

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 4 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2011～2013

課題番号：23246066

研究課題名(和文)ポンプ-プローブレーザーテラヘルツ放射顕微鏡の開発と超高速電子デバイス材料の探索

研究課題名(英文)Fabrication of a pump-probe terahertz emission microscope and investigation of ultra fast electronic devices

研究代表者

村上 博成 (Murakami, Hironaru)

大阪大学・レーザーエネルギー学研究センタ・准教授

研究者番号：30219901

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 38,500,000円、(間接経費) 11,550,000円

研究成果の概要(和文)：微細加工された超高速光電子デバイスの評価のため、レーザーテラヘルツ放射顕微鏡(LTEM)の高空間分解能化を行った。具体的には原子間力顕微鏡(AFM)のカンチレバーのチップ先端に500nm径の微細孔加工を施したものを使用し、これにフェムト秒レーザーを照射することによって先端から発生する近接場光を利用してテラヘルツ電磁波パルスの発生に成功した。このテラヘルツ電磁波パルスの強度分布を観測することにより高分解LTEM像およびAFM像の同時観察に成功した。また、近接場光励起によって発生する微弱なテラヘルツ電磁波パルスを高感度に検出するため、低温成長GaAs光伝導スイッチ形状の最適化を行った。

研究成果の概要(英文)：

We have fabricated a near field excitation laser terahertz emission microscope (LTEM) combined with an atomic force microscope (AFM) in order to evaluate optoelectronic devices with fine structures. In the combined system we introduced a special AFM cantilever with a narrow aperture of about 500 nm into an optical path of excitation femtosecond pulsed laser to generate near-field light to excite terahertz wave pulses. Using the fabricated system, we have succeeded in the generation of terahertz wave pulse from a bowtie antenna fabricated on a low temperature grown GaAs (LT-GaAs) by near field light excitation, and also succeeded in the simultaneous observation of LTEM and AFM images.

On the other hand, we have also succeeded in the high-sensitive detection of terahertz wave pulse by optimizing the antenna structure of photoconductive terahertz detector fabricated on LT-GaAs.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス・電子機器

キーワード：テラヘルツ 近接場光 顕微鏡 原子間力顕微鏡 フェムト秒レーザー 半導体光スイッチ

1. 研究開始当初の背景

近年、半導体デバイスをはじめとする各種電子材料・デバイスの微細化・高速化が進められており、その効率的な開発のためには試作デバイスあるいはデバイス・プロセス過程において、その性能評価を非接触・非破壊で、しかも特別な前処理無しに簡便に行える評価ツールが必要となる。また、将来、開発が予想される100GHz程度で動作する超高速デバイスにおいては、デバイス内のキャリアについてピコ秒オーダーの時間分解能で超高速キャリアダイナミクスを評価可能な装置が必要となってくる。

このように微細化したデバイス进行评估する装置として、例えば半導体デバイスの故障評価・解析などでは、走査型プローブ顕微鏡、ナノプローバー、SEM、TEM、STEM などナノ空間レベルで分析可能な評価装置が多用されている。しかしながら、これらの評価ツールを使って故障箇所診断を行う場合、その測定対象エリアであるミクロン領域までの絞込み作業を行う必要があり、これには疑わしき箇所を複数のミクロン領域に区分けし、これをくまなく観察していくというとても大変な作業を要する。特に、外見上判断できる配線の断線等の欠陥であれば比較的容易に検出することも可能であるが、配線層の下部に埋もれたp-n 接合部などの内部欠陥の場合、その各区分け領域に対して、電子分光や断面観察、その他の方法により、より詳細な観察が必要となる。

このようなp-n接合欠陥のような通常外部からは観察不可能な内部構造の欠陥部検出やキャリアダイナミクスの評価に有用な装置として、我々が独自に開発してきたレーザーテラヘルツ放射顕微鏡があるが、その空間分解能やその他の点において高機能化を図ることは重要である。

2. 研究の目的

社会的ニーズの必然性として、半導体デバイスをはじめとする各種電子材料デバイスの微細化・超高速化が進められている。特に今後、数10ギガヘルツからテラヘルツ帯で動作可能な超高速デバイスを開発していく上で、そこに用いる材料特有の超高速キャリアダイナミクスを評価していくことは重要である。本研究ではこれらの評価を可能とする目的で、様々な電子材料・デバイス中の電界分布やキャリアのダイナミックな動きをイメージング評価可能で、p-n 接合の不良箇所の検出などにも適用可能なレーザーテラヘルツ放射顕微鏡 (LTEM) の高機能化を試みる。

このLTEM は、半導体などの電子デバイス内部に存在する局所電界を利用してテラヘルツ電磁波パルスを生じさせ、これをイメージングすることにより、そのテラヘルツ電磁波パルスの強度分布からLSIなどの故障箇所評価を行うことが出来る装置である。具体的には、フェムト秒レーザーを照射することにより励

起されたキャリアはこの局所電界(あるいは、外部からの印加電界)によって加速され瞬間的な局所電流を生じる。この時の光電流の時間変化によってテラヘルツ電磁波パルスが放射されるが、このテラヘルツ電磁波を観測しイメージングすることでデバイス内部に存在する欠陥等の検出が可能となる。

またこの際励起レーザーをポンプ光とプローブ光に分割し、ポンプ光照射後のキャリアの励起状態や、緩和のダイナミクスの様子を、時間遅延を与えたプローブ光によって放射されるテラヘルツ電磁波を使って2次元的にイメージングすることも可能である。この手法を使えば、キャリアのダイナミクスを2次元的にサブピコ秒の時間分解能で観察することが可能となる。

本研究では、我々がこれまで独自に開発を行ってきたこのLTEMの高機能化のために、イメージングにおける高空間分解能化および、高感度観察のために通常テラヘルツ検出に用いている半導体光伝導スイッチの特性改善を目指す。具体的には、原子間力顕微鏡のカンチレバーのチップ先端に微細孔加工を施したものを使用し、これに励起光であるフェムト秒レーザーを照射し、カンチレバーチップ先端に発生する近接場光を利用してテラヘルツ電磁波パルスの発生を可能とし、このテラヘルツ電磁波パルスの強度分布の高分解イメージングを可能とするとともに、微弱なテラヘルツ電磁波パルスを効率よく検出可能な半導体光スイッチの形状探索を行うことを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 高空間分解能化のための近接場光励起LTEMの開発

通常テラヘルツイメージングと異なり、LTEM の空間分解能は励起光源となるフェムト秒レーザーの集光径で決まる。よって、LTEM で得られる空間分解能は通常テラヘルツイメージング法の100分の1程度の高分解能となるが、この集光径も光の回折限界で制限されるため、従来のLTEM の空間分解能は精々1 μm 程度であった。本研究ではこの空間分解能を向上させるため、原子間力顕微 (AFM) との複合システムを構築した(図1参照)。具体的にはAFMの探針として用いるカンチレバーチップの先端にレーザー波長(800nm)よりも小さな寸法の微小開口孔を有するものを使用し、この開口孔にフェムト秒レーザー光を照射し、そのチップ先端から局所的に発生する近接場光をテラヘルツ波の励起光源として用いた。これにより、従来の方法に比べさらに局所的にテラヘルツ電磁波パルスを励起させることで、LTEM イメージの高分解能化を目指した。

またこのように微小開口孔を有するAFM用カンチレバーを併用しているため、LTEM 画像とAFM 画像を同時観察することも可能となる。本研究では、この開口部の孔径として500 nm ϕ

を有するカンチレバーを使用した。

(2) 高感度テラヘルツ検出のための半導体光伝導スイッチの形状最適化に関する研究
このように強度的に微弱な近接場光を励起源として用いるため、発生するテラヘルツ電磁波パルスの強度も非常に微弱で、高感度な観察を行うためには従来の半導体光伝導検出器(PCD)に比べてより高感度な検出器の開発が必要となってくる。このため本研究では、上記システムの構築と並行してPCDの高感度化も行った。具体的には低温成長 GaAs (LT-GaAs) 基板上に形状の異なる光スイッチを作製しその特性評価を行った。一般に、PCDによるテラヘルツ電磁波検出の際の問題点として、遮蔽効果(スクリーニング効果)がある。これは光励起されたキャリアに起因して引き起こされる空間電荷分極によって入射テラヘルツ電磁波パルスの電界が打ち消され、結果として出力信号が減少してしまう現象である。このため検出信号強度を大きくするために励

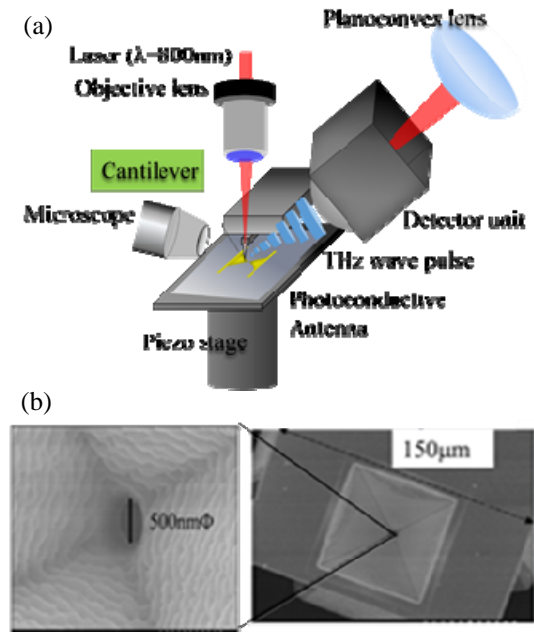


図1. (a)構築したLTEM・AFMハイブリッドシステム。(b)微小開口孔付カンチレバーチップ(レーザー入射面より撮影)。

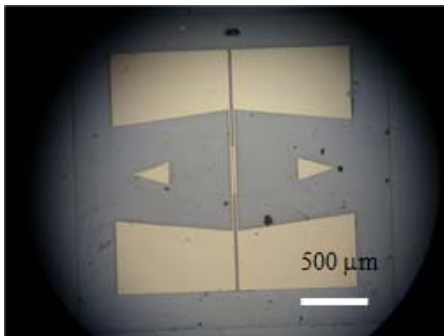


図2. 作製したLT-GaAsダイポール型光伝導検出器。電極幅 $d=500\mu\text{m}$ 。

起レーザーパワーの強度を大きくしてもそれほど効果が得られないのが現状である。そこで、一般的なダイポール型PCDに比べ、スイッチ部の電極幅 d を長くし、励起光の集光面積を広くすることで、通常PCDと比較して同強度の励起光に対し、光キャリア密度を減少させスクリーニング効果を抑制させることにより高感度な検出を試みた。具体的には、LT-GaAs基板上にAuSn合金で形成する電極部の幅 d を $50\mu\text{m}$, $100\mu\text{m}$, $300\mu\text{m}$, $500\mu\text{m}$ のダイポール型PCAを作製した(図2参照)。そのギャップ領域は長方形であるため、球面平凸レンズと円筒面平凸レンズを用いることでレーザー光を楕円形に集光出来るようにし、その検出特性の評価を行った。

4. 研究成果

(1) 近接場光励起LTEMの性能

構築したLTEM・AFMハイブリッドシステムを用いて、LT-GaAs基板上に作製したボウタイアンテナスイッチからテラヘルツ電磁波放射およびイメージ観察を行った。図3にLT-GaAsボウタイ型アンテナから放射された時間領域テラヘルツ電磁波パルス波形を示す。近接場光励起によって放射されるテラヘルツ電磁波パルス強度は、微小開口孔付カンチレバーを挿入しない場合に比べて、およそ 2×10^{-3} 倍となっていることがわかる。しかしながら、この計測により微弱な近接場光によってもLTEM動作によるテラヘルツ電磁波パルスの放射を観測できることを確認した。この図3b中の矢印で示したピーク位置に時間軸を固定し、試料を x - y 走査させることによりLTEMイメージ観察を行った。その結果を図4bに示す。黄色で示す領域が、テラヘルツ電磁波パルスが放射されている領域に対応しているが、同時観察した図4aのAFM像との対比から、バイアス電圧が印加された電極間においてのみテラヘルツ電磁波パルスの放射が生じていることがわかる。また、空間分解能を評価するため、電極間に存在する微小堆積物付近(図4a中矢印)のAFMおよびLTEMのラインプロファイルを使った評価を行った。その結果を図4dに示す。この両者の比較から、今回構築した近接場光励起LTEMシステムの空間分解能は少なくとも微小開口孔サイズと同程度の 500nm 程度を有していることが判明した。

(2) 半導体光伝導テラヘルツ検出器の特性

今回作製した各PCDの出力信号の励起用入射レーザー強度依存性の観察結果を図5に示す。この計測ではInAs基板に波長 800nm のフェムト秒レーザーを照射し、これによって放射されるテラヘルツ電磁波パルスの測定を行った。PCDへ入射する励起光強度の増加に伴い、PCD-50において検出されるテラヘルツ電磁波パルスの最大振幅は入射励起光強度の増加に伴い、飽和していく傾向にあることが分かる。一方で、PCD-500やPCD-300によって検出されたテラヘルツ電磁波パルス最大振幅は

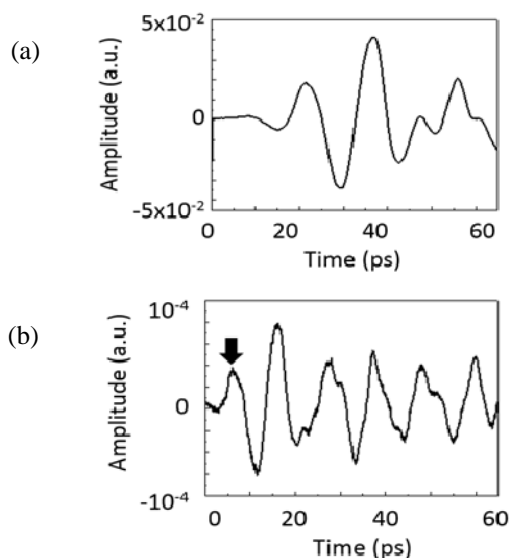


図3. LT-GaAs ボウタイ型アンテナから放射された時間領域テラヘルツ電磁波パルス波形。(a)カンチレバーなし。(b)カンチレバーあり。レーザーパワーは10mWで固定。

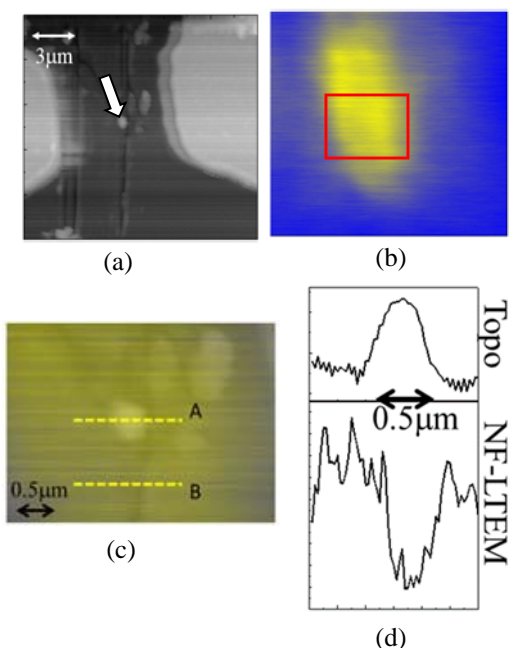


図4. (a)LTEM像と同時観察したLT-GaAsボウタイ型アンテナのAFM像。(b)LTEM像。(c)図b中の長方形で囲まれた領域の高感度LTEMイメージ。(d)図c中の挿入ラインAに沿ったAFMラインプロファイル(上)、およびLTEM像のラインAおよびBに沿ったラインプロファイルの差分。なお、LTEMイメージは電極間バイアス電圧10Vを印加して観察。

同様に飽和していく傾向は見られているものの、より緩やかな飽和になっており、50 mWのパルス光を入射した場合には、PCD-500とPCD-50によって検出されたTHzパルスの最大振幅は2倍以上の差が認められた。通常のダイポール型スイッチの電極幅 d は $5\mu\text{m}$ 程度で、その検出特性は今回作製した $d=50\mu\text{m}$ のもの

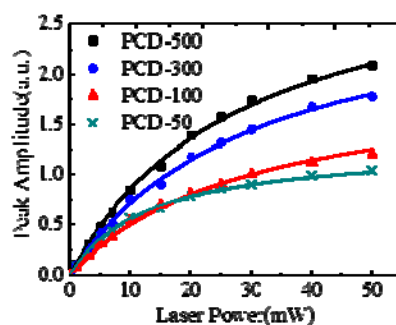


図5. LT-GaAs ダイポール型光伝導検出器の出力信号の入射レーザー強度依存性。ここでPCD-50、-100、-300、-500は、それぞれ $d=50$ 、100、300、500 μm のPCDに対応。

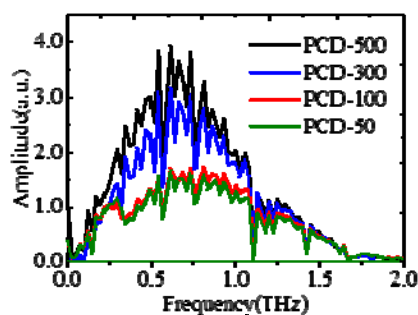


図6. 各PCDのテラヘルツ検出スペクトル特性。

とほぼ同じ特性を示したが、このようにアンテナ幅を大きくすることで従来より高強度なレーザー光を入射することができ、より高い検出感度を得ることが判明した。また図6に、各PCDを用いて観測された時間領域テラヘルツ電磁波パルスのFFTスペクトルを示す。電極幅 d が大きくなるに従って1THz以下の検出特性が最大で3倍程度に向上している様子がわかる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 8件)

- ① H. Murakami、K. Serita、Y. Maekawa、S. Fujiwara、E. Matsuda、S. Kim、I. Kawayama、M. Tonouchi、Laser terahertz imaging system、Journal of Physics D、査読有、2014、印刷中
- ② Y. Maekawa、H. Murakami、I. Kawayama、M. Tonouchi、Fabrication of a near field excitation laser THz emission microscope、Proc. of The 4th International Symposium on Terahertz Nanoscience (TeraNano 4)、2014、pp. 83-84
- ③ 芹田和則、村上博成、川山巖、高橋義典、吉村政志、森勇介、斗内政吉、テラヘルツ波光源走査イメージングシステムの開発、日本赤外線学会誌、査読有、23巻、2013、pp. 6-12

- ④ K. Serita, H. Murakami, I. Kawayama, Y. Takahashi, M. Yoshimura, Y. Mori, J. Darmo, M. Tonouchi, Evaluation of Human Hairs in Terahertz Frequency Domain, Proc. of International Workshop on Optical Terahertz Science and Technology (OTST2013), 2013, p. 42
- ⑤ K. Serita, S. Mizuno, H. Murakami, I. Kawayama, Y. Takahashi, M. Yoshimura, Y. Mori, J. Darmo, M. Tonouchi, Scanning laser terahertz near-field imaging system, Optics Express, 査読有, 20 巻, 2012, pp. 12960-12965
- ⑥ K. Serita, H. Murakami, I. Kawayama, Y. Takahashi, M. Yoshimura, Y. Mori, J. Darmo, M. Tonouchi, Scanning Laser Terahertz Near-field Imaging System, Proc. of International Symposium on Terahertz Nanoscience 2012 (TeraNano 2012), 2012, p. 50
- ⑦ H. Murakami, T. Nakazawa, K. Serita, M. Tonouchi, Y. Takahashi, M. Yoshimura, Y. Mori, Y. Imai, Fabrication of a Fiber-connected Terahertz Time-domain Spectroscopy System for 1.56 μ m Femtosecond Fiber Laser, Proc. of International Symposium on Terahertz Nanoscience 2011 (TeraNano 2011), 2011, p. 242
- ⑧ K. Serita, H. Murakami, J. Darmo, I. Kawayama, Y. Takahashi, M. Yoshimura, Y. Mori, M. Tonouchi, Scanning Laser Terahertz Imaging System, Proc. of TeraNano 2011, 2011, p. 241
- ⑨ 水井健太, 富田直秀, 川山巖, 村上博成, 斗内政吉, 低温成長 GaAs テラヘルツ電磁波検出性能の光伝導アンテナ形状依存性, 第 60 回応用物理学会春季学術講演会, 2013 年 3 月 27 日-3 月 30 日, 神奈川工科大学
- ⑩ K. Serita, H. Murakami, I. Kawayama, Y. Takahashi, M. Yoshimura, Y. Mori, J. Darmo, M. Tonouchi, Scanning Laser Terahertz Near-field Imaging System, テラヘルツ技術研究会, 2012 年 7 月 6 日, 沖縄
- ⑪ 前川佑樹, 藤原昌悟, 村上博成, 川山巖, 斗内政吉, ダイナミックテラヘルツ放射顕微鏡による GaAs 光スイッチ中の超高速キャリアダイナミクス評価, テラヘルツ技術研究会, 2012 年 7 月 6 日, 沖縄
- ⑫ K. Serita, H. Murakami, I. Kawayama, Y. Takahashi, M. Yoshimura, Y. Mori, J. Darmo, M. Tonouchi, Scanning Laser Terahertz Near-field Imaging System, TeraNano 2012, 2012 年 7 月 4 日-5 日, 沖縄
- ⑬ K. Serita, H. Murakami, J. Darmo, I. Kawayama, Y. Takahashi, M. Yoshimura, Y. Mori, M. Tonouchi, Scanning Laser Terahertz Imaging System, TeraNano 2011, 2011 年 11 月 24 日-29 日, 大阪
- ⑭ H. Murakami, T. Nakazawa, K. Serita, M. Tonouchi, Y. Takahashi, M. Yoshimura, Y. Mori, Y. Imai, Fabrication of a Fiber-connected Terahertz Time-domain Spectroscopy System for 1.56 μ m Femtosecond Fiber Laser, TeraNano 2011, 2011 年 11 月 24 日-29 日, 大阪

[学会発表] (計 10 件)

- ① 富田直秀, 水井健太, 村上博成, 川山巖, 斗内政吉, テラヘルツ用低温成長 GaAs 光伝導アンテナのテラヘルツ検出感度の形状依存性, 第 61 回応用物理学会春季学術講演会, 2014 年 3 月 17 日-3 月 20 日, 青山学院大学
- ② Y. Maekawa, H. Murakami, I. Kawayama, M. Tonouchi, Fabrication of a near field excitation laser THz emission microscop, TeraNano 4, 2014 年 3 月 14 日-3 月 15 日, 大阪大学
- ③ I. Kawayama, M. Ohshiro, Y. Sano, H. Murakami, J. Allred, M. Wang, J. Kono, R. Vajtai, P. Ajayan, M. Tonouchi, Terahertz time-domain spectroscopy of large-area grapheme on various substrates, APS March meeting 2014, 2014 年 3 月 3 日-3 月 7 日, Denver, USA
- ④ K. Serita, H. Murakami, I. Kawayama, Y. Takahashi, M. Yoshimura, Y. Mori, J. Darmo, M. Tonouchi, Evaluation of Human Hairs in Terahertz Frequency Domain, OTST2013, 2013 年 4 月 1 日-4 月 5 日, 京都

[その他]

ホームページ等
<http://www.ile.osaka-u.ac.jp/research/thp/people/murakami/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

村上 博成 (MURAKAMI, Hironaru)
 大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・准教授
 研究者番号: 30219901

(2) 研究分担者

川山 巖 (KAWAYAMA, Iwao)
 大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・准教授
 研究者番号: 10332264