

近接場 THz 光と電位の複合顕微鏡開発：電子輸送の新観察法

河野 行雄

独立行政法人理化学研究所 基幹研究所

1. 研究のねらい

本研究は、(1) 新しい高感度テラヘルツ (THz) 検出器と近接場 THz プロブを開発することで、回折限界を超える近接場 THz イメージングを実現すること、(2) ナノ探針と電位計を結合させた高空間分解能エレクトロメータを開発することを目的として行われた。

本研究の背景には以下の事情がある。THz 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。特に物質科学分野では、半導体、超伝導体、有機導体など多くの物質で重要な物性のエネルギーが THz に相当する領域 (\sim meV) に属することが知られており、THz 計測による探求は興味深い。ところが現在、この技術は空間分解能と検出感度の向上という大きな課題に直面している。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の適用が考えられる。可視光・近赤外光領域では、先鋭化された光ファイバーあるいは STM/AFM 探針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 THz 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。

本研究は、近接場 THz イメージングの実現に不可欠な要素技術として、高感度 THz 検出器と近接場 THz プロブの開発を行った。さらに以前筆者らが開発したエレクトロメータを高空間分解能化させることで、物質中電子の振る舞いを多面的に探求することが可能なシステムの構築を行った。

2. 研究成果

(1) カーボンナノチューブを用いた高感度 THz 検出器

高感度 THz 検出器の材料としてカーボンナノチューブ (CNT) のユニークな特性に着目した。CNT にソース・ドレイン・ゲートの 3 端子を付けた量子ドット構造を用いた。このデバイスでは、半導体量子ドットに比べて、1 電子帯電エネルギーが 10~50meV と 1 桁以上大きくなるため、単電子トランジスタとしてより高温で動作する。このデバイスに THz 光を照射することで、電子輸送特性に与える効果を調べた。その結果、2 種類の機構による THz 応答を見出した。

図 1 に、THz 照射なし/ありに対する、CNT 量子ドットのドレイン電流のゲート電圧依存性 (クーロン振動) の結果を示す。THz 照射なしで本来電流が流れない領域 (クーロン閉塞状態) においても、THz 光を照射することによって新たなサテライト電流が発生することが分かった。さらに、THz 光の周波数を変えると、それに応じて電流ピークの位置が変化することが明らかにされた。図 1 挿入図に示したように、サテライト電流ピーク位置は、THz 光子エネルギーに対して線形の依存を示しており、これはまさしく CNT における THz 光子支援トンネルの直接的な証拠を与えている。検出器としての観点から言えば、周波数可変な THz 検出に成功していることを意味する。

もう 1 つの検出器として、CNT が半導体 2 次元電子ガス上に乗ったハイブリッド構造を用いた。このデバイスに THz 光を照

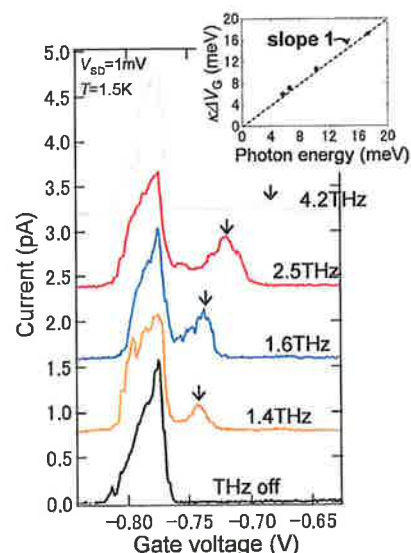


図 1 CNT量子ドットにおけるドレイン電流-ゲート電圧特性に対するTHz光照射の効果。挿入図は、THz光オフですでに発生している電流とTHz光照射によるサテライト電流のピーク間隔のTHz光子エネルギー依存性。

射したところ、2次元電子ガス内で励起された電子-ホール対が作り出す電気的分極をCNT単電子トランジスタが高感度に読み取ることを見出した。この機構を用いることで、超高感度なTHz検出を達成した。

上記のいずれの機構でも、希釈冷凍機やヘリウム3冷凍機を必要とした従来の量子ドット検出器に比べ1桁以上高温(数K)で動作する。これは高感度THz計測の適用範囲を大きく広げることにつながると期待される。

(2) オールインワンチップ近接場THz検出器

次に、近接場THzイメージングの開発に取り組んだ。当初は、可視光や近赤外光領域で通常よく用いられる先鋭化された探針を用いる方法を検討したが、十分なS/Nを確保すること、近接場光とそれ以外の背景光を区別すること、の2点の困難だった。そこで発想を全く変えて、近接場光測定に必要な全てのコンポーネント(アパーチャー、近接場プローブ、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特殊なデバイスを考案・開発し、そのデバイスにより近接場光のみを高感度に検出することを試みた。

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が、今回作製したデバイス(図2)の以下の2つの巧妙な工夫により課題を解決した。1つ目は、アパーチャーのすぐ背後に近接場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可能となる。2つ目の工夫は、検出器としてプローブからすぐ下(60nm下)に存在する2次元電子ガス(GaAs/AlGaAsヘテロ界面に存在)を用いたことである。THz光は2次元電子ガス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延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。これらのことから、2次元電子ガスの検出感度を格段に高めることが可能となる。これは、従来にはなかった全く新しい手法である。さらに、このデバイスのもう1つの重要な利点として、近接場光以外の電磁波は2次元電子ガス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。したがって従来の手法に比べて、本デバイスでは、背景光の影響を受けず、高効率な検出が期待できる。

有限要素法による電界分布計算から、アパーチャーのみの場合とアパーチャー+平面プローブの場合とを比較した(図3)。その結果、後者の場合には、プローブの存在によってエバネッセント場が遠方まで伸びていることが示された。この計算に基づいて、THz透過/不透明の

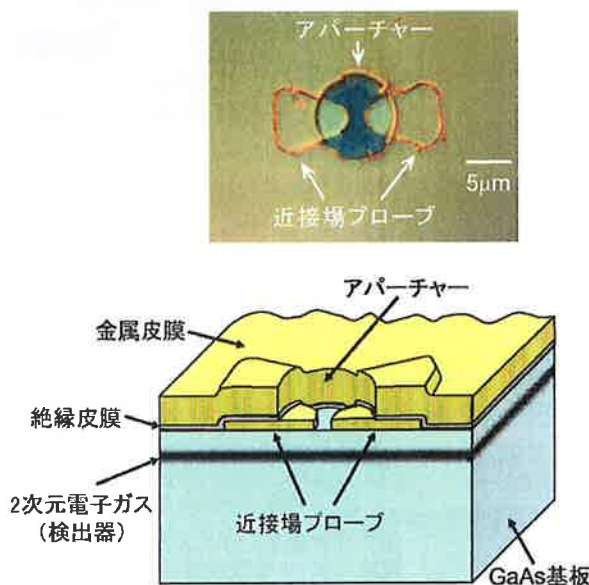
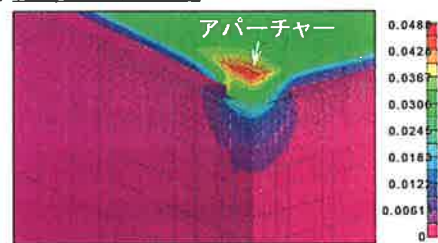


図2 開発した近接場THz検出器の光学写真(上)と概念図(下)。

(a) アパーチャーのみ



(b) アパーチャー+プローブ

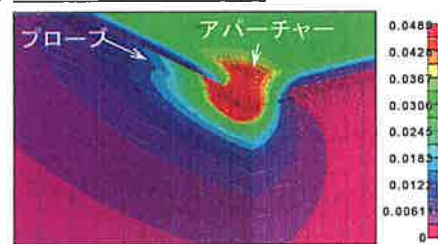


図3 有限要素法によるTHz電磁波の電場分布の計算結果。アパーチャーのみの場合(a)とアパーチャー+プローブの場合(b)。

Line&Space 試料に対する THz 透過強度分布を測定した (図4)。実際に、ピンホールのみの場合と比べて、アパーチャー+プローブでは、明確なプロファイルが観測でき、計算結果から予想される大きな電場増強効果を確認することができた。この実験から得られた空間分解能は約 $9\mu\text{m}$ であり、この値は照射 THz 光の波長に依存しない。またこの値は、 $214.6\mu\text{m}$ の波長に対して波長の約 24 分の 1 に相当し、アパーチャー径 ($8\mu\text{m}$) にほぼ一致する。これらの事実は、今回開発したデバイスによって、波長に依存しない、回折限界を突破した近接場 THz イメージングが実現されたことを示している。

本デバイスは“オールインワンチップ構造”であるため、各要素間の光学的・機械的調整が不要であり、今後 THz イメージングを必要とする多くの分野での活用が期待できる。現在、さらなる高空間分解能の向上 (サブ μm 分解能)・高感度検出を同時に達成するために、検出部として 2 次元電子ガスの代わりに上記 (1) の CNT 量子ドットの使用を計画している。

本成果は、Nature Photonics 誌掲載ならびに JST・理研共同によるプレス発表をはじめ、化学工業日報、Nature Publishing Group Asia Materials、Materials Today (ELSEVIER, UK)、JST News、RIKEN NEWS、Laser Focus World Japan、RIKEN RESEARCH、日刊工業新聞 (2008 年 12 月予定) において特集・紹介記事が掲載された (図5に Nature Asia と Materials Today の特集記事)。

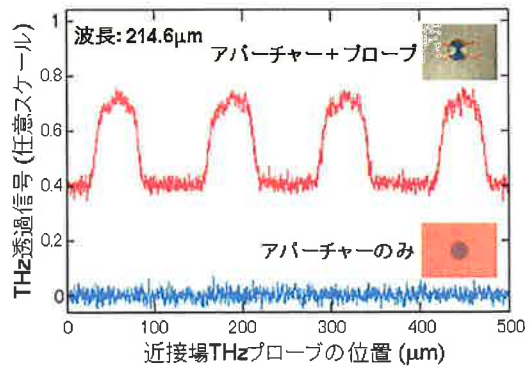


図4 近接場 THz 検出器走査による THz 光透過分布測定。アパーチャー+プローブの場合 (赤線)とアパーチャーのみの場合 (青線)。

Nature Asia



Materials Today (Elsevier, UK)

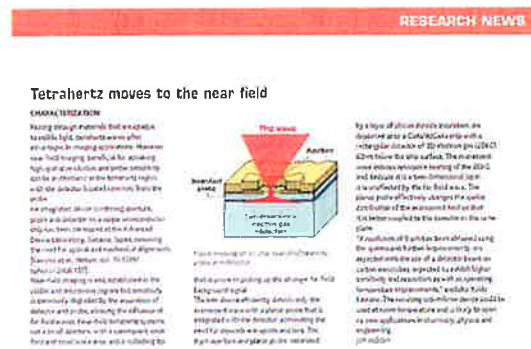


図5 Nature Asia(左)と Materials Today(右)による本成果の特集記事。

(3) AFM 探針と結合された走査型エレクトロメータ

電位分布は、電子の流れや閉じ込めに関する情報をもたらすため、固体物性を特徴づける最も基本的かつ重要な物理量である。以前に、量子ホール素子の縦抵抗が磁場変化に対して示す大きな振動 (シュブニコフド・ハース振動) を利用した、新しい走査型エレクトロメータを開発した (Y. Kawano *et al.*, Appl. Phys. Lett. **84**, 1111 (2004).)。ところが空間分解能がエレクトロメータの素子自体の大きさに依存していたため、測定範囲が限定されていた。

本研究では、高分解能計測システムの構築のため、AFM の金属コートカンチレバーとエレクトロメータを結合させたユニークな計測装置の構築を行った。物質中の量子力学的効果が顕著になるような電子物性に関する研究では、しばしば低温強磁場の測定環境を必要とする。そのため、このような極限環境下でも動作する AFM システムの立ち上げを行い、4.2K の低温下でも試料のトポ像が観察できることを確認した。さらに、量子ホール素子とカンチレバーを金属線で結んだシステムを作製し、高空間分解能な電位分布測定が可能となることを示した。

(4) 開発したシステムの物質科学研究への応用

開発したシステムの応用研究として、現在いくつかの物質における THz 物性、電位分布特性を調べている。現在精力的に取り組んでいる試料の1つはグラフェン（炭素結晶の単原子層）である。グラフェンでは、線形なエネルギー-波数関係の帰結であるディラック粒子がキャリアとなるため、特異な物性が発現する。ディラック粒子の THz 領域での振る舞いや輸送現象の空間特性は興味深い問題であり、本研究で開発した近接場 THz イメージングや電位イメージングが威力を発揮すると期待している。

3. 主な発表

論文

- ・河野 行雄、“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—”、日本光学会誌「光学」・特集「テラヘルツ波デバイスの開発と応用」（2009年2月号掲載予定）
- ・Y. Kawano and K. Ishibashi, “An on-chip near-field terahertz probe and detector”, *Nature Photonics* **2**, 618-621 (2008).
- ・Y. Kawano, T. Fuse, S. Toyokawa, T. Uchida, and K. Ishibashi, “Terahertz photon-assisted tunneling in carbon nanotube quantum dots”, *Journal of Applied Physics* **103**, 034307-1-4 (2008) and subsequently selected for *Virtual Journal of Nanoscale Science & Technology* **17**, (2008).

招待講演

- ・Y. Kawano, “Application of low-dimensional electronic devices to THz technology: Carbon nanotube detector and near-field imaging”, 2nd Japan-Korea Joint Workshop on THz Technology (Tokyo, October 2008).
- ・Y. Kawano, “Frequency-tunable detection and near-field imaging of THz waves”, International Symposium on Terahertz between Japan and Sweden (Tokyo, May 2008).
- ・Y. Kawano, “Terahertz sensing and imaging based on carbon nanotubes: frequency-selective detection and near-field imaging”, JST-DFG Workshop on Nanoelectronics (Aachen, March 2008).

4. その他

特許

- ・河野 行雄、石橋 幸治、テラヘルツ光検出装置とその検出方法、特願 2008-222980、出願人：独立行政法人理化学研究所
- ・河野 行雄、石橋 幸治、近接場テラヘルツ光検出器、特願 2008-178041、出願人：独立行政法人理化学研究所

受賞

- ・第2回日本物理学会若手奨励賞受賞（2008年3月）
- ・第22回応用物理学会講演奨励賞受賞（2007年9月）