

平成 26 年 6 月 1 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：23246067
研究課題名(和文)周波数領域テラヘルツ・トモグラフィの研究

研究課題名(英文)Frequency-domain Terahertz Tomography

研究代表者

永妻 忠夫 (Nagatsuma, Tadao)

大阪大学・基礎工学研究科・教授

研究者番号：00452417

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 33,400,000円、(間接経費) 10,020,000円

研究成果の概要(和文)：近年、テラヘルツ・パルス波を利用して物体の3次元断層画像を得る「テラヘルツ時間領域トモグラフィ技術」が、非破壊検査・診断の分野で利用され始めている。本研究では、システムの小型化、低価格化、高性能化を目指し、次世代のテラヘルツ・トモグラフィ技術として、テラヘルツ波スペクトルを制御することによる「周波数領域トモグラフィ技術」の研究に世界に先駆けて着手し、動作原理の実証と実用上の技術課題を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Three dimensional (3D) terahertz (THz) imaging or THz tomography has recently proven to be useful for non-destructive testing of industrial materials and structures. In place of previous imaging techniques such as THz pulsed/continuous-wave radar and THz computed tomography, we proposed a THz optical coherence tomography (OCT) using photonics- and electronics-based continuous-wave THz sources, and demonstrated superior capabilities of 3D imaging with respect to system size, cost-effectiveness and performance in the frequency regions from 400 GHz to 800 GHz.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電子デバイス・電子機器

キーワード：マイクロ波・ミリ波 テラヘルツ波 トモグラフィ 電子デバイス・機器 計測工学

1. 研究開始当初の背景

テラヘルツ波 (100GHz~10THz の電磁波) を利用した分光器やイメージング装置の商品化が進められる中、3次元像や物体の断面画像を得ることのできるトモグラフィ技術に対するニーズが高まっていた。主流は、テラヘルツ「パルス波」を用いたトモグラフィ (テラヘルツ・パルスレーダ) 技術であり、工業製品の多層薄膜構造や錠剤のコーティング、人肌の角質層の検査、古典絵画の表層診断、構造物診断など、X線を始めとする従来技術が適用できない幅広い応用が示されていた。

しかしながら、テラヘルツ・パルスレーダ技術にはいくつかの問題点 (テラヘルツ・パルス波を発生させるためのフェムト秒パルスレーザ光源ならびにシステムが大型で高価である、測定時間が長い等) があり、それを解決するために、図1に示すようないくつかの手法が提案されていたが、多くの実用上の技術課題を有していた。

2. 研究の目的

システムの小型化、低価格化、高性能化により、テラヘルツ・トモグラフィ技術の適用分野や市場を拡大するために、次世代の技術として、テラヘルツ波スペクトルを制御することによる周波数領域トモグラフィ技術の研究に世界に先駆けて挑戦し、実用化に向けた諸課題を明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

医療を始め様々な分野で実用されている、光波を用いた「光コヒーレンス・トモグラフィ (Optical Coherence Tomography: OCT)」と称される技術を、テラヘルツ (THz) 波領域に適用すること (THz-OCT と呼ぶ) を提案し、それを実現するための信号発生・検出といった要素技術の研究とプロトタイプシステムの開発を行った。

	THzパルスレーダ	FM-CWレーダ	THz-CT	THz-OCT
特長	超高深さ分解能 分光機能 (マイクロ波で実用化実績)	高深さ分解能 (マイクロ波・ミリ波で実用化実績)	(マイクロ波・X線で実用化実績)	系が簡単 光源が小型・安価 (近赤外線の実用化実績)
課題	パルスレーザが大きく高価 測定時間が長い	RF部品の高性能化 (特に、高出力化) と低価格化が課題	物体または系の回転機構が必要 測定対象が限定/高度な信号処理要 測定時間が長い	(本研究)

図1 本研究の位置づけ。

4. 研究成果

本技術は、図2に示すように、光技術あるいは電気技術により発生させた THz 信号源 (インコヒーレント・ノイズ源、周波数掃引信号源) と簡単な干渉計を組み合わせたものである。

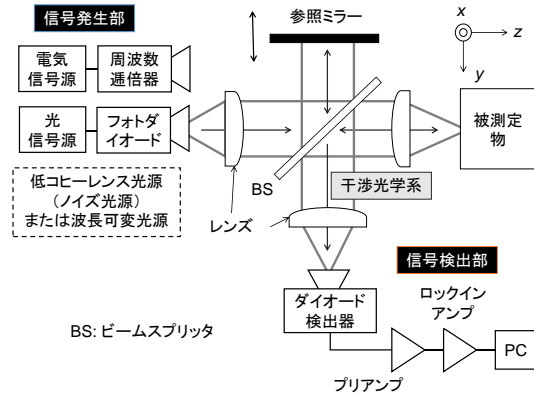


図2 THz-OCTの構成図。

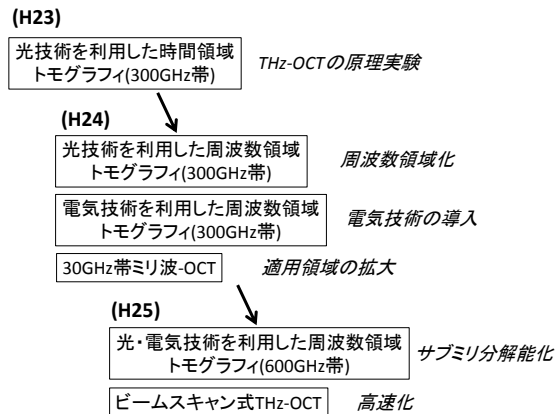


図3 3年間の研究開発の流れ。

図3に、この3年間の研究開発の流れを示す。H23年度は、図2の信号発生部に光技術により発生したインコヒーレント THz 波 (広帯域 THz ノイズ: 240GHz~400GHz) を用いて、「時間領域トモグラフィ技術」を開発し、世界で初めて THz-OCT による3次元イメージング画像の取得に成功した。

つぎに H24 年度は、前年度に確立した小型干渉計システムをベースに、本研究の目標であった「周波数領域トモグラフィ技術」へと展開した。そのために、波長可変レーザとフォトダイオードを用い、240GHz~450GHz の帯域で単一周波数の電磁波を連続的に掃引する (周波数掃引型) 信号源を開発した。これにより、周波数掃引型 THz-OCT システムを構成し、3次元イメージングに成功した。また、周波数通倍電気技術を用いた周波数掃引型 THz-OCT システムの開発に着手した。加えて、適用領域の拡大を目指し、物質透過率が高くなり、より深度の大きな情報が得られる

30GHz 帯ミリ波 OCT システムの開発を行い、コンクリート内部の亀裂や木質材料の診断等に適用できることを示した。

図 4 は、300GHz 帯のトモグラフィの一例である。アルファベットの掘られた、3 枚のプラスチック板 (1mm 厚) を重ねたものを測定している。同図(b)のような 3 次元画像が得られ、また同図(c)に示すように、各板の表裏が分離できていることがわかる。

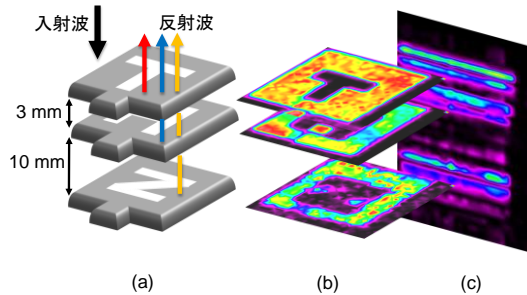


図 4 300GHz 帯 THz-OCT による測定例。

最終年度には、「周波数掃引型 THz-OCT システム」の実用化に不可欠な、高空間分解能化と画像取得の高速化の 2 つのポイントに注力して、プロトタイプシステムを開発した。

まず、高空間分解能化に向けて、光技術と電気技術の双方により、600GHz 帯 (およそ 400GHz~800GHz の帯域) の周波数掃引型トモグラフィシステムを開発した。光技術を用いた場合、より広帯域の信号発生が可能であり、検出器の広帯域化により、一層の高分解能化が期待できる。一方、全電気システムでは、光技術に比べて約 10 倍の高出力化が可能であり、損失の大きな物質への適用することができる。

奥行き分解能として、帯域から理論的に予想される分解能、約 0.6mm(空気中)実験的に実証し、目標としていたサブミリメートル分解能を達成した。また、奥行き方向の測定精度として $\pm 3\mu\text{m}$ が確認され、ペットボトル、IC カード、ケーブル等の単層・多層膜の厚み計測に有効であることを示した。図 5 は、約 0.5mm 厚のペットボトルの厚み測定の例である。ボトル内の水の有無によらず、計測可能である。

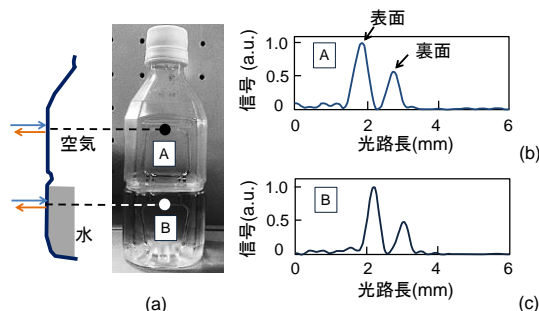


図 5 ペットボトルの厚み測定の例

現トモグラフィシステムにおいて測定時間を支配している要因は、深さ方向ではなく 2 次元平面の画像を得るためにメカニカルステージで物体を動かすところにあった。そこで、THz ビームをスキャンする方式を検討した。実際に、新たに設計した F θ レンズとガルバノミラーを組み合わせることにより、1 次元スキャナーシステムを開発し、上記の全電気方式 THz-OCT システムに導入した。 $\pm 30\text{mm}$ の範囲を 0.2 秒で計測可能となり、今後、2 次元スキャナーの導入によるリアルタイム計測の実現の見通しが得られた。

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 11 件)

- ① 永妻忠夫, テラヘルツ波を用いたイメージング技術, 画像ラボ (2014), 出版予定, 査読無
- ② T. Nagatsuma, H. Nishii, and T. Ikeo, Terahertz imaging based on optical coherence tomography (Invited), OSA Journal Photonics Research, accepted, 査読有
- ③ 永妻忠夫, 久武信太郎, 電気光学効果を利用した電磁界計測技術の動向 (招待論文), 電子情報通信学会和文論文誌 B, vol. J97-B (2014), 243-252, 査読有 http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=j97-b_3_243
- ④ T. Ikeo, T. Isogawa, T. Nagatsuma, Three Dimensional Millimeter- and Terahertz-Wave Imaging Based on Optical Coherence Tomography (Invited), IEICE Trans. Electronics, vol. E96-C (2013), 1210-1217, 査読有 http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=e96-c_10_1210
- ⑤ S. Hisatake and T. Nagatsuma, Continuous-wave Terahertz Field Imaging Based on Photonics-based Self-heterodyne Electrooptic Detection, Opt. Lett., vol. 38 (2013), 2307-2310, 査読有 DOI:10.1364/OL.38.002307
- ⑥ 永妻忠夫, テラヘルツ波を用いたイメージング技術の最近の進展, 映像情報メディア学会誌, vol. 67 (2013) 211-215, 査読有 <http://ci.nii.ac.jp/naid/110009597678>
- ⑦ S. Hisatake, G. Kitahara, N. Kukutsu, Y. Fukada, N. Yoshimoto, and T. Nagatsuma, Phase-sensitive Terahertz Self-heterodyne System Based on Photodiode and Low-temperature grown GaAs Photoconductor at 1.55 μm , IEEE

Sensor Journal, vol. 13(2012), 31-36, 査読有

DOI:10.1109/JSEN.2012.2218281

- ⑧ T. Isogawa, T. Kumashiro, H.-J. Song, K. Ajito, N. Kukutsu, K. Iwatsuki, and T. Nagatsuma, Tomographic Imaging Using Photonically Generated Low-Coherence Terahertz Noise Sources, IEEE Trans. Terahertz Science and Technology, vol. 2 (2012), 485-492, 査読有
DOI: 10.1109/TTHZ.2012.2208745
- ⑨ B. Vidal, T. Nagatsuma, N. J. Gomes, and T. E. Darcie, Photonic Technologies for Millimeter- and Submillimeter-wave Signals, Advances in Optical Technologies, vol. 2012 (2012), 1-18, 査読有
DOI:10.1155/2012/925065
- ⑩ Tadao Nagatsuma, Terahertz Technologies: Present and Future, IEICE Electronics Express, vol. 18 (2011), 1127-1142, 査読有
DOI:10.1587/elex.8.1127
- ⑪ S. Hisatake and T. Nagatsuma, Nonpolarimetric Technique for Homodyne-type Electrooptic Field Detection, Appl. Phys. Express, vol. 52 (2011), 012701, 査読有
DOI: 10.1143/APEX.5.01270

[学会発表] (計 42 件)

- ① T. Nagatsuma, Present and Future Challenges in Terahertz-wave Photonics (Invited), Asia-Pacific Microwave Photonics Conference (APMP2013), 2013年4月22日, Gwangju, Korea
- ② S. Hisatake, T. Nishimura, and T. Nagatsuma, Terahertz Electric Field Mapping Based on All-optical Self-heterodyne Electrooptic Sensing, Asia-Pacific Microwave Photonics Conference (APMP2013), 2013年4月22日, Gwangju, Korea
- ③ T. Nagatsuma, Continuous-wave Terahertz Imaging and Spectroscopy Based on Telecom Photonics (Invited), Asia Communications and Photonics Conference (ACP2013), 2013年11月12日, Beijing, China
- ④ H. Nishii, T. Ikeou, K. Ajito, N. Kukutsu, T. Nagatsuma, Terahertz Tomographic Imaging with Sub-millimeter Depth Resolution, 2013 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC2013), 2013年11月6日, Seoul, Korea
- ⑤ S. Hisatake, and T. Nagatsuma, Jae-Young Kim and Katsuhiko Ajito,

Self-heterodyne Terahertz Spectrometer Based on Photodiodes, IEEE International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP2013), 2013年10月30日, Alexandria, USA

- ⑥ T. Nagatsuma, Photonic Generation of Extreme Broadband RF Signals for Communications and Sensing (Invited), IEEE International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP2013), 2013年10月30日, Alexandria, USA
- ⑦ T. Nagatsuma, T. Ikeo, H. Nishii, Terahertz Imaging based on Optical Coherence Tomography (Invited), 21st International Conference on Applied Electromagnetics and Communications (ICECom2013), 2013年10月16日, Dubrovnik, Croatia
- ⑧ T. Nagatsuma, Photonic Generation of Terahertz Waves for Communications and Sensing, (Invited) Second International Conference on Telecommunications and Remote Sensing (ICTRS2013), 2013年7月11日, Noordwijkerhout, Netherlands
- ⑨ T. Nagatsuma, "Generating Millimeter and Terahertz Waves by Photonics for Communications and Sensing, IEEE Intern. Microwave Symposium (IMS2013), 2013年6月5日, Seattle, USA
- ⑩ T. Nagatsuma, Radio Spectral Evolution with Photonics Technologies (Invited), Regional Annual Fundamental Science Symposium 2012, 2012年12月11日, Johor Bahru, Malaysia
- ⑪ T. Nagatsuma, Photonic Generation of Terahertz Waves for Communications and Sensing (Invited), 2012 THz Workshop Focusing on Radio-Over-Fiber Communication, 2012年12月03日, National Tsing Hua University, Taiwan
- ⑫ S. Hisatake, G. Kitahara, N. Kukutsu, Y. Fukada, N. Yoshimoto, and T. Nagatsuma, Phase-sensitive Terahertz Self-heterodyne System Based on Photonic Techniques, IEEE Topical Meeting on Microwave Photonics, 2012年09月14日, Noordwijk, Netherland
- ⑬ T. Ikeou, T. Isogawa, K. Ajito, N. Kukutsu, and T. Nagatsuma, Terahertz Imaging Using Swept Source Optical-Coherence-Tomography Techniques, IEEE Topical Meeting on Microwave Photonics, 2012年09月14日, Noordwijk, Netherland
- ⑭ S. Hisatake and T. Nagatsuma, Homodyne Detection of Microwaves Based on Non-Polarimetric Electro Optic Technique, 2012 Asia-Pacific Microwave Photonics Conference, 2012年04月27

- 日, 京都市 (京都府)
- ⑮ S. Hisatake, G. Kitahara, H.-J. Song, K. Ajito, and T. Nagatsuma, Terahertz Frequency-Domain Spectrometer Based on Photodiode and Low-Temperature-Grown GaAs Photoconductor at $1.55\ \mu\text{m}$, 2012 Asia-Pacific Microwave Photonics Conference, 2012年04月26日, 京都市 (京都府)
- ⑯ T. Nagatsuma, M. Fujita, S. Hisatake, T. Takada, D. Asa, M. Kawamura, G. Kitahara, Y. Morimoto, K. Arakawa, T. Shiode, T. Ishigaki, and T. Isogawa, Terahertz Photonics and Electronics for Communications and Sensing, 3rd Global COE International Symposium on Electronic Devices Innovation (EDIS2011), 2011年12月16日, 豊中市・千里ライフサイエンスセンター (大阪府)
- ⑰ T. Nagatsuma and T. Isogawa, Terahertz Imaging Using Broadband Noise Sources (Invited), International Symposium on Terahertz Nanoscience (TeraNano 2011), 2011年11月28日, 大阪大学・中之島センター (大阪府)
- ⑱ S. Hisatake, K. Shimahashi, G. Kitahara, Y. Morimoto, H.-J. Song, K. Ajito, and T. Nagatsuma, Homodyne Detection of Microwaves Using Low-Temperature-grown GaAs at $1.55\ \mu\text{m}$, 2011 IEEE International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP 2011), 2011年10月20日, Singapore, Singapore
- ⑲ T. Isogawa, T. Kumashiro, H. Song, K. Ajito, N. Kukutsu, K. Iwatsuki, and T. Nagatsuma, Tomographic Imaging Using Photonically Generated Low-coherence Terahertz Sources, 2011 IEEE International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP 2011), 2011年10月19日, Singapore, Singapore
- ⑳ T. Nagatsuma, Photoconductors vs. Photodiodes for THz Generation and Detection (Invited), 2011 IEEE International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP 2011), 2011年10月18日, Singapore, Singapore
- ㉑ T. Nagatsuma, Photoconductors vs. Photodiodes for THz Generation and Detection (Invited), 2011 IEEE International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP 2011), 2011年10月18日, Singapore, Singapore
- ㉒ T. Nagatsuma, Photonic Generation of Terahertz Waves for Communications and Imaging (Invited), International Workshop on THz Electronics and Communications, 2011年6月24日, Seoul, Korea
- ㉓ 西井啓起, 池應敏行, 永妻忠夫, サブミリメートル奥行き分解能を持つテラヘルツ・トモグラフィ, 2014年電子情報通信学会総合大会, 2014年3月19日, 新潟大学
- ㉔ 永妻忠夫, ミリ波・テラヘルツ波技術の動向と今後の展望 (招待講演), Microwave Workshops & Exhibition (MWE2013), 2013年11月29日, パシフィコ横浜, 横浜
- ㉕ 永妻忠夫, テラヘルツ技術を支える基礎科学と最近の進展 (招待講演), 電子情報通信学会九州支部専門講習会, 2013年11月15日, 九州大学伊都キャンパス, 福岡
- ㉖ 久武信太郎, 西村辰彦, 永妻忠夫, 光技術に基づく連続テラヘルツ波の振幅と位相の可視化, 2013年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2013年9月17日, 福岡工業大学, 福岡
- ㉗ 池應敏行, 五十川貴之, 永妻忠夫, 周波数逓倍器を用いたテラヘルツ光コヒーレンストモグラフィ, 2013年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2013年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2013年9月17日, 福岡工業大学, 福岡
- ㉘ 永妻忠夫, ミリ波・テラヘルツ波フォトリソグラフィの進展と今後の展望, IEEE Photonics Society Japan Chapter 特別講演会 (招待講演), 2013年5月17日, 東京
- ㉙ 池應敏行, 五十川貴之, 味戸克裕, 久々津直哉, 永妻忠夫, 周波数領域型光コヒーレンス・トモグラフィを利用したテラヘルツイメージング, 電子情報通信学会MWP研究会, 2013年4月26日, 東京
- ㉚ 永妻忠夫, 新たなフェーズに入りつつあるテラヘルツ技術とその展望 (招待講演), 2013年電子情報通信学会総合大会 エレクトロニクスソサイエティプレナリーセッション, 2013年03月20日, 岐阜大学, 岐阜
- ㉛ 久武信太郎, 大矢浩祐, 味戸克裕, 深田陽一, 吉本直人, 永妻忠夫, 自己ヘテロダイン型テラヘルツ分光システムの周波数軸校正, 2013年電子情報通信学会総合大会, 2013年03月20日, 岐阜大学, 岐阜
- ㉜ 五十川貴之, 池應敏行, 都甲浩芳, 味戸克裕, 久々津直哉, 永妻忠夫, 周波数領域型 OCT を利用したミリ波イメージング, 2013年電子情報通信学会総合大会, 2013年03月20日, 岐阜大学, 岐阜
- ㉝ 池應敏行, 五十川貴之, 味戸克裕, 久々津直哉, 永妻忠夫, 周波数領域型 OCT を利用したテラヘルツイメージング, 2013年電子情報通信学会総合大会, 2013年03月20日, 岐阜大学, 岐阜

- ③③ 永妻忠夫, 電波と光波の境界にある電磁波「テラヘルツ波」の科学と応用 (招待講演) 電気四学会関西支部 准員及び学生員のための講演会, 2012年11月22日, 京都工繊大学、京都
- ③④ 永妻忠夫, テラヘルツ技術の研究動向と今後の展望 (招待講演), 日本学術振興会 真空ナノエレクトロニクス第158委員会 第93回研究会, 2012年08月20日, 大阪大学中之島センター、大阪
- ③⑤ 五十川貴之, 池應敏行, 味戸克裕, ソン ホジン, 久々津直哉, 永妻忠夫, 低コヒーレンステラヘルツ波を用いたトモグラフィ技術の研究, 電子情報通信学会マイクロ波ミリ波フォトニクス研究会, 2012年07月26日, 札幌、北海道
- ③⑥ 永妻忠夫, テラヘルツ波の応用を支えるデバイス技術の動向 (招待講演), URSI-C委員会 第22期 第3回公開研究会, 2012年06月01日, 鹿児島大学、鹿児島
- ③⑦ 五十川貴之, 熊城拓人, ソン ホジン, 味戸克裕, 久々津直哉, 岩月勝美, 永妻忠夫, 光技術による低コヒーレンス・テラヘルツ波を用いたトモグラフィ, 電子情報通信学会総合大会, 2012年3月20日, 岡山大学 (岡山県)
- ③⑧ 北原元貴, 久武信太郎, 味戸克裕, 久々津直哉, ソン ホジン, 永妻忠夫, 1.5 μ m 帯光励起による低温成長 GaAs 検出器を用いた CW テラヘルツ分光システム, 電子情報通信学会総合大会, 2012年3月20日, 岡山大学 (岡山県)
- ③⑨ 森本雄太, 久武信太郎, 味戸克裕, 久々津直哉, 都甲浩芳, 永妻忠夫, 100 GHz 帯アンテナ近傍界の EO センシング, 電子情報通信学会マイクロ波・フォトニクス研究会, 2012年1月26日, 大阪大学 (大阪府)
- ④⑩ 北原元貴, 久武信太郎, 味戸克裕, 久々津直哉, ソン ホジン, 永妻忠夫, 1.5 μ m 帯 CW 励起による低温成長 GaAs を用いたテラヘルツ波のホモダイン計測, 電子情報通信学会マイクロ波・フォトニクス研究会, 2012年1月26日, 大阪大学 (大阪府)
- ④⑪ 森本雄太, 久武信太郎, 味戸克裕, 久々津直哉, 永妻忠夫, ホモダイン検波法による EO センシングシステム, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2011年9月13日, 北海道大学 (北海道)
- ④⑫ 北原元貴, 久武信太郎, 味戸克裕, 久々津直哉, ソン ホジン, 永妻忠夫, 1.55 μ m 帯 CW 励起による低温成長 GaAs を用いたマイクロ波のホモダイン受信, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2011年9月13日, 北海道大学 (北海道)

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等

研究室 HP: <http://ipg-osaka.com/>

本研究での受賞 (6件):

- ・ IEEE MWP2011 Best Student Paper Award
- ・ IEEE MWP2012 Best Student Paper Award
- ・ 電子情報通信学会 MWP 研究会学生論文賞 2012年度)
- ・ 電子情報通信学会 MWP 研究会学生論文賞 2013年度)
- ・ 2013IEEE Microwave Theory and Techniques Society Japan Young Engineer Award
- ・ 2013 Asia Pacific Microwave Conference Best Student Paper Award

6. 研究組織

(1) 研究代表者

永妻 忠夫 (NAGATSUMA, Tadao)
大阪大学・大学院基礎工学研究科・教授
研究者番号: 00452417

(2) 研究分担者

久武 信太郎 (HISATAKE, Shintaro)
大阪大学・大学院基礎工学研究科・助教
研究者番号: 20362642

(3) 研究協力者

NTT