

研究報告書

「テラヘルツ波の単一光子検出と近接場センシング」

研究期間：平成20年10月～平成23年3月

研究者：生嶋 健司

1, 研究のねらい

本研究では、半導体量子構造によるテラヘルツ(THz)波の単一光子検出機構を応用して、局所的なテラヘルツ電磁場を検出・イメージングする近接場センシングを開発する。特に、対象物の自発的放射を検出するパッシブ・テラヘルツ顕微鏡の開発、固体デバイス上を伝搬するテラヘルツ波を検出するオンチップ・テラヘルツ光子制御、の実現を目指す。これらテラヘルツ検出技術は、半導体ナノ構造の発光過程探索や少数分子系における化学反応分析、生きている細胞・生体高分子の活性状態の可視化など広範囲な応用へ発展することが期待される。

2, 研究成果

本研究では、半導体量子構造による単一 THz 光子検出技術を発展させて、テラヘルツ科学へ貢献する新たな計測ツールを開発してきた。次の二つの展開を行った。

(1) パッシブ THz 顕微イメージング。

(2) オンチップ・THz 光子検出および制御。

以下、それぞれについて研究成果を報告する。

(1) パッシブ THz 顕微イメージング

サーモグラフィに代表されるパッシブ顕微鏡では、空間分解能を一桁向上させるには、検出感度を二桁改善する必要がある(輻射は面積に比例)。また、0.1mm に及び長波長光であるか

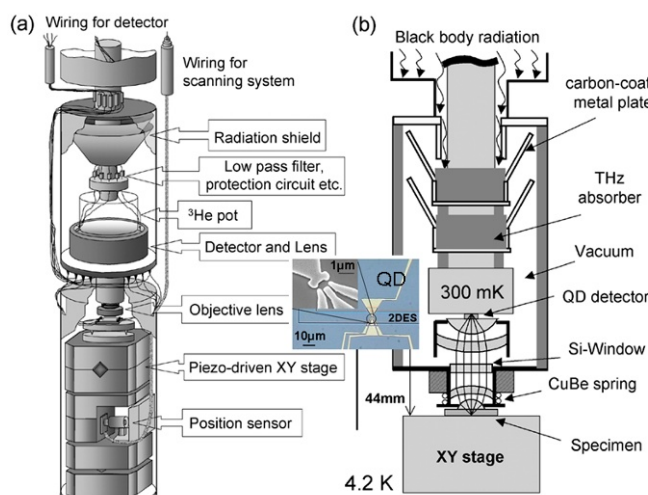


Fig. 1 Photon-counting THz microscope

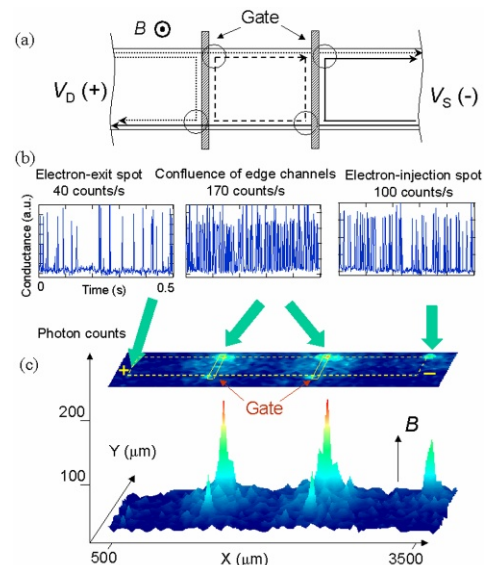


Fig2. Photon-counting imaging of THz emission from a quantum-Hall device.

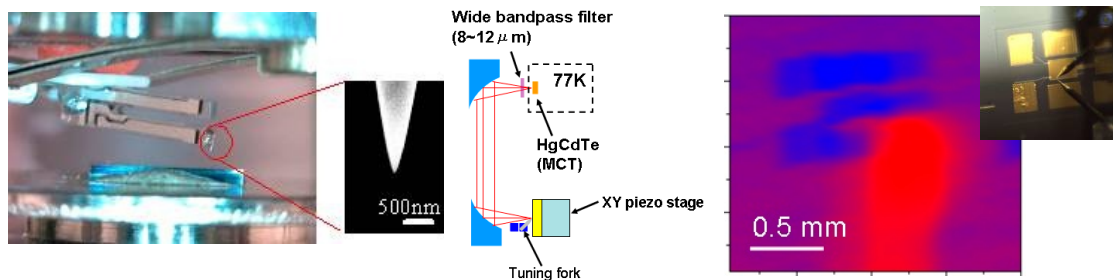


Fig.3 Passive s-SNOM (left). Far-field passive imaging of the metal tip (right).

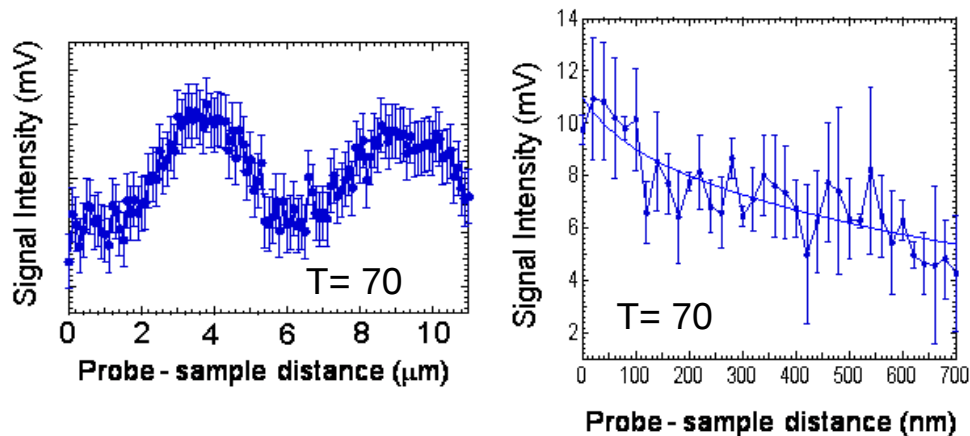


Fig. 4 Interference term (left). Near-field response (right).

ら、高い空間分解能を達成するためには、回折限界を超える光学システムが必要である。また、常温の熱エネルギーと同程度、もしくは小さな光子エネルギーをもつテラヘルツ波を相手にするので、常温の背景輻射から目的微小信号を取り出すことも重要な技術的要素である。まとめると、パッシブ顕微鏡の困難点は、(i) 高い検出感度、(ii) 回折限界を超える空間分解能、(iii) 背景輻射に埋もれた微小信号の検出、の 3 点が挙げられる。これらの困難点を同時に克服することは難しいことから、我々はひとつずつ解決する戦略を取っている。まず、最初に試みたことは、(i)に対する問題解決、つまり極限の感度追求である。半導体量子ドットを単電子トランジスタとして動作させた単一 THz 光子検出器を用いて、我々は THz 帯域におけるフォトンカウンティングイメージングを可能にしてきた (Fig.1 と Fig.2)。この顕微鏡を用いて極低温の半導体素子 (量子ホール効果素子) からの新しい THz 発生機構を見出した (Fig.2)。この新しい単色点光源の発見が後述するオンチップ・THz 光子検出、さらにはオンチップ・光子制御の着想の起点になっている。これらの成果から、低温環境下において 0.1 アトワットの放射レベルの顕微観察が可能であることがわかる。

次に、常温環境下の観察対象物に対して波長スケールを超える高い空間分解能の追求に取り組んだ。ここでは使い勝手のよい汎用中赤外光検出器 (HgCdTe:MCT) を使用する。感度不足のため、試料を 70 程度まで加熱して熱輻射強度を上げて測定する。空間分解能の改善のため、次の二つのシステムを立ち上げた。まずひとつは散乱型のパッシブ近接場顕微鏡システムである (Fig.3)。音叉型振動子にタングステンナノプローブを取り付けた AFM を利用している。Fig.3 の右図は共焦点光学系において試料を走査して得られたナノプローブ近辺の Far-field 像である。空間分解能は 30μm 程度である (波長 10.3μm)。Far-field 像からナノプローブ先端部に光学系の焦点を固定し、試料表面 - ナノプローブ間距離の信号強度依存性を

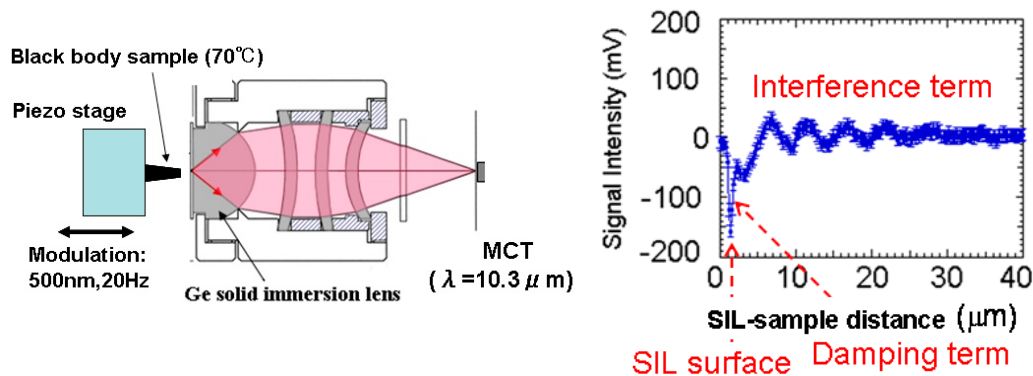


Fig. 5 SIL-Thermomicroscope (left). Signal intensity vs SIL-sample distance (right).

測定した結果、Fig.4 に示すように干渉項および 100nm スケールで減衰する近接場と思われる応答が観測されている。まだパッシブ近接場応答の物理的描像が確立していないものの、約 100nm の空間分解能を示す画像が得られている。さらにもうひとつ立ち上げたシステムは、Ge という誘電率の高い材料をソリッドイマージョンレンズ (SIL) として使用したサーモマイクロスコプである (空間分解能 2 μ m 程度、Fig.5)。たとえば、細胞サーモグラフィの場合、マイクロメートルスケールの空間分解能で十分活用できると考えられる。SIL サーモマイクロスコプでは、試料そのものを SIL 表面で微小振動させて変調することで背景輻射との区別が可能となった。Fig.5 に試料と SIL 表面との距離依存性を示す。減衰項と SIL と試料との干渉項が観測された。減衰項は低周波変調でかつ試料を加熱したときにだけ現れることから、試料と SIL の熱拡散によるものと考えられる。これらの結果から、熱拡散や干渉の効果を念頭に置いて画像化していくことが必要であることが明らかになった。これらの開発を通して背景輻射の抑制方法や信号変調技術に対して多くの知見が得られ、量子ドット検出器を用いたフォトンカウンティングシステムとの融合への道筋がついたと考えている。また、現状の汎用検出器を用いたシステムでも常温よりやや試料を加熱することにより計測可能であることから、熱励起による金属や誘電体における固体表面の電子・格子ダイナミクスを調べることができると考えられる。

(2) オンチップ・THz 光子検出および制御

本研究は、フォトンカウンティングイメージングにより見出された量子ホール効果素子からの THz 発光により着想された。強磁場中の 2 次元電子系において、我々は波長よりもずっと小さな単色点光源とフォトンカウンターを作製することができる。したがって、これらの THz コンポーネントを組み合わせることにより、固体チップ上の電磁場を光子レベルで制御する回路ができるのではないかと考えた。現代科学では 1 個ずつの電子制御は当たり前となったが、質量も電荷もない相対論的素粒子の光子を制御することはまだ人類未踏の挑戦である。我々はまず、エッジ電流注入による点光源と量子ドット検出器を伝送路で結合させたデバイスを作製した。フォトンカウンティング実験により、固体上の配線を伝わる高周波の電気信号を光子として捕えられることを示した。さらに、詳細なエミッター特性の研究から、量子ホール電子系の閉じ込めポテンシャル近傍で従来考えられているスピン分裂よりも 20 倍以上増強していることが見出された。これは、ランダウ準位間における交換相互作用によるものと考えられ、量子ホール電子系分野において新しい知見を与えると共に、発光過程においてスピン自由度が強く関

与していることが見出された。

3, 今後の展開

本研究で、テラヘルツ帯域のパッシブ顕微鏡技術として、背景輻射の少ない極低温環境下でフォトンカウンティングレベルで画像が取れるということ、常温環境下において波長スケールよりも高い空間分解能(サブミクロン)で画像が取れるということ、を立証した。今後は、これらの技術を融合して、常温試料観察が可能で、フォトンカウンティングレベルの感度で波長スケールを超える高い空間分解能をもつパッシブな近接場テラヘルツ顕微鏡へと発展させたい。特に、常温試料観察の場合、300K プランク輻射のピークに相当する波長 15 μ m 程度が望ましいだろう。二重量子井戸を利用した電荷敏感型の中赤外検出器では、量子ドットサイズにするとフォトンカウンティングレベルの感度になることが予想されており、そのフォトンカウンターの開発に取り組むつもりである。また、パッシブ分光ができるようにすることも重要な課題である。高感度で広帯域なテラヘルツ検出器の開発は今後の重要な課題である。ひとつの候補は、層数により大きく性質の異なるグラフェンのランダウ分裂の利用である。特許の可能性があるので詳細は控えるが、現在、グラフェン結晶成長の専門家との共同研究が始まっている。一方、生きている細胞のサーモグラフィーを実現するためにこれまで準備をしてきたが、細胞を長時間生かすための環境セルの開発と細胞周辺の水溶液への熱拡散を回避するための工夫が必要であることを認識した。今後、バイオ系の専門家との共同研究を通して解決することを計画している。

オンチップ・光子制御を目指すテーマについてはまだプロシーディングにおいてしか発表していないにもかかわらず、既に複数の国際会議からの招待講演と UK の著名な雑誌からのレビュー執筆依頼まで来ている。期待以上に評価を頂いており、今後の励みにしたい。光子を制御することは無謀なまでの挑戦だが、発光効率、伝送効率、検出効率の改善をひとつずつ克服し、単一光子を取り扱う“光子回路”の実現を目指したい。

4, 自己評価

当初の計画どおり、フォトンカウンティングイメージングの追及と汎用検出器を用いた常温試料観察用の近接場センシング実現まではほぼ達成した。パッシブな近接場センシングの実演はまだ論文発表に至っていないが、さきがけ期間中にぎりぎり間に合うことができてほっとしている。さらに、フォトンカウンティングイメージングで得られた結果から、オンチップ・THz 光子検出および制御への新しい構想が生まれ、周辺分野にインパクトを与えた。当初の最終目標である、“フォトンカウンティング近接場 THz 顕微鏡”にまでは至っていないが、上記開発過程において多くの知見が得られ、その道筋は見えつつある。さきがけ期間中に細胞サーモグラフィーだけは実現したいと考えたが、研究室の立ち上げにおいてバイオ系の新しいセットアップや測定にまで手が回らなかったことが心残りである。多くのバイオ系研究者およびバイオ系ベンチャー企業の方々が興味を抱いてくれており、近い将来に生命の息吹を画像化できるように精進したい。

5, 研究総括の見解

テラヘルツ領域の単一光子検出および近接場計測というかなり野心的で困難な問題に取り組み、当初計画の全てではないが2、3の重要な成果を上げることができた。特に量子ホール

デバイスからのテラヘルツフォトン計測は興味深い成果と言える。また、これから着想されたオンチップ THz 光子検出制御法の開発は、研究期間の途上で着想されたものであるが、今後大きく発展する可能性があり、評価できる。

6, 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

1. K. Ikushima and S. Komiyama, Photon generation by injection of electrons via quantum Hall edge channels, Phys. Rev. B 84, 155313 (1-5) (2011).
2. K. Ikushima, D. Asaoka, S. Komiyama, T. Ueda, K. Hirakawa, Manipulating terahertz photons on a quantum Hall effect device, Physica E 42, 1034-1036 (2010).
3. [Invited Review] K. Ikushima, S. Komiyama, Imaging by terahertz photon counting, C. R. Physique 11 444 – 456 (2010).

(2) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物等)

・国際会議

1. [Invited] K. Ikushima, K. Kunitani, D. Asaoka, S. Komiyama, T. Ueda, and K. Hirakawa, On-chip terahertz photon manipulation, The 35th International Conference on Infrared, Millimeter and THz Waves (IRMMW-THz2010), Sep. 2010.
2. [Oral] K. Ikushima and S. Komiyama, Generation of terahertz photons via edge-channel transport, International Symposium on Advanced Nanodevices and Nanotechnology (ISANN), Hawaii, USA, Dec. 2009.
3. K. Ikushima and K. Kunitani, Landau level emission in the imbalance between adjacent spin-resolved edge channels, EP2DS-19, USA, July 2011.

・解説

生嶋健司、テラヘルツ放射の単一光子計測とパッシブ顕微観察、J. Vac. Soc. Jpn. 53, 309 (2010).

・著書

Kenji Ikushima, Single-Photon Counting and Passive Microscopy of Terahertz Radiation, Frontiers in Optical Methods--Nanocharacterization and Coherent Control (Springer), in press.