

「物質現象の解明と応用に資する新しい計測・分析基盤技術」
平成 18 年度採択研究代表者

小宮山 進

(東京大学大学院総合文化研究科 教授)

「半導体量子構造の探索とテラヘルツ波計測技術開拓」

1. 研究実施の概要

中赤外からサブミリ波にいたるテラヘルツ (THz) 領域 ($1\text{THz}=10^{12}/\text{s}$; 周波数=35-0.3THz、光子エネルギー=150-1meV、波長=8 μm -1mm の領域) は、あらゆる分子の振動・回転準位、固体の格子振動、半導体の不純物準位や人工的量子構造のエネルギー準位、超伝導ギャップといった、物質の重要なエネルギースペクトルを豊富に含む。物質中の現象は一般に励起状態間の遷移を伴うため、そのダイナミクスに応じて、ほとんどの現象に伴って、その情報は (微弱だが) 固有のテラヘルツ波発光となって外界に発信されている筈である。従って、物質が発する超微弱なテラヘルツ波を高分解能で捕らえれば、物質や分子集団の示す固有の現象やダイナミクスの多くの部分が解明されるだろう。ところが、従来盛んに行われている研究は、測定対象を外部からの THz 光源で照射して透過 (反射) スペクトルを調べる active 計測法であり、対象が自ら発する THz を計測しない。一方、外部からの THz 光照射を行わずに測定対象が自らが発する THz 光を捉える passive 計測は、現在まで、数 cm サイズ以上の対象に測定が限られている。それでは主にマクロな領域の温度分布しか解らない。本研究では、圧倒的高感度を有し、かつ簡便に使用出来る新たな THz 検出器を広範囲の波長領域で開拓し、同時に、専用の THz 顕微鏡の開発を行うことにより、超高感度かつ高分解能の passive な THz 顕微計測法を開拓し、物質や生体分子の現象を直接ミクロに追究し得る、新たな研究手段を創出することを意図する。

2. 研究実施内容

本年度は検出器開拓に向けて努力を集中した。図 1 の赤線は、本研究の検出器に要求される最低限の特性検出能 (D^*_{min} : 波長サイズの対象から 300K の熱輻射の 1%以下の揺らぎを計測する限界) を波長の関数として示しており、電波・赤外線天文学で開発された従来の

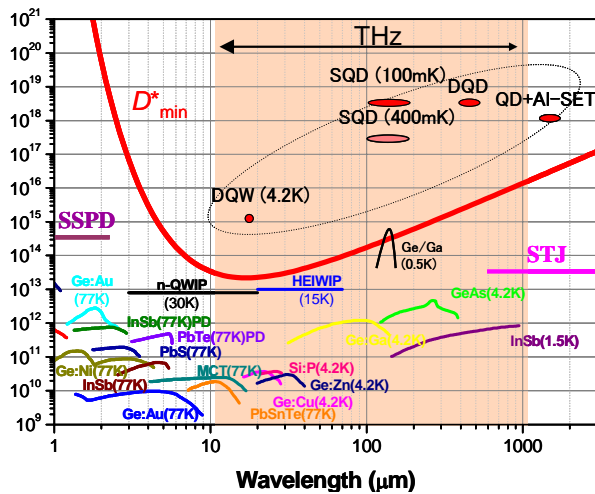
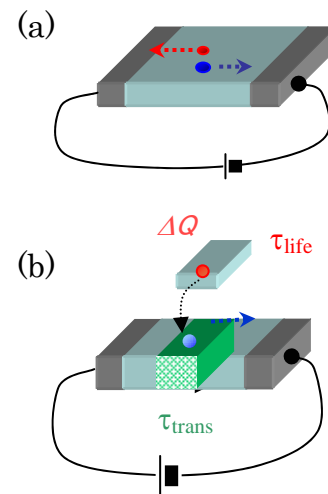
図1 さまざまな検出器の感度 D^* 

図2 THz 光検出の概念図

高感度 THz 検出器の感度がいずれも要求を満たさず、本研究に利用できないことを示す。図1の薄青色の楕円領域中に赤で記した、 D^*_{\min} を超える感度の数種類の検出器 (QD/AISET, DQD, SQD, DQW) が、我々の研究チームが今までに開発した検出器であり、今後の本研究開発の土台となる [S.Komiyama et al., *Nature* **403**, 405(2000), O. Astafiev, et al., *Appl. Phys. Lett.* **80** 4250 (2002), H. Hashiba et al., *Phys. Rev.* **B73**, 081310 (2006), Zhenghua An et al., *Appl. Phys. Lett.* **86**, 153, (2006)]。これらの検出器は、いずれも高純度 GaAs/AlGaAs 量子井戸結晶を用いており、図2 (b)のように GaAs 量子井戸の孤立した微小領域から THz 光吸収によって電子を1個追い出し、電子を失った孤立領域が+eに帯電する効果を利用する。近傍に作成する電荷敏感素子が+eの帯電効果を、莫大な数 (10^6 から 10^{10} 個) の電子の流れの変化として検知する。光子→電子の増幅作用を内蔵した電荷敏感型赤外光トランジスタ (CSIP: Charge Sensitive Infrared Phototransistor) として働くために超高感度が実現する。

(一方で、従来型検出器の多くは、図2 (a)のように THz 光子1個の吸収による伝導電子1個の信号電流を検知するフォトダイオード型であるため、感度に限界があった。)

しかし、これらの超高感度検出器は現状形態のままでは必ずしも応用に適さない。より簡便で量子効率の高い検出器に改善する必要がある。本年度は、(i)今後の開拓の基礎となる、超高感度検出器の特性評価のための4.2K動作の分光計の作成とそれを用いた検出器評価、(ii)新たな機構による検出探索、および(iii)超高純度 GaAs/AlGaAs 2重量子井戸結晶成長のために、分子線エピタキシャル装置 (MBE) の整備を行った。

[4.2K動作の分光計] 超高感度検出器の評価は、300K黒体輻射を完全に遮断した状態で行う必要がある。そこで、回折格子を GaAs 結晶の選択エッチングにより自作した上、図3 (b)に示すように、光源 (図3 (a))、回折格子 (図3 (c))、検出器の全てを液体ヘリウム中に浸す分光計を制作した。この測定計を用いて、DQW検出器 (2重量子井戸検出器) を計測し、分光特性 (図3 (c))、感度 ($D^*=5 \times 10^{14} \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$)、量子効率 (1%) を得た。これら結果を基

に、波長範囲の拡大と量子効率の改善について、今後の着想を得た。

[新たな THz 検出機構の探索] 平川グループでは、変調ドープヘテロ構造量子井戸に量子ドットを埋め込んだ 10 μm 帯赤外光検出器の検討を行った。素子の構造上、埋め込める量子ドット層の数に制限があること、量子ドット中で光励起された電子が量子ドットを脱出する確率が小さいことなどにより、高効率の光検出が困難なことが今まで問題であった。この問題を解決するため、図 4 に示すように、素子中のテラヘルツ光吸収層には、テラヘルツの光子エネルギーに相当する束縛エネルギーを持つ浅い不純物 (Si や Be) や量子ドットを十分な吸収を得られる程度に挿入する着想を得た。浅い不純物や量子ドットから励起された正孔 (電子) は電界により走行し、2重障壁共鳴トンネル構造界面にある InAs 量子ドットにトラップされる。この時、トラップされた光励起キャリアにより共鳴トンネル構造付近の電位が変化し、トンネル電流が変化することにより光検出を行う。トラップされた正孔 (電子) の寿命が十分長ければ、縦型フォトトランジスタのように機能し、高感度が期待できる。2重障壁共鳴トンネル構造の最適化のための設計、可視光パルスを入射したときの光励起キャリアの寿命の測定などを開始した。

[高純度 GaAs/AlGaAs 結晶の成長] 本研究の検出器開拓の重要な鍵は、高純度 GaAs/AlGaAs 系ヘテロ構造結晶を得ることにある。そのために、今年度は半年間かけて分子線エピタキシー (MBE、RIBER) の大規模なオーバーホールを行なった。その過程でさらに、購入した基板の表面状態によって成長結晶中の残留不純物濃度に不規則な変化が起こることが明らかとなり、平成18年3月現在、その対策を行って徐々に高移動度のヘテロ構造が成長できるようになりつつある。また、自己組織化量子ドットの結晶成

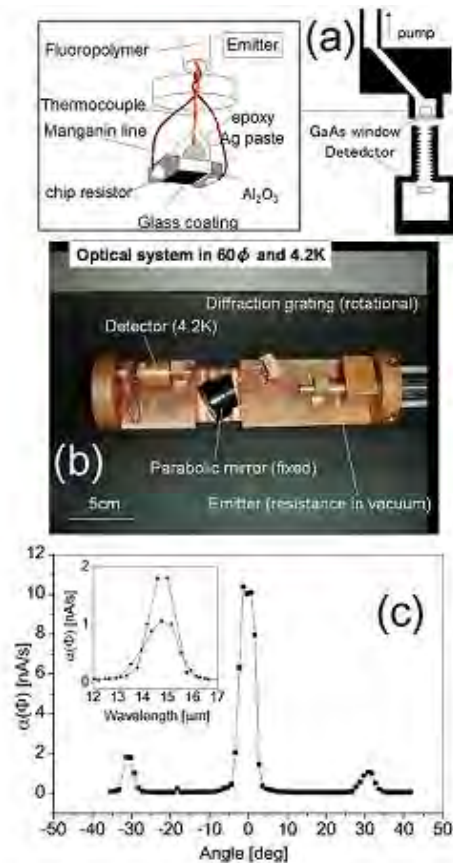


図3 超高感度検出器評価用の 4.2K 分光計

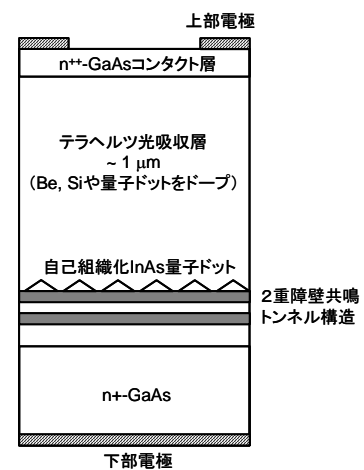


図4 共鳴トンネル構造による高感度テラヘルツ検出

長について、MBE 装置のメンテナンス毎に最適な成長条件を探す必要があり、図5に示すように、成長する量子ドットのサイズや密度と成長条件の関係を明らかにした。

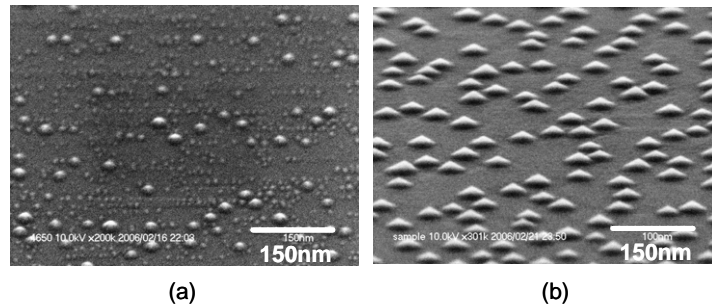


図5 GaAs 基板上に InAs を 70 秒堆積させたときの表面モーフロジー。(a)成長条件の最適化前；(b)InAs 量子ドットの成長中に成長中断を入れながら成長した場合

3. 研究実施体制

(1)「小宮山」グループ

- ①研究分担グループ長:小宮山 進(東京大学大学院総合文化研究科 教授)
- ②研究項目
 - ・テラヘルツ検出器と顕微鏡の開拓

(2)「平川」グループ

- ①研究分担グループ長:平川 一彦(東京大学生産技術研究所第3部 教授)
- ②研究項目
 - ・結晶成長およびテラヘルツ検出の新機構探索

4. 研究成果の発表等

(1)論文発表(原著論文)

- Zhenghua An, T.Ueda, S.Komiyama, & K.Hirakawa, "Metastable excited states of a closed quantum dot with high sensitivity to infrared photons", *Phys. Rev. B* **75**, 085417 (2007)
- Peter Kleinschmidt, Stephen P. Giblin, Vladimir Antonov, Hideomi Hashiba, Leonid Kulik, Alexander Tzalenchuk, and Susumu Komiyama, "A Highly Sensitive Detector for Radiation in the Terahertz Region", *IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT* **56**, 463-467 (2007)
- M. Jung, K. Hirakawa, S.Ishida, Y. Arakawa, S. Komiyama "Electron transport and shell structures of single InAs quantum dots probed by nano-gap electrodes" *Physica E-LOW-DIMENSIONAL SYSTEMS & NANOSTRUCTURES* **32** (1-2), 187-190, 2006