

「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 顕微鏡を開発することにより、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いる。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する。平成 20 年度は、本プロジェクトで開発した 2 重量子井戸を用いた長波長赤外領域 (波長 14 ミクロン) の超高感度検出器 (Charge Sensitive Infrared Phototransistor: CSIP) における電子と入射光との結合を改良するために理論的シミュレーションと実験を比較しつつ進め、量子効率を従来の数倍 (1.5%→8%) 改善した。また、動作特性の温度依存性解析から光励起の再結合機構を解明し、波長域拡大のための指針を得た。多方面への応用のため、検出器アレー作成のためのリソグラフィ技術を開発した。顕微鏡に関しては、走査型共焦点光学系に CSIP を搭載し、常温試料からの passive な 2 次元イメージング画像 (波長 14 ミクロンに対して分解能 25 ミクロン) を得た。

今後は、CSIP の本格的応用に向けて、入射光を量子井戸中電子に強く結合するためにフォトニック結晶と近接場の知見をあわせ、10%以上の量子効率を目指す。また、アレー動作の実現に向かう。顕微鏡については、AFM 技術を援用して近接場技術を導入し、passive 計測での波長以下の分解能実現を目指したい。

## 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。

[**検出器**] 本プロジェクトの目的達成のために、従来の高感度検出器に比し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 について、昨年度行った特性検出能 ( $D^*$ ) やダイナミックレンジ等の特性の詳細な測定と解析について論文発表<sup>(4-1)-(2)</sup>するとともに、昨年度見出

した 4.2K 以上の温度まで信号が観測できることに関し、さらに詳細な実験を通して、特性検出能が 30K 程度まで有意に減少せず ( $D^* = 8 \times 10^{14} \text{cmHz}^{1/2}/W$  程度に) 維持されることを見出した。<sup>(4-1)-1)</sup> 検出器の広範な応用に向けた更なる性能向上のためには量子効率の向上が第一に重要であり、そのためには、入射光によって量子井戸面上に、面に垂直の大きな電場成分を作る必要がある。昨年度まではパッチアンテナを用いていたが、より以上の効率を目指すために、金属 2 次元格子を結晶表面に蒸着して結合を試みた (図 1)。(格子周期を光の波長またはそれ以下にして回折光の発生を抑え、代わりに、金属表面近傍にエバネセント波を生成して利用する。) 正方窓の正方格子 (図 1 右 A, B)、正方金属パッチの正方格子 (図 1 右 C)、および十字窓の正方格子 (図 1 右 D)、市松模様の格子 (図には示さず) を試し、量子効率として 2% (図 1 右 A 従来の最高値) から 8% (図 1 右 D 従来の約 4 倍) の値を実現した。また、FDTD 法によるシミュレーション (図 2) を開始し、今後、10%以上の量子効率を最適化により目指す感触を得た。

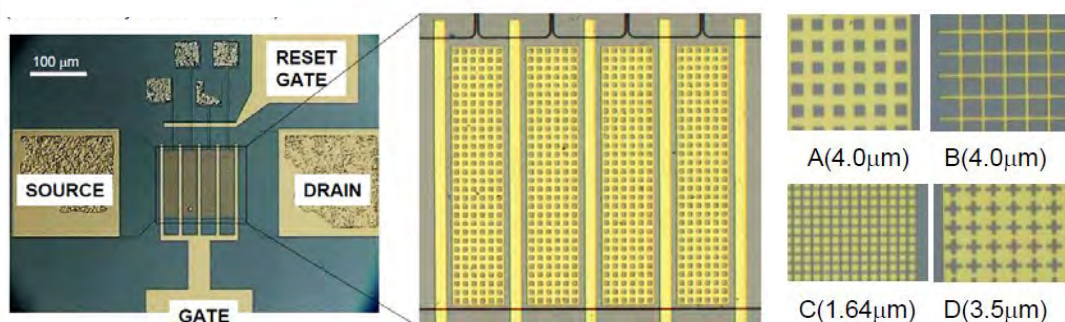


図 1. CSIP の顕微鏡写真(左)、入射光との結合のため金属格子を配した受光領域 (中央)。異なる金属格子 A-D(右)、A-D のカッコ内は格子の周期。(GaAs 中の入射光波長は 4.0 μm)

アレー素子の開発について、昨年度からの懸案だったオーミックコンタクトの歩留まり、および 2 層配線間の絶縁不良の問題は、それぞれ合金化時に低濃度の水素ガスを導入すること、および多層レジストによるリソグラフィ技術を用いて解決した。これで、アレー素子の実現に関してリソグラフィ上の大きな困難は無くなったと考えられる。

**[顕微鏡]** 昨年度製作した CSIP 搭載の走査型共焦点顕微鏡では、光路上に発生する液体

ヘリウムからの蒸発泡が光信号に雑音をもたらすことが判明した。これは、当初検出系 (CSIP, レンズ、ピンホール) を液体ヘリウムに直に浸す構造による。そこで、検出系を真空断熱層に設置して熱接触で冷却する方式に設計変更して顕微鏡システムを新たに構築し (図 4)、雑音の無い鮮明な常温試料のパッシブイメージング画像 (分解能 25 ミクロン) を得ることに成功した (図 5、図 6)。このように、近接場導入の土台となる幾何光学顕微鏡が完成したので、非開口式近接場の実現に向けて、金属探針 (タングステン) の電

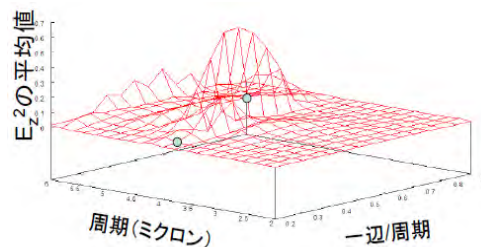


図 2 正方窓の金属正方格子に対するシミュレーション

縦軸: z 方向電場の平方の格子下 0.1nm の平面上での平均値を入射光の電場振幅 2 乗平均で除した値

平面手前から左奥へ、周期: 2→6 μm

平面手前から右奥へ、辺/周期: 0.2→0.9

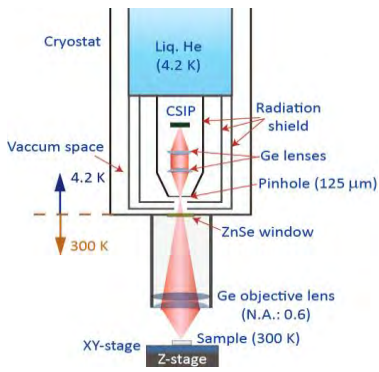


図4. CSIP 検出器による既開発の走査型共焦点顕微鏡

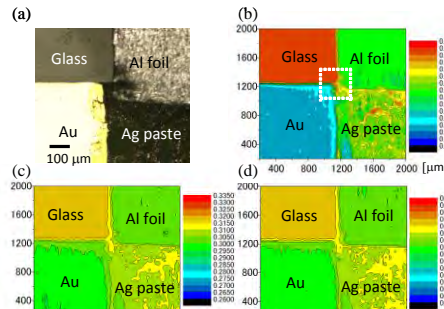


図5. CSIP 検出器による走査型共焦点顕微鏡を用いて得られたパッシブ画像

解研磨と、探針をナノメートル精度で制御するためのチューニングフォークによる制御系の製作を開始した(図7)。このように、超高分解能を有する実用的なTHz領域のパッシブ測定系の実現にむけて着実に前進している。

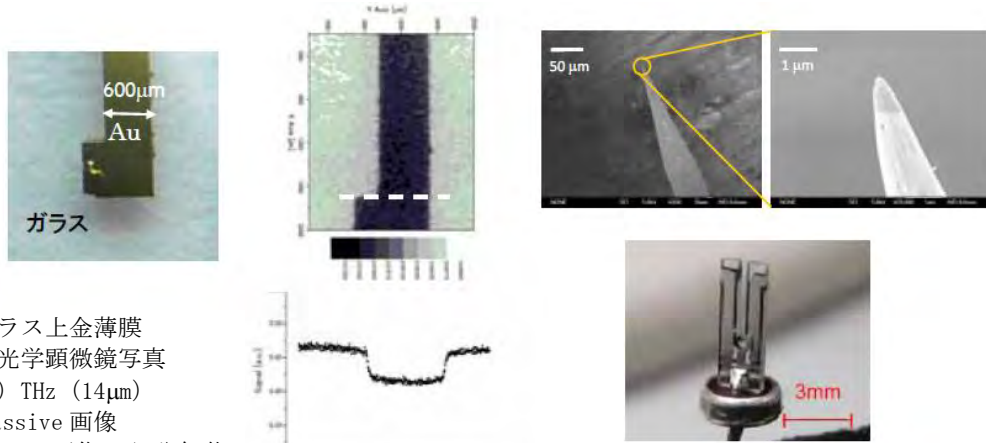


図6 ガラス上金薄膜  
(左) 光学顕微鏡写真  
(右上) THz (14μm)  
の passive 画像  
(右下) THz 画像から分解能  
25μm を得る。

図7 (上)近接場プローブとなる電解エッチしたタングステン針(先端径 100nm)。(下)プローブを位置制御するチューニングフォーク(水晶振動子)

[**GaAs/AlGaAs 結晶の成長**] GaAs/AlGaAs 系ヘテロ構造の結晶成長のために用いている分子線エピタキシー装置 (MBE : RIBER) が一昨年度から、本調子で無く、2 重量子井戸構造に 0.1mm の空間レベルで不均があり、また不純物酸素濃度が高かった。全てのソース (Ga, As および Al) を交換することで酸素不純物濃度は低下したが、結晶の不均一性は相変わらず存続しており、現在も、可能な原因を一つづつ除去している。プロジェクト研究の進展を確実にするため、今年度途中から協力研究室 (平川研究室) の別の MBE (VG) を利用した成長、および外部企業にも成長を依頼することを開始した。平成 20 年度末の段階で VG および外部企業からの 2 重量子井戸構造結晶の成長を何回か試行錯誤し、設計パラメータの最適化を詰めている。来年度中には、外部企業を含めた複数の MBE から、本研究に十分な品質をもつ結晶が成長可能となることが期待できる。

### 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(東京大学大学院、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、教授)

②研究項目

結晶成長

(3)「生嶋」グループ

①研究分担グループ長:生嶋 健司(東京農工大大学院、准教授)

②研究項目

THz 光の近接場制御

(4)「An」グループ

①研究分担グループ長:An Zhenghua (Fudan University、准教授)

②研究項目

検出器の開拓

#### 4. 研究成果の発表等

(1) 論文発表 (原著論文)

1. T. Ueda, Z. An, K. Hirakawa, Susumu Komiyama,  
Charge sensitive infrared phototransistors:Characterization by an all-cryogenic spectrometer.  
J. Appl. Phys. 103, 093109 (2008).
2. K.E..Spirin, S.V.Morozov, V.I.Gavrilenko,Y.Kawaguchi & S.Komiyama,  
Magnetic field dependence of the photoresponse time of GaAs/AlGaAs quantum Hall effect device. Semicond Science & Technology 23, 95014 (2008).
3. T.Ueda, S.Komiyama, Z.An, N. Nagai, and K.Hirakawa  
Temperature dependence of the performance of charge-sensitive infrared phototransistors.  
J. Appl. Phys. 105, 64517 (2009)

(2) 特許出願

平成 20 年度 国内特許出願件数 : 0 件 (CREST 研究期間累積件数 : 0 件)