

戦略的創造研究推進事業 CREST
研究領域「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」
研究課題「半導体量子構造の探索とテラヘルツ波
計測技術開拓」

研究終了報告書

研究期間 平成18年10月～平成24年3月

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)

§ 1 研究実施の概要

(1) 実施概要

超高感度と使用の簡便さを備え、広範な応用に適するテラヘルツ(THz) 検出器を開拓することを第一の目標とし、開発した検出器を用いて超高感度かつ超高分解能の Passive な THz 近接場顕微鏡を開拓することを第二の目標とした。全ての研究は「小宮山」グループが中心に進めたが、各グループの寄与は最後に記す。

検出器の開発 高純度 GaAs/AlGaAs2重量子井戸結晶を利用して、増幅作用を内包する新たな機構の電荷敏感型赤外検出器(CSIP: Charge Sensitive Infrared Phototransistor)を構築した。つまり、14~16 μm の波長領域の単一光子検出を初めて実現し、さらに動作方法・入射光と電子との結合方法・素子構造、および励起光の入射方法の最適化を進めて感度を20 倍程改善した。液体ヘリウム温度以上($<23\text{K}$)で動作し、従来の検出器に比べて1000 倍程度の感度を有する。感度が桁違いに大きいだけでなく、単位入射光強度に対する信号電流(Responsibility)が大きいために検出器信号の取り扱いが簡便である。かつ検出可能な光強度のダイナミック・レンジが極めて広いために応用上多くの利点を有する。研究では、異なる量子井戸結晶を設計して波長帯域の拡大した：短波長側に 12 μm まで拡大し、さらに長波長側は天文観測からの要請が強い 45 μm までの超高感度性を実証するとともに 100 μm 程度までの拡大可能性を示した。CSIP は上記した諸特性が優れるだけでなく、素子構造が単純で、出力電流が入射光の時間積分で得られるという利点がある。それは CMOS センサーに類似しておりアレー化に適する。本研究ではオーミック電極の歩留まり向上と2 層配線のリソグラフ技術開発により、20x20 画素のアレー素子の作成にも成功した。単一光子レベル感度の THz 検出素子のアレー化の例は今まで無く、本研究のアレー化のデモはブレイクスルー的意味を持つ。

以上のように、本研究は長波長赤外から THz にまたがる広い帯域(波長範囲 12—45 μm で実証、可能範囲 10–100 μm)に対して、従来型のあらゆる検出器を感度・使い勝手の双方の点ではるかにしのぐ画期的な検出器(CSIP)の開発に成功し、アレー化の可能性も示した。今後顕微鏡や天文への応用を含めて広範囲の応用が期待され、近い将来、長波長赤外・THz 領域における超高感度検出の様相に大きな変革をもたらす可能性が高い。

顕微鏡の開発 CSIP 検出器を利用して、従来の概念とは異なる新しいタイプの THz 顕微鏡を構築した。現在まで、可視から赤外域の多種多様な光学顕微鏡が開発されているが、それらは全て外部光源で試料を照射し、試料からの反射光、透過光、散乱光、蛍光などを観察する点では共通している。このように、従来型顕微鏡は試料に刺激を与え、それに対する応答を調べる Active 計測であり、観察対象の同定や構造を決定する上では絶大な威力を発揮する。しかし、物質中のマイクロな現象をあるがままの姿で知るためには必ずしも有効な手法ではない。すなわち、物質中の全ての現象は、行き着くところ電子やイオンコアのマイクロな運動の組み合わせであり、そのスペクトルのほとんどは THz 領域にある。そのためあらゆる物質は、多彩な現象に伴う電子やイオンコアのマイクロな運動の特徴をテラヘルツ電磁波に刻印し、表面近傍にエバネセント波として発信しているはずである。それを検出すれば、物質中のマイクロな現象を、あるがままの姿で検知することができるだろう。しかし、従来型顕微鏡のように外部光照射に対する応答を調べたのでは、物質の現象自体が作り出している電磁波の情報を拾い出すことができないからである。

本研究では、物質中の現象の一部として生成する極微弱な THz 波を検出する新たな顕微鏡を開発した。そのために、外部光を一切照射せず(Passive 計測)、物質が自ら作る THz 領域の極微電磁波を検出する。しかも、波長より圧倒的に小さな領域(分解能 $<$ 波長/100)を検知する超高分解能で検出する。それは、大きな領域では、結局、プランク輻射と物質の放射率(emissivity)という良く知られたマクロ量を測ることに帰着してしまうからである。このように、超高感度性と超高分解能性に対する厳しい要求に伴う技術的困難から、従来そのような顕微鏡は存在しなかった。本研究では、①超高感度を CSIP を用いることで達成し、②超高分解能を

AFM 制御した金属短針による近接場技術と短針の 2 重変調技術により実現して、上記の、試料自体が生ずる極めて微弱な THz 光を検出する顕微鏡を世界ではじめて実現した。顕微鏡は Passive な散乱型の THz 近接場顕微鏡(s-SNOM; scattering-type Scanning Near-Field Optical Microscope)であり、従来の Active な THz 顕微鏡に比して千倍以上の感度をもち、さらに超高空間分解能(60nm \approx 波長/250)を達成した。

最も単純な応用例として、研究では開発した顕微鏡を常温近傍で熱平衡にある金属と誘電体という、最も単純な系と、電流存在下の微細金属リードという、良く素性の判った対象に応用した。対象が単純な系であるにもかかわらず、検出された物理量は新しく有用な知見がえられた。すなわち、試料表面に強く局在する強力な熱励起のエバネセント波の存在が見出された。このエバネセント波がプランク輻射と異なるのは勿論、良く知られる表面プラズモンや表面(フォノン)ポラリトンとも全く異なり、電子やイオンの熱運動に伴って生成する電荷揺らぎが試料表面に作る、きわめて相関長の短い電磁波であり、世界で初めて本研究で見出されたものである。本研究ではさらに、微小金属リードに微小電流を流し、電流分布による電子系揺らぎのナノメートルの空間パターンをイメージングすることに成功し、ナノサーモメトリーへの応用可能性を実証した。本研究で観察した金属・誘電体に限らず、あらゆる物質は分極を通して内部のマイクロな運動の情報を表面の THz エバネセント波に刻印して発信しているはずである。

本研究では、顕微鏡開発を通してあらゆる物質の現象を探求するための、質的に新しい計測手段を提供した。今後、さまざまな対象の新たな現象探求のためにこの顕微鏡の手法が適用されることが期待される。

以下に各グループの寄与を記す。「平川」グループは高純度 GaAs/AlGaAs 系ヘテロ構造結晶を得るために、分子線エピタキシー装置(MBE)の維持と結晶成長、ヘテロ構造の設計、および SIMS による結晶評価を分担した。さらに、テラヘルツ波帯のフォトニック結晶作成により、光と電子の結合効率改善の可能性を示唆すると共に、自己組織化 InAs 量子ドット(共鳴トンネルダイオード)による新たな高感度テラヘルツ検出器の可能性を示した。「生嶋」グループは低温試料を対象にしたフォトンカウンティング計測とオンチップ近接場光検出を通して、本研究の近接場光学技術の開発に基礎的指針を与えると同時に、従来型の検出器(MCT)を用いて THz 顕微鏡を試作して本研究の THz 顕微鏡との比較を可能にした。「An」グループは、半導体面上の金属メッシュのプラズモン共鳴、および面に垂直方向のキャパシタ効果を取り入れたシミュレーションを行った。これは、「小宮山」グループが行ったシミュレーションの発展形であり、CSIP の量子効率のさらなる改善に指針を与えた。

(2) 顕著な成果

1. T. Ueda and S. Komiyama “Charge-sensitive Infrared Phototransistors: Single-photon Detectors in the Long-Wavelength Infrared” Sensors & Transducers Journal, 10, Special Issue, 60-70, 2011.

概要: 増幅機構を内蔵する機構を導入して新たな THz 検出器(CSIP)を構築し、世界で初めて波長 14~16 μm に対して液体ヘリウム温度以上($<23\text{K}$)での単一光子検出を実現した。従来の検出器に比べて 1000 倍程度の感度を持つとともに、CMOS センサーに似た特徴を有し、使い勝手が良いために多方面への応用が期待できる。

2. T.Ueda, Y.Soh, N. Nagai, S. Komiyama, and H. Kubota “Charge-Sensitive Infrared Phototransistors Developed in a Wavelength Range of 10-50 μm ” Japn.J.Appl. Phys. Rapid Communication 50, 020208, 2011.

概要: CSIP 検出器の開発は主に波長帯域 14~16 μm で行ってきたが、量子井戸結晶構造の設計と結晶成長を適正化することで、検出波長帯域を 12 μm ~45 μm に拡大した。顕微鏡によるスペクトロスコーピーや天文分野を含めて、より広範囲の応用可能性をもたらした。

3. Y. Kajihara, K.Kosaka and S. Komiyama “Thermally excited near-field radiation and far-field interference” Opt. Express, 19(8), 7695-7704, 2011.

概要： 超高感度の CSIP 検出器を利用して、外部光源による照射を用いず試料自体が表面近傍に発する微弱な THz 光を検出する散乱型の THz 近接場顕微鏡(s-SNOM)を世界で初めて構築した。さらに、開発したs-SNOM を金属と誘電体試料に適用し、表面に強く局在した熱励起エバネセント波の検出に初めて成功した。

§ 2. 研究構想

(1) 当初の研究構想

長波長赤外から遠赤外光にいたるテラヘルツ(THz)領域は、物質にとって多くの重要なスペクトルを含む分光領域であるにもかかわらず、従来、超高感度を有し、かつ簡便に使用できる検出器が存在しなかった。本研究の第一の目標は、簡便性を備えつつ、従来の検出器を遥かにしのぐ超高感度を持つ検出器を開拓することで、テラヘルツ領域での応用に適した検出器を提供することである。第二の目標は、開発する超高感度検出器の応用の一つとして、超高感度かつ波長以下の空間分解能を有する専用のテラヘルツ顕微鏡を構築することである。それらを合わせて、テラヘルツ領域に於ける強力な計測手段として、試料を外部光源で照射せず、試料自らが発するテラヘルツ光を検知する Passive 計測法を創出することを意図する。

第一の目標に関して、研究代表者らは本研究以前に、既に半導体量子ドットと単電子トランジスターを組み合わせた量子ドット検出器を開発し、テラヘルツ光子のフォトンカウンティングを実現し、従来検出器の約 1 万倍の高感度を実現していた。しかし検出器の動作に超低温 (<0.4K) を必要し、かつ素子の作成と取り扱いに相当程度の技術を要することから、広範な応用には必ずしも適しなかった。そこで本研究では、4.2K 以上の温度で動作し、素子構造が単純で作成・取扱いともに簡便で、アレー化にも適する、応用に適した超高感度検出器の開発を目指した。そのために、III-V 族半導体の 2 重量子井戸構造を用いて、増幅機能を内蔵する単純だが新しい検出機構を構想した。つまり、量子井戸の一方にテラヘルツ光を吸収させて帯電させ、その効果を他方の量子井戸の伝導度変化として読み取ることで入射テラヘルツ光を検出する。本研究の検出器は、従ってテラヘルツ光に敏感な浮遊ゲートを持つ電界効果トランジスターに対応するので、現在は Charge Sensitive Infrared Phototransistor (CSIP) と呼んでいる。本研究では、そのような検出器 (CSIP) をテラヘルツの広い帯域 (8 μm -100 μm) にわたって実現し、かつ、20x20 画素程度のアレー素子を作成することを目指した。

第二の目標は、開発した超高感度検出器を用いて、従来とは異なる概念の、物質内部の現象を直接知ることのできるテラヘルツ顕微鏡を構築することである。そのために外部からの光照射を行わない Passive 計測で波長以下の分解能を実現する必要がある。波長以下の分解能をもつ THz 近接場顕微鏡として、従来、外部の THz 光源によって試料を照射して散乱を観察する、Active 顕微鏡の研究が少数存在した。しかし、検出器の感度不足と、環境の背景輻射から極微弱な信号を分離する技術的困難性のために Passive 計測の近接場顕微鏡は存在しなかった。本研究では、低温試料を対象にしたフォトンカウンティング顕微鏡技術と近接場光学技術を基礎に、CSIP 検出器の利点を応用して、常温試料が自ら発するテラヘルツ光を検知する Passive THz 近接場顕微鏡を実現し、物質研究に新たな計測手法を提供することを目指した。

(2) 新たに追加・修正など変更した研究構想

研究進行に応じて天文分野の研究者と交流し、波長 30 μm -60 μm の帯域で特に高感度検出器が求められていることを知った。そこで、当初予定した波長 600 μm の CSIP 検出器の開発に代えて 30 μm -60 μm の帯域を目指した。

§3 研究実施体制

(1)「小宮山」グループ

①研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
小宮山 進	東京大学大学院 総合文化研究科	教授	H18.10～
生島 健司	東京大学大学院 総合文化研究科	助教	H18.10～ H20.2 (H20.2より農 工大准教授 着任)
中島 峻	東京大学大学院 総合文化研究科	助教	H19.4～
上田 剛慈	東京大学大学院 総合文化研究科	特任研究員	H19.4～ H23.5
AN Zhenghua	東京大学大学院 総合文化研究科	特任研究員	H19.4(H19.5 より Fudan University 准 教授着任)
綿貫 丈雄	東京大学大学院 総合文化研究科	特任研究員	H19.4～ H20.3
梶原 優介	東京大学大学院 総合文化研究科	特任研究員	H19.10～
WANG Zhihai (王 志海)	東京大学大学院 総合文化研究科	特任研究員	H19.10～ H22.3
Patrick NICKELS	東京大学大学院 総合文化研究科	特任研究員	H19.9～ H22.3
KANG Ting Ting	東京大学大学院 総合文化研究科	特任研究員	H21.12～ H23.9
高木 久美 子	東京大学大学院 総合文化研究科	学術支援専門 職員	H19.4～
佐藤 崇	派遣 (テンプスタッフ)	技術員(派遣)	H21.12～
宗 勇樹	熊本大学 大学院自然科学研究科	博士課程院生	H22.4～
林 冠廷	国立清華大学 物理学科	博士課程院生	H23.9～
樋田 啓	東京大学大学院 総合文化研究科	博士課程院生	H20.4～
小坂 圭史	東京大学大学院 総合文化研究科	修士課程院生	H21.4～ H23.3
松田 慎平	東京大学大学院 総合文化研究科	修士課程院生	H21.4～
朝岡 大介	東京大学大学院 総合文化研究科	修士課程院生	H20.4～ H21.3

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

氏名	所属	役職	参加時期
平川 一彦	東京大学生産技術研究所	教授	H18.10～
長井 奈緒美	東京大学生産技術研究所	特任研究員	H19. ～ H23.9

②研究項目 結晶成長

(3)「生嶋」グループ①研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
生嶋 健司	東京農工大 工学研究科	准教授	H20.4 ～ (H18.10 ～ H20.3 小宮山 G として参加)
宮本 陽介	東京農工大 工学研究科	博士課程院生	H23.4～

②研究項目 THz光の近接場制御

(4)「An」グループ

①研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
AN Zhenghua	Fudan University, Institute of Advanced Materials (中国)	准教授	H20.10～ (研究員として H19.4 小宮山 G 所属)

②研究項目 検出器の開拓

§ 4 研究実施内容及び成果

4. 1 テラヘルツ検出器と顕微鏡の開拓 (東京大学総合文化研究科 小宮山グループ)

(1)研究実施内容及び成果

第1に III-V 族系半導体の 2 重量子井戸結晶を用いて、新たな検出機構により超高感度のテラヘルツ検出器—電荷敏感型赤外光トランジスター; CSIP (Charge Sensitive Infrared Phototransistor)—を開発した。第2に、CSIP を用いて専用のテラヘルツ近接場顕微鏡を構築した。第3に、近接場顕微鏡で常温の金属と誘電体を観察し、表面に熱的に励起されたエバネセント波を実験的に初めて検出した。以下で、①検出器開発、②パッシブ顕微鏡開発、に項目を分けて記す。

① 検出器開発

原理・基本動作 図1(a)に示す 100nm 程隔たった2重量子井戸構造において、図1(b)のように表面側の量子井戸からメサエッチングとクロスゲートによって孤立領域を作る。入射赤外光がこの孤立した量子井戸中の電子に吸収されて電子がサブバンド間励起(基底状態→第一励起状態)されると、励起電子は直ちにトンネル障壁を通して下層の量子井戸(ソース・ドレイン間の伝導チャンネルを形成する)に脱出する。そのため電子を失った孤立量子井戸は正に帯電(+ΔQ)するが、そのことで静電容量結合している下層の量子井戸が負に帯電(-ΔQ)して電子濃度が増えるために、2次元伝導チャンネルの伝導度が増大する。このように、ソース・ドレイン電流の増大で THz光を検知する。この素子は、光によって敏感に帯電する浮遊ゲートを持つ電解効果トランジスターと見なせるので、CSIP (Charge

Sensitive Infrared Phototransistor)と呼ぶ。この機構では、励起寿命が長いために光入射の継続とともに帯電効果が蓄積してついに飽和する。検出器として用いるために、図1(b)に示すリセットゲート(RG)に正の電圧パルス(+0.4V, 幅 0.1~1 μ sec)印加し、孤立量子井戸を中性化し、CMOS センサーと類似のリセット動作させることで、優れた特性を得ることができることを見出した(図 2)。⁵⁽¹⁾⁻⁵

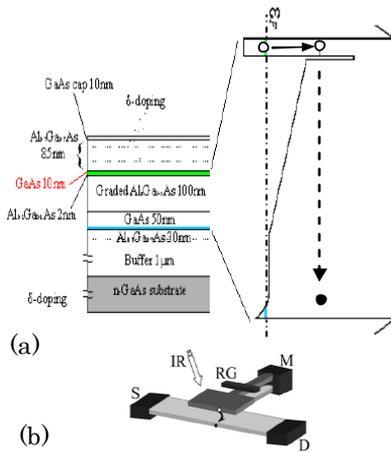


図 1. 検出器(CSIP)概念図 (a)表面側量子井戸の励起電子が下側へトンネル脱出。(b)素子構造: 表面側量子井戸が浮遊ゲートとして働き、電子のトンネル脱出による下側の電子チャンネルの伝導度増大が信号となる。

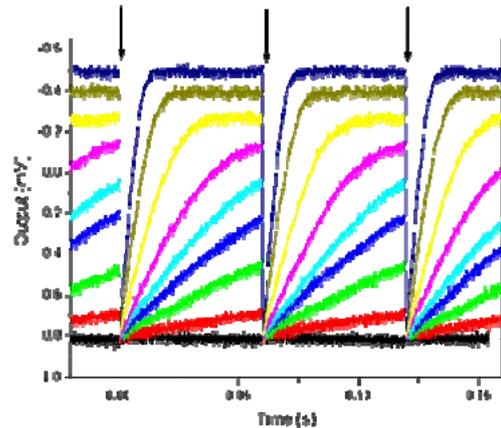


図 2. 検出器(CSIP)のリセット動作。⁵⁽¹⁾⁻⁵入射光強度に比例して電流の増大速度が決まる。リセットパルス印加(図の矢印位置)して用いる。

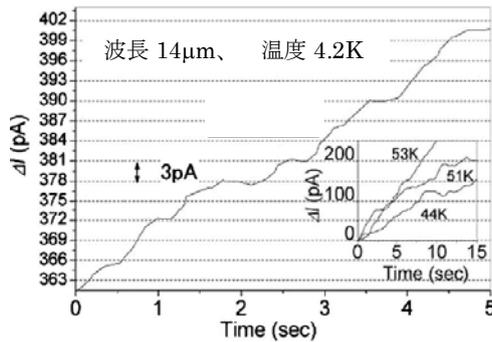


図 3. 単一光子検出感度を示す、ステップ的電流増大 (3pA)。⁵⁽¹⁾⁻⁷

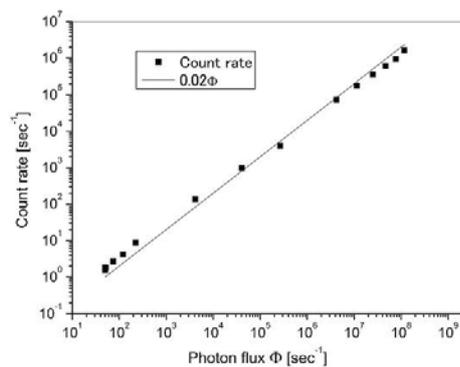


図 4. 応答のダイナミックレンジ ⁵⁽¹⁾⁻⁷

フォトンカウンティングと検出のダイナミックレンジ 超高感度の CSIP の開発のためには信頼できる特性評価が重要だが、そのためには、300K 黒体輻射を完全に遮断した状態で計測を行う必要があった。そこで、GaAs 結晶の選択エッチングにより回折格子を自作し、光源・反射鏡・レンズ・回折格子のすべてを検出器と同じ液体ヘリウム温度に冷却して用いる分光系を作成することから始めた。この計測によって、トランジスタの大きな増幅作用（光伝導利得）のために、単位の入射光によって生ずる光電流の値（Current Responsivity）が $R_{\text{current}}=10^4\sim 10^6\text{A/W}$ に達すること。また、微弱光に対しては単一光子感度を持つ（図 3）一方で、光強度に応じてリセットパルスの間隔を調節することにより、入射光強度の極めて広い範囲に対して応答の線形性を保つことができ、計測のダイナミックレンジが 10^6 以上（図4）に達するという、非常に飛びぬけて優れた特性を明らかにした。⁵⁽¹⁾⁻⁷ さらに、従来検出器（Si:As IBI）の 5 倍以上の感度 ($D^*=5\times 10^{14}\sim 1,2\times 10^{15}\text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$ @4.2K) があることを明らかにした。⁵⁽¹⁾⁻⁷ ただし、量子効率の研究段階の初期には 1~2%と、従来検出器よりも低い値であった。このことについては後で記す。

動作温度範囲 検出器の応用を考える上で、動作温度範囲がきわめて重要である。波長 $15\mu\text{m}$ の CSIP が図5に示すように、 $T=23\text{K}$ 程度まで感度の低下をきたすことなく動作可能であることがわかった。⁵⁽¹⁾⁻¹¹ $T>23\text{K}$ で信号が急速に減少する機構は、検出器特性の詳細な温度依存性の解析から、図6に示すように、励起過程とは逆の、熱励起された電子が下側の 2 次元チャンネルから上側の孤立した量子井戸に飛び込むことで正電荷の再結合が急速に進行することが原因と判断された。⁵⁽¹⁾⁻¹¹ これは、動作温度の上限が検出する光子エネルギー $h\nu$ にほぼ比例する — 熱エネルギーが $h\nu$ の約 $1/40$ に達すると感度がほぼ消失する — ことを示唆する。ごく荒っぽく考えて他に阻害要因がない場合は、 $T=4.2\text{K}$ (または $T=2\text{K}$) では最大波長 $80\mu\text{m}$ (または $160\mu\text{m}$) まで CSIP を実現できることを意味する。

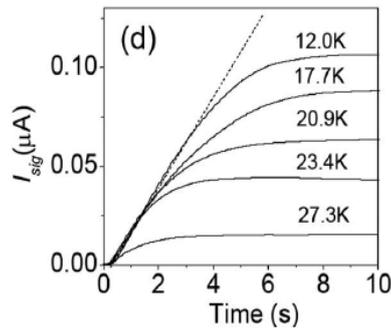
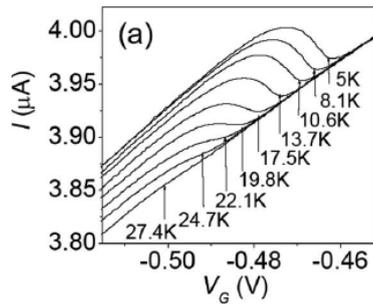


図5. 信号の温度依存性⁵⁽¹⁾⁻¹¹²

- (a) ゲート電圧に対する応答
- (b) リセットパルス後の電流増大

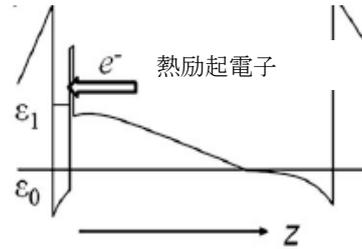


図6. 温度上昇に伴う熱励起電子の再結合

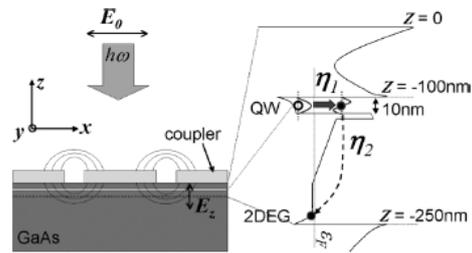
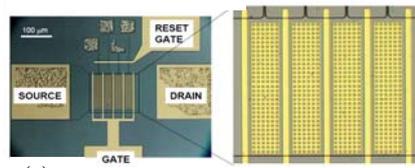
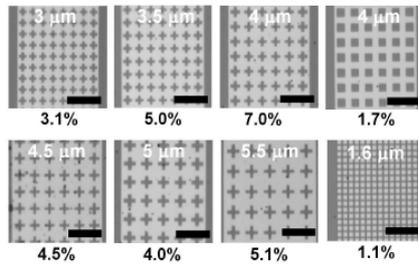


図7. 金属カップラーが垂直電場成分(E_z)を作ってサブバンド間励起を生ずる。

感度の向上 CSIP の感度を以下の方策によってさらに向上させた。まず、量子効率 η を改善した。CSIP は量子井戸中の 2 次元サブバンド間励起によって信号を得るため、図7に示すように、量子井戸面内に垂直方向の電場成分を必要とする。ところが、素子面に垂直に入射する光は、量子井戸面に平行な電場成分しか持たないため、入射光と量子井戸中の電子の運動を結びつける特別の光結合器を必要とする。その際、多数の量子井戸が光を吸収する従来の QWIP (Quantum Well Infrared Photodiode) などとは異なり、ひとつの量子井戸だけが吸収する CSIP では、その垂直方向の電場成分を増強する工夫が特に重要になる。本研究では当初、n 型導電性 GaAs 基板上に成長した GaAs/AlGaAs 結晶を用いることによって、表面側量子井戸の上に金属パッチを配し、マイクロストリップアンテナ(通称パッチアンテナ)を形成することで結合を得ていたが、量子効率は2%以下だった。より以上の効率を目指すため、図7および図8に示すように、金属の2次元格子を結晶表面に蒸着し、格子周期 p を光の波長と特定の関係にすることで、金属表面に表面プラズモンを励起して強い結合を得た。⁵⁽¹⁾⁻¹⁸ 格子の窓の形として、図8の下半分に示すように、正方形、十字形、さらに正方金属パッチの格子、および、市松模様の格子(図には示さず)を試し、あわせてFDTD法によるシミュレーションもおこなった。波長14.5ミクロン(GaAs中の波長は4.3ミクロン)に対して格子の周期 p を2ミクロンから5.5ミクロンに変化させると、図9に示すように、 p がほぼ GaAs 中の波長に等しい($p=4.5$ ミクロン)ところで最大の E_z 成分を与える。十字窓のほうが正方窓より E_z 成分が大きいことがわかる。図9の E_z の値からサブバンド間の遷移確率を計算して量子効率の理論予想値示すのが図10であり、7%(十字窓)程度が予想される。図10に示す実測値もほぼ7%をしめしており、量子効率は従来の4倍程度となり感度も同一の因子で向上した($D \approx 5 \times 10^{15} \text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$ @4.2K)と考えられる。(この改善に関して特許申請を行った:9①②-2。)



(a)



(b)

図8. (a)左: CSIPの顕微鏡写真)、右: 入射光の結合のため金属格子を配した受光領域。(b) 周期と形状の異なる金属格子: 各図の下の数値 (%) は量子効率の実測値

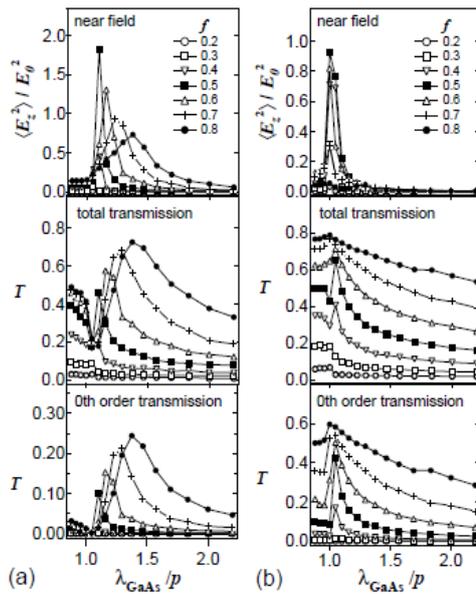


図9. 表面プラズモン金属格子のシミュレーション⁵⁽¹⁾⁻¹⁸ (a) 十字窓、(b) 正方窓。上から、近接場の E_z 成分、全透過率、ゼロ次回折(直進)の透過率

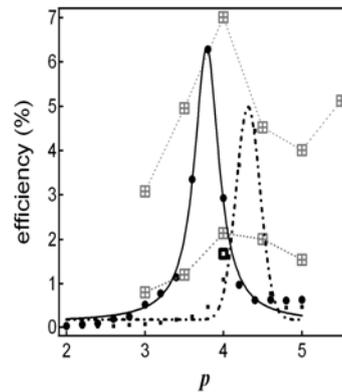


図10. 結晶A, Bに対する十字窓格子による量子効率の実験値(十字四角)の格子周期 p 依存性。実線(●)はシミュレーション。点線は正方窓に対する参考シミュレーション。⁵⁽¹⁾⁻¹⁸

さらに量子効率とは異なる改善を行った。当初、CSIPは図1(b)の概念図のように表面側の量子井戸による孤立領域を1個だけ持つ構造だった。この構造では、ソース・ドレイン間に入射光子エネルギーの数分の1程度($eV_{sd} \sim h\nu/4$)以上の電圧 V_{sd} を印加すると、信号電流が

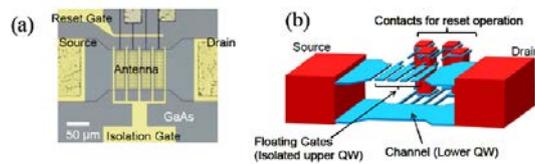


図 11. 複数のクロスゲート(IG)による上側量子井戸の孤立領域分割。(a) 光学顕微鏡写真 (b)概念図

飽和するため、 $eV_{sd} < h\nu/4$ を満たす小さな電圧でしか駆動できないという制約があった。この制約を取り除くために、図 11(a),(b)で示すように、孤立領域を n 個(図 11 の素子では $n=4$)の直列区画に分割し、それぞれの区画を、 V_{sd} を n 等分した電圧にリセットする素子構造に変更した。このことにより、 n 倍大きな信号電流を得ることに成功した。(この改善についても特許申請を行った: 9①②-1。)

このことで、量子効率が従来の 7%から約 14%に、また感度も $D^* \approx 1 \times 10^{16} \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ @4.2K 程度に向上したと考えられる。

波長域の拡大 CSIP の特徴を生かし、量子井戸幅の変化によって異なる波長の検出器を設計して実現した。本研究で主に開発してきた 15 ミクロンの短波長側として、まず 12 ミクロンの CSIP を実現した。ただし、8 ミクロンの素子は、幾つかの異なる結晶を成長して試みたが井戸中に電子層が形成しなかった。おそらく、狭い量子井戸幅に対して井戸界面の凸凹荒さが相対的に顕著となり、量子準位形成を妨げられると思われる。天文観測への応用を考える場合、短波長側は、軍需目的で開発された従来検出器の大規模(100 万画素超)アレーが存在するため、むしろアレー化が進んでいない長波長側が重要となる。特に、天文観測とともに顕微鏡応用にも重要な波長 25 ミクロンから 60 ミクロンにかけての波長領域にお

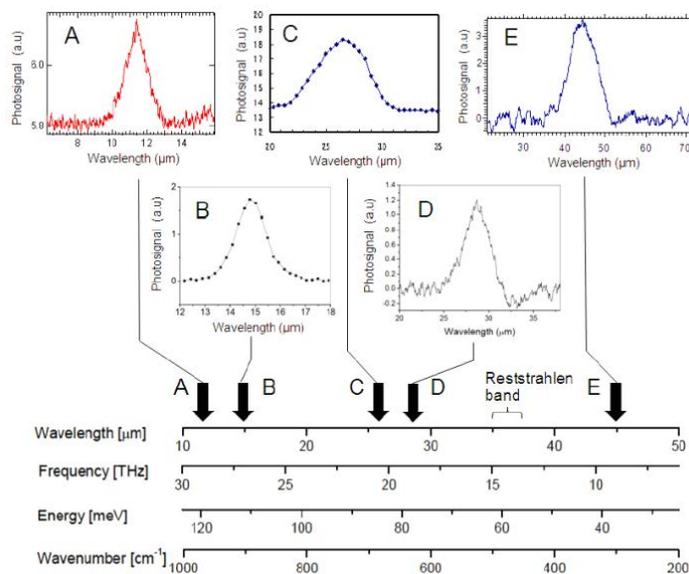


図12 CSIPの波長域拡大(12μm-45μm)。^{5(1)-,30}

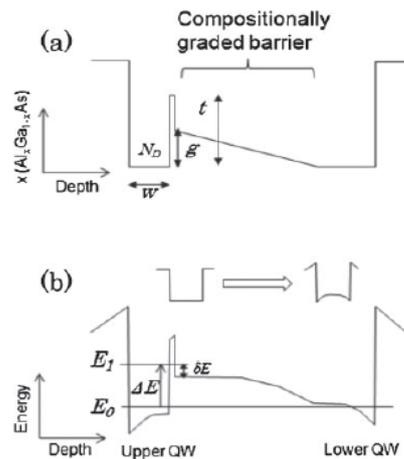


図13 (a)理想的なポテンシャル形状 (b)現実のポテンシャル形状。長波長になるに従い、励起電子のエネルギーが小さいために脱出過程が抑えられる。

いて、図12に示すように、(12ミクロン、15ミクロンに加えて)27ミクロン、29ミクロン、および45ミクロンのCSIP作成に成功した。^{5(1)-22,30}

検出感度に関して、最も波長の長い45ミクロンは他のCSIPに比べて低かったが、それは、AlGaAsに含まれる酸素欠陥に起因する深い電子トラップが、上下の量子井戸にはさまれたバリア層のポテンシャルを持ち上げ(図13(b))、下側の2次元電子層への電子の脱出を阻んでいるものと考えられる。そこで、酸素不純物が混入し難いInP/InGaAsP系の成長を行って素子の試作を行ったが、現在まだ試行の途中である。

これとは別に図14(a)に示すように、長波長域への拡大を念頭にした新たな機構によるCSIPを構想した。⁵⁽¹⁾⁻¹⁵つまり、励起電子が下側2次元電子層へ脱出(図1)するのではなく、クロスゲート(IG)によるポテンシャル障壁を通過して“横方向”の同一の量子井戸に脱出

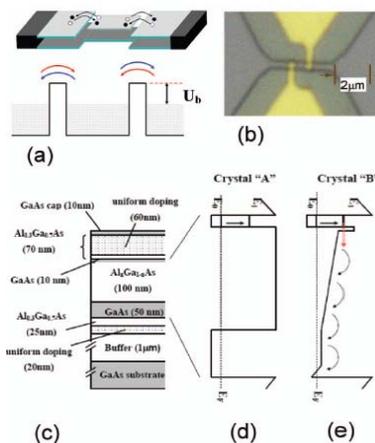


図14 長波長 (>40μm) 検出を念頭にした励起電子脱出機構(a)と量子井戸(b)およびヘテロ構造(c),(d)。⁵⁽¹⁾⁻¹⁵

する素子を作成して実験した(図14(b))。上側量子井戸と下側2次元電子系間のバリア層が図14(c),(d)のように高く、通常の脱出(図1)が起こらない結晶(A)を用いる。図14(b)のように、サブミクロンサイズのカrossゲート(IG)、および量子井戸の孤立領域をもち、入射光を金属格子(表面プラズモン)ではなく、IGと兼用するポータアンテナで結合する。波長14.5ミクロンと45ミクロンの井戸幅の結晶について、それぞれ信号を得た。波長14.5ミクロンについては、得られたが信号の感度は高くなかった⁵⁽¹⁾⁻¹⁵。

以上の知見は、今後CSIPのさらなる長波長域($h\nu < \hbar\omega_{LO}$ 、すなわち36.6ミクロン以上で150ミクロン程度に達する領域)への拡大が有望であることを示すものであり、CSIPが長波長域にさらにもう一段階発展する可能性を大きく開いた。

なお、GaAsの縦光学フォノン(33.6ミクロン)と横光学フォノン(36.6ミクロン)に挟まれたReststrahlen帯は誘電率の実部が負となって反射率が増大する。そのため、光との結合に困難が生ずることが予想されるが、多層のプラズモニック構造を考慮することで問題が解決する可能性を「An」グループのシミュレーションが示唆している(以下、4.4を参照)。

アレー素子 CSIP素子の回路図を図15(a)に示すように、CSIPはCMOSセンサーのソース・ドレイン、ゲート(IG)、リセットゲートの構成に類似しており、また出力信号がリセットパルス間の光の積分値に比例する点も共通である。さらに、素子構造が単純なために、CMOSセンサーと同様にアレー化に適する。一方、アレー化は天文応用にとって必須であるだけでなく、他のさまざまな応用のためにも重要と考えられる。本研究では、応用に適した超高性能の検出器を提供することを目指しているため、本格的な大規模アレー化は企業の参入を待つとしても、テラヘルツ技術のひとつのイノベーションのきっかけになることを意図して、14ミクロン素子の20x20画素のアレーを目指した。

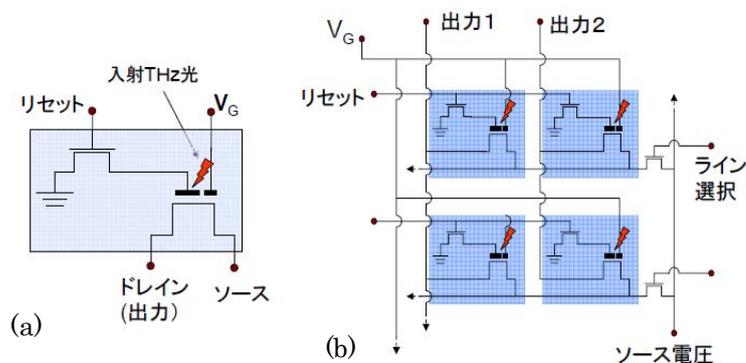


図15 (a)CSIP 単一素子の回路表記 (b)アレー化：ソース電圧とリセットバイアス電圧を選択する行にパルスで与えて、すべての列の(ドレイン)出力電流をいっせいに読み出す。

結晶の適否判定方法と信号不在の機構 CSIP 検出器の性能向上に直接は関わらないが、今後応用を拡大する上で基礎的に有用な知見が研究の最終期に得られた。CSIP には(i)結晶構造(2層の量子井戸と障壁層の厚みや原子組成)が設計どおりに形成され、(ii)下側の電子層が高い電子移動度を有すること、が必要条件である。ところが、通常の電気容量と伝導度の測定、およびSIMS(2次イオン質量分析)検査でこれら2条件が満たされるように見えながら、赤外光応答を一切示さない結晶が存在し、その判別に時間を要することがCSIP開発の速度を抑える面があった。この問題を解決するために、3個のカrossゲートを持つ素子による簡便な電気計測を考案し、それが能率的な結晶の判別に寄与し、かつ信号不在の原因について重要なヒントを与えることを示した。

同様な結果が、異なる波長帯域(20 μm 、45 μm)の結晶や、横方向への励起電子の脱出機構(図14)の結晶でも得られ、信号不在の結晶に共通の基本的特性と考えられる。また、

この特性は量子井戸の電子濃度や移動度と直接の相関は無いことが示唆された。これらの事実は研究の最終段階で判明したため、その知見を研究期間内に十分還元する時間的余裕はなかったが、今後の CSIP 開発のために極めて有用な情報が得られたと言える。

まとめ：成果の位置づけと類似研究との比較 図16で灰色楕円内の黒丸が本研究で実現した CSIP の感度であり、従来検出器に比して圧倒的な高性能を示す。長波長域に延びる点線の白い楕円領域には、今後さらに拡張が期待され、特に天文観測からの期待が高い。CSIP の感度(D*)は従来のよく知られた検出器に比較して 1000 倍程度高い。(現在の最高感度は、図には示されていない波長 15 ミクロン程度の Si:As BIB(Blocked

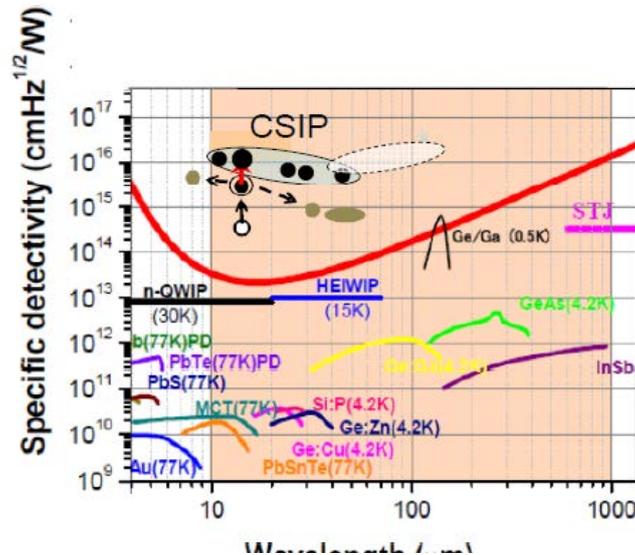


図 16. CSIP と従来型検出器の感度比較。CSIP 本研究での CSIP は黒丸。白丸と 2 重丸はそれぞれ研究開始時と中間報告時点での値。点線の白い楕円の領域は、今後拡張が期待される領域。

impurity band detector)と考えられ、それに比べると約 150 倍程度。)量子効率 $\eta \approx 14\%$ に達すると考えられる。高感度性だけでなく、Current Responsivity ($R_{\text{current}} = 10^5 \sim 10^8 \text{ A/W}$)が従来のあらゆる検出器に比べて1万倍から1千万倍大きく、かつ素子の出力インピーダンスが $0.3 \sim 2 \text{ k}\Omega$ と扱い易い値であるため、特別な低雑音前置増幅器やインピーダンス変換機を必要とせず、信号の取り扱いが極めて容易な利点がある。さらにダイナミックレンジが大きく ($> 10^6$)、単純な素子構造をもち、アレー化に適する。以上をまとめて、テラヘルツ領域における格段に優れた検出器であり、顕微鏡、天文観察を始め今後さまざまな分野に应用が広がると考えられる。以上のように、長波長赤外から THz にまたがる広い帯域で従来のあらゆる検出器を感度・使い勝手双方の点で共にはるかにしのぐ、画期的な検出器 CSIP の開発に成功したと言える。CSIP に最適な結晶の強力な判別方法とともに、結晶設計のより明確な指針が得られた現在、顕微鏡や天文への应用を含めて広範囲の应用が今後大いに期待される。近い将来、長波長赤外・THz 領域における超高感度検出の様相に大きな変革をもたらす可能性が高い。

② パッシブ顕微鏡開発

共焦点(幾何光学)顕微鏡 目標とする Passive 近接場顕微鏡の困難は、試料自身が作る THz 光が極めて微弱であることだけでなく、その微弱な近接場光が圧倒的に強い遠隔場の輻射(プランク輻射)に埋もれていることにある。従って、超高感度の CSIP 検出器に加えて、混入するプランク輻射を最小化すること、および混入した背景のプランク輻射から近接場光を選別する変調手段を必要とする。検出器に入射するプランク輻射は、試料からの成分と、レンズや窓材からの迷光成分の和である。研究では、双方を最小化するために、独自に設計した共焦点顕微鏡を自作した。⁵⁽¹⁾⁻¹⁴ 図17に示すように、CSIP(波長 $12\mu\text{m}\sim 16\mu\text{m}$)の置かれた 4.2K の空間は低温シールドで囲われており、ピンホールを通してのみ外の常温の世界とつながっている。室温の対物レンズ(Ge, $\text{NA}=0.6$)で集めた試料の光を常温の窓(ZnSe)を透過してピンホールに集光し、液体ヘリウム温度の検出器側レンズ(Ge)で CSIP に向け再集光する。このような共焦点系では、常温の対物 Ge レンズと ZnSe 窓材からのプランク輻射のうち、ピンホールを通過する限られた立体角成分だけが背景輻射の迷光となる。この迷光はピンホール径を絞ることで減らすことができ、また、幾何光学顕微鏡の分解能も向上することで、試料からのプランク輻射も減少する。本研究ではピンホール径 $\phi=125\mu\text{m}$ で分解能 $\delta=26\mu\text{m}$ を、さらに $\phi=62\mu\text{m}$ に絞ることで分解能 $\delta=16\mu\text{m}$ (ほぼ回折限界)となることを実測で確かめた。^{5(1)-14, 31} なお、試料からの光と、常温の Ge レンズ・ZnSe 窓材からの迷光の強さの比はほぼ $1:1$ である。⁵⁽¹⁾⁻¹⁴ 試料は XYZ ステージに乗せ、Z 軸の調節で焦点をあわせ、XY の挿引で 2 次元画像を得る。

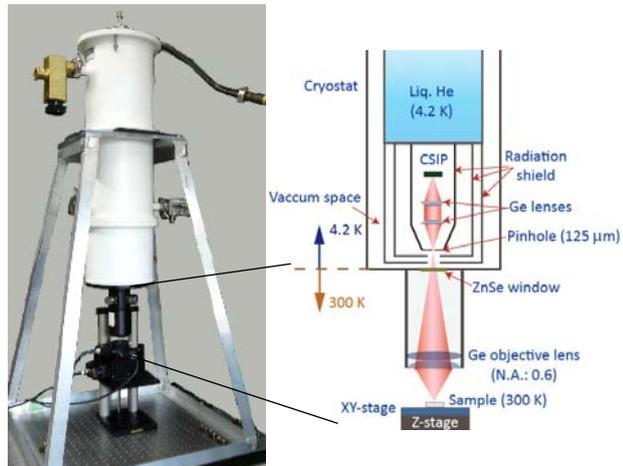


図17 .CSIP 搭載の走査型共焦点顕微鏡 (幾何光学)⁵⁽¹⁾⁻¹⁴

散乱型近接場顕微鏡(s-SNOM) 回折限界を越す分解能を実現するために、従来の Active 計測では 図18(a) のように、試料表面近傍に探針を置く散乱型近接場技術(s-SNOM)が知られている。外部光が探針を照射することで、光電場が針先の狭い領域に集中し、試料が局所的に励起されて散乱光をもたらす。本研究の Passive 計測はこのような Active 計測の仕組みとは異なる。図18(b)のように、試料を照射することなく、試料自身が持つ近接場を探針で散乱して伝播波に変換し、それを幾何光学顕微鏡に導いて検出する。ただし、技術的困難のために、このような Passive 計測が本研究以外で行われた例は無い。—— 数年前、計測に成功したとの報告(Y.De Bilde et.al., Nature 444,740(2006))があったが、それについては後に記す。—— 困難は、試料からの深針による散乱光が極めて弱いことに加え、それが、試料表面の広い範囲(幾何光学の焦点領域)からの、ずっと強いプランク輻射(自然放出と反射を含む)が出ており、それらが混じって検出器に到達することである。強度としては後者のほうが遥かに大きく、これが迷光に加わる。従って、極微弱な近接場の散乱光を選別することが本質的に重要である。本研究では以

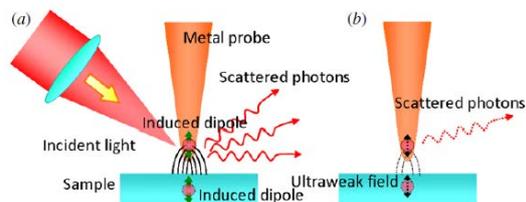


図18 (a) Active 計測は外部光を照射して散乱を調べる。(b) Passive 計測 試料自身が作る電磁波を調べる

下に記すように、探針を上下することで有効な選別に成功した。

電解研磨で作成した金属(W)深針をチューニングフォークに取り付けて AFM (32kHz シェアフォース) で制御し、共焦点顕微鏡(図17)の焦点位置に置く(図19)。近接場による信号の識別を可能にするために、AFM制御とは独立に、深針の高さ z (試料表面からの距離)を低周波(10Hz)で上下に(20nm から 500nm) 振動する。図18(b)に示すように、針先の最下点では試料表面の近接場を散乱するが、針先が高いと近接場の散乱波は消失または

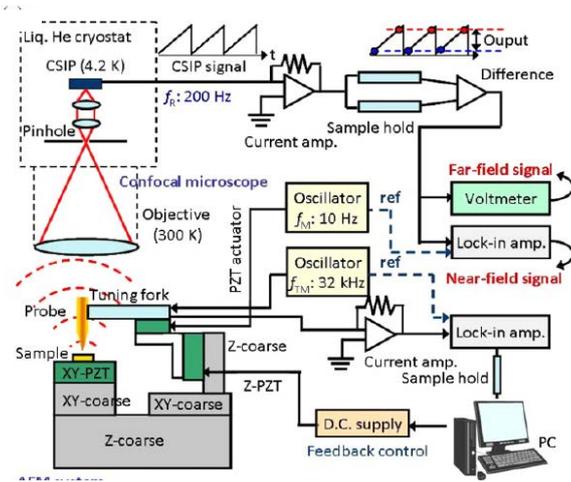


図19. Passive s-SNOM のブロックダイアグラム

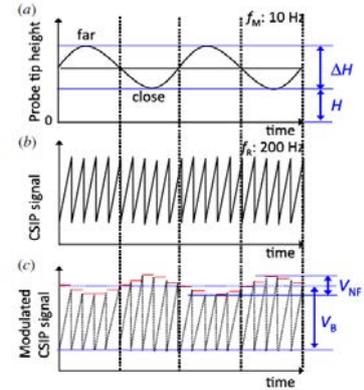


図20. (a)深針先端の高さ変調 ($h < z < h + \Delta h$, 10Hz) (b) 変調なしの時の CSIP の信号波形 (リセットパルス周波数 200Hz)。 (c)変調があるとき、信号波形は深針の高さと逆位相で変調される。

減少する。一方で試料表面からのプランク輻射は針の高さによって影響を受けない。従って、検出器信号の変調成分(図20(c): V_{NF})が近接場信号を与える。一方で、平均値(図20(c) : V_B)が背景のプランク輻射を与える。⁵⁽¹⁾⁻²⁴

構築したs-SNOMを用いて、誘電体結晶(GaAs, SiC, SiO₂)基板上に作成した数種類の金属膜試料(Au, Al, Ti)の近接場計測を試みて成功した。図21に SiC 基板上に作成した金薄膜のパターンの例を示す。図21(a)で示す常温試料からの THz 光画像が図21(b)である。図21(b)の左が遠隔場画像(プランク輻射、CSIP 信号の平均値: V_B)であり、右が近接場画像(CSIP 信号の変調成分: V_{NF})である。遠隔場の空間分解能は回折限界の 16 μ m程度であり、金の十字パターンは識別できるものの、3 ミクロンピッチのストライプ構造は見えない。しかし、近接場の画像では構造が鮮明に識別でき、SiO₂ と Au の近接場光強度のステップの急峻さから空間分解能として 60nm(波長の 250 分の 1)が導かれた。

以上のように、本研究の第 2 の目標である超高感度で超高分解能を有する Passive な THz 挿引近接場顕微鏡を構築することに成功した。ただし、この顕微鏡は「従来の計測法に比べて分解能が何倍か向上した」といった、単なる数値上の性能向上ではなく、観察される対象そのものが異なる、質的に新しい計測法であることが強調されるべきである。つまり、以下に記すように“質的に異なる輻射”が計測される。それが何か? 今後の応用を広げるために極めて重要である。

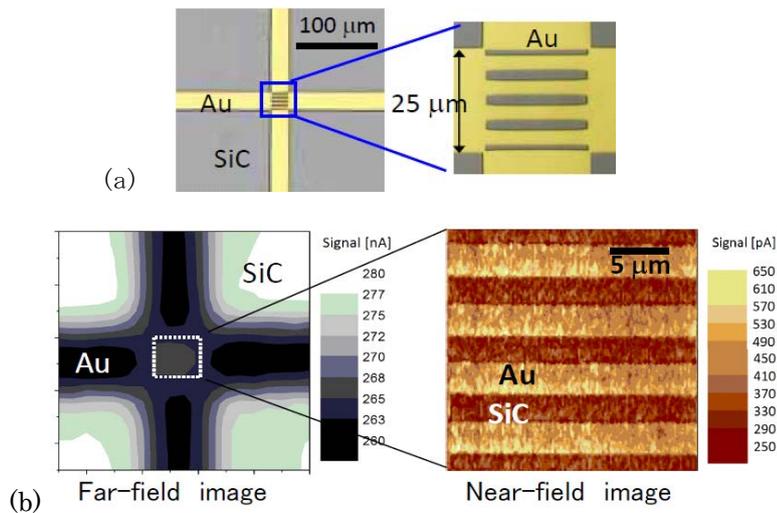


図21 SiC 基板上金パターンの(a)光学顕微鏡像と (b) Passive テラヘルツ画像 ($\lambda=14.5\mu\text{m}$ 、常温) 左:遠隔場 ($z \gg \text{波長}$) のプランク輻射、右:近接場 ($z \approx 80 \text{ nm}$) で観察されるエバネセント波⁵⁽¹⁾³¹

Passive s-SNOMで観察されるもの: 熱励起エバネセント波 図21(b)左の遠隔場信号(プランク輻射)の画像は、Emissivity の大きな SiC が Emissivity の小さな金より明るいことを示しており、当然の結果である。ところが、図21(b)右の近接場信号はコントラストが逆転しており、金の方が SiC よりずっと強い。この事実は近接場信号がプランク輻射とは素性の異なるものであることを示す。さらに、表面プラズモンの熱励起によるものでも無い。それは以下の結果からわかる。つまり、観察している THz 周波数($\lambda=14.5\mu\text{m}$)は金属のプラズマ共鳴周波数よりずっと小さため、表面プラズモンは物質面内を真空波長とほぼ同じ波長でコヒーレントに伝播し、かつ表面から外側の空間に波長以上に染み出す。ところが、近接場信号の画像には面内の干渉パターンは観測されない。(ここには示さないが、数 100nm から数十 μm の異なるサイズと形状の多数の金属試料の近接場 2 次元画像において、いかなる干渉パターンも観測されなかった。)さらに、近接場信号の強度($\lambda=14.5\mu\text{m}$)は物質表面から離れるに従って急激に減少し、わずかに波長の 0.6%(100nm)程度離れるだけで非常に小さくなる。従って、信号は表面プラズモンによるものではあり得ない。誘電体結晶(GaAs、SiC、SiO₂)の近接場光にも、金属に比べて強度は小さいが、同様な特徴が見出される:プランク輻射と無関係、かつ表面フォノンポラリトンでもない。散逸を持つあらゆる有限温度の物質は内部に電荷揺らぎを持つ。(金属では伝導電子の熱運動、誘電体ではイオン格子の熱運動に起因する。)この電荷揺らぎが、物質表面の極く近傍にきわめて強い電磁場のエバネセント波を生成することが理論的に予想される(K.Joulain et al., Surf. Sci. Rep. 57, 59, 2005)。金属の場合、表面近傍(<100nm)で電磁エネルギー密度が黒体輻射の 1 万倍以上に達する。このエバネセント波が近接場信号の原因である。今まで実験的に直接検出されたことが無い熱励起エバネセント波が、本研究で開発した s-SNOM ではじめて検出された。

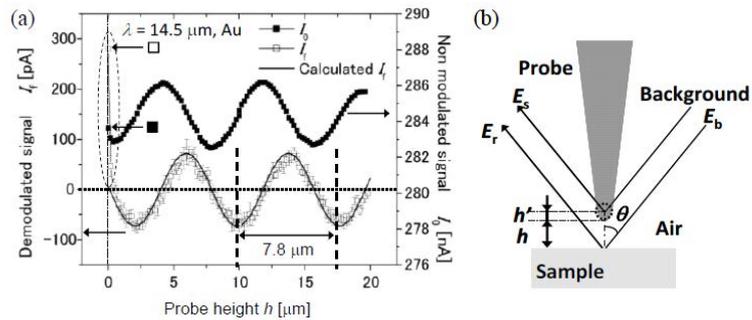


図22 (a)深針の試料表面からの距離、 $h = 20\mu\text{m}$ までの範囲で見られる定在波的干渉パターン。(b)近接場とは無関係。背景(プランク)輻射の針先と表面の間の干渉。⁵⁽¹⁾⁻³¹

深針と表面間の距離(h)を波長程度まで増大すると、図22(a)に示すように高さ方向に定在波的な干渉が現れることに注意する。図22(b)に示すように、この信号は外からの入射伝搬波の針先による散乱波と試料表面での反射波の干渉によるものであり、近接場とは無関係なので注意を要する。⁵⁽¹⁾⁻³¹ 数年前、加熱した試料による熱励起エバネセント波を観測したとする報告があった(Wilde et al. Nature,2006)が、実はエバネセント波ではなく、このような、針先と試料表面の間のプランク輻射の干渉である可能性が高い。伝導電子の熱運動は、金属表面に時間・空間的に変動する電荷揺らぎを生じ、その揺らぎが熱励起エバネセント波をもたらす。電荷揺らぎは相関長 ξ で特徴づけられ、真空波長以下のあらゆる値を持つ($\xi < \lambda$)が、直観的に理解できる重要な点は、相関長以内の表面近傍($h < \xi$)でのみ、 ξ の揺らぎによるエバネセント波が顕著に見出される事である。つまり、 ξ より離れた位置では、揺らぎ電荷による電磁場が互いに打ち消し合うので検知されない。表面から距離 h が増大するに伴って、エバネセント波の強度が急激に減衰するのはこのためであり、減衰長が揺らぎの相関長に関係する。

上記の直観的議論から、距離 $z=h$ におけるエバネセント波は、概ね $h < \xi < \lambda$ の範囲の揺らぎスペクトルを持つ。表面プラズモンによる極めて鋭い励起が真空波数位置に見られるが、積分強度は小さく、エバネセント波への寄与は無視できる。このことから、近接場信号に表面プラズモンによる面内干渉パターンが生じないのが当然である事が理解できる。

まとめ：成果の位置づけと類似研究との比較

照射光無しに、室温の熱励起エバネセント波を検出する Passive 計測は本研究が世界初である。従来の Active 計測に比して1万分の1以下の極微弱光を、背景輻射から分離して検出する技術的困難があったために今まで報告例が無かった。熱励起エバネセント波は、散逸を持つあらゆる物質が普遍的にもち、物質表面の物理的・化学的性質を決める上で大きな役割を果たすと考えられる。この熱励起エバネセント波が本研究で初めて計測可能になったことから、今後、物質表面の現象の理解が大きく進展することが期待される。今まで、Active 計測においては、コヒーレントな外部光を照射して近接場を励起する実験が行われていたが、そのような計測の場合は表面プラズモンが励起され、本研究のような相関長や表面からの減衰長が短いエバネセント波が観測されることは無い。過去の類似研究としては、170C に熱した金からの測定に関する報告が唯一存在する(Wilde et al., Nature 444,740(2006))。しかし、報告では表面プラズモンによる近接場を検出したとされるが、その“近接場”は試料表面から数ミクロン隔たった領域まで検出されているほか、空間分解能が数ミクロン程度にとどまっているように見える。また試料面内の干渉パターンが明確に観察される等、本研究の結果と大きく矛盾する観測結果が多数得られており、物理的に類似の

現象が観測されているとは考えにくい。エバネセント波として理論的に解釈することも不可能だけでなく、論文の主張のように表面プラズモンとしての解釈にも大きな矛盾を孕む。報告された輻射の諸特徴は、むしろ本研究が副次的に見出した“ブランク輻射の深針による干渉” (図22) による結果に酷似している事を指摘しておく。

本研究の観察は常温近傍で平衡状態にある金属 (および誘電体)、および電流励起された金属リード線、という比較的素性のわかった系を対象としたが、金属、誘電体に限らず、あらゆる物質は分極を通して内部のマイクロな運動(現象)の情報を表面の THz エバネセント波に直接刻印して発信しているはずであり、THz 表面エバネセント波の観察を通じた物質現象の研究という新しい手法が今後広がることが期待される。そのような研究の概念自体、まだ十分認知されていないが、本研究がその端緒となり、重要性への理解が深まることが望まれる。

(2)研究成果の今後期待される効果

CSIP 検出器について CSIP 検出器は、その使い勝手の良さから、今後その応用が確実に広がると思われる。その中で、高感度性が最大限に発揮されるのは、なんと言っても天文への応用と思われる。特に人工衛星への搭載がもし実現すれば大きな契機になるだろう。日本の次世代赤外線天文衛星として SPICA (Space Infrared Telescope for Cosmology and Astrophysics) が 2018 年の打ち上げを目指している。数年前から JAXA の研究者数名が CSIP に関心を持ち、SPICA 搭載の可能性を探っていた。SPICA のための検出器候補の絞込みの議論が、2 年前にヨーロッパで行われ、その場で、土井靖生氏 (東大総合文化研究科・JAXA) が CSIP を紹介され、^{5(3)②-12} 関係者の関心呼んだものの、「極めて有望だがアレーの実績が無い」ということで、残念ながら CSIP は最終候補には残らなかった。最終候補として選ばれたのは、波長 10~20 μm では Si:Sb による BIB (Blocked impurity band) 検出器であり、35~60 μm では超伝導 TES (Transition Edge Sensor) -- 別名、超伝導マイクロ・ボロメータ -- である。Si:Sb-BIB は古くから軍用に徹底的な開発が進んでおり、512x512 画素の完璧なアレー素子系が読み出し回路とともに完成している。そのため単一素子で 150 倍の感度を持つ CSIP 検出器といえども現状の単一素子では対抗できない。ただし、今後 CSIP で 512x512 画素以上のアレー動作が可能になれば、長波長赤外分光の世界に一大変革をもたらすだろう。そのために技術的問題は、既に成し遂げられた BIB (Blocked impurity band) 検出器のアレー化よりは単純なはずである。(ただし、組織的な取り組みが必要だろう。) 一方で、波長 35~60 μm の超伝導 TES の感度は 14 μm の CSIP に比べれば 100 分の 1 程度に過ぎず、アレー化も実現していない。しかし、各国 (ロシア・ヨーロッパ・アメリカ) の多くの研究グループが既に長年研究している安定感があることと、アレーの試みが既に始まっていることが評価されたと考えられる。(SPICA の目標として 35~60 μm では最終的に 43x43 画素を目指している。)

SPICA への搭載は当面なくなったが、天文へ CSIP の応用は SPICA 以外にも多く考えられる。現在、JAXA の研究グループと協力して波長 30~100 μm の単一素子の感度向上と。さらにアレー化の試みを行うことを計画している。さらに、16~28 μm の帯域を開発することで、Passive 顕微鏡の応用範囲の拡大とも連動させることも計画している。可視域を翻ってみるに、光電子増倍管やアバランシェダイオードなどの超高感度単一素子の時代が長く続いた後、CCD や CMOS センサーの出現でイメージングに革命的变化が生じた。長波長赤外・THz 領域においても、10~100 μm の広い波長域に CSIP 検出器のラインアップが今後揃い、さらにアレー化が実現すれば、超高感度検出の方法が大きく変貌し、今まで無かった新たな計測器の開発につながる可能性があるだろう。

Passive 顕微鏡について 本研究の顕微鏡開発は、既に存在する計測器の性能向上ではなく、今まで存在しなかった新概念の計測装置の創出であった。そのため、今後の発展の可能性の幅は広い。まず、物質の基礎的側面の理解への寄与が深まる可能性がある。物質中には熱エネルギー、電流によるエネルギー、ATP の加水分解のような化学エネルギー、機械的エネルギーなどの微小エネルギーによってさまざまな現象が起こっており、それぞれ特徴的な THz エバネセント波が表面近傍に生成しているはずである。本研究での観察対

象は、単純な金属や誘電体に限られたが、今後、固体・液体・無機物・有機物・生体を問わず応用が広がり、表面エバネセント波を通して物質現象を探る、新たな研究手法が定着することが期待される。また、物質の表面・界面は、物質の化学的・物理的性質を決める上で本質的に重要であり、物質の機能の多くは表面や界面を通して現れる。物質表面は THz エバネセント波で覆われているため、物質表面や界面の物理・化学的性質が THz エバネセント波による影響を受けている可能性が高い。逆に、THz エバネセント波の観測を通して、物質の表面・界面の性質を理解を深めることができるだろう。特に、物質の表面反応、触媒反応、親水・疎水性、表面分子の吸着、カシミール力などの表面力の性質のより深い理解とともに、それらの性質と物質内部のダイナミクスとの関連がより明確になるだろう。より具体的な例としては、誘電体の表面フォノンポラリトン共鳴近傍でのエバネセント波の様子が興味深い。また、THz エバネセント波が表面近傍の電子系の揺らぎを強く反映することから、表面を探索するユニークな計測法ともなる。単層膜のグラフェンやトポロジカル絶縁体の表面 Dirac 電子層などの研究にユニークな手法を与えるだろう。

ナノフォトニクスとしての技術的側面として、物質表面の温度分布をナノメートル分解能(60nm)で画像化する「超高分解能の温度顕微鏡」と見なせる。そこで、たとえば動作状態の半導体集積回路の温度分布の観察が、応用として役立つ可能性がある。さらに、本研究は、金属深針が物質表面を自由空間の電磁波にきわめて強く結合する(黒体輻射の 100 倍以上)ことを示しており、このことから、ナノメートル分解能で物質を輻射冷却や輻射加熱する技術が生まれる可能性がある。

4. 2 結晶成長(東京大学 平川グループ)

(1)研究実施内容及び成果

①超高度テラヘルツ検出用二重量子井戸ヘテロ構造の結晶成長

CSIP 開発の基礎となる、変調ドープ伝導チャンネルとテラヘルツ吸収用量子井戸、および電子移送組成傾斜層からなる二重量子井戸ヘテロ構造を、分子線エピタキシー(MBE)により結晶成長を行った。当初、期待した伝導特性が出ない問題があったが、頻繁な SIMS 検査と実験結果を付き合わせることで、AlGaAs 中に残留酸素が多く取り込まれるという問題を突き止めた。そこで、原料セル(Al, Ga)の交換などにより、酸素濃度を抑えることができ、高純度の結晶成長を行うことができるようになった。しかし、現有の MBE はまだ安定な成長ができず、結果に成長ごとのふらつきがある。徹底した大規模なオーバーホールを実行したが問題解決には至らなかった。また、長波長(45 μm)検出用構造については、極めて Al 組成の低い AlGaAs 合金構造の作製が必要であり、また実際の動作時のダイナミックなバンド曲がり効果などもあり、現有の MBE では期待される感度を実現できず、外部企業の結晶成長に頼ることになった。

②TM モードテラヘルツ電磁波用フォトニック結晶の作製

半導体量子井戸構造中のサブバンド間遷移を用いたテラヘルツデバイスにおいては、光学遷移の選択則から必然的に TM 偏光とのみ相互作用する。従って、結晶表面から入射する光を TM モードに変換して、高効率にサブバンド間遷移と結合させる仕組みが必要である。我々は、検出器表面からテラヘルツ光を入射し、効率よく光を閉じ込めるためのテラヘルツ帯 TM モード用フォトニック結晶構造の研究を行った。その構造を図23(a)に示す。ドープした基板を下側の光閉じ込めに、また基板表面には、均一に電圧を印加するための半透明 Ti 電極とハニカム状の穴を設けた金属電極を作製した、非常に簡単な構造のものである。図23(b)は活性層内で発生させたテラヘルツ光が外部に出てくる確率に対応する量をプロットしているが(光検出の逆過程)、Ti 膜厚を最適化することにより明瞭なフォトニックバンドギャップを生成することができた。このフォトニックバンドギャップを用いることにより、テラヘルツ光を有効に閉じ込めることができる微小共振器を実現することができる。

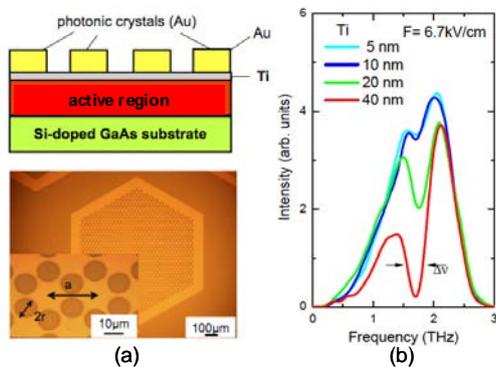


図23 (a)ハニカム型表面電極を用いたテラヘルツ帯TMモードフォトニック結晶構造。(b)表面Ti半透明電極の厚さを変えたときのTHz光の結合特性

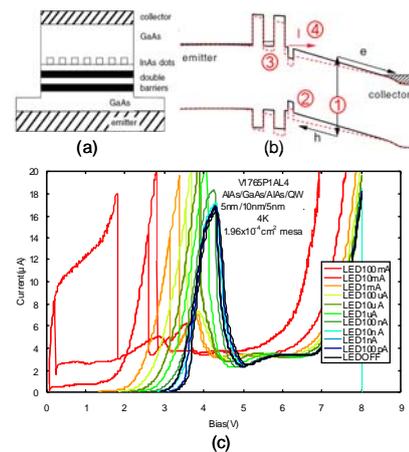


図24 (a)共鳴トンネルダイオードと光キャリア蓄積層(量子ドットまたは量子井戸)を組み合わせた高感度光検出構造、(b)動作原理図(黒:暗状態、赤:光照射時)、(c)LED光を照射したときの電流-電圧特性

③共鳴トンネルダイオードを用いた高感度光検出器

共鳴トンネルダイオードと光キャリア蓄積層を組み合わせたシンプルな構造の高感度光検出器の作製を行った。光キャリア蓄積層として、自己組織化 InAs 量子ドットおよび InGaAs 量子井戸からなる構造を成長し、可視の LED を用いて感度や雑音を評価した。その結果、光蓄積層が量子ドットの場合も量子井戸の場合も、おおよそ最大で 10^6 A/W 程度の responsivity と 10^{15} $\text{cmHz}^{0.5}/\text{W}$ 程度の detectivity であった。

(2)研究成果の今後期待される効果

今回開発したテラヘルツ帯 TM モードフォトニック結晶構造は、サブバンド間遷移に必須な TM モードの電磁波に対してフォトニックバンドギャップを実現することができている。さらに、構造が簡単であること、また素子に均一な電流を注入するための半透明金属電極も積層した構造となっており、デバイスと集積化するために適した構造となっている。今後、フォトニック結晶の周期的な穴に欠陥を導入することにより、TM モードテラヘルツ微小共振器の実現に応用することができる。

また共鳴トンネルダイオード素子については、適切な不純物のドーピングや構造の選択により、テラヘルツ波でコレクタ側に正孔の生成ができれば、高感度のテラヘルツ波検出器にも展開できると考えられる。

4.3 THz 光の近接場制御 (東京農工大学 生嶋グループ)

(1)研究実施内容及び成果

超高感度の Passive テラヘルツ計測、およびテラヘルツ近接場光学の発展可能性を探るために、以下2つの研究課題を実行した。さらに、従来検出器(MCT)を用いた Passive テラヘルツ顕微鏡を構築して常温試料の観察を行い、「小宮山」グループの CSIP による顕微鏡との比較を行った。ただし、深針による近接場ではなく幾何光学による顕微鏡なのでここでは記述から省く。

①フォトンカウンティング THz 顕微鏡による量子ホール端状態のテラヘルツ発光の研究

量子ドット単一 THz 光子検出器を組み込んだ THz 顕微鏡(図25上図)を用いて、GaAs/AlGaAs ヘテロ構造結晶の2次元電子層におけるサイクロトロン発光現象について探求した。2次元電子層を横切るトップゲートをもつホール素子を作製し、ランダウ占有率4

の量子ホール状態においてゲート下のランダウ占有率を2にしたときのホール素子のフォトンカウンティングイメージングを行った。ソース・ドレイン電圧を印加すると、図25下図に示すようにトップゲートのコーナーにおいて THz 発光が見出された。発光の生じるスポットは、異なる電気化学ポテンシャルをもつ 1 次元伝導チャンネル(量子ホール端状態)の合流点に対応することがわかった。この実験結果は、ノイズレスな伝導チャンネルを注入電流とした光子数揺らぎの抑制された THz 点光源実現の可能性を示唆しており、量子光学としても興味深い。この成果は、強磁場中 2 次元電子層において、サブ波長スケールの光源とフォトンカウンターが実現できることを意味しており、次の(b)の構想へとつながった。

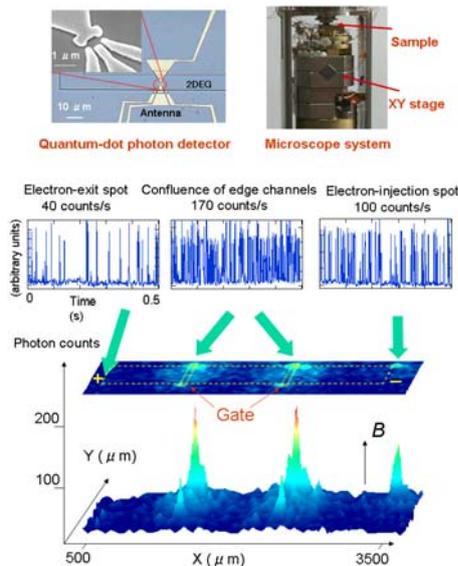


図 25 THz フォトンカウンティング計測 による量子ホール端状態からの発光観測。

②オンチップ・THz 光子発生/伝搬/検出

本研究の目的は、強磁場中 2 次元電子層で実現される電流揺らぎの抑制された量子ホール端状態を用いた THz 点光源と単電子制御による量子ドット単一 THz 光子検出器を利用して、固体上の電磁場を発生から伝送・検出まで完結して制御するオンチップ量子光学系を構築することである(図 26a,b)。まず、プロトタイプとして、端状態合流点(光源として機能:図 26c)と量子ドット(フォトンカウンターとして機能:図 26d)を two-strip 伝送路の両端部で近接場結合させた試料を作製した。我々は、真空波長 140 ミクロンの THz 電磁波を固体上伝搬させて、同一基板上の量子ドットでフォトンカウンティングすることに成功した。また、発光閾値電圧と電気輸送測定の詳細な研究により、端状態近傍におけるスピン分裂がバルク GaAs に比べて 20 倍以上に交換増強されていることが明らかになった。

(2)研究成果の今後期待される効果

上記(a), (b)の成果により、固体デバイス上で THz 電磁場を単一光子レベルで制御できる可能性が出てきた。強磁場中 2 次元電子層は、サブ波長スケールの単色点光源とフォトンカウンターを一つのデバイス上に組み込むことができるので、固体上の”光子“の Hanbury Brown and Twiss 実験や量子ドット-電磁場結合系実現など、量子伝導と量子光学の分野を横断する多くの学際研究への進展が期待される。

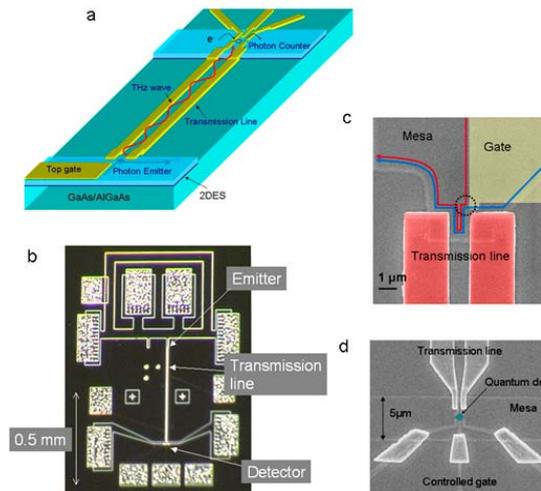


図 26 オンチップ・THz 光子発生/伝搬/検出デバイス

4. 4 検出器の開拓(Fudan 大学 An グループ)

(1)研究実施内容及び成果

シミュレーションで CSIP の量子効率向上の可能性を探り、さらに有望な構造を探索した。

① プラズモンによる光カプラーの検討

CSIP における量子井戸中電子のサブバンド間励起を起こす光カプラーとして、十字窓のアーレーを持つ金属膜格子を検討した。⁵⁽¹⁾⁻²⁷ (同様の構造に対する「小宮山」グループの計算⁵⁽¹⁾⁻¹⁸のより詳細な発展である。) 十字窓の配列周期(P)と長さ(L)を連続的に変えて詳細な計算を実行し、電場の増強が、周期 P に依存する伝播表面プラズモン(PSP: Propagating Surface Plasmon)と、窓サイズLに応じて個別の十字窓で起こる局在形状共鳴(LSR: Localized Shape Resonance)の組み合わせで生ずる事を明らかにした。さらに、波長 λ に対して最適構造が $P \approx 2L \approx 0.975 \times \lambda_{\text{GaAs}}$ で得られることを示した。これは「小宮山」グループの以前の計算結果と矛盾しないが、数値的に設計指針を与えたことが重要である。また、最適構造での量子効率がプラズマ効果を利用しない構造に比べて約 30 倍大きいことを示した。

② プラズモニック・キャビティの検討

CSIP の更なる発展のために、図 27(a)に示す新たな構造を検討した。⁵⁽¹⁾⁻²⁸ 量子井戸構造を持つ結晶(厚さS)が、十字窓アーレーの金属格子(上側、図 27(b))と一様な金属層(下側)とでサンドイッチされている。実際の CSIP では、下層の金属を n-GaAs で置き換えることで近似的に実現できる。図 26(c)に示すように、反射スペクトルに多重の共鳴線が現れる。これは伝播表面プラズモン(PSP)、局在形状共鳴(LSR)に加えて、底面の金属層からの反射による Fabry-Perot 干渉が加わった結果である。Ez 成分の計算により、十字窓アーレー金属格子の単独のカプラーに比べて 6 倍の量子効率が得られることが予想される。CSIP の量子効率をさらに向上させるための有望な指針を与えた。本研究は GaAs 結晶の反射率が 1 に近づく Reststrahlen 帯での CSIP の構造設計にも有益な指針を与えると考えられる。

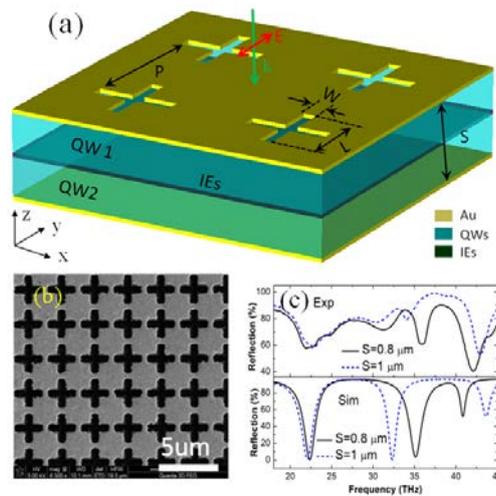


図27 プラズモニックキャビティによる光カプラー:(a)構造図
 (b) キャビティ上面の顕微鏡写真 (c) 反射スペクトル: 実測(上)と
 シミュレーション(下)。 $S=0.8\mu\text{m}$ (青線)、 $1\mu\text{m}$ (黒線)。 $P=3\mu\text{m}$,
 $L=2.6\mu\text{m}$, $W=0.52\mu\text{m}$

(2) 研究成果の今後期待される効果

本研究のプラズモンを利用した光カプラーは、CSIP 以外にも、広く多くの微細なオプトエレクトロニック素子に有用と考えられる。

§5 成果発表等

(1)原著論文発表 (国内(和文)誌 0 件、国際(欧文)誌 32 件)

1. M. Jung, K. Hirakawa, S. Ishida, Y. Arakawa and S. Komiyama “Electron transport and shell structures of single InAs quantum dots probed by nano-gap electrodes” *Physica E*, 32 (1-2), 187-190, 2006.
2. P. Kleinschmidt, S. P. Giblin, V. Antonov, H. Hashiba, L. Kulik, A. Tzalenchuk, and S. Komiyama “A Highly Sensitive Detector for Radiation in the Terahertz Region” *IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT*, 56, 463-467, 2007
3. Z. An, T. Ueda, S. Komiyama and K. Hirakawa ”Metastable excited states of a closed quantum dot with high sensitivity to infrared photons” *Phys. Rev. B*, 75, 085417, 2007.
4. P. Kleinschmidt, S. P. Giblin, V. Antonov, H. Hashiba, L. Kulik, A. Tzalenchuk and S. Komiyama “A Highly Sensitive Detector for Radiation in the Terahertz Region” *IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT* 56, 463-467, 2007.
5. 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.
6. 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.
7. T. Ueda, Z. An, K. Hirakawa and S. Komiyama “Charge sensitive infrared phototransistors: Characterization by an all-cryogenic spectrometer” *J. Appl. Phys.*, 103, 093109(1-7), 2008.
8. K. Ikushima, S. Komiyama, T. Ueda, K. Hirakawa “THz-photon generation due to electrons injected via quantum-Hall edge channels” *Physica E*, 40, 1026 - 1029, 2008.
9. K. E. Spirin, S. V. Morozov, V. I. Gavrilenko, Y. Kawaguchi and S. Komiyama “Magnetic

- field dependence of the photoresponse time of GaAs/AlGaAs quantum Hall effect device” *Semicond Science & Technology*, 23, 95014, 2008.
10. S. Pelling, R. Davis, L. Kulik, A. Tzalenchuk, S. Kubatkin, T. Ueda, S. Komiyama and V. N. Antonov “Point contact readout for a quantum dot terahertz sensor” *Appl. Phys.Lett.*, 93, 073501(1-3), 2008.
 11. 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(1-8), 2009.
 12. A. V. Antonov, V. I. Gavrilenko, D. I. Kuritsyn, S. V. Morozov, K. E. Spirin, Y. Kawaguchi, and S. Komiyama “Evolution of the Photoresponse Time of the GaAs/AlGaAs Cyclotron Resonance Quantum Hall Effect Detector” *ISSN 1063-7826, Semiconductors*, 43, 223-227, 2009.
 13. P. Nickels, T. Ueda, Z. An and S. Komiyama “Improving the CSIP Performance” *Infrared Physics & Technology*, 52, 439-441, 2009.
 14. 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, 2009.
 15. Z. Wang, S. Komiyama, T. Ueda and N. Nagai “A Modified Scheme of Charge Sensitive Infrared Phototransistor” *Appl. Phys. Lett.*, 95, 022112, 2009.
 16. Z. An, T. Ueda, S. Komiyama, K. Hirakawa and X. Shen “Lithographic quantum dot for sensitive infrared photon detection” *Phys. Status Solidi*, 4, 936, 2009.
 17. H. Hashiba, V. Antonov, L. Kulik, A. Tzalenchuk, and S. Komiyama “Sensing individual terahertz photons” *Nanotechnology*, 21, 1655203, 2010.
 18. 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(3), 384-390, 2010.
 19. 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.
 20. 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(3P), 2010.
 21. T. Ueda, Z. An and S. Komiyama “Temperature dependence of novel single-photon detectors in the long-wavelength infrared range” *Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*, online published first / DOI:10.1007/s10762-010-9659-3, 2010. 32(5), 673-680, 2011.
 22. Z. Wang, S. Komiyama, T. Ueda, M. Patrashin and I. Hosako “Charge Sensitive Infrared Phototransistor for 45 μ m Wavelength” *J. Appl. Phys.*, 107, 1(1-4), 2010. (DOI:10.1063/1.3406255)
 23. T. Ueda and S. Komiyama “Novel Ultra-sensitive Detectors in the Wavelength Range of 10-50 μ m” *Sensors*, 10, 8411-8423, 2010.
 24. Y. Kajihara, K. Kosaka and S. Komiyama “A sensitive near-field microscope for thermal radiation” *Rev. Sci. Instrum.* 81, 033706 (4pages), 2010.
 25. Y. Kajihara, K. Kosaka and S. Komiyama “Passively detecting thermal evanescent waves from room temperature objects”, *Journal of Nonlinear Optical Physics & Materials*, 19, 584-594, 2010.
 26. Y. Kajihara, K. Kosaka and S. Komiyama “Passive near-field microscopy in long-wavelength infrared”, *e-Journal of Surface Science and Nanotechnology*, 9, 173-175, 2011. *Proc. 6th Int. Workshop on Nano-scale Spectroscopy and Nanotechnology (NSS6) October 25 (Mon) - 29 (Fri), 2010. Kobe University Centennial Hall (Rokko Hall), Kobe, JAPAN.* DOI: 10.1380/ejssnt. 2011.
 27. H. Wang, Z. An, C. Qu, S. Xiao, L. Zhou, S. Komiyama, W. Lu, X. Shen and P.K. Chu “Optimization of Optoelectronic Plasmonic Structures” *Plasmonics*, Published online, 27

- January, 2011. (DOI 10.1007/s11468-011-9207-6) *Plasmonics*, 6 (2), 319-325, 2011.
28. M. Li, Z. An, L. Zhou, F. Mao, H. Wang “Strong Coupling between Propagating and Localized Surface Plasmons in Plasmonic Cavities” *Chinese Physics Letters.*, 28(7), 075206, 2011.
 29. K. Ikushima and S. Komiyama “Photon generation by injection of electrons via quantum Hall edge channels” *Phys. Rev. B*, 84, 155313, 2011.
 30. T.Ueda, Y.Soh, N. Nagai, S. Komiyama, and H. Kubota “Charge-Sensitive Infrared Phototransistors Developed in a Wavelength Range of 10-50 μm ” *Japn. J. Appl. Phys. rapid Communication*, 50, 020208, 2011.
 31. Y. Kajihara, K.Kosaka and S. Komiyama “Thermally excited near-field radiation and far-field interference” *Opt. Express*, 19(8), 7695-7704, 2011.
 32. Y. Kajihara, K.Kosaka and S. Komiyama “Probing thermal evanescent waves with a scattering-type near-field microscope” *Meas. Sci. Tech.*, 22, 085102(1-5), 2011.

(2)その他の著作物(総説、書籍など)

1. 生嶋健司 “単一光子検出イメージング” テラヘルツ技術総覧(テラヘルツテクノロジーフォーラム編) NGT コーポレーション, 第7章, 471, 2007.
2. 小宮山進 “テラヘルツ単一光子検出器とパッシブ顕微鏡の開拓”, 「光学」(日本光学会(応用物理学会)) 37(8), 461-468, 2008.
3. 小宮山進, 上田剛慈 “テラヘルツ領域の単一光子検出” *固体物理*, 45(7), 371-380, 2010.
4. K. Ikushima and S. Komiyama “Imaging by terahertz photon counting” *Comptes Rendus Physique*, 11, 444-456, 2010.
5. 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鏡観察” *J. Vac. Soc. Jpn.* 53, 309, 2010.
6. S. Komiyama “Single-Photon Detectors in the Terahertz Range” *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, (Invited Paper) 17(1), 54-66, 2011.
7. T. Ueda and S. Komiyama “Charge-sensitive Infrared Phototransistors: Single-photon Detectors in the Long-Wavelength Infrared” *Sensors & Transducers Journal*, 10, Special Issue, 60-70, 2011.

(3)国際学会発表及び主要な国内学会発表

① 招待講演 (国内会議8件、国際会議 8件)

1. S. Komiyama (東京大学・総合文化研究科) “New Terahertz Microscopy Developed by Nano Devices” 第5回ナノテクノロジー総合シンポジウム JAPAN NANO 2007, 東京ビックサイト, 2月21日, 2007.
2. 生嶋健司 (東京農工大学) “THz フォトン計測:低温物性研究への応用” 日本物理学会 シンポジウム, 鹿児島, 3月20日, 2007.
3. T. Ueda (東京大学・総合文化研究科) “Single Photon Detection in the Long Wave Infrared” The Thirteenth International Conference on Narrow Gap Semiconductors, Guildford UK, July 8-12, 2007.
4. K. Ikushima (東京農工大学) “Imaging by single THz photon counting” The 31th International Conference on Infrared and Millimeter Waves and The 14th International Conference of Terahertz Electronics, Cardiff, UK, Sept. 3-7, 2007.
5. 小宮山進 (東京大学・総合文化研究科) “超高感度テラヘルツ検出器の開拓” 応物 量子エレクトロニクス研究会, 軽井沢, 1月11日, 2008.
6. 小宮山進 (東京大学・総合文化研究科) “ミリ波・テラヘルツ波デバイス・システムの進展” 電子情報通信学会総合大会, 北九州市, 3月19日, 2008.
7. 小宮山進 (東京大学・総合文化研究科) “テラヘルツ単一光子顕微鏡(Single-terahertz-

- photon microscope)”日本学術振興会「ナノプローブテクノロジー第167委員会」第51回研究会「光子制御技術の最先端～単一光子発生・単一量子系観測・メタマテリアル」,慶應義塾大学日吉キャンパス,7月17-18日,2008.
8. 小宮山進(東京大学・総合文化研究科)“単光子検出器”国際高等研究所研究プロジェクト「高度計測技術の発展と埋没」第1回研究会,THz 領域計測器の現状と問題 国際高等研究所(木津川市木津川台),8月29-30日,2008.
 9. Susumu Komiyama (東京大学・総合文化研究科)“Photon detectors and passive microscopy in the terahertz” GDR-E 2008 THz Workshop “Semiconductor sources and detectors of THz radiation” Paris, France Sept. 25-26, 2008.
 10. Susumu Komiyama (東京大学・総合文化研究科)“Charge-sensitive Infrared Photo-transistors (CSIP) & Passive Terahertz Microscopy” OTST 2009 International Workshop on Optical Terahertz Science and Technology, Santa Barbara, USA March 7-11, 2009.
 11. Komiyama (東京大学・総合文化研究科)“Ultrahigh sensitive detectors in the terahertz region” 20th International Symposium on Space Terahertz Technology (ISSTT2009), Charlottesville, Virginia, USA, April 20-22, 2009.
 12. 梶原優介(東京大学・総合文化研究科)“20THz 帯顕微鏡によるパッシブイメージング”第43回光波センシング技術研究会講演会,埼玉大学東京ステーションカレッジ, JRサピアタワー(東京都日本橋),6月9-10日,2009.
 13. S.Komiyama (東京大学・総合文化研究科)“High-sensitivity detection of THz waves and its application to passive microscopy of matters”, The workshop on Novel Quantum Structure Detectors, Sanya, China, Jan. 4-6, 2010.
 14. S.Komiyama (東京大学・総合文化研究科)“Single-photon detection in THz and its application” QLEO (The Conference on Lasers and Electro-Optics) 2010, San Jose, USA, May 16-21, 2010.
 15. T. Ueda (東京大学・総合文化研究科)“Single-photon copunters in the Mid-infrared through terahertz regions and their applications to microscopy” The 23rd Annual Meeting of the IEEE Photonic Society Meeting, Denver Colorado USA, Nov. 7-11, 2010.
 16. 梶原優介 (東京大学・総合文化研究科)“THz near-field Imaging of thermally excited surface waves” 日本物理学会、シンポジウム「Nanoscience by the fusion of light and scanning probe microscopy (光と走査プローブ顕微鏡の融合によるナノサイエンス)」富山,9月24日,2011.

② 口頭発表 (国内会議 17 件、国際会議 14 件)

1. 上田剛慈 (東京大学・総合文化研究科)“4.2K 空間で構築した中赤外高感度検出器用分光測定系:2重量子井戸型中赤外検出器の評価” 応用物理学会、東京,3月29日,2007.
2. 中島峻 (東京大学・総合文化研究科)“量子ホール遷移幅の試料サイズ依存性” 日本物理学会,鹿児島,3月21日,2007.
3. K. Ikushima (東京農工大学)“THz-photon generation due to electrons injected via edge channels” EP2DS-17 (17th International Conference on the Electronic Properties of Two-Dimensional Systems), Genova, Italy, July 15-20, 2007.
4. 上田剛慈 (東京大学・総合分科研究科)“電荷敏感型赤外光子検出器(CSIP)の動作温度依存性” 応用物理学会 千葉,3月28日,2008.
5. 坂田祐輔(東京大学・生産技術研究所)“二重障壁共鳴トンネル高感度光検出構造における光励起正孔の寿命” 応用物理学会,千葉,3月27日-3月30日,2008.
6. 竹中 聡(東京大学・生産技術研究所)“二重障壁共鳴トンネル構造を用いた高感度光検出(II)” 応用物理学会,千葉,3月27日-3月30日,2008.
7. Z. AN “Lithographic quantum dot for single photon detection application”, 5th International Conference on Semiconductor Quantum Dots, Gyeongju, Korea, May 11-16, 2008.

8. 梶原優介(東京大学・総合文化研究科) “パッシブ THz 共焦点顕微鏡の構築及び分解能評価” 応用物理学会, 愛知, 9月3日, 2008.
9. P. Nickels (東京大学総合文化研究科) ”Charge Sensitive Infrared Phototransistor” Quantum Structure Infrared Photodetector (QSIP) 2009 International Conference Yosemite, CA, USA, Jan.18-23(Jan. 23), 2009.
10. 梶原優介 (東京大学総合文化研究科) “テラヘルツ顕微鏡の構築とパッシブイメージング” 精密工学会, 東京, 3月13日, 2009.
11. 梶原優介 (東京大学・総合文化研究科) “20THz 帯顕微鏡によるパッシブイメージング” 第43回光波センシング技術研究会講演会、東京, 6月9日, 2009.
12. Y. Doi, Z. Wang, T. Ueda, P. Nickels, S. Komiyama, M. Patrashin, I. Hosako, S. Matsuura, M. Shirahata, Y. Sawayama, and M. Kawada “CSIP - A Novel Photon-Counting Detector Applicable for the Spica Far-Infrared Instrument” Workshop The Space Infrared Telescope for Cosmology & Astrophysics: Revealing the Origins of Planets and Galaxies, Oxford, United Kingdom, July 6-8, 2009.
13. 小坂圭史 (東京大学・総合文化研究科) “THz 近接場光検出に向けたシアフォース型 AFM の開発” 応用物理学会, 富山, 9月9日, 2009.
14. P. Nickels (東京大学・総合文化研究科) “Charge Sensitive Infrared Phototransistor (CSIP): Array study” 応用物理学会, 富山, 9月10日, 2009.
15. Z. Wang (東京大学・総合文化研究科) “Charge Sensitive Infrared Phototransistor (CSIP) for $\lambda = 45$ mm Wavelength Radiation” 応用物理学会, 富山, 9月10日, 2009.
16. 松田慎平, Patrick Nickels, 上田剛慈, 小宮山進 “FDTD 法による電荷敏感型光子検出器 (CSIP) 結合構造の設計” 応用物理学会, 富山, 9月10日, 2009.
17. Y. Kajihara (東京大学・総合文化研究科) “Passive terahertz microscopy with a highly sensitive detector” IMEKO XIX World Congress Fundamental and Applied Metrology, Lisbon, Portugal, Sept. 6-11, 2009.
18. Y. Kajihara (東京大学・総合文化研究科) “Shear-force distance control for terahertz near-field microscopy” 3rd International Conference of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology (ASPEN), Kitakyusyu-shi, Japan, Nov. 11-13, 2009.
19. Y. Kajihara (東京大学・総合文化研究科) “Passive imaging with a highly-sensitive infrared phototransistor” The 34th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2009), Busan, Korea, Sept. 21-25, 2009.
20. K. Ikushima (東京農工大学) “Generation of terahertz photons via edge-channel transport”, ISANN(International Symposium on Advanced Nanodevices and Nanotechnology), Hawaii, USA, Dec. 4, 2009.
21. 梶原優介 (東京大学・総合文化研究科) “20THz 帯顕微鏡によるパッシブイメージング” 第43回光波センシング技術研究会講演会、東京, 6月9日, 2009.
22. 梶原優介 (東京大学・総合文化研究科) “テラヘルツ領域のパッシブな近接場イメージング” 応用物理学会秋季大会, 長崎, 9月16日, 2010.
23. 松田慎平 (東京大学・総合文化研究科) “半導体基板上の表面プラズモンアンテナへの裏面入射の効果” 応用物理学会秋季大会, 長崎, 9月17日, 2010.
24. 梶原優介 (東京大学・総合文化研究科) “照射光源を使用しないテラヘルツ近接場イメージング” ナノフォトニクス総合的展開 第28回オープンセミナー, 東京大学工学部2号館, 10月21日, 2010.
25. 梶原優介 (東京大学・総合文化研究科) “テラヘルツ領域のパッシブな近接場イメージング” 第12回 GRL 浜松セミナー ~若手研究者のための光・電子・情報科学に関する情報交換~, 静岡大学 浜松キャンパス, 12月17日, 2010.
26. Y. Kajihara (東京大学・総合文化研究科) “Near-field microscopy of thermal radiation” QLEO (The Conference on Lasers and Electro-Optics) 2010, San Jose, USA, May 16-21, 2010.

27. T. Ueda (東京大学・総合文化研究科) “Charge sensitive infrared phototransistors: Ultrasensitive Detectors in the wavelength range of 5–50 μm ” SENSORDEVICES 2010, Venice/Mestre, Italy, July 18–25, 2010.
28. Z. AN “Optimization of a plasmonic coupler with cross-shaped metal hole array structure for optoelectronic device”, Frontiers of Plasmonics, International workshop, Xi’an, China, Sept. 3–7, 2010.
29. (selected for young researcher award) Y. Kajihara (東京大学・総合文化研究科) “Detecting terahertz near-field radiation without external illumination” 10th International Symposium on Measurement and Quality Control (ISMQC) 2010, Osaka, Japan, Sept. 5–8, 2010.
30. Y. Kajihara (東京大学・総合文化研究科) “Ultra-sensitive passive near-field microscopy in long-wavelength infrared region” The 6th International Workshop on Nano-scale Spectroscopy and Nanotechnology (NSS6), Kobe, Japan, Oct. 25–29, 2010.
31. Y. Kajihara (東京大学・総合文化研究科) “Probing thermal evanescent fields with a near-field microscope” The 36th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2011), Houston, USA, Oct. 3–7, 2011.

③ ポスター発表 (国内 0 件、国際 8 件)

1. Y. Kajihara, S. Komiyama, K. Kosaka, P. Nickels and T. Ueda “Passive Microscopy in Long-wavelength Infrared Region” 2nd International Workshop on Terahertz Technology (TeraTech 09), Osaka, Japan, Dec. 1–3, 2009.
2. T. Ueda, S. Komiyama, N. Nagai, K. Hirakawa “Temperature dependence of a novel single photon detector in the long wave infrared” 2nd International Workshop on Terahertz Technology (TeraTech 09), Osaka, Japan, Dec. 1–3, 2009.
3. P. Nickels, S. Matsuda, T. Ueda and S. Komiyama “Improved coupler design for CSIP and CSIP Array” 2nd International Workshop on Terahertz Technology (TeraTech 09), Osaka, Japan, Dec. 1–3, 2009.
4. Z. Wang, S. Komiyama, T. Ueda, M. Patrashin and I. Hosako “Charge Sensitive Infrared Phototransistor for 45 μm Wavelength” 2nd International Workshop on Terahertz Technology (TeraTech 09), Osaka, Japan, Dec. 1–3, 2009.
5. K. Ikushima, D. Asaoka, S. Komiyama, T. Ueda, K. Hirakawa “Manipulating terahertz photons on a quantum Hall effect device” 18th International Conference on the Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-18), Kobe, Japan, July 20–24, 2009.
6. (selected for the best poster paper award) Y. Kajihara, K. Kosaka and S. Komiyama “Passive near-field microscopy in long-wavelength infrared region” International Conference on Nanophotonics 2010, Tsukuba, Japan, May 30–June 3, 2010.
7. T. Ueda “Single-photon counters in MIR-THz region developed for near field passive microscopy” OTST 2011 (Optical Terahertz Science and Technology, 2011), Fess Parker’s Double Tree Resort by Hilton Santa Barbara, Santa Barbara, CA, USA, March 14, 2011.
8. K. Ikushima (東京農工大学) “Landau level emission in the imbalance between adjacent spin-resolved edge channels” EP2DS-19, Florida, USA, Jul. 25, 2011.

(4) 知財出願

① 国内出願 (2 件)

1. 赤外光検出器(分割)、小宮山進、上田剛慈、Patrick Nickels、科学技術振興機構、2009/5/25 特願2009–125194
2. 赤外光検出器(光結合機構)、小宮山進、Patrick Nickels、科学技術振興機構、2009/5/25 特願2009–125195

②海外出願 (2 件)

1. 赤外光検出器(AF01-04PCT)、小宮山進、上田剛慈、Patrick Nickels、科学技術振興機構、2010/4/16 PCT/JP2010/056864、米国、欧州(ドイツ・英国)
2. 赤外光検出器(AF01-05PCT)、小宮山進、Patrick Nickels、科学技術振興機構、2010/4/16 PCT/JP2010/056865、米国、欧州(ドイツ・英国)

§ 6 研究期間中の主なワークショップ、シンポジウム、アウトリーチ等の活動

年月日	名称	場所	参加人数	概要
H21. 9. 2-4	戦略的創造研究推進事業 (CREST) 成果発表 (2009 分析展)	幕張メッセ		成果報告 (ポスター発表)
H22. 3. 11	田中領域第 1 回公開シンポジウム	都市センターホテル	200	成果報告
H23. 3. 9	田中領域第 2 回公開シンポジウム	コクヨホール	200	成果報告
H23. 9. 7	戦略的創造研究推進事業 (CREST) 成果発表 (2011 分析展)	幕張メッセ	100	成果報告

§ 7 結び

検出器の開発と顕微鏡の開発という 2 大目標はおおむね達成できたと考えている。検出器開発の基本は結晶成長だが、研究期間の前半は現有の MBE 結晶成長装置のトラブルが続いて対策に手間取った面がある。ただし、後半は、企業からの購入に切り替えて何とか凌ぐことが出来た。検出器の長波長域への拡大のために、InP 系への転進の検討はまだ途上にあるが、GaAs 系でも試みるべきことはあると考えている。(励起電子の面内脱出機構や従来型でのゲート電極の操作など。)

研究費について。研究代表者の所属する部局には、電子線描画装置をはじめ、半導体試料一般を扱うクリーンルーム設備が存在せずそれらを共通に維持管理する仕組みが無い。そのため、設置場所のスペース料を含めて、全てのクリーンルーム関連装置の維持管理を研究代表者のグループが単独で、本研究のなかで行った。そのためそれに、スタッフの雇用を含めて応分の研究費を要した。

今後の研究の展開について、小宮山は今年度で大学を定年退職するが、実験室スペースの若干を今後 1, 2 年間は大学から借用できると期待している。その間に、本研究に関わった若手研究者が、独立に本研究の成果を発展させてゆくことができるよう、若手の自立を助力したいと考えている。個別事項になるが、電子線描画装置を含めたクリーンルーム設備を維持管理するグループがその後存在しなくなるため、それ以降どうするのか、周りの研究室および部局の責任者と相談している。