

研究種目：若手研究（スタートアップ）

研究期間：2008～2009

課題番号：20860024

研究課題名（和文） AFM を利用したエバネッセント THz 光散乱検出法の研究

研究課題名（英文） Detecting evanescent THz waves with an AFM probe tip

研究代表者

梶原 優介 (KAJIHARA YUSUKE)

東京大学・大学院総合文化研究科・研究員

研究者番号：60512332

研究成果の概要（和文）：

本研究では、照射光源を利用しないエバネッセント THz 光散乱検出法の確立を目指した。自己検知型 AFM を開発して THz ナノ顕微鏡を構築し、自然放出光の近接場イメージングを行った。常温サンプル(GaAs/Au)をイメージングした結果、Au 上で GaAs 上よりも遥かに大きい近接場応答(室温熱励起された表面プラズモン)が得られた。空間分解能は 150nm(波長の 1/100)を達成している。

研究成果の概要（英文）：

We developed a scattering-type scanning near-field optical microscope, which does not use any external light source. With the developed microscope, we performed passive near-field microscopy of spontaneous thermal emission. By scanning a near-field probe on a GaAs/Au sample at room temperature without an external light, we obtained near-field components derived from thermally activated surface plasmon on Au. The spatial resolution of 150 nm (1/100 of wavelength) was successfully achieved.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	1,330,000	399,000	1,729,000
2009 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
総計	2,530,000	759,000	3,289,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・計測工学

キーワード：パッシブイメージング, 原子間力顕微鏡, 近接場顕微鏡, エバネッセント波, テラヘルツ波, 中赤外光, 表面プラズモン

#### 1. 研究開始当初の背景

計測技術は可視光領域から発展を続け、現在は X 線領域から近赤外領域に至るまで検出器・計測器がほぼ揃っている。しかし THz 領域(光子エネルギー: 150meV~1meV, 波長: 8 $\mu$ m~1mm)における計測技術は、十分な感度を持つ検出器が存在しなかったために

未だ発展途上の段階にある。THz 領域は、固体の格子振動、分子の振動・回転準位など物質現象の基礎研究において極めて重要なスペクトル領域を成すため、その計測技術の発展は、物性物理分野のほか、エレクトロニクス、バイオ、医療など様々な分野に非常に大きなインパクトをもたらす可能

性がある。

近年は THz 計測の基礎研究が進みつつあり、検出器に関しては、InSb, HgCdTe などの光伝導型中赤外光検出器や、量子井戸のサブバンド間遷移を用いる検出器(QWIP: Quantum Well Infrared Photodetector)など多数の検出器が開発されている。また計測技術に関しては、半導体や電気光学結晶にフェムト秒レーザを照射して THz 光を発生させ、上記検出器などを用いて計測する技術が確立されつつあり、薬物検査や医薬品分析などへの応用が報告されている。

これらの計測技術は専ら照射光源を利用した active な計測であるが、物質固有現象のスペクトルを検出するためには、物質自身が発現する THz 光を passive に計測する必要がある。また物質現象の情報を多分に有するメゾスコピック現象の計測のためには、sub- $\mu\text{m}$  オーダの空間分解能が不可欠である。しかし既存の検出器は何れも単一光子レベルには達しないため、passive 計測は計測時間の非常に長い天文分野等に限定されている。

しかし申請者の所属研究グループでは近年、n 型 GaAs 基板上の GaAs/AlGaAs 二重量子井戸構造を用いて、単一光子レベルの検出能力を持つ THz 検出器(CSIP)を開発した。CSIP は光子吸収によって生ずる量子構造の電気分極を電界効果トランジスタ(FET)によって検知する電荷敏感型検出器であり、従来検出器に比べて2~4桁の高感度を有する。

## 2. 研究の目的

検出器 CSIP を利用した THz 顕微鏡は研究開始時において既に開発していたが、回折限界を考慮すると空間分解能は波長程度(10 $\mu\text{m}$ 以上)に留まっていた。しかし最も興味深いメゾスコピック現象を検出するには、sub- $\mu\text{m}$  分解能が要求される。そこで本申請研究では、既存の顕微鏡に AFM ベースのエバネッセント光学系を付加し、空間分解能を圧倒的に向上させることとした。

具体的には計測対象に金属プローブ等を接近させてエバネッセント THz 成分を散乱させ、散乱成分を顕微光学系で検出器に導くことにより、passive かつ sub- $\mu\text{m}$  分解能を有する無光源型 THz ナノ顕微鏡を開発することを目指した。本顕微鏡により、常温における物質現象のダイナミクスの実時間イメージング法の確立が期待できる。

## 3. 研究の方法

研究期間の前半(平成 20 年度)は、無光源型 THz ナノ顕微鏡の開発を行い、研究期間の後半(平成 21 年度)は、パッシブな近接場イメージングを行った。以下に具体的な研究

方法を示す。

[平成 20 年度]

### (20-1) AFM プローブの作製

タングステンワイヤ(径 50  $\mu\text{m}$ )を KOH 溶液中で電解研磨して AFM プローブを作製した。プローブは消耗品であるため頻繁に作製する必要があるが、先端径 100 nm 以下のプローブが歩留まり良く作製できた。

### (20-2)プローブ位置決め機構の開発

サンプルプローブ間の距離はナノオーダーで制御する必要がある。本研究ではプローブ先端とサンプルとの相互作用により発現する原子間力(シアフォース)をピエゾ効果で検知し、位置決めフィードバックを行うシアフォースモードを導入した自己位置検知式プローブ位置決め機構を開発した。プローブは水晶振動子(固有振動数: 32.7kHz)に取り付けられ、ファンクションジェネレータにより強制発振させる。本制御により、位置決め分解能 1nm オーダを達成した。

### (20-3) 無光源型 THz ナノ顕微鏡の開発

研究期間前に作製した共焦点 THz 顕微鏡に対してエバネッセント顕微光学系を導入し、図 1 に示すような無光源型 THz ナノ顕微鏡を開発した。近接場プローブにより散乱された THz 成分は、共焦点光学系を通してディテクタ(THz 検出器)に導かれる。ディテクタにて検出される THz 信号には Far-field のバックグラウンド成分と近接場成分が含まれるが、プローブを上下に振動させて信号を変調し、Lock-in 検出することにより、所望の近接場信号のみを取得される。

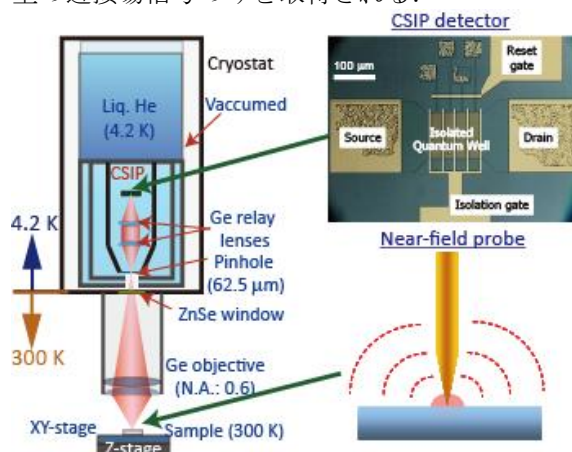


図 1 無光源型 THz ナノ顕微鏡

[平成 21 年度]

(21-1) 無光源型 THz ナノ顕微鏡の基礎検証  
シンプルな構造の標準試料(Au/GaAs)のグレーティング構造を EBL リソグラフィにて作製し、試料上においてプローブを走査させてパッシブ計測を行った。計測対象は、300K

からの輻射が最も多い波長  $14.5\mu\text{m}$  近傍をターゲットとした。検証事項は、主に空間分解能とスループットである。

(21-2) 物質現象の passive イメージング  
 金属と半導体上のエバネッセント波をパッシブに近接場計測し、信号を比較した。その結果、常温において室温熱励起された表面プラズモンが金属上に存在することを実験的に確認した。

#### 4. 研究成果

構築した顕微鏡を用い、図 2(a)に示すサンプルに対しパッシブ近接場計測を行った。サンプルは  $3\mu\text{m}$  ピッチのグレーティング構造であり、GaAs 基板上に Au を  $120\text{nm}$  蒸着している。 $36\mu\text{m}\times 36\mu\text{m}$  の領域を  $200\text{nm}$  ステップ( $180\times 180$  ピクセル)で走査し、散乱された THz 近接場信号をロックイン検出した。各ピクセルにおけるロックイン時定数及び走査間隔は  $300\text{ms}$  である。得られた passive イメージングの結果は図 2(c)の通りである。比較のため、パッシブ計測した Far-field 像を図 2(b)に示している。Far-field 像においては、回折限界のため分解能が  $15\mu\text{m}$  程度であり、グレーティング構造は分解不可能である。一方、図 2(c)においては、GaAs と Au を明瞭に識別することができる。波長  $14.7\mu\text{m}$  に対して  $3\mu\text{m}$  ピッチが識別できるため、本結果は回折限界を上回る超解像像である。以上から、常温における自然放出光の近接場イメージングが可能であることが示された。図 2(c)において、GaAs からの信号よりも Au からの近接場信号の方が大きい、これは Au の表面近傍に表面プラズモンによるエバネッセント波が生じているからである。室温熱励起された表面プラズモンを直に観察した例は他にない。

次に、s-SNOM の分解能を実験的に評価した。分解能評価実験においては、図 2(a)におけるグレーティングを跨ぐようにプローブを一次元的に走査し、得られた信号のエッジ幅から分解能を見積もっている。得られた一次元プロファイルは図 3(a)の通りである。走査ステップは  $25\text{nm}$  であり、ロックイン時定数及び走査間隔は  $1\text{s}$  である。二次元イメージングの結果同様、Au からの近接場信号強度が GaAs からの信号強度よりも大きいことが見てとれる。また近接場信号のエッジ幅から、構築した散乱型近接場顕微鏡の分解能は  $150\text{nm}(\lambda/50)$  以下であることが見積もられる。常温からの自然放出光をサブミクロン分解能で passive 計測した結果自体が世界初であり、本顕微鏡法の大きなポテンシャルを示す結

果となった。

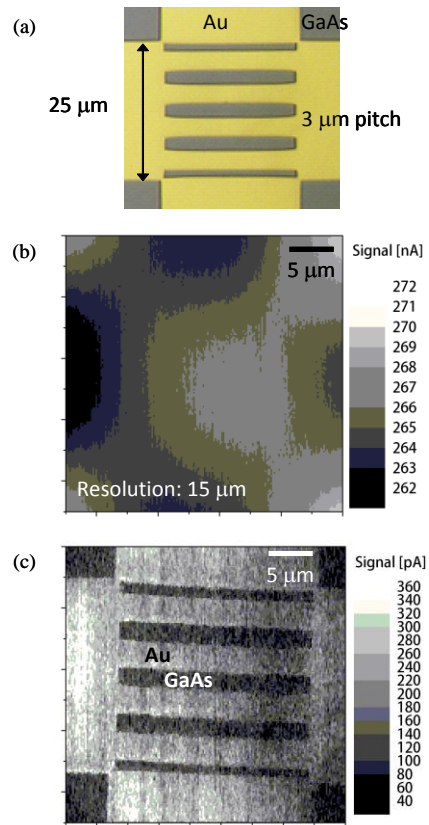


図 2 (a) 測定サンプル：GaAs 基板上に Au を  $120\text{nm}$  蒸着している。(b) パッシブな Far-field 像 (c) パッシブな近接場像

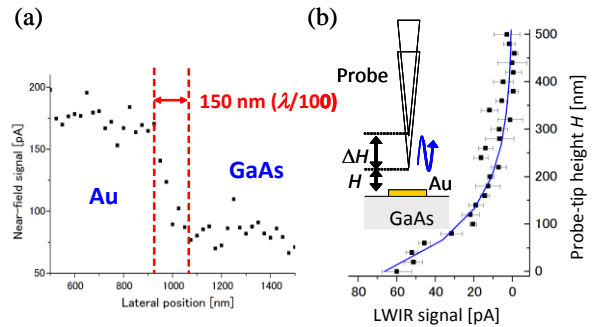


図 3 (a) Au/GaAs 境界の 1 次元プロファイル (b) プローブの高さと近接場信号の関係

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件) 全て査読有り

1. Y. Kajihara, K. Kosaka, and S. Komiyama: A sensitive near-field microscope for thermal radiation, Rev. Sci. Instrum., **81**, 3 (2010) 033706 1-4.
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**, 6 (2009) 063702 1-4.

[学会発表] (計 9 件)

1. 梶原優介, 小坂圭史, 小宮山進: 散乱型近接場顕微鏡によるテラヘルツ自然放出光の超解像イメージング, 2010 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, 埼玉大学, (2010/3/17) 385-386.
2. 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) 317-318, Osaka, Japan, Dec. 1, 2009
3. Y. Kajihara, S. Komiyama, and K. Kosaka: Shear-force distance control for terahertz near-field microscopy, 3rd International Conference of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology (ASPEN 2009) 2A2-2-2045-p, Kitakyusyu, Japan, Nov. 12, 2009.
4. Y. Kajihara, S. Komiyama, P. Nickels, and T. Ueda: Passive imaging with a highly-sensitive infrared phototransistor, The 34th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2009), 09030303, Busan, Korea, Sep. 22, 2009.
5. Y. Kajihara, T. Ueda, P. Nickels, and S. Komiyama: Passive terahertz microscopy with a highly sensitive detector, IMEKO XIX World Congress, 158-163, Lisbon, Portugal, Sep. 9, 2009.
6. 小坂圭史, 梶原優介, 小宮山進: THz 近接場光検出に向けたシアフォース型 AFM の開発, 第 70 回応用物理学会学術講演会講演予稿集, 富山大学, (2009/9/9) 613.
7. 梶原優介, 小宮山進, パトリック・ニックェルス, 上田剛慈: 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, (2009/6/9) 29-34.
8. 梶原優介, 小宮山進, パトリック・ニックェルス, 上田剛慈: テラヘルツ顕微鏡の構築とパッシブイメージング, 2009 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, 中央大学, (2009/3/13) 509-510.
9. 梶原優介, 上田剛慈, 小宮山進: パッシブ THz 共焦点顕微鏡の構築及び分解能評価, 第 69 回応用物理学会学術講演会講演予稿集, 中部大学(2008/9/3) 878.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

○取得状況 (計 0 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
取得年月日:  
国内外の別:

[その他]

ホームページ等

<http://maildbs.c.u-tokyo.ac.jp/~komiyama/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

梶原 優介 (KAJIHARA YUSUKE)

東京大学・大学院総合文化研究科・研究員

研究者番号: 60512332

(2) 研究分担者

( )

研究者番号:

(3) 連携研究者

( )

研究者番号: