よりも十分小さなサイズのアパーチャー部に発生した近接場光の電場分布（本来は一部分に局在している）を、プローブ先端で遠方まで広げることができる。2 つ目の工夫は、検出器としてプローブからすぐ下（60 nm 下）に存在する 2DEG を用いたことである（近接場テラヘルツ光の強度は 2DEG の電圧変化により読み取る）。このデバイスでは、プローブによって空間的に引き伸ばされた近接場光をすぐ間近にある検出器で直接的に検出することができる。従来のように、探針で近接場光を輻射場に変換したり、微小開口を長距離通過した後の非常に弱い光を検出したりする必要はない。したがって、近接場テラヘルツ光に対する 2DEG の検出感度を格段に高めることが可能となる。さらに、このデバイスに

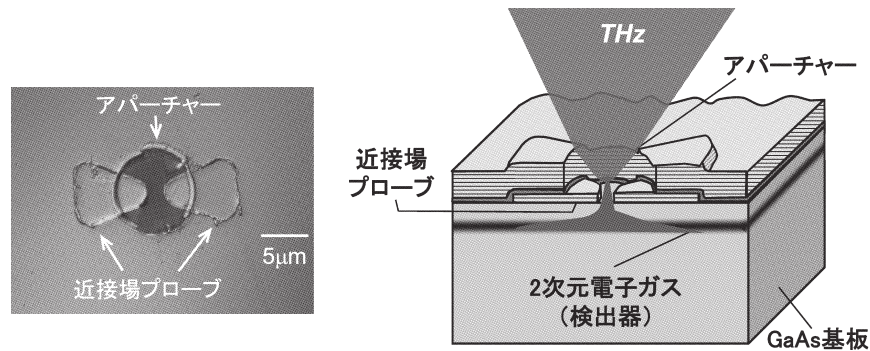


図5 作製した近接場テラヘルツ検出器の光学写真(左), デバイス構造の概念図(右). (巻頭カラー口絵参照)

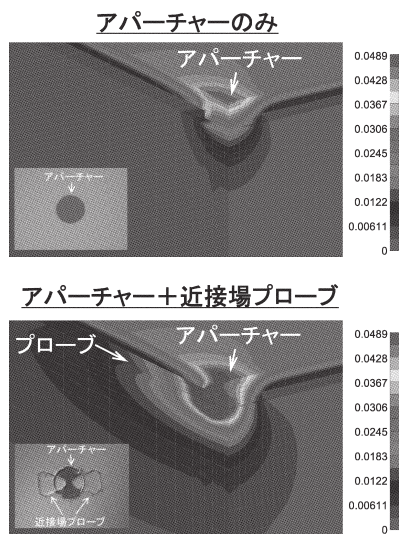


図6 有限要素法によるアパーチャー部近傍におけるテラヘルツ電界分布の計算結果. アパーチャーのみの場合(上)とアパーチャー+近接場プローブの場合(下). 各図の左下は, 実際に作製したデバイスのアパーチャー近傍の光学写真. (巻頭カラー口絵参照)

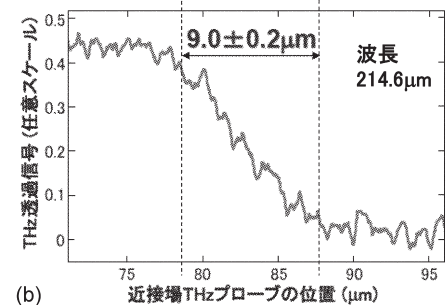
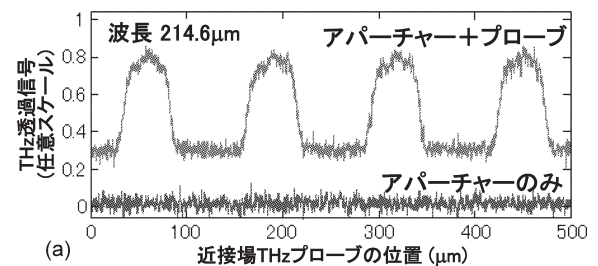


図7 (a) 図6の2種類の検出デバイスを試料に近接させ走査することによって得られたテラヘルツ光透過分布(温度13 K). (b) 信号強度の90~10%基準に基づいたエッジテストによる空間分解能の評価(図7(a)のデータの一部を拡大).

はもうひとつ重要な利点がある. それは, 近接場光以外の電磁波は2DEGの下を通り抜けていくだけであるため, その影響を避けられることである. 以上の点から従来に比べて, 本デバイスでは背景光の影響を受けず, 近接場光のみの高効率な検出が期待できる.

### 3.3 計算・実験結果

上述の効果を検証するために, 有限要素法によってテラヘルツ電磁波の電場分布を計算した(図6). 近接場プローブがないもの(アパーチャーのみ)とあるもの(アパーチャー+近接場プローブ)とで比較を行った. 図6に示されるように, 前者では近接場光がアパーチャー部に局在している様子が見て取れる. これは予想通りの結果であり, この局在した状況が従来の手法における低い検出感度の原因である. 一方後者では, 近接場プローブの存在によっ

て, 本来アパーチャー部に局在する近接場光が空間的に広がっている様子が確認された. この効果により, 近接場光と2DEGとの結合効率の増大が期待できる.

実際に, テラヘルツ光透過/不透明のLine & Space試料に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7). 試料の透過部の幅:  $50 \mu\text{m}$ , 不透明部の幅:  $80 \mu\text{m}$ である. この測定では, 試料に対して(近接場検出器と反対側から)ガスレーザーを照射し, その透過テラヘルツ光強度を検出器で読み取るという測定を行っている. この測定でも, 図7(a)に示されるように, 近接場プローブがないものとあるものとで比較を行った. アパーチャー+プローブでは, アパーチャーのみの場合に比べて明確なプロファイルが観測され

ており、図6の計算結果で示された大きな電場引き込み効果を確認することができた。さらに、信号強度の90~10%に基づいたエッジテストからこのデバイスがもつ空間分解能を見積もった結果が、図7(b)である。約9 $\mu\text{m}$ の空間分解能が得られた。この値は、(1) 照射テラヘルツ光の波長に依存しない、(2) 214.6 $\mu\text{m}$ 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) アパーチャー径(8 $\mu\text{m}$ )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り、したがってここでの実験結果は、今回開発した検出器によって近接場テラヘルツイメージングが実現されたことを示している。

本研究で開発したデバイスは半導体ワンチップのみの“オールインワンチップ”構造であり、各要素間の光学的・機械的調整が不要で信頼性・実用性が高い。今後は、半導体デバイス検査、食品検査、基礎物性研究など多くの用途への普及が期待できる。

#### 4. 今後の展開

本稿の最後に、第2, 3章で紹介した検出器の改良に向けた今後の展開と、そのアプリケーションについて述べる。

高感度・周波数可変テラヘルツ検出器(第2章)では、半導体ヘテロ構造による2DEGの代わりに、グラフェン(炭素結晶の1原子層)による2DEGを使用すると性能を大きく向上させることができると考えている。グラフェン中のキャリアは、線形なエネルギー・運動量分散関係の帰結である質量ゼロのディラックフェルミオンとみなせることが知られており<sup>23)</sup>、トランジスタ応用などへの興味から近年急速に注目を集めている。この特異的な性質から、磁場によるランダウ準位の形成が通常の半導体とは異なっており、準位間隔が遠赤外~中赤外に至るかなりの広帯域にわたる。この特性を利用することで、広帯域周波数可変テラヘルツ検出器の実現を期待している。

近接場テラヘルツ検出器(第3章)は、現時点でも多くの用途に使用できるが、材料科学や細胞科学などの分野では観察対象によってより高い空間分解能が要求される場合がある。本デバイスの空間分解能はアパーチャー径で決まるため、この径を小さくすれば空間分解能は向上する。ただし、それに伴ってエバネセント場の強度が急激に減少する<sup>24)</sup>ため、検出器の感度も同時に向上させる必要がある。そのための有望な策として、2章2節で紹介したCNT/2DEGハイブリッド構造による検出器を利用することを計画している。この検出器は、2DEGのみの検出器よりもはるかに高感度である。このデバイス構造の改善によって、

約2桁高い0.1 $\mu\text{m}$ の空間分解能が得られると見積もっている。このデバイスも“全集積化”型であるため、コンパクトで使い勝手のよいものになるだろう。

次に、高感度テラヘルツ検出器の応用について述べたい。冒頭でも触れたように、テラヘルツ分光・イメージングは幅広い用途が可能であり、特に「非破壊検査」の観点から将来は巨大な市場形成につながる可能性を秘めている。高分解能化が進むにつれて、必然的に要素技術としての高感度テラヘルツ検出器の重要性は増す。さらに、こういった応用とともに、筆者が興味をもっているのは物質・材料研究への応用である。テラヘルツ光の特徴として、光子エネルギーがmeV領域、電磁波振動の時間がps領域にあることも重要な要素である。したがって、半導体、超伝導体、有機導体などの物質中電子の低エネルギー励起状態やダイナミクスの空間・時間特性を調べるツールとして、高感度テラヘルツ検出器によるイメージングや分光が大きな威力を発揮するだろう。以前に筆者らは、固浸レンズによるテラヘルツイメージングを用いて、半導体量子ホール系における励起電子の空間分布の観測を行い、そこでの電子の散乱機構や輸送特性に関する興味深い情報を得ることができた<sup>25-27)</sup>。そのほかにも、高温超伝導体における超伝導電流マッピング<sup>28)</sup>、MgB<sub>2</sub>超伝導体のテラヘルツ伝導度<sup>29)</sup>、半導体超格子中の非古典的なブロッホ振動ダイナミクス<sup>30)</sup>、カーボンナノチューブにおけるバリスティック(弾道)電子ダイナミクス<sup>31)</sup>などの研究例がある。今後、近接場テラヘルツイメージングを用いてよりマイクロな領域における物性を探求することは、テラヘルツ研究の中で面白い方向性のひとつであると考えている。

以上本稿では、高感度テラヘルツ検出器について、従来技術と本研究で開発した技術について紹介した。テラヘルツ検出器の開発は電波側、光側の双方からさまざまなアプローチがあり、冒頭で述べたように、光源開発と同様、研究者にとっては新しい発想が要求される面白くやりがいのある分野である。テラヘルツ関連の学会・研究会に参加すると、電子工学、バイオ、電波天文学、固体物理学、無機化学、有機化学など多種多様なバックグラウンドをもつ専門家が集結しており、それぞれ独自の知識・技術を織り込んだ研究成果を披露する様子が見られる。これは、テラヘルツ研究分野特有の魅力であると筆者は感じている。今後も、物理や化学などの基礎科学と工学が交差する領域で、新しい技術が生み出されることを期待したい。

本稿で紹介した研究は、科学技術振興機構(JST)さきがけの支援を受けて行われたものである。

文 献

- 1) レビューとして例えば, M. Tonouchi: "Cutting-edge terahertz technology," *Nat. Photonics*, **1** (2007) 97-105.
- 2) L. Esaki and R. Tsu: "Superlattice and negative differential conductivity in semiconductors," *IBM J. Res. Dev.*, **14** (1970) 61-65.
- 3) S. Kumar, B. S. Williams, S. Kohen, Q. Hu and J. L. Reno: "Continuous-wave operation of terahertz quantum-cascade lasers above liquid-nitrogen temperature," *Appl. Phys. Lett.*, **84** (2004) 2494-2496.
- 4) 関根徳彦, 寶迫 巖: "テラヘルツ帯量子カスケードレーザー", **38** (2009) 72-79.
- 5) N. Orihashi, S. Suzuki and M. Asada: "One THz harmonic oscillation of resonant tunneling diodes," *Appl. Phys. Lett.*, **87** (2005) 233501-1-3.
- 6) 吉岡大二郎: 量子ホール効果 (岩波書店, 1998).
- 7) 中島龍也, 青木秀夫: 多体電子論III 分数量子ホール効果 (東京大学出版会, 1999).
- 8) 齋藤理一郎, 篠原久典 編: カーボンナノチューブの基礎と応用 (培風館, 2004).
- 9) 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.
- 10) 河野行雄, 小宮山進: "量子ホール電子系を用いた遠赤外光子検出器", 「材料科学」(日本材料科学会誌) 特集号, **37** (2000) 206-214.
- 11) 河野行雄, 内田剛生, 石橋幸治: "カーボンナノチューブ/GaAs 2次元電子ハイブリッド構造による THz 検出", 第69回応用物理学学会学術講演会講演予稿集 (2008) p. 981.
- 12) Y. Kawano and K. Ishibashi: "An on-chip near-field terahertz probe and detector," *Nat. Photonics*, **2** (2008) 618-621.
- 13) J. R. Tucker and M. F. Milla: "Photon detection in nonlinear tunneling devices," *Appl. Phys. Lett.*, **33** (1978) 611-613.
- 14) S. Ariyoshi, C. Otani, A. Dobroiu, H. Sato, K. Kawase, H. M. Shimizu, T. Taino and H. Matsuo: "Terahertz imaging with a direct detector based on superconducting tunnel junctions," *Appl. Phys. Lett.*, **88** (2006) 203503-1-3.
- 15) 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.
- 16) M. A. Paesler and P. J. Moyer: *Near-Field Optics* (Wiley, New York, 1996).
- 17) M. Ohtsu ed.: *Near-Field Nano/Atom Optics and Technology* (Springer-Verlag, Berlin/New York/Tokyo, 1998).
- 18) 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.
- 19) F. Zenhausern, Y. Martin and H. K. Wickramasinghe: "Scanning interferometric apertureless microscopy: Optical imaging at 10 angstrom resolution," *Science*, **269** (1995) 1083-1085.
- 20) S. Hunsche, M. Koch, I. Brener and M. C. Nuss: "THz near-field imaging," *Opt. Commun.*, **150** (1998) 22-26.
- 21) 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.
- 22) H. T. Chen, R. Kersting and G. C. Cho: "Terahertz imaging with nanometer resolution," *Appl. Phys. Lett.*, **83** (2003) 3009-3011.
- 23) K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, M. I. Katsnelson, I. V. Grigorieva, S. V. Dubonos and A. A. Firsov: "Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene," *Nature*, **438** (2005) 197-200.
- 24) H. A. Bethe: "Theory of diffraction by small holes," *Phys. Rev.*, **66** (1944) 163-182.
- 25) Y. Kawano and T. Okamoto: "Imaging of intra- and inter-Landau-level scattering in quantum Hall systems," *Phys. Rev. B*, **70** (2004) 081308(R)-1-4.
- 26) Y. Kawano and T. Okamoto: "Macroscopic channel-size effect of nonequilibrium electron distributions in quantum Hall conductors," *Phys. Rev. Lett.*, **95** (2005) 166801-1-4.
- 27) 河野行雄: "量子ホール効果の素子応用—走査型電位計とTHz光顕微鏡", *固体物理*, **39** (2004) 919-931.
- 28) S. Shikii, T. Kondo, M. Yamashita, M. Tonouchi, M. Hangyo, M. Tani and K. Sakai: "Observation of supercurrent distribution in  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  thin films using THz radiation excited with femtosecond laser pulses," *Appl. Phys. Lett.*, **74** (1999) 1317-1319.
- 29) R. A. Kaindl, M. A. Carnahan, J. Orenstein, D. S. Chemla, H. M. Christen, H.-Y. Zhai, M. Paranthaman and D. H. Lowndes: "Far-infrared optical conductivity gap in superconducting  $\text{MgB}_2$  films," *Phys. Rev. Lett.*, **88** (2001) 027003-1-4.
- 30) N. Sekine and K. Hirakawa: "Dispersive terahertz gain of non-classical oscillator: Bloch oscillation in semiconductor superlattices," *Phys. Rev. Lett.*, **94** (2005) 057408-1-4.
- 31) Z. Zhong, N. M. Gabor, J. E. Sharping, A. L. Gaeta and P. L. McEuen: "Terahertz time-domain measurement of ballistic electron resonance in a single-walled carbon nanotube," *Nat. Nanotechnol.*, **3** (2008) 201-205.

(2008年10月6日受理)