

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 29 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2009～2013

課題番号：21226010

研究課題名(和文) テラヘルツ波による大容量無線通信実現の為にデバイス・システムの開拓

研究課題名(英文) Development of devices and systems toward realization of high-capacity wireless communications by terahertz waves

研究代表者

浅田 雅洋 (ASADA, Masahiro)

東京工業大学・総合理工学研究科(研究院)・教授

研究者番号：30167887

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 167,600,000円、(間接経費) 50,280,000円

研究成果の概要(和文)：未開拓のテラヘルツ周波数帯を用いた大容量無線通信の実現を目指し、テラヘルツ波の発振と変調、および無線伝送の研究を行った。発振デバイスでは、電子遅延を短縮した共鳴トンネルダイオードにより、半導体電子デバイスでは最高周波数の1.55THz室温発振を達成するとともに、集積微細アンテナの構造最適化による高出力動作および高速直接変調を達成した。光信号照射によるテラヘルツ波変調デバイス、変調用の高電流駆動能力トランジスタも得られた。また、共鳴トンネルダイオード送信器とショットキーバリアダイオード受信器を用いた無線伝送実験を行い、テラヘルツ波による大容量通信の見通しを得た。

研究成果の概要(英文)：Toward realization of high-capacity wireless communications in the undeveloped terahertz frequency region, we investigated oscillation and modulation of terahertz waves, and wireless data transmission. For the oscillation device, we achieved room-temperature oscillation at 1.55 THz using resonant tunneling diodes with reduced electron delay, which is the highest frequency of semiconductor electron devices. High-power oscillation and high-speed direct modulation of these oscillators were achieved with the structure optimization of the integrated micro-antennas. Modulators for terahertz waves with optical signal and transistors with high current drivability for modulation were also obtained. Wireless data transmission was demonstrated with the resonant-tunneling-diode transmitter and Schottky-barrier-diode receiver, and feasibility of high-capacity communication was obtained.

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：電子デバイス・集積回路 テラヘルツデバイス 大容量無線通信 共鳴トンネルダイオード 微細ショットアンテナ テラヘルツ波の変調

### 1. 研究開始当初の背景

光と電波の中間に位置するテラヘルツ(THz)周波数帯は、分析やイメージングなど非常に幅広い応用の可能性があり、通信においても、THz 帯の超広帯域性を利用すれば大容量伝送が可能のため、開拓が強く望まれてきた。1THz 程度以下の周波数では大気減衰の窓を使った数十～数百 m の距離で、また、1THz 以上では局所空間において、いずれも数十～百 Gb/s の大容量の通信が期待できる。

しかしながら本研究開始当初において、THz 通信の研究は、0.1～0.3THz においてレーザー光の差周波数やマイクロ波の逡倍による THz 波発生を用いた伝送の研究が始まったばかりで、小型な THz 発振素子や変調素子など、通信の重要な要素となるデバイスはほとんど開発されていない状況であった。

特に発振素子に関しては満足なものが無く、我々の研究してきた共鳴トンネルダイオード(RTD)は、THz 発振素子のひとつとして0.8THz の室温発振達成など、ようやく可能性が出ていたが、まだ発振周波数が1THz を超える室温半導体デバイスは無く、信号を重畳するための変調方法も明らかでなかった。

### 2. 研究の目的

本研究は、大容量 THz 無線通信の実現に向けて、その重要な要素となるデバイス・システムを開拓するため、(1)RTD を用いた THz 発振デバイスの高周波化、高出力化、指向性やスペクトル特性の向上、(2)高速信号伝送のための発振デバイスの直接変調特性の把握と外部変調デバイスの提案・作製、(3)これらを用いた THz 波による信号伝送を行い、大容量無線通信の可能性を明らかにすることを目的とした。

### 3. 研究の方法

(1) THz 発振デバイスについて、RTD と微細スロットアンテナを集積した構造により、高周波化・高出力化を行う。高周波化は電子の遅延時間(共鳴準位滞在時間とコレクタ走行時間)を短縮できる層構造を RTD に導入する。

高出力化は、まず単体発振素子でオフセット構造の導入とアンテナ各部分のサイズの最適化によるインピーダンス整合を行い、さらにアレイを構成して行う。

また、制御可能な高い指向性を持つ構造を考案・作製するとともに、発振スペクトルの測定を行い、その特性を把握する。

(2) THz 波の変調について、RTD のバイアスへの信号重畳による直接変調特性を把握し、高速変調が可能な構造を考案するとともに、RTD への光信号照射による強度変調が可能なことを示し、その特性を測定する。また、外部変調デバイスを考案・作製する。

変調駆動用のトランジスタについて、十分な駆動能力を有しかつ集積に適した構造の作製を行い、高周波特性を評価する。

(3) 以上のデバイスによる THz 無線伝送の実験を行い、大容量 THz 無線通信の可能性を明らかにする。

### 4. 研究成果

(1) 共鳴トンネルダイオード(RTD)によるテラヘルツ波の発生

#### RTD の高周波化

RTD による THz 発振器では、図 1 に示すスロットアンテナとの集積構造を用いて、本研究以前にキャパシタンスの小さな RTD 層構造を用いて、0.8THz までの室温発振を得ていた。

本研究では、まず、RTD 発振器の詳細な理論解析を行い、発振周波数が電子の遅延時間で制限されていること、および、電子の遅延時間が共鳴準位滞在時間とコレクタ空乏層走行時間で構成されることを示し、さらに、これらを短縮するための RTD 構造を提案した。

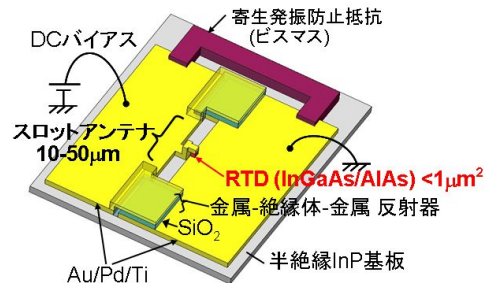


図 1 微細スロットアンテナを集積した RTD による THz 発振素子

これに基づいて、まず RTD の障壁層の薄層化により、室温半導体電子デバイスでは初めて1THz を超える 1.04THz の発振を達成した。続いて、薄層で深い量子井戸の導入により 1.31THz までの発振周波数上昇、さらに、コレクタスペーサー層厚を最適化することにより 1.42THz までの室温発振を達成した。RTD 層構造と同時に、スロットアンテナ長についても詳細な電磁界解析から最適化を行い、これらの結果を総合し、現在までに、図 2 に示すように 1.55THz の室温発振を達成した。これは室温の電子デバイスでは最高の発振周波数である。

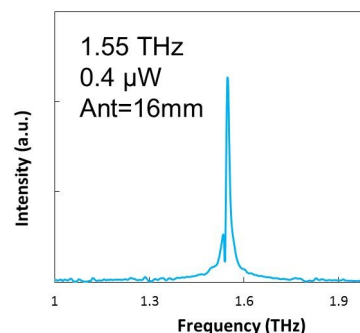


図 2 電子遅延時間を短縮した RTD 構造と短縮スロットアンテナによる 1.55THz 室温発振

高周波化のために量子井戸の薄層化を行うと、発振に必要なバイアス電圧が上昇してしまうが、この問題に対して、ステップエミッタ構造を導入した構造を提案・作製し、実際に低バイアスが得られることを示し、これによって、さらに高周波化が可能になった。

これらの結果から、RTD とアンテナ構造を最適化すれば、2THz 以上の発振も可能であることが理論的に予測され、RTD が単体で小型の通信発振素子として非常に適していることが示された。

#### RTD の高出力化

RTD 発振素子は、研究当初、出力が数  $\mu\text{W}$  と小さいことが問題であった。本研究ではこれに対して、発振特性の理論解析により、小出力の原因が RTD とアンテナのインピーダンス不整合にあることを示した。これを改善して高出力化できる構造として、RTD の位置をスロットアンテナの中央からずらして放射インピーダンスを大きくするオフセットスロットアンテナを新たに提案した。さらに、このスロットアンテナの幅を最適化すれば精密なインピーダンス整合により出力を最大化できることを理論的に示した。

この結果に基づき、オフセットスロットアンテナを用いた素子を作製し、単体の発振素子で 0.42mW の出力が 0.55THz において得られた。また、アンテナ幅最適化によりインピーダンス整合が可能なることも実証した。

発振素子をアレイにして出力合成を行うことも、高出力化には有効な方法である。そこで、図 3 のようにオフセットスロットアンテナを導入した発振素子を平面スタブ導波路で結合した 2 素子アレイを作製した。このアレイは、素子間の相互注入同期のために単一周波数で発振し、これによるコヒーレント電力合成により、0.61mW の出力が 0.62THz で得られた。この出力は、この周波数帯の発振素子としてはこれまでで最大である。RTD の面積を最適化すればさらに高出力化が可能なることも理論的に示された。

オフセットスロットアンテナとで述べた高周波化構造を組み合わせると素子構造の最適化を行えば、単体でも 0.5THz で 1mW、1THz で 0.3mW の出力が理論的に十分可能であり、アレイによりさらに高出力化も可能である。以上の結果から、通信用光源として十分な出力となる見通しが得られた。

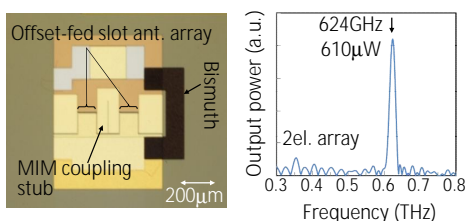


図 3 2 素子アレイによる高出力発振。光学顕微鏡写真(左)と発振スペクトル(右)。

#### 指向性、スペクトル特性

RTD 発振素子は、シリコン半球レンズを装填することにより高指向性を得ているが、大型になり扱いにくい。本研究では、スロットアンテナ上に誘電体 BCB 薄膜とパッチアンテナ電極を形成することにより、半球レンズ無しでも比較的高い指向性が得られる構造を新たに提案した。これを図 4 に示す。この構造では、レンズ表面の透過や全反射に伴う損失も回避できるため高出力化にも有効で、小型の通信素子構造として適している。作製した単体のパッチ電極素子では、理論と一致する 7dBi の指向性が実験で得られた。また、パッチ電極の結合アレイを単体の RTD 発振素子上に配置した構造では、半球レンズよりも大幅に小型化した構造でも、半球レンズに匹敵する 16dBi の指向性が可能なことが電磁界シミュレーションにより示された。さらに、BCB 薄膜上のパッチ電極の配置により放射特性の設計に幅広い自由度があることも示された。

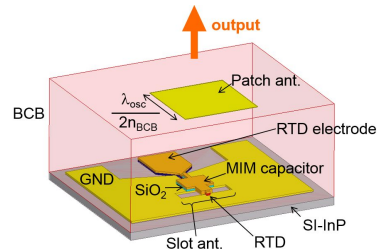


図 4 シリコンレンズを用いないパッチアンテナ集積 THz 発振素子

発振スペクトル特性に関しては、マイクロ波通信および他の RTD 発振素子による局部発振器を用いてヘテロダイン検波測定を行い、ともに 10MHz 以下の結果が得られた。これは RTD の THz 発振素子では初めての測定結果であり、理論解析ともほぼ一致した。また、スペクトル線幅が、高出力化とアレイ構成時の相互注入同期によって減少可能であることが理論的に示された。

#### (2) テラヘルツ波の変調

##### RTD の直接変調

RTD 発振器は、バイアスを直接変調することにより、容易に信号を THz 波に重畳できる。まず、図 1 の発振器の直接強度変調特性を測定し、変調の 3dB カットオフ周波数として 4.5GHz を得た。この周波数上限はアンテナ両端の金属-絶縁体反射器のキャパシタンスで制限されている。しかし、このキャパシタンスを減らすと、THz 帯で複雑な共振が起こり、多数の周波数が発振して出力が低下する。

そこで、このような複雑な共振の原因となる寄生素子を小さくでき、高周波の直接変調が可能なる、図 5 の構造を新たに提案した。この素子を作製し、出力低下が起きないことを実証するとともに、図 6 のように 30GHz の変調カットオフ周波数を達成した。

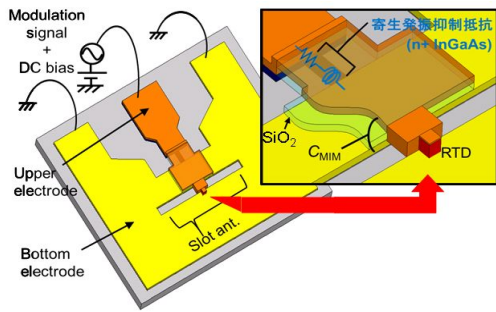


図5 高速変調用 RTD 発振素子の構造

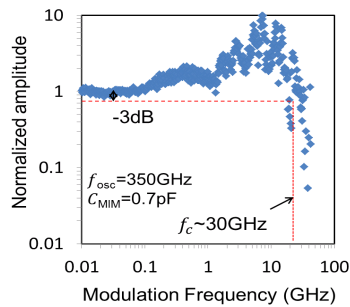


図6 図5の素子構造における高速変調特性

さらに、変調周波数帯でピーキングを起こす伝送線路形状とすれば、変調周波数を100GHzまで拡大できることも理論解析により明らかになった。

以上から、直接変調が小型のRTD発振素子を用いた大容量THz通信の簡便な方法として有効であることが示された。

#### RTDへの光照射による変調

RTD発振素子のスロットアンテナ内の半導体層に光を照射すると、THz出力が減少することを見出した。この現象は、光ファイバからの信号をTHz波に転写して、光ファイバ通信とTHz無線通信をシームレスにつなぐ方法として利用できる。

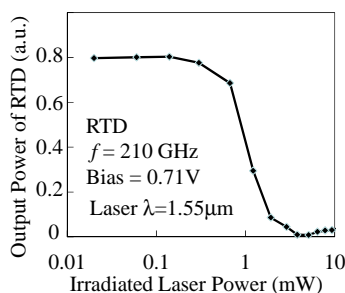


図7 光照射による RTD 発振素子の出力変化

THz出力の変化は、半導体層での光吸収によるキャリア発生のためにTHz波に対する損失が増加して生じている。光ファイバ通信波長1.55μmを吸収するGaInAs層を導入した素子の出力変化の測定結果を図7に示す。照射径が50μmと大きい実験結果であるが、絞り込みにより低いパワーで十分な変調が可

能である。キャリアを引き抜く電極構造を形成することにより、数十GHzの変調が可能と期待される。

#### 光による外部変調

光信号を半導体に照射することにより生成したキャリアによってTHz波を吸収させ、その強弱を変化して信号を作り出す外部変調器の実現を目指すにあたり、本研究開始までの予備実験にて明らかになっていたのは、光のスポットサイズとTHz波のスポットサイズが大きく異なり、重なりが少ないため効率よく変換できないという問題である。これを解決するために、THz波を上下金属で挟みこみスポットサイズを小さくしたところに、光を照射する導波路構造を導入した。

数値計算において280GHzの周波数において20dB以上の消光比を取ることができていることを明らかにし、国際会議にて発表を行っている。また、素子作製においては、図8に示すようにアンテナ、変調器、受光器となるショットキーバリアダイオードを集積した構造の実現に成功した。

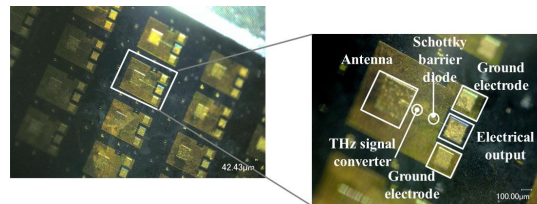


図8 外部変調器、アンテナ、ショットキーバリアダイオード受光器の集積

#### 変調用トランジスタ

変調用トランジスタに期待されるのは、その高速性であるが、その為には低電圧での高駆動電流が望ましい。本研究では、InGaAs系MOSFETにおいて、チャンネル長を50nm程度と短くし、InGaAsでは電流供給の為の十分なキャリア濃度が得られないイオン注入に代わり、結晶成長による高濃度層を用いることで高電流密度化を図り、特にn-InP層をソースとした場合に図9に示す様に0.5Vのドレイン電圧において2.4A/mmという世界最高の電流密度を得た。

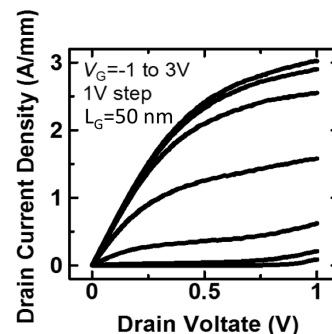


図9 高電流密度 InGaAs-MOSFET の I-V 特性

これは知る限り現時点でも世界最高の電流密度である。また同様の素子を Si 基板上に薄膜として転写することにも成功した。InGaAs は現在 CMOS 集積回路における次世代 n-MOSFET のチャネル材料として IBM やインテル等の大手企業を含めて研究され注目されているが、この高駆動能力の結果は、DRC 等を含む 5 件の国際会議招待講演となった。

### (3) テラヘルツ波無線通信の実験

THz 通信の初期実験として、RTD では初めてのデータ伝送を行った。実験系を図 10 に示す。周波数は 540GHz で、送信は RTD の直接変調、受信はショットキーバリアダイオード(SBD)を用いている。シリコン半球レンズ上の発振素子の位置調整が十分でなく、受信器の入射電力は約  $10\mu\text{W}$  となっている。

図 11 にビットエラーレートとアイパターンの測定結果を示す。伝送レートの上昇とともにビットエラーレートが上昇している。この測定では 3.2Gb/s までの伝送が前方誤り率訂正 (FEC) 限界以下で得られた。

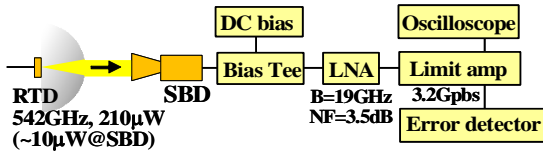


図 10 THz 無線伝送実験系

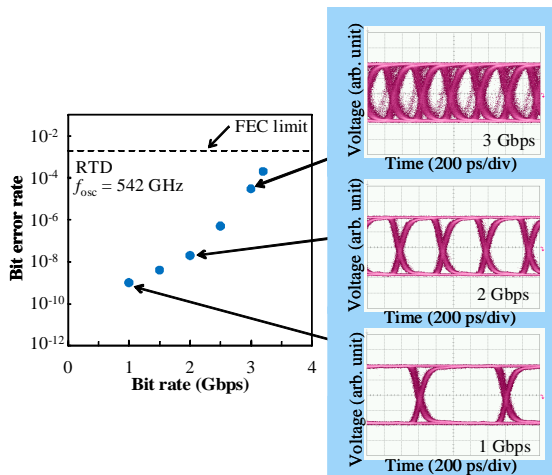


図 11 THz 無線伝送の測定結果。ビットエラーレート(左)とアイパターン(右)。

この初期実験における伝送速度は、図 1 の構造を用いたために RTD の変調周波数で制限されているが、図 5 の高速変調用の構造を用いることにより、伝送速度の大幅な向上が可能である。図 5 の構造に(1)の で述べた高出力化構造を併用し、さらに(1)の で述べた半球レンズが無い構造を導入すれば位置調整が不要になり、小型で簡易な大容量 THz 通信用送信デバイスが形成できる。受信系に関しては、広帯域と低雑音レベルを有する

SBD と低雑音増幅器 (LNA) により、十分な S/N 比を確保する必要がある。これは 40Gb/s 程度まではすでに可能であり、トランジスタ回路の今後の改善により、さらに高速でも可能になると期待できる。S/N 比増加には送信側の出力増加も有効である。これらにより、数十～百 Gb/s の伝送が可能と考えられる。

以上から、本研究により、RTD を用いた小型の大容量 THz 無線通信の見通しが得られたと考えられる。

## 5. 主な発表論文等

(雑誌論文)(計 50 件)

H. Kanaya, R. Sogabe, T. Maekawa, S. Suzuki, and M. Asada, Fundamental oscillation up to 1.42 THz in resonant tunneling diodes by optimized collector spacer thickness, J. Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, 査読有, vol.35, pp.425-431, 2014. DOI: 10.1007/s10762-014-0058-z

S. Suzuki, M. Shiraishi, H. Shibayama, and M. Asada, High-power operation of terahertz oscillators with resonant tunneling diodes using impedance-matched antennas and array configuration, IEEE J. Selected Topics Quantum Electron., 査読有, vol. 19, No.1, 8500108, 2013.

DOI: 10.1109/JSTQE.2012.2215017

M. Kashiwano, J. Hirai, S. Ikeda, M. Fujimatsu, and Y. Miyamoto, High open-circuit voltage gain in vertical InGaAs channel metal-insulator semiconductor field effect transistor using heavily doped drain region and narrow channel mesa, Jpn. J. Appl. Phys., 査読有, vol.52, pp. 04CF05(1-4), 2013. DOI:10.7567/JJAP.52.04CF05

K. Ishigaki, M. Shiraishi, S. Suzuki, M. Asada, N. Nishiyama, and S. Arai, Direct intensity modulation and wireless data transmission characteristics of terahertz-oscillating resonant tunnelling diodes, Electron. Lett., 査読有, vol.48, No.10, pp. 582-583, 2012.

DOI:10.1049/el.2012.0849

M. Shirao, Y. Numajiri, R. Yokoyama, N. Nishiyama, M. Asada, and S. Arai, Preliminary experiment for direct media conversion to sub-terahertz wave signal from 1.55- $\mu\text{m}$  optical signal using photon-generated free carriers, Jpn. J. Appl. Phys., 査読有, vol. 48, No. 9, pp. 090203-1-3, Sept. 2009.

DOI:10.1143/JJAP.48.090203

〔学会発表〕(計 214 件)

M. Asada and S. Suzuki, Room-temperature THz oscillators using resonant tunneling diodes (招待講演), Int. Workshop. Optical THz Science and Tech. (OTST 2013), Tu1-2, Kyoto, Apr. 2, 2013.

Y. Miyamoto, T. Kanazawa, Y. Yonai, A. Kato, K. Ohsawa, M. Oda, T. Irisawa, and T. Tezuka, Heavily doped epitaxially grown source in InGaAs MOSFET for high drain current density (招待講演), IEEE Semiconductor Interface Specialists Conf.(SICS 2013), Arlington, VA, 9.1 6, Dec. 10, 2013. D. Take, M. Shirao, K. Maruyama, N. Nishiyama, M. Asada, and S. Arai, Compact optical/THz signal converter using photo-generated carrier gate in THz waveguide", IEEE Photonics Conference (IPC 12), MS3, Burlingame (USA), Sep. 24, 2012.

M. Asada and S. Suzuki, Room-temperature THz oscillators using resonant tunneling diodes with reduced delay times (招待講演), Int. Symp. Frontier THz Tech. (FTT 2012), WeP.2, Nara, Nov. 28, 2012.

M. Asada and S. Suzuki, THz oscillators using resonant tunneling diodes at room temperature (Keynote 招待講演), Int. Conf. Infrared & Millimeter Waves and Terahertz Electronics (IRMMW-THz 2010), Tu-C1.1, Rome, Sept. 7, 2010.

〔図書〕(計 3 件)

M. Asada and S. Suzuki, "Resonant tunneling diodes for THz sources", Chapter 7, Handbook of Terahertz Technologies, edited by H.-J. Song and T. Nagatsuma, Pan Stanford Publishing, 2014 (出版予定).

宮本恭幸, "グリーンナノテクノロジー", 編集(ナノテクノロジーネットワーク編集委員会委員), 日刊工業新聞社, Feb. 2011. 総ページ数 217.

〔産業財産権〕

出願状況(計 5 件)

名称: 共鳴トンネルダイオードおよびテラヘルツ発振器

発明者: 杉山弘樹, 鈴木左文, 浅田雅洋

権利者: 日本電信電話株式会社, 東京工業大学

種類: 特許

番号: 特願 2012-34749

出願年月日: 2012 年 2 月 21 日

国内外の別: 国内

取得状況(計 2 件)

名称: 共鳴トンネルダイオードおよびテラヘルツ発振器

発明者: 杉山弘樹, 横山春喜, 浅田雅洋, 鈴木左文

権利者: 日本電信電話株式会社, 東京工業大学

種類: 特許

番号: 特許第 5445936 号

取得年月日: 2013 年 12 月 10 日

国内外の別: 国内

〔その他〕

ホームページ

[http://www.pe.titech.ac.jp/AsadaLab/Asada\\_Lab.html](http://www.pe.titech.ac.jp/AsadaLab/Asada_Lab.html)

<http://www.pe.titech.ac.jp/Furuya-MiyamotoLab/index.htm>

<http://www.pe.titech.ac.jp/AraiLab/inind.html>

報道等

「RTD 素子の性能が大きく向上、室温で 1.42THz を発振 - テラヘルツ波の用途拡大に道」, 日経エレクトロニクス, 2014 年 1 月

「共鳴トンネル構造によるテラヘルツ波の発生とその応用」, 科研費 NEWS (学振), vol.4, p.8, 2012

“Milestone for wi-fi with T-rays”, BBC News, 2012 年 5 月 16 日、

“Re-grown source-drain III-V MOSFETs demonstrate higher drain current”, Semiconductor Today, 2011 年 5 月

(他 4 件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

浅田 雅洋 (ASADA, Masahiro)

東京工業大学・大学院総合理工学研究科・教授

研究者番号: 3 0 1 6 7 8 8 7

(2) 研究分担者

宮本 恭幸 (MIYAMOTO, Yasuyuki)

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号: 4 0 2 0 9 9 5 3

西山 伸彦 (NISHIYAMA, Nobuhiko)

東京工業大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号: 8 0 4 4 7 5 3 1

(3) 連携研究者

鈴木 左文 (SUZUKI, Safumi)

東京工業大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号: 4 0 5 5 0 4 7 1