

# 半導体・カーボンのナノ構造を用いた テラヘルツ波画像技術の開発と 応用に関する研究

新規開拓電磁波の極限計測による新現象・新機能の発見を目指して

河野 行雄

東京工業大学 量子ナノエレクトロニクス研究センター  
准教授



## 研究の背景

テラヘルツ(THz,  $10^{12}$  Hz)電磁波技術は、生体分子分光・電波天文学・物性科学などの基礎科学から情報通信・医療・セキュリティなどの実用的応用に至る幅広い分野にわたって必須とされている。ところが、THz電磁波は光領域と電波領域の間にあるため、20世紀の科学技術が築いてきた光学と電子工学という既存の2大技術が単純に適用できない。THz帯は、発展が取り残された“最後の砦”とも言える。ところが、THz電磁波が可視光を通さない物質でも適度に透過すること、光子エネルギーがmeVという様々な物質・生体系の重要な領域に属することから、このエネルギー領域における電磁波の検出・イメージング技術は、セキュリティ、医療、材料・デバイス検査などへの応用が可能である。そのため、研究・生産現場だけでなくわれわれの日常生活にも大きな恩恵をもたらすことが期待され、世界中から熱い視線が寄せられている。

しかしながら、THz検出・イメージングの応用を進めていく上で、高感度検出・高空間

分解能をいかに達成するかという大きな課題に直面している。これは、高性能検出器の欠如、可視光に比べて長いTHz波の波長(0.1~1mm程度)から高い空間分解能が容易に得られない等に起因する。以上から、高性能なTHz検出・イメージングは、その技術的確立が容易ではなく、現代光科学技術の中で高い独創性の要求されるチャレンジングな課題となっている。

## 研究の成果

以上を背景として本研究は、半導体やカーボンの低次元ナノ電子材料が持つ特徴を活かした、新しいTHz検出・イメージング技術の開拓と、それを用いた、物質・デバイス中の電子の振舞いの解明を目的として行った[1]。

### 1. 検出器開発:半導体量子構造、カーボンナノチューブを用いた超高感度・周波数可変THz光子検出器

従来のTHz検出器は、光子1個の吸収に対して伝導電子1個の励起になるため、必然的に検出感度に限界がある。この問題を克服するために、カーボンナノチューブ量子ドットと半導体中2次元電子ガスが結合したハイブリッド構造を作製し、2次元電子中でTHz励起されたキャリアを、カーボンナノチューブによる高感度電荷センサで読み取る新機構を創出した(図1)。この検出器は、究極感度である単一光子検出レベルにまで到達し、検出自体が周波数可変性を持つため、超高感度・周波数可変THz光子検出器として機能する[2, 3]。現在、物質中電子、生体系高分子、天体系星間物質からの極微弱なTHz放射の

検出が、物質における新現象・新機能の発見、生命活動や宇宙創生の謎の解明につながるかと期待されている。今回開発した検出器は、これら現代科学のフロンティアに貢献する基盤要素技術となり得る。

### 2. イメージング開発:オールインワンチップ近接場型とパッシブ顕微計測

従来のレンズによるTHzイメージングでは、空間分解能が波長程度(0.1~1mm)に限定され(回折限界)、大きな問題となる。これを解決するために、回折限界を超える近接場THzイメージングの開発に取り組んだ。従来よく使用される先鋭プローブ式から発想を全く変えて、アパーチャ・プローブ・検出器全てが半導体(GaAs/AlGaAs)ワンチップに集積化されたユニークな素子を考案・創出した(図2)。この素子により、近接場THz光のみを高感度に検出し、波長の制限を突破(分解能 $9\mu\text{m}$ 、波長の24分の1)することに成功した[4, 5]。この素子は、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。

さらに最近、この素子と、高精度スキューニングを可能にするチューニングフォークとを組み合わせることにより、分解能400nm(波長の約540分の1)という超高解像度なTHzイメージングを実現した。これにより、外部THz光源なしで対象物からのTHz発光を顕微計測する技術(パッシブ顕微計測)を達成した。これらは、“THzナノイメージング”という新しいツールの創出である。今後さらなる改良により、これまで波長の長さゆえ観測できなかった、ナノ電子材料や生体細胞・高分子1つ1つにアクセスし、THz画像・分光解析を行うという今までにない研究の展開が可能

図1 カーボンナノチューブ／半導体2次元電子ガス複合構造によるTHz検出器の概念図

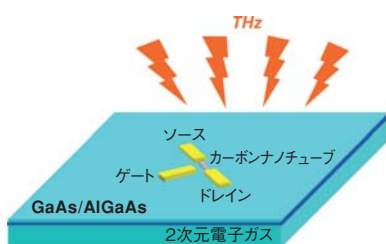


図2 ワンチップ構造による近接場THzイメージングセンサの概念図

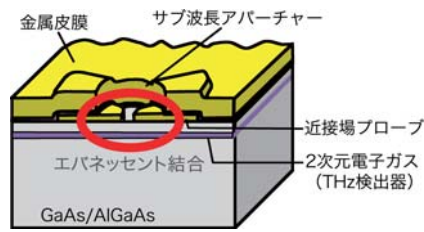
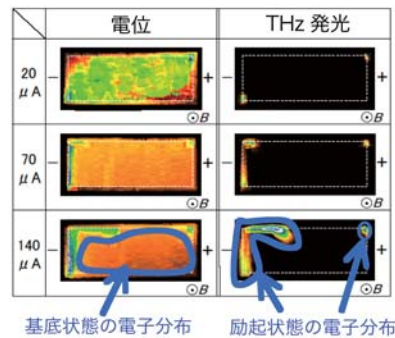


図3 半導体における電位分布とTHz発光分布の観測結果



である。この強力な研究手法は、ナノ構造の電子物性や高分子が司る生命活動の解明において、新たな視点から豊富な情報をもたらすことが期待できる。

### 3. 電子材料・デバイス研究への応用:

#### 半導体量子構造、グラフェン、高分子

さらに以上の高機能THz計測を電子材料・デバイス研究へ応用する研究を展開した。

まず、独自に創出した電位分布観測技術<sup>[6]</sup>とTHz顕微鏡との複合顕微鏡を開発し、磁場中半導体ヘテロ構造2次元電子系(量子ホール系)に応用した。実験結果から、ランダウ準位の基底・励起状態各々の電子分布<sup>[7]</sup>(図3)、ならびに伝導チャネ

ルに対するマクロなサイズ効果<sup>[8]</sup>を明らかにした。これらは、通常の電気抵抗測定では観測・解明が不可能であった、初の成果である。

次に、THz計測をグラフェン(炭素結晶の単原子層)に応用する研究を展開した。この物質では、キャリアが質量ゼロのディラックフェルミオンと見なされ、特異な物性を発現することから、世界中で大きな注目が寄せられている。本研究では、グラフェンのランダウ準位形成が通常の半導体とは著しく異なることに着目し、0.8~33THz程度の相当な広帯域における、ディラックフェルミオンのTHz・赤外共鳴による光伝導を実証した<sup>[9]</sup>。この結果は、新しい広帯域THz・赤外分光器になることを示しているため、米国特

許を取得した。さらに、グラフェン中のポテンシャル揺らぎを直接観察することに成功し、THz・赤外共鳴との関連について重要な知見をもたらした<sup>[9, 10]</sup>。これらは、THz電磁波をプローブとして、ディラックフェルミオンの振る舞いに迫ることを可能にした点で、高い意義を持つ成果である。また、THzイメージングの新たな応用として、最近、高分子のTHz画像観察に成功し、THz領域における高分子の空間ダイナミクスを探求する道筋を示した。

## 将来の展望

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、宇宙・天体系など幅広い。従来の物理・化学・生物という枠を超えて、自然科学・工学を総合的に俯瞰する観点が必要であり、そのためゆめ探求から新しい産業が生まれると期待される。今回開発した技術はTHz電磁波の極限計測であり、今後、単一バイオ・分子THz解析やTHz光子相関といった新しい分野の開拓につなげていきたい。

本研究は、東京大学、理化学研究所、東京工業大学において行われたものです。共同研究者の皆様へ深く感謝申し上げます。

### 補足説明

#### 近接場イメージング

自由空間を伝搬せずに局在した電磁場を総称して近接場光(あるいはエバネッセント光)と呼ぶ。これは、波長よりも小さなサイズの穴に光照射された場合の穴の背後などにおいて発生する。近接場光のサイズは、電磁波の波長には依存せず、発生部における構造物の形状によって決定される。この近接場光を照射あるいは検出することによって、波長の制限を超える、極めて高い解像度の光学像を得ることができる。

#### グラフェン

炭素結晶の単原子層膜。理論的には質量ゼロのキャリアが流れていると理解される。将来の高性能電子材料(高速トランジスタや透明電極等)として期待されている。グラフェンの作製と電気伝導の測定に成功したGeim教授とNovoselov教授は2010年ノーベル物理学賞を受賞した。

### References(参考文献)

- [1] 総説としてY. Kawano, "Highly Sensitive Detector for On-Chip Near-Field THz imaging", IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics 17, 67 (2011). (Invited paper)
- [2] Y. Kawano, T. Uchida, and K. Ishibashi, "Terahertz sensing with a carbon nanotube/two-dimensional electron gas hybrid transistor", Applied Physics Letters 95, 083123 (2009).
- [3] 河野行雄, "テラヘルツ光子の検出とその応用", 日本光学会誌 41, 521 (2012).
- [4] Y. Kawano and K. Ishibashi, "An on-chip near-field terahertz probe and detector", Nature Photonics 2, 618 (2008).
- [5] 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 38, 81 (2009) (巻頭口絵)
- [6] Y. Kawano and T. Okamoto, "Scanning electrometer using the capacitive coupling in quantum Hall effect devices", Applied Physics Letters 84, 1111 (2004). (Selected for cover)
- [7] Y. Kawano and T. Okamoto, "Imaging of intra- and inter-Landau-level scattering in quantum Hall systems", Physical Review B (Rapid Communication) 70, 081308(R) (2004).
- [8] Y. Kawano and T. Okamoto, "Macroscopic Channel-Size Effect of Nonequilibrium Electron Distributions in Quantum Hall Conductors", Physical Review Letters 95, 166801 (2005).
- [9] Y. Kawano, "Wide-Band Frequency-Tunable Terahertz and Infrared Detection with Graphene", Nanotechnology (2013), in press.
- [10] Y. Kawano and K. Ishibashi, "Scanning nanoelectrometer based on a two-dimensional electron gas transistor with a probe-integrated gate electrode", Applied Physics Letters 96, 142109 (2010).