

「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

従来不可能だった超高感度を有し、かつ簡便に使用出来るテラヘルツ (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 顕微計測法を開拓することを最終的に意図しており、そのことで物質や生体分子の現象を直接ミクロに追究し得る研究手段を創出しようとしている。平成 18 年度までに、CMOS センサーに類似した長波長赤外領域 (波長 1.4 ミクロン) の検出器 (Charge Sensitive Infrared Phototransistor: CSIP) の開拓に成功していたが、平成 19 年度は、CSIP における入射波と電子との結合、および動作方法を改良し、天文観測に使われる従来の高感度検出器 (Si:As IBI) の 10 倍以上の感度 ($D^*=1.2 \times 10^{15} \text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$ @4.2K) を実現した。また、検出器の動作温度域の拡大を試み、25K までの動作を確認するとともに、CSIP の特長を生かして 20x20 のアレー検出器の作成を開始した。さらに、CSIP の顕微鏡応用のために、走査型共焦点顕微鏡を設計・製作し、テスト実験を開始した。

平成 19 年度の研究で、開発した CSIP が本研究プロジェクトの目的達成のために十分な感度特性と波長拡大の潜在的可能性をもつことが明らかになった。今後は、CSIP による顕微鏡開発に近接場技術を導入して実測へむけて歩を進めるとともに、平行して、CSIP の更なる特性改善・波長拡大・アレー化に取り組みたい。

2. 研究実施内容

(文中にある参照番号は 4. (1)に対応する)

検出器、顕微鏡、および結晶成長について記す。

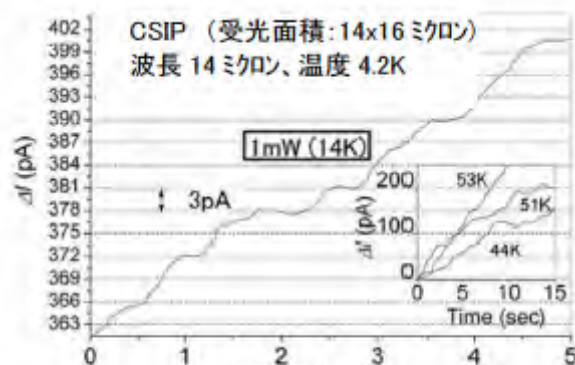
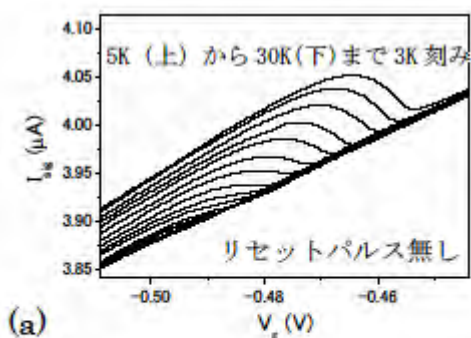
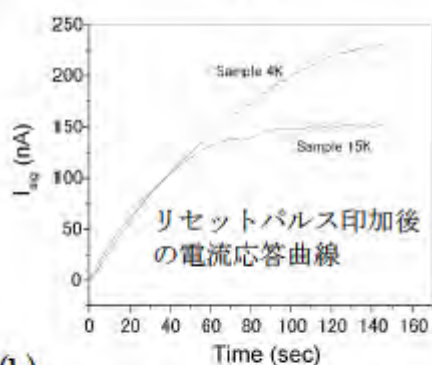


図1 テラヘルツ光子の入射によるステップ(3pA)的電流増大。リセットパルス(1 μs 幅)印加後の5秒間。



(a)



(b)

図2 温度依存性。(a)電流のゲート電圧依存性。入射光により電流が飽和値まで増大。(b)4K と15Kにおける Responsivity は温度で不変。

[検出器] 本プロジェクトの目的達成のためには、従来天文観測用に開発された高感度検出器よりさらに桁違いの感度を有する検出器を必要とする。そのためGaAs/AlGaAs系2重量子井戸結晶による新たな検出器 (CSIP ; Charge Sensitive Infrared Phototransistor) を開発している。今年度は、波長 14 ミクロンに感度を持つ CSIP につき、構造と動作方法の改善によって検出器応用に必要なリセット動作を実現した¹⁾。また、昨年度末に構築した低温分光系を用いて検出器特性の詳細を測定し、従来検出器 (Si:As IBI) の 10 倍以上の感度 ($D^* = 1.2 \times 10^{15} \text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$ @4.2K) (図1)を始め、Responsivity= $10^4 \sim 10^6 \text{A/W}$ 、ダイナミックレンジ 10^6 以上という優れた特性を明らかにした²⁾。後で記すように、感度のさらに2桁程度の向上が今後期待できる。CSIP は感度だけでなく、CMOS センサーに類似した積分型信号を持ち、かつ単純な素子構造を持つ長所があるため、アレー化を含めて、今後顕微鏡応用を越えて広範な応用が期待できる。応用に有利な性質として、さらに 25K の温度まで検出感度があることを見出した (図2 (a) (b))。今後、温度依存性の詳細を解明することにより、温度域の拡大可能性を検討したい。

CSIP の特性を生かすべくアレー素子 (20x20 画素) の試作を開始した (図3)。これまで何回かの試作により、オーミックコンタクトの歩留まりと 2 層配線間の絶縁層に解決すべき問題があることが判明した。オーミックコンタクト

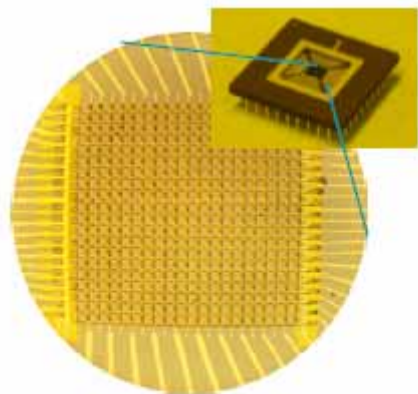


図3 CSIP アレー素子
(20x20 画素)

トは合金化の条件見直しにより、また絶縁層はSiO₂および有機系の膜の生成方法を工夫することで解決しようとしている。

上記のCSIPとは別に、平川グループでは2重障壁共鳴トンネルダイオードと障壁近傍に配置した自己組織化InAs量子ドット層からなる光検出器の研究を進め、可視光励起によって素子の動作原理を確認した。その中で、光吸収による量子ドットへの正孔の蓄積→トラップされた電子による正孔の消滅→過剰電子の蓄積の過程によって生ずる最終的な帯電した励起状態の寿命が極めて長いことをみだし、それを利用してリセット動作による積分モードの検出が可能であることを見出した。

[顕微鏡] CSIPを搭載する顕微鏡を製作した(図4(a))。図4(d)に示すように、室温の対物レンズ(Ge)と液体ヘリウム温度の検出器側レンズ(Ge)をもつ共焦点光学系(波長~14μm)である。対物レンズで集められた試料からの光をいったんピンホール(液体ヘリウム温度)に焦点を結び、その後検出器側レンズでCSIPに集光する。図4(b)は液体ヘリウム温度の検出器側光学系(ピンホール、レンズ、CSIP)の写真である。図4(c)は室温部の対物レンズ光学系および試料を載せるXYZステージである。平成19年度末に組み立てが終わりテスト実験を開始した。

この顕微鏡の分解能は回折限界により20ミクロン程度に制限されると考えられる。今後は、テスト実験を繰り返しつつ回折限界を越す分解能を目指すために、対物レン

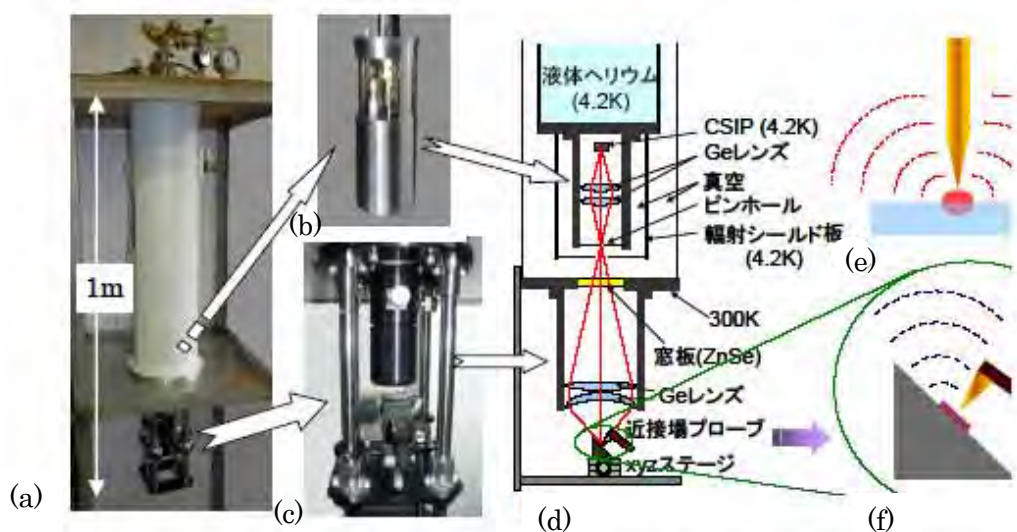


図4 CSIP 搭載の走査型共焦点顕微鏡 (a) 全体像写真 (b) 検出器側光学系
(c) 対物レンズ鏡筒と試料ステージ (d) 概念図 (e) (f) 非開口式近接場探針

ズの試料焦点領域に原子間力顕微鏡（AFM）の金属探針を配置する予定である。図4(e)のように、探針は先端からナノメートル近傍の試料表面のエバネセント波を散乱するので、探針を走査することによってエバネセント波の分布を極めて高い分解能で画像化できる筈である。このような探針による近接場技術は外部光照射によるアクティブ計測では既に知られている。物質内に閉じ込められた電子波が探針へのトンネルにより取り出される走査トンネル顕微鏡（STM）と類似するため、Optical STM と呼ばれ、回折限界を大きく越える分解能が確認されている。しかしパッシブ計測はまだほとんど行われておらず、従来検出器を用いた報告が一例（*Y. De Bilde et. al., Nature 444, 740(2006)*）あるのみである。今後、桁違いに高感度のCSIPを用いて、パッシブなOptical STM計測の有用性を実証してゆきたい。

〔**GaAs/AlGaAs 結晶の成長**〕 本研究の検出器開拓にとり、高純度 GaAs/AlGaAs 系ヘテロ構造の結晶成長が出発点である。分子線エピタキシー（MBE、RIBER）のオーバーホールを行った平成19年夏以来、装置が本調子でなく、特に2重量子井戸構造における基板側量子井戸に、所望の電子を生成できない問題があった。SIMS などによる検査の結果、成長した AlGaAs 層中に 10^{18} cm^{-3} 程度の酸素が不純物として混入していることが判り、それが原因であろうと推測される。現在、材料の入れ替えを含めて対策をとっている。現在の CSIP の Responsivity と感度は従来検出器より優秀だが、それでも結晶純度を反映した比較的低い電子移動度 ($1\text{m}^2/\text{Vs}$ 以下) によって低く抑えられた値である。MBE による高純度結晶の成長が軌道に乗れば、CSIP の特性はさらに桁違いに良くなることが予想される。

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、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 研究参加者研究分担グループ長:平川 一彦(東京大学、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)

1. Z. An, T.Ueda, K.Hirakawa and S.Komiyama “ Reset Operation of Quantum Well Infrared Phototransistors“ IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES, 54, 1776-1780, 2007
2. T. Ueda, Z. An, K. Hirakawa and S.Komiyama “Charge sensitive infrared phototransistors: Characterization by an all-cryogenic spectrometer” J. Appl. Phys. (to be published)
3. K.Ikushima, H.Sakuma, S.Komiyama and K.Hirakawa, “Visualization of quantum Hall edge channels through imaging of terahertz emission” Phys. Rev. B 76(16) 165323 2007