

テラヘルツ波のイメージング応用

Imaging Application in Terahertz-waves Technology

山下将嗣 中島佐知子 大谷知行 川瀬晃道

Abstract

我々はテラヘルツ波の物質に対する透過特性を利用したテラヘルツ分光イメージングシステム、及びフェムト秒レーザ走査による物質からのテラヘルツ波放射を用いたレーザテラヘルツエミッション顕微鏡の開発を進めている。本稿では、これらのイメージングシステムの応用例として、薬物のテラヘルツ帯分光情報を用いた郵便物内の違法薬物識別技術、及びレーザテラヘルツエミッション顕微鏡による LSI 内部の故障箇所絞り込み技術への応用について紹介する。

キーワード：テラヘルツイメージング、非破壊検査、郵便物、違法薬物、大規模集積回路、故障解析

1. ま え が き

近年、テラヘルツ波を用いた分光分析システムやイメージングシステムの開発研究が急速に進んでいる。テラヘルツイメージングに関する研究は、1970年代に行われていたが⁽¹⁾、1990年代に入りフェムト秒レーザや非線形光学効果を用いた簡便なテラヘルツ波発生・検出技術の開発により盛んに行われるようになった^{(2)~(4)}。

テラヘルツ波の特徴として、物質に対する適度な透過性を有すること、物質固有の、特に分子間振動による吸収が現れることが挙げられる。前者の特性を利用して、最近では NASA によってスペースシャトル外部断熱材の非破壊検査法としてテラヘルツイメージングが用いられ非常に注目された⁽⁵⁾。また、テラヘルツ帯の分光情報を用いたセンシング技術としては、DNA の変性構造と二重らせん構造ではテラヘルツ帯の光学特性が異なるこ

とを利用した蛍光マーカフリー DNA チップの開発が進められている⁽⁶⁾。

我々はテラヘルツ波を用いたイメージング研究の一環として、郵便物内の違法薬物検査システム⁽⁷⁾及び、集光したフェムト秒レーザ走査によって物質から放射されるテラヘルツ波を観測するレーザテラヘルツエミッション顕微鏡 (LTEM: Laser THz Emission Microscope)^{(8),(9)}の開発を進めている。本稿では、これらの研究に関してイメージング技術の応用という視点から、テラヘルツ分光イメージングによる郵便物内の違法薬物の識別及び、LTEM を用いた半導体大規模集積回路 (LSI) 内の無バリア故障箇所絞り込み技術について述べる。

2. テラヘルツ分光イメージングによる郵便封筒内部の違法薬物識別

現在、国内外で流通する郵便物、特に封筒などの信書は法律によりその開封検査が禁じられている。そのため、封筒中に麻薬や覚せい剤などの違法薬物が混入している疑いがある場合でも任意に開封検査を行うことはできず、非破壊で内容物を検査する手法が必要となる。非破壊検査としては、X線によるスキヤニングや化学的手法による物質検知、麻薬探知犬・探知器が広く認知されているが、X線検査では内容物の形状を知ることはできても、成分を特定できない。また、化学的手法や麻薬探知犬による検知は、封筒外部にわずかでも内容物が漏れ出していなければ適用できない。

山下将嗣 独立行政法人理化学研究所川瀬独立主幹研究ユニット
E-mail m-yama@riken.jp
中島佐知子 東京理科大学大学院工学研究科電気工学専攻
E-mail snakajima@riken.jp
大谷知行 正員 独立行政法人理化学研究所テラヘルツイメージング研究チーム
E-mail otani@riken.jp
川瀬晃道 正員 名古屋大学大学院工学研究科量子工学専攻
E-mail kawase@nuee.nagoya-u.ac.jp
Masatsugu YAMASHITA, Nonmember (Kawase Initiative Research Unit, Riken, Wako-shi, 351-0198 Japan), Sachiko NAKAJIMA, Nonmember (Faculty of Engineering, Tokyo University of Science, Tokyo, 162-0825 Japan), Chiko OTANI, Member (Terahertz Sensing & Imaging Team, Riken, Wako-shi, 351-0198 Japan), and Kodo KAWASE, Member (Graduate School of Engineering, Nagoya University, Nagoya-shi, 464-8603 Japan).
電子情報通信学会誌 Vol.89 No.6 pp.481-487 2006年6月

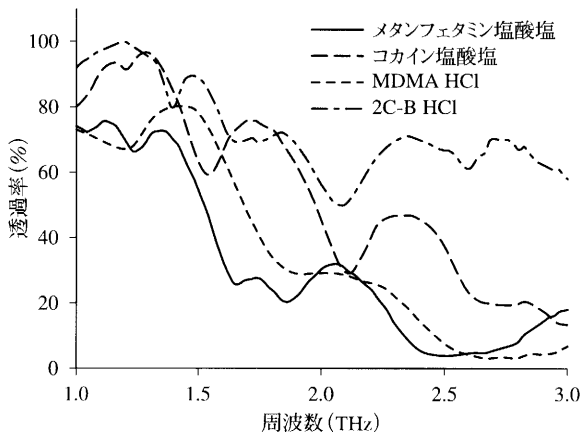


図1 違法薬物のテラヘルツ帯透過スペクトル 4種類の禁止薬物はそれぞれ特徴的な吸収ピークを有している。

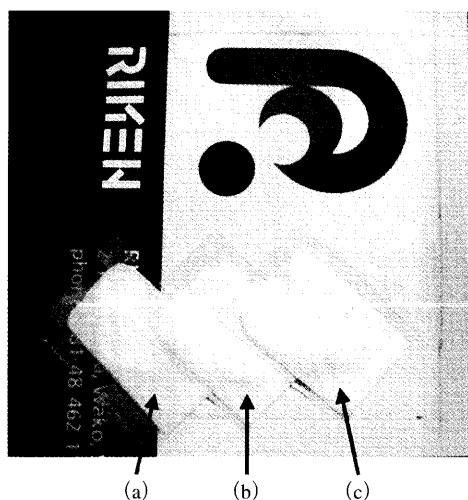


図2 封筒中の禁止薬物 (a) コデイン, (b) コカイン及び(c) スクロース. 薬物は封筒内に配置, テラヘルツ波透過イメージング測定を行った。

我々は種々の薬物に対してテラヘルツ帯の透過率測定を行い、幾つかの違法薬物において特徴的な吸収スペクトルが現れることを確認した。図1に代表的な覚せい剤であるメタンフェタミン塩酸塩(Methamphetamine HCl)、麻薬のコカイン塩酸塩(Cocaine HCl)、合成麻薬MDMA HCl及び2C-B HClの4種類の分光測定結果を示す。それぞれの禁止薬物が特徴的なピークを有しており、1~3THzの領域においてスペクトル形状による成分同定が可能であると考えられる。禁止薬物の透過スペクトルに現れた吸収ピークは主に分子間振動モードに起因するものと考えられ、各々の物質の分子構造に固有のものである。一方で、郵便封筒は3THz以下の周波数領域で高い透過性を有していることから、テラヘルツ分光イメージングが郵便封筒内部の違法薬物検出に有効と考え、その検証実験を行った。

測定に用いたサンプルを図2に示す。サンプルは、違法薬物である(a)コデイン、(b)コカイン、及び、(c)糖

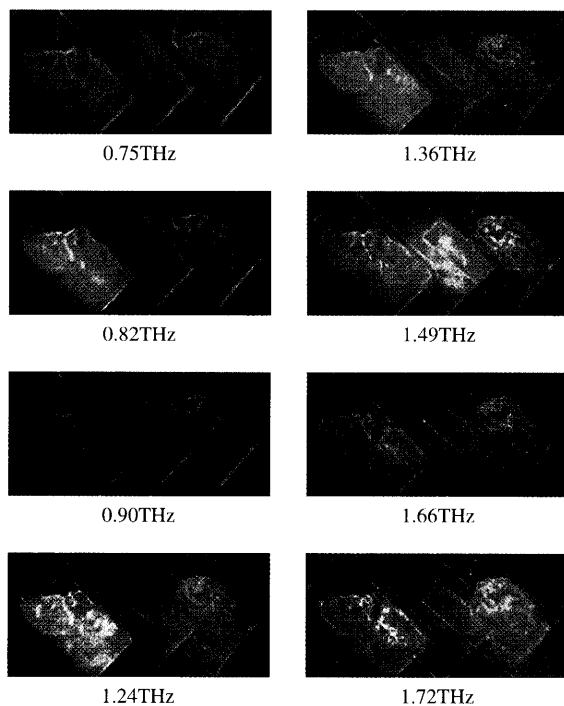


図3 サンプルのテラヘルツ帯多重分光画像

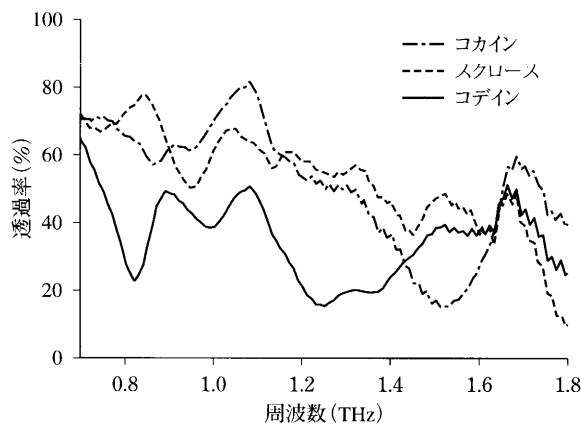


図4 薬物成分のテラヘルツ帯透過スペクトル

類のスクロースをそれぞれポリエチレン小袋に封入し、封筒中に配置した。分光イメージング測定には、理研と栃木ニコン社が共同開発したテラヘルツ時間領域分光(THz-TDS: THz Time Domain Spectroscopy) イメージングシステムを用いた。なお、測定したイメージング領域は縦24mm×横46mm、1ピクセルのサイズは250μm角、使用した周波数は0.7~1.8THz、周波数分解能は10GHzである。図3にマルチスペクトル画像の例を、図4に成分ごとのスペクトルデータを示す。図4のスペクトルは5回の隣接平均を行って平均化の処理を施している。取得した分光イメージングデータに対して最少二乗法による主成分分析法⁽¹⁰⁾を適用して得られた薬物の空間分布像を図5に示す。図5の各画像は、主成分分析により求められた各成分の空間分布像を表し、上から順

に、コデイン、コカイン、スクロース、周波数非依存成分であり、各成分の空間分布がめいりょうに分離抽出されている。この結果から、郵便物内に隠された違法薬物の非浸襲検出・識別法としてのテラヘルツ分光イメージングの有用性が示された。

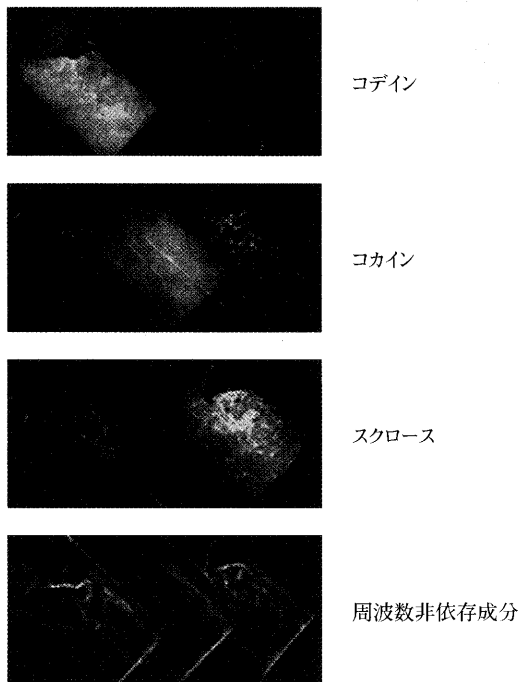


図5 テラヘルツ分光イメージングによる禁止薬物の識別結果

3. LTEM を用いた LSI 故障箇所絞り込み技術

LTEM とはフェムト秒レーザー走査によって放射されるテラヘルツ波の分布を高空間分解能で測定する走査型顕微鏡であり、試料内のテラヘルツ波放射機構に関する情報の画像化を行う。特に我々はフェムト秒レーザー励起により半導体 LSI から放射されるテラヘルツ波に着目し、LSI 内部の欠陥評価システムへの応用を目指して研究を進めている。

LSI からのテラヘルツ波放射は、フェムト秒レーザー励起によって回路内に光電流パルスを生成することで生じる。放射されるテラヘルツ波の時間波形は、光電流パルスの時間変化や回路内での伝搬経路等に依存するため、集積回路内の異常をテラヘルツ波の時間波形の変化として検出することにより、欠陥検出技術への応用が期待できる。

最先端の LSI 開発は微細化・複雑化が進むとともに生産の困難性が増しており、デバイス開発段階で生じるプロセスでの課題を解析しフィードバックを行う種々の故障解析が重要な役割を担っている。LSI の故障解析では、故障が存在する場所の絞り込みが重要であり、様々な故障箇所絞り込み技術が利用されている。しかしながら、従来の故障箇所絞り込み技術は、バイアス電圧を印加した動作状態あるいはスタンバイ状態の LSI 評価は可能だが、製造途中の LSI に適用することができない。LSI 製造工程の早期に故障解析を行うことにより研究開発効率は大きく向上するため、チップを無バイアス状態で測定

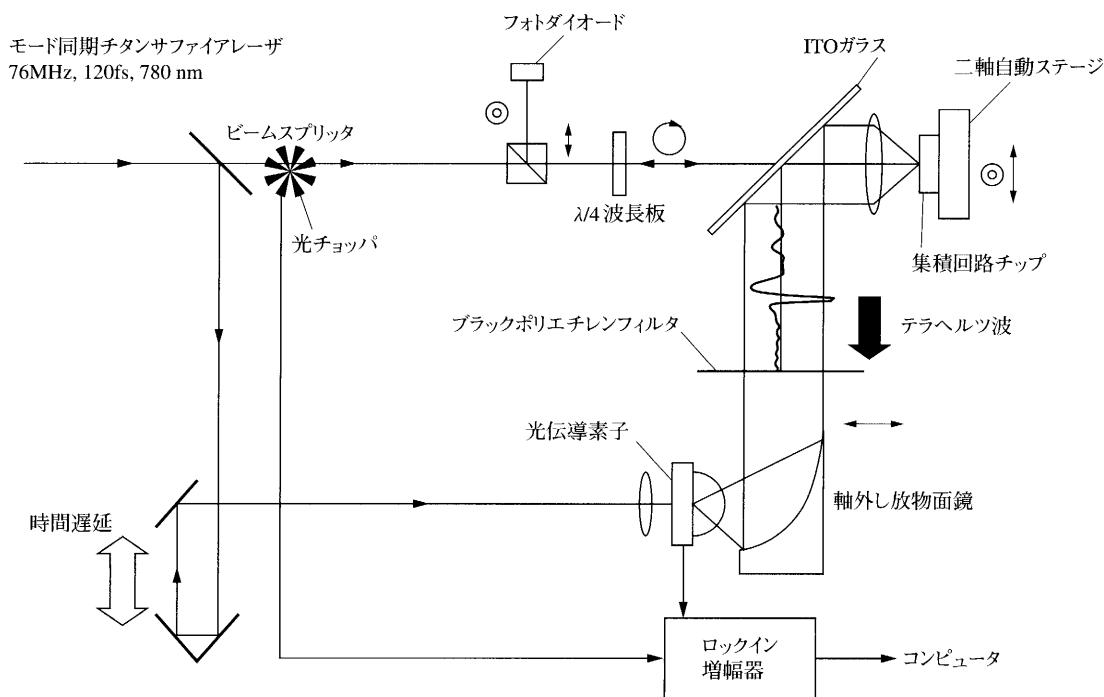


図6 LTEM システムの実験光学系概要

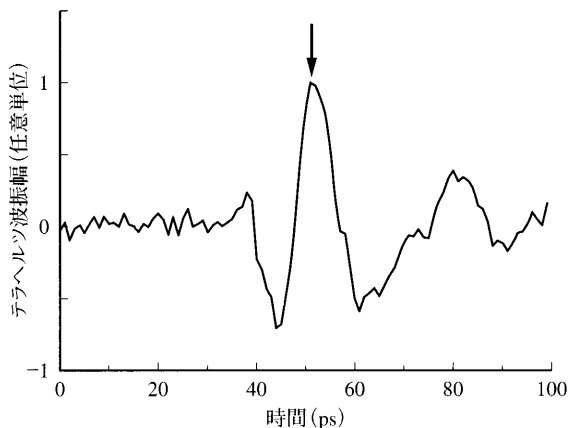
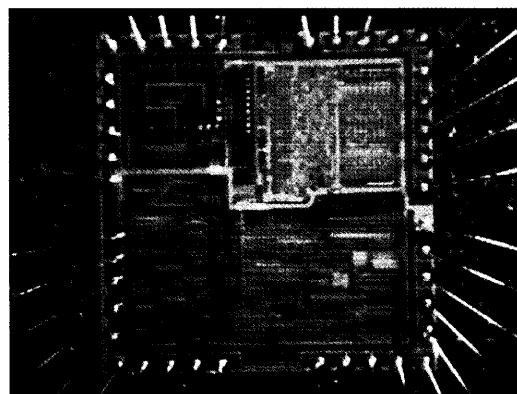


図7 LSI チップから放射されたテラヘルツ波の時間波形

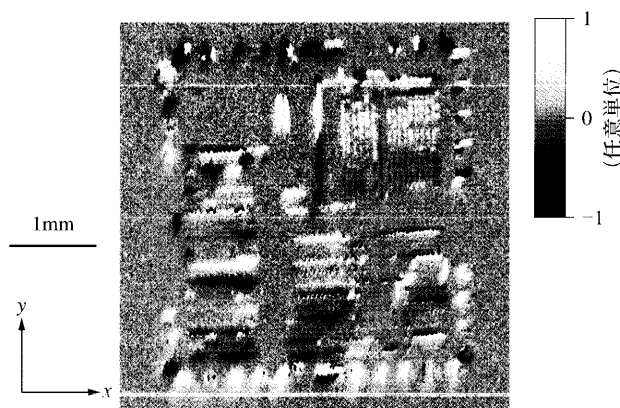
可能な故障箇所絞り込み技術の開発が望まれている。外部から電圧を印加しない場合でも LSI チップ内には pn 接合部等にビルトイン電界が存在するため、フェムト秒レーザーパルス照射によって生成される光電流パルスが回路内を流れテラヘルツ波は放射される。したがって、LTEM を用いて LSI を観察することにより、無バイアス状態の LSI チップで故障箇所の検出が行える可能性がある。

LTEM システムの構成を図 6 に示す。励起光源として、パルス幅 120fs、中心波長 780nm のモード同期チタンサファイアレーザを用いている。光源から出力されたフェムト秒レーザーパルスは、ビームスプリッタ (BS) によって励起光と検出光に分けられる。励起光はガラス基板上に作成された透明導電性酸化インジウムすず (ITO: Indium Tin Oxide) 薄膜を通過した後、集光用レンズによって精密自動ステージに設置された試料に集光される。システムの空間分解能は励起光 (波長 780nm) のスポットサイズで制限され、約 $3\mu\text{m}$ である。試料から放射されたテラヘルツ波はレーザ集光用に用いたプラスチックレンズで集められ、ITO 薄膜で反射された後、放物面鏡によって光伝導素子に集光される。光チョッパによる励起光の変調周波数に同期した検出器からの電流信号はロックインアンプにより検波・増幅される。光伝導素子に照射する検出光経路には折返しミラーを配置した自動ステージを配置しており、ステージを移動させることによって時間遅延を検出光に与え、テラヘルツ波の時間波形を検出することが可能である。また、試料からの反射光をフォトダイオードで検出することにより、反射レーザ顕微鏡像を取得しサンプルへのレーザ照射位置の調整を行う。

図 7 にバイアス電圧を印加した状態の LSI から放射されたテラヘルツ波の時間波形の測定結果を示す。放射されたテラヘルツ波の時間波形は、最初のメインパルスに続き、配線内での光電流分布やシリコン基板内での多重反射の影響によって、数十 ps 以上にわたり振動成分が



(a) LSI 光学顕微鏡像



(b) LTEM 像

図 8 LSI 光学顕微鏡像及び LTEM 像

続く波となっている。LTEM 像は検出光の時間遅延位置を固定し、電動ステージにマウントした LSI チップを二次元的に移動させながら、テラヘルツ波振幅信号を検出することにより取得した。回路内のどの位置をレーザ励起するかによって光電流分布及びそれに伴って放射されるテラヘルツ波の時間波形は変化するため、画像取得時の時間遅延ステージの位置を変化させることにより、多くの情報が得られる。本稿で紹介する実験結果は、図 7 において矢印で示したようにメインパルスの最大振幅位置において測定を行っている。

バイアス電圧を印加した条件で LSI の LTEM 像を取得した結果を図 8 に示す。測定に用いた LSI は最小配線幅が約 $2\mu\text{m}$ のマイクロプロセッサである。図 8 (a) は、LSI の光学顕微鏡写真であり、図 8 (b) はバイアス電圧印加時の LTEM 像である。図 8 (b) 中、白及び黒の領域はそれぞれ、符号が正及び負のテラヘルツ波振幅を表しており、回路内部の電流あるいは電界が逆向きであることを示している。LSI 内部に断線等の電気的欠陥がある場合には、内部の電界分布異常を反映して LTEM 像が変化する。

無バイアス電圧状態の集積回路内においても、pn 接合や金属/半導体接合などの界面には、ビルトインの電

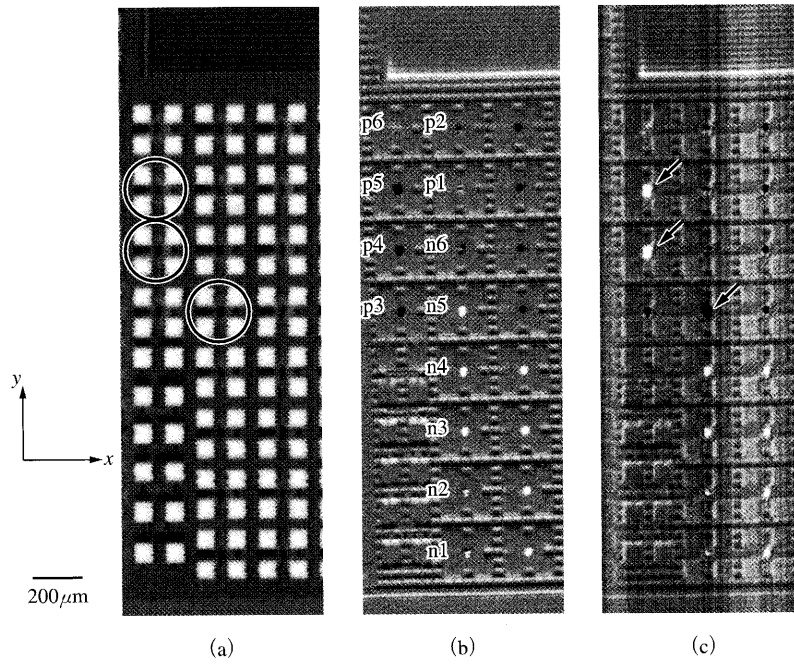


図9 無バイアス電圧下における MOSFET チップの測定結果 (a)はレーザ反射像であり、白丸は断線 MOSFET を示している。(b)正常チップ及び(c)断線チップの LTEM 像。(b)中 n1 ~ n6 及び、p1 ~ p6 は MOSFET の n チャネル及び p チャネルを表しており、(c)中に矢印で示した MOSFET の配線が断線している。

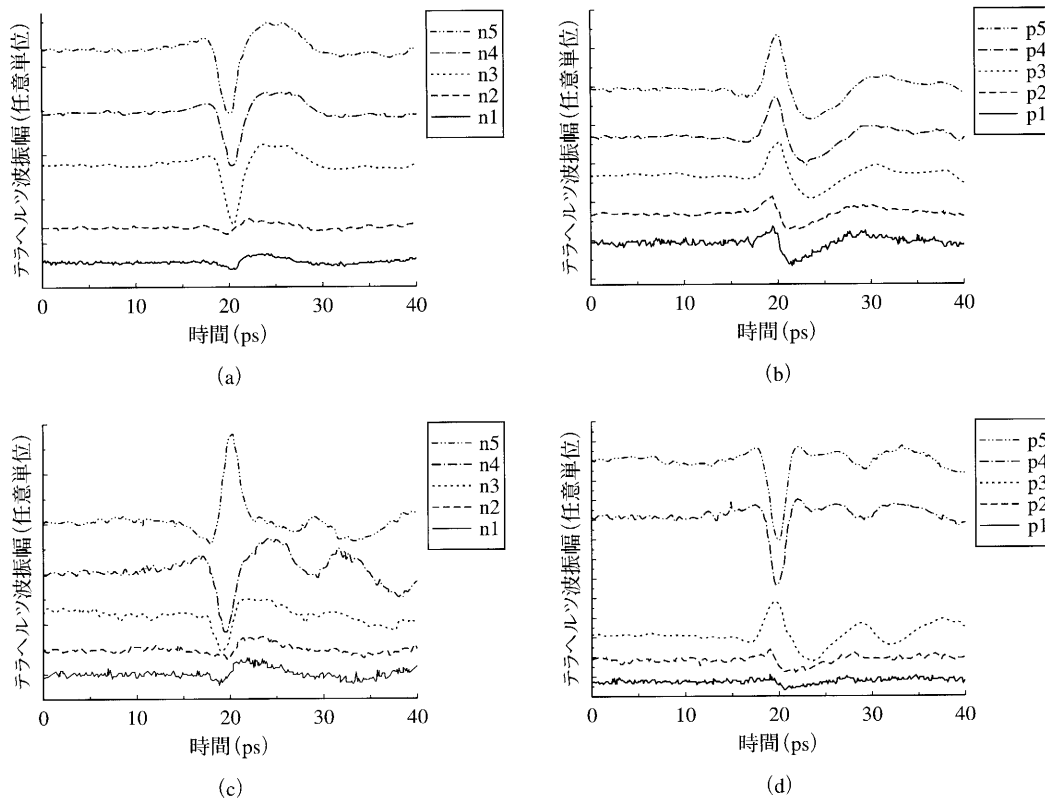


図10 無バイアス状態の MOSFET から放射されたテラヘルツ波時間波形 (a)正常 n 型, (b)正常 p 型, (c)断線 n 型, (d)断線 p 型 MOSFET から放射されたテラヘルツ波時間波形。

界が発生している。これらのビルトイン電界が発生している領域にフェムト秒レーザパルス照射すると励起された光キャリアがビルトイン電界によって加速され、光

電流パルスが発生しテラヘルツ波の放射が起る。シリコンの少数キャリアの再結合時間は、 μs オーダと長く数十 MHz のレーザ繰返し周期で発生する電流パルスは、

pn 接合等に接続された配線中を流れる。放射されるテラヘルツ波の時間波形は、発生した電流パルスの時間変化に比例するだけでなく、配線など空間的な構造からも影響を受けると考えられ、配線断線等の影響がテラヘルツ波の振幅強度あるいは時間波形の変化として現れる可能性がある。

無バイアス電圧下の測定に用いたサンプルは MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) が作り込まれた TEG (Test Element Group) で、LSI 製造プロセス評価用に作製されたものである。通常のサンプル及び断線箇所を含むサンプルを無バイアス電圧下で LTEM 観測した結果を図 9 に示す。図 9 (a) は励起レーザ光の反射像であり、白丸で示した箇所には電極から pn 接合近傍への金属配線を集束イオンビームによって断線させた MOSFET が存在する。図 9 (b) 中の n1 ~ n6, p1 ~ p6 は、それぞれ MOSFET が n チャネル, p チャネルであることを表しており、それぞれ接合部の形状・サイズを変化させて作製している。

MOSFET からのテラヘルツ波放射は、pn 接合部にフェムト秒レーザを照射した際、光電流パルスが発生することで起る。図 9 (b) 及び (c) は、正常サンプルと断線箇所を含む故障サンプルの LTEM 像であり、pn 接合部が存在する電極間の中心領域から強いテラヘルツ波の放射が確認できる。図 9 (b) の正常サンプルの測定結果より、n チャネル及び p チャネルで、空乏層内部の電界の向きを反映して、テラヘルツ波の振幅の符号が反転していることが分かる。また、n6 や p6 の MOSFET からのテラヘルツ波の放射振幅は非常に弱く、pn 接合形状の影響を受けていると考えられる。

一方、正常サンプル (図 9 (b)) と故障サンプル (図 9 (c)) を比較すると、FIB による断線箇所を有する P4, P5, N5 の三つの MOSFET (図 9 (c) 白矢印) から放射されたテラヘルツ波振幅の符号が反転していることが分かる。図 10 にサンプルの pn 接合部から放射されたテラヘルツ波の時間波形の測定結果を示す。テラヘルツ波の時間波形の振幅は MOSFET 構造に依存して変化しているが、時間波形の形状についてはほとんど変化が見られていない。これは、サンプル構造の変化が pn 接合部の形状・サイズが主であり、配線パターンに大きな違いがないためと考えられる。正常サンプルと故障サンプルの比較では、LTEM 像の比較結果と対応しており、断線させた MOSFET からのテラヘルツ波の時間波形の極性が反転している。この原因についてはまだ十分理解できていないが、無バイアス電圧下において MOSFET の配線断線により LTEM 像に差異が観測されたことから、LSI 製造工程において LTEM を用いた無バイアス故障箇所絞り込み技術の実現可能性が示唆された。

4. む す び

テラヘルツ波を用いたイメージングの応用技術について紹介した。テラヘルツ波の封筒に対する高い透過性と薬物固有の吸収スペクトルを利用することにより、郵便物内の違法薬物分布の識別に成功した。現在、開発中の違法薬物検査システムにおいては、本手法とテラヘルツ波散乱光検出を用いたスクリーニングシステムとの併用により、高速かつ高精度な判定が可能になると期待される。

また、レーザテラヘルツエミッション顕微鏡による半導体 LSI 故障箇所絞り込み技術について述べた。LSI 故障箇所絞り込みは、故障の根本的な原因解明をナノ・原子レベルで行う物理解析を遂行する上で不可欠な技術であり、LSI 研究開発において今後ますます重要になると考えられる。

なお、郵便物内の違法薬物検出に関して御協力頂いた科学警察研究所井上博之博士、金森達之研究員に深く感謝申し上げます。また、阪大レーザーエネルギー学研究所斗内政吉教授、NEC エレクトロニクス 三川 清氏には LTEM を用いた LSI 故障解析研究に関して御協力を頂き深く感謝申し上げます。

文 献

- (1) T.S. Hartwick, D.T. Hodges, D.H. Barker, and F.B. Footc, "Far infrared imagery," *Appl. Opt.*, vol.15, no.8, pp.1919-1922, 1976.
- (2) B.B. Hu and M. C. Nuss, "Imaging with terahertz waves," *Opt. Lett.*, vol.20, no.16, pp.1716-1719, 1995.
- (3) D.M. Mitteleman, R.H. Jacobsen, and M.C. Nuss, "T-ray imaging," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol.2, no.3, pp.679-691, 1996.
- (4) K. Kawase, J. Shikata, and H. Ito, "Terahertz wave parametric source," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol.35, no.3, pp. R1-R14, 2002.
- (5) N. Karpowicz, H. Zhong, C. Zhang, K. Lin, J-S. Hwang, J. Xu, and X.-C. Zhang, "Compact continuous-wave subterahertz system for inspection applications," *Appl. Phys. Lett.*, vol.86, 054105, 2005.
- (6) M. Brucherseifer, M. Nagel, P.H. Bolivar, H. Kurz, A. Bosserhoff, and R. Buttner, "Label-free probing of the binding state of DNA by time-domain terahertz sensing," *Appl. Phys. Lett.*, vol.77, no.24, pp.4049-4051, 2000.
- (7) K. Kawase, Y. Ogawa, Y. Watanabe, and H. Inoue, "Nondestructive terahertz imaging of illicit drugs using spectral fingerprints," *Opt. Express*, vol.11, no.20, pp.2549-2554, 2003.
- (8) T. Kiwa, M. Tonouchi, M. Yamashita, and K. Kawase, "Laser terahertz-emission microscope for inspecting electrical faults in integrated circuits," *Opt. Lett.*, vol.28, no.21, pp.2058-2060, 2003.
- (9) M. Yamashita, K. Kawase, C. Otani, T. Kiwa, and M. Tonouchi, "Imaging of large-scale integrated circuits using laser-terahertz emission microscopy," *Opt. Express*, vol.13, no.1, pp.115-120, 2005.
- (10) Y. Watanabe, K. Kawase, T. Ikari, H. Ito, Y. Ishikawa, and H. Minamide, "Spatial pattern separation of chemicals and frequency-independent components by terahertz spectroscopic imaging," *Appl. Opt.*, vol.42, no.28, pp.5744-5748, 2003.

(平成 18 年 2 月 22 日受付)



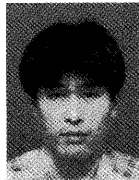
やました まさつぐ
山下 将嗣

平9 阪大・工・応物卒. 平14 阪大大学院工学研究科博士後期課程了. 工博. 平14 理研川瀬独立主幹研究ユニットユニット研究員. 平15 同基礎科学特別研究員. レーザテラヘルツ放射顕微鏡によるLSI故障解析技術の開発に従事. 応用物理学学会員.



なかじま さちこ
中島 佐知子

平17 東京理科大・工・電気卒. 同年同大学院工学研究科修士課程入学. 理研研修生. 主として, テラヘルツ分光イメージングの応用に関する研究に従事.



おたに ちこう
大谷 知行 (正員)

平2 京大・理卒. 平7 東大大学院理学系研究科了. 理博. 理研宇宙放射線研究室基礎科学特別研究員, 同イメージ情報技術開発室研究協力員を経て, 平13 同川瀬独立主幹研究ユニットサブリーダー. 平17 同テラヘルツ光研究プログラムテラヘルツイメージングチームチームリーダー. テラヘルツ波の高性能検出器の開発及び応用の研究に従事. 応用物理学会, 日本物理学会, 日本天文学会, 各会員.



かわせ こうじ
川瀬 晃道 (正員)

平元京大・工・電子卒, 平8 東北大学院工学研究科博士課程了. 工博. 平9 東北学院大・工・応物・助手. 平10 同講師. 平11 理研フォトダイナミクスセンターフロンティア研究員. 平13 同独立主幹研究員. 平17 名大・教授. 平17 年度文部科学大臣表彰若手科学者賞受賞. テラヘルツパラメトリック光源及びテラヘルツイメージングの研究に従事. 応用物理学会, レーザー学会, OSA, IEEE, 各会員.



2006 IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS 2006)

主催: IEEE Microwave Theory and Techniques Society (MTT-S), Communication Society (ComSoc)

日時: 1月14~20日 (RWS自体は17~19日の3日間)

会場: San Diego Convention Center, アメリカ

参加者: 2,446名 (展示会やその他ワークショップ等を含む)

主要参加国: アメリカ, カナダ, ドイツ, 日本, 韓国, イタリア, フランス, フィンランド, ほか

セッション数及び論文数: 28セッション (うちポスター2セッション), 論文157件

主たるトピックス:

本シンポジウムは, 2004年まではRadio and Wireless Conference (RAWCON)の名で開催されており, IEEEのMTT-SとComSocの共催によるマイクロ波と無線通信システム分野間の学際的な交流に主眼をおいたユニークな国際会議となっている. また本シンポジウムは“MTT Wireless Week”と呼ばれる週間行事の中心に位置し, Topical Meeting on Silicon Monolithic Integrated Cir-

cuits in RF Systems, Topical Workshop on Power Amplifiers for Wireless Communications 及び Wireless Exhibition と連携して開催され, 参加者は本シンポジウムのみでなく複数のワークショップやチュートリアル, 展示会に同時に登録・参加できる.

RWS 2006 自体の投稿件数は257件で, うち157件が採択されている. 一般投稿論文から優れた論文を選出し, 招待論文として各セッションのはじめに通常より長い発表時間を割り当てるなど, ユニークな工夫も見られた. 聴講者数の点から各セッションを見ると, 通信システムや理論に関するテーマよりもRF回路での実装に絡めた発表に聴講者が集まる傾向が強く, 参加者層もComSocに比べるとやはりMTT-Sからが多いという印象であった. 通信システム分野ではメジャーな国際会議であるICCやGLOBECOMでは, RF回路による実装をテーマにした論文が少ないことを考えると, 無線通信システム分野でも応用や実装に関するテーマであれば, 本シンポジウムに投稿するのもよいのではないと思われる. 2007年のRWSは, カリフォルニア州のロングビーチで開催される予定である.

(執筆者 落合秀樹 正員)

横浜国立大学大学院工学研究院知的構造の創生部門)