

小宮山 進

国立大学法人 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。さらに、その検出器を用いて、超高感度かつ高分解能の passive な THz 顕微鏡を開発することを第2の目標とし、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。

昨年度までに、化合物半導体2重量子井戸結晶による新たな機構の検出器（電荷敏感型赤外トランジスター、CSIP; Charge Sensitive Infrared Phototransistor）を開発し、従来検出器の約 500 倍の検出感度(波長 15 μ m)を実現した。今年度は入射光を検出器の結晶裏面から入射することによってさらに 2 倍余り感度を向上すると共に、波長範囲を 12 μ m~29 μ m に拡大した。顕微鏡については、昨年度に、散乱型近接場挿引顕微鏡(s-SNOM)を構築し(波長 15 μ m)、常温金属表面からの熱励起放射の検出に成功した。今年度は、AFM 制御するタングステン深針の作製方法改良と共焦点光学系の改良によって、空間分解能が昨年の 150nm から 60nm (波長の 250 分の1)に向上し、また感度が 3 倍改善した。

大幅に性能が向上した s-SNOM による観察を数種類の金属、および異なるイオン性結晶に拡張して、基本的に重要な新たな知見を得た。つまり、金属上の信号が伝導電子の乱雑な熱揺らぎ運動によって作られる高エネルギー密度の表面エバネセント波によるものであり、単位面積当たりのその放射強度が、金属の種類によることなくプランク公式の上限値(黒体放射)の 50 倍以上に達するという驚くべき結果を得た。信号の試料サイズ依存性や温度依存性から、この熱励起表面波が、良く知られた表面プラズモンではなく、それとは全く異なる、非共鳴的で空間周波数のずっと大きな表面波であることを確証した。

このように、熱励起エバネセント波を世界初初めて観測した。熱励起エバネセント波は金属だけでなく凝縮系物質一般に普遍的に存在し、物質表面の物理・化学的性質を決定する上で重要な役割を果たすと考えられる。今後、観察対象を金属以外の物質系に拡大し、物質全般の表面波研究を大きく進展させたい。

§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(東京大学生産技術研究所)

- 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、教授)
- 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(東京農工大大学院共生技術研究院、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, Institute of Advanced Materials(中国))
- ②研究項目:検出器の開拓

§3. 研究実施内容

検出器と顕微鏡の開発について分けて記す。

【CSIP 検出器】 (i)感度向上: 従来、光カプラ(金属格子)のある素子表面側から入射光を照射していたが、シミュレーションによれば裏面入射(図1)では結合効率が3.3倍(GaAsの屈折率)程度向上することが期待される。図1の構成による実測で約2倍の感度向上を確認した。

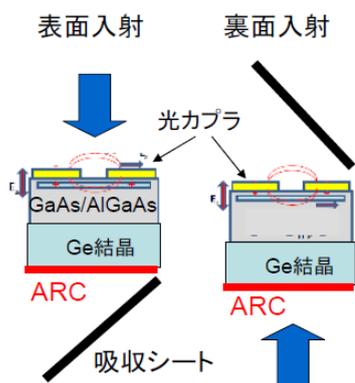


図1: CSIPへの表面入射から裏面入射への変更で金属の表面プラズモン格子の効率向上

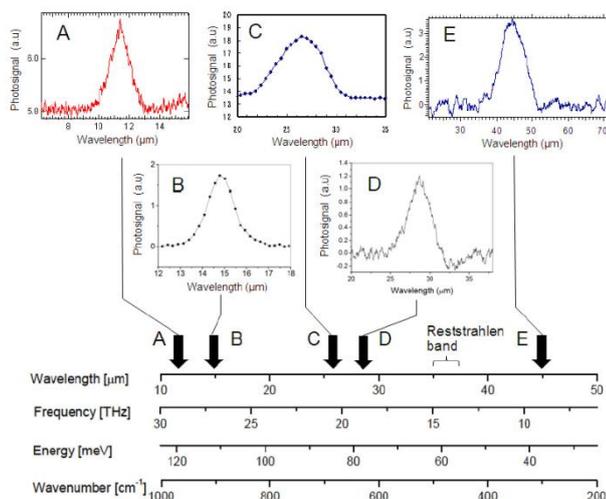


図2: CSIPの波長域拡大(12μm-45μm)

このことで量子効率が従来の 8%から約 14%に向上したことが期待される。**(ii)波長拡大:** 昨年度に引き続き、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 12 μm から 45 μm までの広い帯域で光信号の検出に成功した。^{3),4),7)} さらに、不純物酸素の影響が少ない InP 系の結晶を昨年度から継続して試みた。

[散乱型 THz近接場顕微鏡:s-SNOM (図3)] 昨年度、AFM 制御による金属探針(タングステン)と CSIP を組み合わせて散乱型 THz近接場顕微鏡(s-SNOM)を開発した。今年度は、①より高感度の CSIP 検出器を用い、②共焦点光学系のピンホール(液体ヘリウム温度)の径を 125 μm から 62 μm に絞り、かつ ③金属深針(タングステン線)の電解研磨法による作成技術向上によってプローブ先端径を先鋭化(100nm \rightarrow 40nm)した。これらのことで、幾何光学(far-field)の分解能を 25 μm \rightarrow 15 μm に、さらに近接場光学系の分解能を 150nm \rightarrow 60nmへ、それぞれ大幅に改善すると共に、近接場信号の S/N 比を約3倍改善した。^{5),9)}

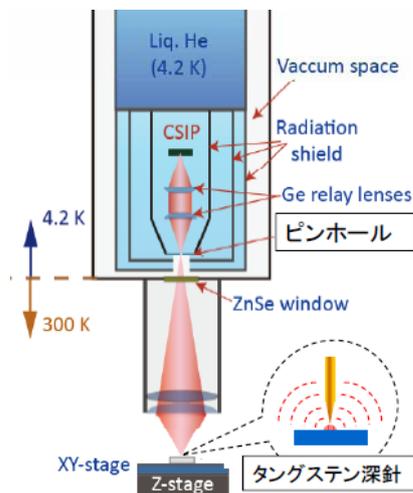


図3: 散乱型テラヘルツ挿引顕微鏡(s-SNOM)の概念図

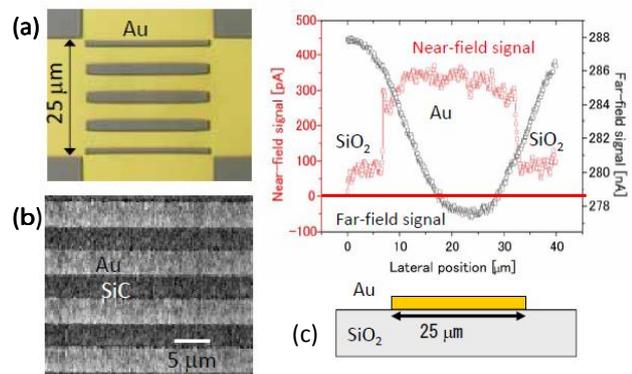


図4 (a) SiC上金ストライプの光学顕微鏡像 (b)同上のs-SNOM画像 (c) SiO₂と金の近接場光(赤)と幾何光学による遠隔場(far-field)光(黒)の1次元挿引プロファイル

[熱励起エバネセント波の世界初計測] 改良した s-SNOM を、誘電体結晶(GaAs, SiC, SiO₂ など)の基板の上に作成した数種類の異なる金属膜試料(Au, Al, Ti, Ni)に適用し、本格的なパッシブ計測を室温で行った。^{5),9)} 図4(a),(b)は SiC 基板の上の金の例である。図 4(b)で解るように近接場光は Au からの信号が SiC に比べて数倍強い。異種の金属(Au, Al, Ti, Ni)の近接場光強度はほぼ同じ強さであり、誘電体結晶(GaAs, SiC, SiO₂)からの近接場光の数倍ある。図 4(c)に示した SiO₂と Au の近接場光強度のステップ変化から、空間分解能として 60nm(波長の 250 分の 1)が導かれる。観測した全ての近接場信号は外部照射光無しで得られ、有限温度の熱エネルギーによる輻射である。しかし、図 4(c)は単位面積当たりの近接場光強度が黒体輻射強度の約66倍程度に達することを示しており、プランクの輻射公式では全く説明できない新たな起源の輻射であることを示す。理論的には、伝導電子の乱雑な熱揺らぎ運動(金属)およびイオン格子の乱雑な熱振動(誘電体)によって表面に極めて強く局在した

電磁場のエバネセント波が熱的に励起されることが予言されており、金属表面近傍（100nm 以下）の電磁エネルギー密度が黒体輻射の千倍以上に達すると予想されている。本研究で観測された黒体輻射を桁違いに凌ぐきわめて強い熱的な近接場光は、このように極めて強い熱的表面エバネセント波を検出したことによる。図5は Au の上での近接場光信号が、表面からの距離が数十 nm 離れるだけで顕著に減少することを示しており、この減衰曲線は理論的に計算される表面波の空間分布で説明できる。近

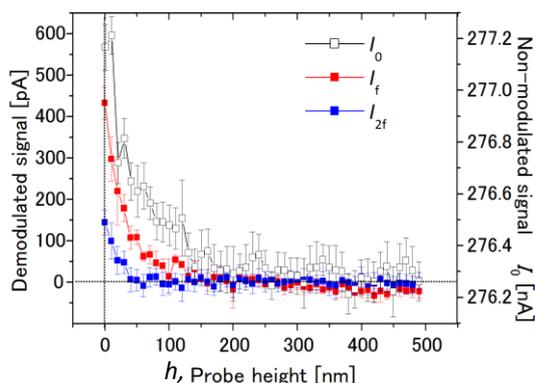


図5 深針の高さ h （試料表面との距離）の増大に伴う近接場信号の減衰。試料はAu

接場信号の試料温度依存性および信号強度の試料サイズ依存性をさらに測定することによって、計測される表面波が良く知られた表面プラズモンポラリトンや表面フォノンポラリトンとは全く異なった性質を持っていること。特に、きわめて大きな空間周波数（波数）を持つ非共鳴的な輻射であることを確認し、それらの依存性が理論的予言に極めて良く合致することを確かめた。

熱励起表面波は、金属だけでなく凝縮系物質に普遍的に存在し、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していると考えられる。この熱励起表面波が初めて実験的に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。

§4. 成果発表等

(4-1) 原著論文発表

● 論文詳細情報

1. J. C. Chen, Jingbin 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.(DOI: 10.1143/JJAP.49.031201)
2. T.Ueda, Z.An, and Susumu Komiyama “Temperature dependence of novel single-photon detectors in the long-wavelength infrared range” Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, online pulished first / DOI:10.1007/s10762-010-9659-3, 2010. (DOI:10.1007/s10762-010-9659-)
3. Z. Wang, S.Komiyama, T. Ueda, M. Patrashin and I. Hosako “Charge Sensitive Infrared Phototransistor for 45 μm Wavelength” J.Apple.Phys., 107, 1(1-4), 2010. (DOI:10.1063/1.3406255)
4. T. Ueda and S. Komiyama “Novel Ultra-sensitive Detectors in the Wavelength

- Range of 10-50 μm ” Sensors, 10, 8411-8423, 2010. (DOI:10.3390/s100908411)
5. 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. (DOI: 10.1142/S0218863510005480)
 6. H.Wang, Z.An, C.Qu, S.Xiao, L. Zhou. S.Komiyama. W.Lu, X.Shen, P. K.Chu “Optimization of Optoelectronic Plasmonic Structures” Plasmonics, Published online, 27 January , 2011. (DOI 10.1007/s11468-011-9207-6)
 7. T. Ueda, Y. Soh, N. Nagai, S. Komiyama and H. Kubota “Charge-Sensitive Infrared Phototransistors Developed in a Wavelength Range of 10-50 μm ” JJAP rapid communication, 50, 020208(1-3), 2011. (DOI: 10.1143/JJAP.50.020208)
 8. Takeji Ueda and Susumu Komiyam “Charge-sensitive Infrared Phototransistors:Single-photon Detctors in the Long-Wavelength Infrared” Sensors & Transducers Journal, 10, Special Issue, 60-70, 2011.(http://www.sensorsportal.com/HTML/DIGEST/P_SI_133.htm)
 9. Y. Kajihara, K.Kosaka and S. Komiyama “Thermally excited near-field radiation and far-field interference” Opt. Express, 19, 2011 (in press)
- THz

(4-2) 知財出願

- ① 平成 22 年度特許出願件数(国内 0件)
- ② CREST 研究期間累積件数(国内 2件)