

「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

超高感度を有し、かつ簡便に使用出来て広範な応用に適する、従来不可能だったテラヘルツ (THz) 検出器を開拓することを第1の目的とする。その際、応用分野として天文観測と物質計測を念頭に置くが、特に後者については、超高感度かつ高分解能の *passive* な THz 顕微鏡を開拓することを第2の目標として設定する。そのことで物質や生体分子の現象を直接マイクロに追究し得る研究手段を創出しようとする。

昨年度までに、GaAs/AlGaAs2重量子井戸結晶による新たな機構に基づく素子を作成して、波長約 15 $\mu\text{m}$  において、従来の約 150 倍の感度を有する検出器 (電荷敏感型赤外トランジスタ、CSIP; Charge Sensitive Infrared Phototransistor) を実現していた。今年度は、光ゲート領域を複数に分割する新たな構造により感度をさらに 4 倍程度 (従来検出器に比べて約 500 倍) 改善した。また、井戸幅の異なる結晶を用いて、天文にとって重要性の高い、より長波長帯域に検出域を拡大する試みを行い、45 $\mu\text{m}$  に至る波長域で光信号を得るとともに、15 $\mu\text{m}$  帯では、20 $\times$ 20 画素のアレー素子を作成した。顕微鏡開拓については、昨年度に上記した波長 15 $\mu\text{m}$  の超高感度 CSIP 検出器を用いて THz 走査型共焦点顕微鏡を設計・製作した。本年度は、昨年度に開拓した顕微鏡の焦点位置にタンゲステン深針を置き、それを AFM 様の制御機構によりナノメートル精度で制御することによって、THz 領域の散乱型近接場挿引顕微鏡を構築した。今年度後半に、この近接場顕微鏡によって、300K の常温試料からの自然発光 (表面プラズモン等の熱励起による: 波長 15 $\mu\text{m}$ ) を、波長の 100 分の1の分解能 (150nm) で計測することに成功した。

波長以下の分解能を有する *Passive* な THz 近接場顕微鏡は世界的に例が無い。今後、検出器の波長を拡大し、かつ光学系の更なる改良を行い、波長帯域拡大とともに S/N 比を 10 倍程度改善することにより、さまざまな物質計測に役立つ汎用性の高い高性能の *Passive* THz 顕微鏡を実現する。

## § 2. 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

## § 3. 研究実施内容

(文中に番号がある場合は(4-1)に対応する)

検出器と顕微鏡の開発について記す。

[CSIP 検出器] (i)感度向上: CSIP 検出器への印加上限電圧を増大するために、図1(a)に示すように受光部となる孤立ゲート領域を複数に分割し、感度を数倍高めた(特願2009-125194)。また、昨年度の光-電子間の結合増強による量子効率改善<sup>1,5)</sup>(図1(b))についても特許出願した(特願2009-125195)。

(ii)波長拡大とアレー化 昨年度までは常温試料の顕微鏡に適する波長 15 $\mu\text{m}$  の CSIP を開発してきたが、天文応用にはより長波長領域(30-60 $\mu\text{m}$ )が重要でありまたアレーによる動作が必須である。<sup>11)</sup> そこで、量子井戸幅の異なる結晶による検出器を設計、製作し、図2に示すように波長 27 $\mu\text{m}$ 、29 $\mu\text{m}$ 、光信号を確認した。ただし、感度が 15 $\mu\text{m}$  に比べて劣り、その原因が Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As に含まれる不純物の酸素原子によると推測される。そこで、今後は異なる素子構造<sup>3)</sup>を試みるとともに、不純物酸素の影響が少ない InP 系の結晶を試みることにした。そのため InP/InGaAsP 系の 2 重量子井戸構造結晶の成長を開始した。アレー素子作成について、本プロジェクトの開始以来努力してきたが、本年度、20×20 画素のアレー素子作成に成功した。今後、読み出し回路と組み合わせたアレー動作に取り組む。

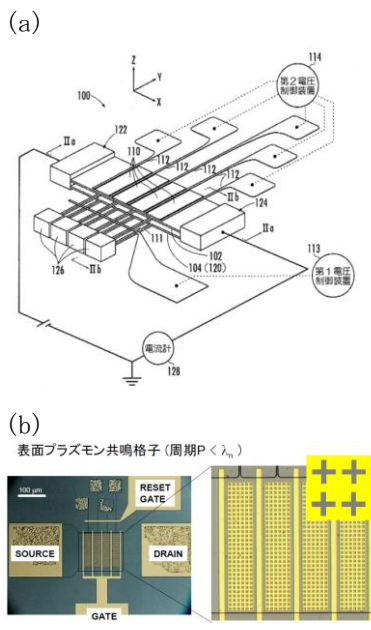


図1: CSIPの改善、(a)受光領域の分割、(b)表面プラズモン共鳴の金属格子による光吸収効率の向上。

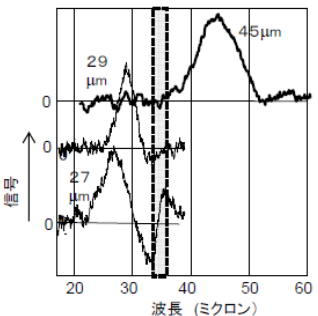


図2: 異なる GaAs 量子井戸幅の CSIP (左から 16,17, 20nm) による光信号励起スペクトル。灰色領域は Reststrahlen 帯。

[ 散乱型 THz近接場挿引顕微鏡 ]

昨年度構築した CSIP(波長 15 $\mu$ m)を搭載した走査型共焦点顕微鏡<sup>2)</sup>と金属探針(タングステン)をもつ AFM 制御システムを組み合わせることによって、図3に示すように超高感度の散乱型 THz 近接場挿引顕微鏡を実現した。<sup>7)</sup> 近接場光を散乱する金属深針はタングステン線を電解研磨(先端径約 100nm)して作成し、それを小型のチューニングフォークに取り付けてナノメートル精度で AFM 制御した。

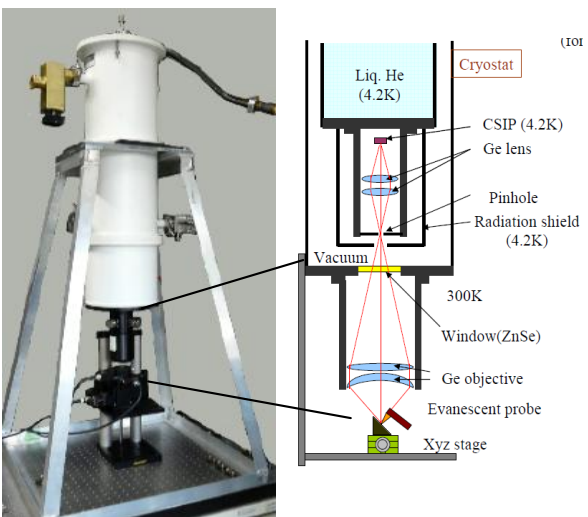


図3: CSIP 搭載の非開口式近接場顕微鏡

今年度中盤(10月)に上記の系を実現した当初は、1画素(1 ステップ)ごとの測定に 10 秒ほどを要したが、その後測定型の改良(CSIP 検出器の選択、探針・試料面・顕微鏡光軸の相対角度の最適化、および制御系の改善)によって S/N 比 4 倍ほど改善し、1画素の測定所要時間を 0.3 秒まで短縮して観察のスループットを大幅に向上した。図4は、改良後の顕微鏡によって、GaAs 基板上の金ストライプ(図4(a))を観察した結果である。

試料温度は室温で、その他外部からの照射光は当てていない。図 4(b)は 35 ミクロン角の大面積の領域の近接場光による 2 次元画像である。(1画素あたり 0.3 秒。全挿引時間 5 時間) 図 4(c)は金ストライプを横切って直線状に挿引して得られる近接場光の強度変化である。(1画素 1 秒。挿引時間 3 分 20 秒。)図4(d)は同一直線状の AFMトポ信号である。図4(b),(c)ともに、3 $\mu\text{m}$  ピッチの金ストライプが鮮明に識別できる。ステップ構造の鋭さ(幅)から、ほぼ 150nm(波長の 100 分の 1)の分解能が実現していることが分かる。

近接場光は金からの信号が GaAs に比べて2倍程度大きい(図 4(c))。これは、金中の伝導電子の熱運動によって表面プラズモンが励起され、そのプラズモンによるエヴァネセント波が探針によって散乱されて近接場信号が得られることを示唆する。さらに、図4(e)は、(i)近接場信号が試料表面から距離約 100nm 離れると完全に消失すること、および(ii)それ以上離れた

領域では、近接場と無関係な伝搬波の反射による定在波(半波長周期)が現れることを明確に示す。これら図4の測定結果は、全てが表面プラズモンによる近接場として矛盾なく解釈できる。

長波長赤外-THz領域では、炭酸ガスレーザー(10.4 $\mu\text{m}$ )等の外部光を照射して近接場を強制的に発生させるActive計測法が以前から行われている。しかし、照射光無しに、室温の熱エネルギーによるエヴァネセント波を検出する本研究のようなPassive計測は、従来のActive計測に比して1万分の1以下の極微弱光を検出する必要があるため、今まで報告例は無い。本研究では今までにない超高感度検出器(CSIP)を用いることにより、世界で始めてPassive計測可能なTHz近接場顕微鏡を実現できた。

過去の類似実験例として唯一、170Cに熱した金からの表面プラズモンによる近接場を測定したと主張する報告がある(Wilde et al., Nature 444,740(2006))が、空間分解能が数ミクロン程度あるように見え、また ”近接場信号”が試料から数ミクロンも隔たった領域まで検出されるとされている。これらの結果は、表面プラズ

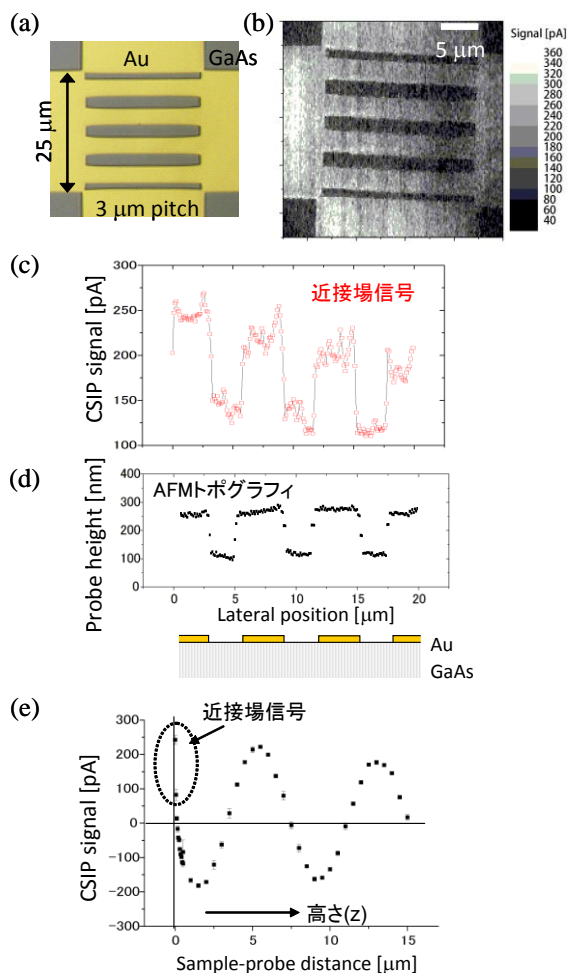


図 4 近接場 THz 顕微鏡像 (a)試料:GaAs 上金ストライプ (b)近接場画像 (c)GaAs と金の近接場高強度コントラスト (d)同時に計測されたトポ像 (e)金ストライプ上における、信号の高さ依存性

モンのエヴァネセント波として矛盾なく説明できる本研究の図4の結果とは明確に異なる。

今後この顕微鏡の真価が発揮される現象を捜したい。そのために、金属の表面プラズモンだけでなく、強誘電体や強磁性体、およびグラフェン等に観察対象を広げると共に、金属探針のSTM制御を試み、トンネル電流の注入によるテラヘルツ発光という新たな挑戦を試みたい。

## § 4. 成果発表等

### (4-1) 原著論文発表

#### ● 論文詳細情報

1. P. Nickels, T.Ueda, Z. An and S. Komiyama, "Improving the CSIP Performance", *Infrared Physics & Technology* 52, 439-441, 2009 [DOI: 10.1016/j.infrared.2009.05.029]
2. Y. Kajihara, S. Komiyama, P. Nickels and T. Ueda "A passive long-wavelength infrared microscope with a highly sensitive phototransistor" *Rev. Sci. Instrum.* 80, 063702(4pp), 2009 [DOI: 10.1063/1.3152224]
3. Z.Wang, S.Komiyama, T. Ueda and N. Nagai "A Modified Scheme of Charge Sensitive Infrared Phototransistor" *Appl. Phys. Lett.* 95, 022112(3pp), 2009 [DOI: 10.1063/1.3173819]
4. Z. An, T. Ueda, S. Komiyama, K. Hirakawa, and X. Shen "Lithographic quantum dot for sensitive infrared photon detection" *Phys. Status Solidi*, 4, 936-939, 2009 [DOI 10.1002/pssc.200880658]
5. P. Nickels, S. Matsuda, T. Ueda, Z. An and S. Komiyama, "Metal hole arrays as a resonant photo-coupler for charge sensitive infrared phototransistors" *IEEE J. Quantum Electronics*, 46,384-390, 2010 [DOI: 10.1109/JQE.2009.2035822]
6. J. C. Chen, J. Zhang, C. C. Chi, T. Ueda, and S. Komiyama, "Temperature limitations of quantum Hall far-infrared photodetectors", *Jpn. J. Appl. Phys.* 49, 031201(3pp) 2010 [DOI: 10.1143/JJAP.49.031201]
7. Y. Kajihara, K.Kosaka and S. Komiyama, A sensitive near-field microscope for thermal radiation, *Rev. Sci. Instrum.* 81 033706 (4pages) 2010 [DOI:10.1063/1.3360826]
8. H. Hashiba, V. Antonov, L. Kulik, A. Tzalenchuk and S. Komiyama, "Sensing individual terahertz photons" *Nanotechnology*, 21, 165203 (5pp), 2010 [DOI:10.1088/0957-4484/21/16/165203]
9. K. Ikushima, D. Asaoka, S. Komiyama, T. Ueda, K. Hirakawa, Manipulating

terahertz photons on a quantum Hall effect device, *Physica E*42, 1034–1037 2010  
[DOI:10.1016/j.physe.2009.11.136]

10. Takeji Ueda, Zhenghua An, and Susumu Komiyama, Temperature dependence of novel single-photon detectors in the long-wavelength infrared range to be published in *Journal of infrared, millimeter, and terahertz waves*
11. Zhihai Wang, Susumu Komiyama, Takeji Ueda, Mikhail Patrashin, and Iwao Hosako, “Charge Sensitive Infrared Phototransistor for 45  $\mu\text{m}$  Wavelength”, to be published in *Journal of Applied Physics*

**(4-2) 知財出願**

- ① 平成 21 年度特許出願件数(国内 2 件)
- ② CREST 研究期間累積件数(国内 2 件)