

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 3 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560398

研究課題名(和文) 機能的半導体ヘテロ構造を持つ共鳴トンネルダイオードによるテラヘルツ発振器高性能化

研究課題名(英文) Resonant-Tunneling-diode Terahertz Oscillator with Functional Heterostructure for High Performance

研究代表者

鈴木 左文 (Suzuki, Safumi)

東京工業大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：40550471

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：高周波・高出力化を目指しGaInAs/AlAs共鳴トンネルダイオード(RTD)テラヘルツ発振器について研究を行った。まず、高周波化に向け走行時間を減らすため、空乏層の長さを決めているコレクタスペーサ層厚の最適化を行った。さらに、井戸内滞在時間を減らすための狭井戸化を行い、導体損失を低減したアンテナと組み合わせることで1.92THzの発振を得た。これは現在電子デバイスで最高の発振周波数である。高出力化に向けて、インピーダンスマッチングのためのオフセット給電スロットアンテナとアレイ化による出力合成を行った。これにより620GHzにおいて610μWの高出力が得られた。

研究成果の概要(英文)：Terahertz oscillators with Resonant tunneling diodes (RTDs) and slot antennas were investigated for high frequency and high output power. To obtain high-frequency oscillation, we optimized the thickness of the collector spacer layer, for which a trade-off relation exists in terms of the reduction of the electron transit time and capacitance. A narrow quantum well for short dwell time and an antenna structure for low conduction loss were also employed. By these procedures, room-temperature fundamental oscillation of up to 1.92 THz was achieved. To date, this is the highest oscillation frequency in a single solid-state electronic oscillator. For high-output power operation of the RTD oscillators, we employed offset-fed slot antenna for impedance matching between RTD and antenna, and also utilized power combination technique with array configuration. To date, 610 μW has been obtained in a preliminary experiment performed at 620 GHz using a two-element array of the offset slot antennas.

研究分野：テラヘルツ

キーワード：共鳴トンネルダイオード テラヘルツ発振器

1. 研究開始当初の背景

光と電波の境界である、0.1～数10テラヘルツ(THz)の周波数帯電磁波による、化学・医療・バイオテクノロジーなどの分野で活用期待される分析やイメージングや、情報通信の大容量・高速化などが、近年のTHz帯光源の活発な開発により実現されつつある。

現在主に利用されているTHz帯のコヒーレントな光源として、ミリ波ソースをもとに逡倍器を連結したものや、2つの光信号の差周波を取り出す方法などがあるが、日常で使われる応用に用いるにはコンパクトな単体の室温半導体の光源が相応しい。半導体光源は、THz帯が光と電波の中間に位置することから、光デバイスと電子デバイスの両分野から研究がなされてきた。光デバイスでは、量子カスケードレーザーのTHz発振が2002年に欧米で報告され、その後も活発に研究が行われており、ごく最近195kでの動作が報告された。しかしながら以前低温動作がネックとなっている。電子デバイスでは、InP系HBTやHEMT、およびCMOSなどの高速トランジスタ、また、ガン、タンネットなどのダイオードにより動作周波数がサブTHz～THz領域に延びてきている。特に最近の高速トランジスタの進展はめざましく、670GHz帯での低雑音増幅器がごく最近(2011年)報告されているが、まだ1THz以上の動作には研究の進展が必要である。また、超格子を用いたプロッホ振動素子などの量子効果デバイスも研究されている。

共鳴トンネルダイオード(RTD)を用いたTHz帯発振デバイスはこれまでに、電子デバイスでは初めての1THzを越える室温基本波発振や、550GHz帯で約400 μ Wの出力、また、アレイ化による出力合成によりさらなる高出力化の可能性も理論と実験により得られている。この発振器は、電流数10-100mA、電圧1V程度で室温動作し、直流電源により駆動できる手軽さをもっており、さらに、出力も高周波領域では単体電子デバイスの中で最高レベルであるなど現在種々研究されている他のTHzデバイスには無い手軽な光源という特徴を備えている。素子の寿命測定も行っており、劣化無しの連続動作時間は1000時間を超え耐久性も期待出来る。

また、以上の様なデバイス単体の研究のみならず、素子を用いた応用として、申請者は素子の発振出力を直接AM変調し560GHz帯において無線伝送実験も行っている。現在までに、2Gbps程度までのビットレートにおいて明瞭なアイ開口が得られ、エラーレートの測定なども行い、素子の変調特性の把握も進んでいる。以上の様に、RTD発振器は日常的に使われるようなTHzアプリケーションに適用出来る極めて現実的な可能性を持っていると言える。

2. 研究の目的

THzアプリケーションの一つである、THz帯無線通信では、その超広帯域性を利用した簡易なシステムによる超大容量無線伝送が期待される。使用される周波数帯域は0.1THz～1THzの範囲に存在する大気吸収の少ない窓領域を、距離としては数10～数100m以下の比較的短距離が想定され、送信機出力がmW程度あれば、100Gbpsの超大容量通信も可能と見積もられている。また、1-2THzの大気吸収の大きい領域も短距離の秘匿通信に活用が期待される。これらにより、大容量のデータや超高精細画像等の配信が簡単にできるようになり、災害復旧、遠隔医療操作、エンターテインメント配信、科学研究データの配信、室内や航空機・電車内などでの簡便な超高速データ伝送、スマートフォン同士のデータのやりとりなどなど、数多くのシーンでの利用が想定される。

また、ミリ波からTHz波を用いたイメージングは封筒や服の内側などに秘匿された物質を透視するのに有用であり、すでにセキュリティ分野への導入が行われている。これら装置に、単体のTHz光源を採用すれば、装置を劇的にコンパクトにすることができると考えられる。さらに、THz周波数帯には、物質特有の吸収スペクトルが各所に存在するため、広く周波数をカバーするコンパクトな光源を用いれば、非破壊で物質を特定することが手軽に持ち運べる大きさの使いやすい装置により可能になる。

RTD発振器は非常に高いポテンシャルを有しているが、次世代通信に要求される100Gbpsの伝送容量の達成やイメージング等の応用に用いるには、素子の2THz程度までの高周波化とmWクラスへの高出力化が必要である。素子の発振周波数の限界と出力を決定しているのは、主にデバイスの遅延時間であるため、バリア層の薄膜化および狭井戸化、電子走行層の厚さ最適化などを導入したRTDを作製する。さらに低損失なアンテナを組み合わせることによって、応用に必要な高周波化と高出力化を達成することを目標とした。

3. 研究の方法

発振の限界は主にRTDの持つ微分負性コンダクタンスの高周波応答によって決定される。微分負性コンダクタンスは電子に対する共鳴トンネル領域滞在時間とコレクタ空乏層の走行時間からなる遅延時間のために応答出来なくなり、周波数増加とともに減少する。高周波の発振を得るためには、滞在時間および走行時間を短縮することが有効である。滞在時間を減らすための薄膜バリア構造および狭井戸構造導入と、空乏層走行時間短

縮のためのコレクタスペーサ層最適化を行った RTD を作製した。また、狭井戸構造では井戸内の量子準位の上昇に伴い、バイアス電圧も上がってしまうため、深い井戸構造による準位低下、および、ステップエミッタ構造によるエミッタ伝導帯の底上げを行い、バイアス電圧上昇を抑圧している。空乏層を削減すると走行する距離が短くなるため走行時間は短縮するが、容量は大きくなるため、スペーサ厚最適化も行った。

これら RTD 層構造の改善に加え、アンテナ構造の最適化も高周波化に有効である。アンテナ損失は放射損と導体損からなり、その導体損はアンテナ周囲長に比例するスロット縁部分の抵抗と RTD とアンテナ電極をつなぐエアブリッジの抵抗からなっている。高周波化に向けてスロット長を短くするとエアブリッジの抵抗が支配的となるため、エアブリッジの太さを太くすることで抵抗を削減した。

RTD とアンテナのインピーダンスマッチングが達成できれば 1mW を超える出力が期待できるが、RTD 発振器の出力はおよそ 1-10 μ W と小さかった。これは RTD のキャパシタンスによりアンテナの共振周波数より発振周波数が低くなるため放射コンダクタンスが小さくなっているためである。そこで我々はオフセット給電スロットアンテナにより高出力化を行った。さらに発振器構造をアレイ化することにより出力合成を行った。

4. 研究成果

実験ではまず始めにスペーサ層の最適化を行った。6, 12, 25 nm と 3 種類スペーサ厚を振り、アンテナ長 20 μ m のスロットアンテナと組み合わせて発振器を作製した。この時のバリア層と井戸層厚はそれぞれ 1nm と 3nm である。また、井戸は $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ の In リッチの構造を用いた。12 nm のスペーサ層厚のときが最適厚であり、そのとき 1.42 THz の基本波発振が得られた。また、アンテナ長の最適化を行い、12 μ m のアンテナを用いたときに同じスペーサ層 12nm の RTD から 1.55THz の発振が得られた。

次に井戸層の薄層化を行いさらなる高周波化を進めた。従来の 3nm から 2.5nm に薄膜化し、かつ、薄膜化にともなう共鳴順位の上昇を抑えるため、 $\text{In}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ にさらに In 組成をあげている。また、バリアの手前のエミッタにバンドギャップの大きい InGaAlAs 層を採用し、低電圧化を行った。さらに、アンテナの導体損失の多くを占めていたメサを接続するエアブリッジの幅を広くしたアンテナを採用している。図 1 に発振周波数のメサ面積依存性を示す。アンテナ長 12 μ m、メサ面積 0.1 μm^2 の時に 1.92THz の発振が得られた。

これは現時点において電子デバイスのなかで最高の発振周波数である。

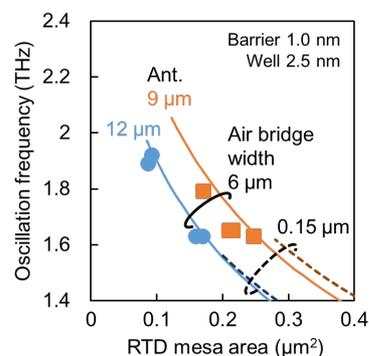


図 1: 発振周波数のメサ面積依存性。6mm の太いエアブリッジを用いることに因って $\sim 0.1\mu\text{m}^2$ のメサにより 1.92THz の発振が得られた。

高出力化では、オフセット給電構造を取り入れた 2 素子を並べ、素子間を MIM 構造で出来たカップリング用スタブ構造でつなぎ相互注入同期させた素子を作製した。2 素子同時駆動したところ、624 GHz の単一周波数発振となり、出力は単体の約 2 倍の 610 μ W が得られコヒーレントな出力合成を達成した (図 2)。これは現在この周波数帯でのレコード出力である。同様の構造で 770 GHz では 270 μ W、810 GHz では 180 μ W の出力も得ている。

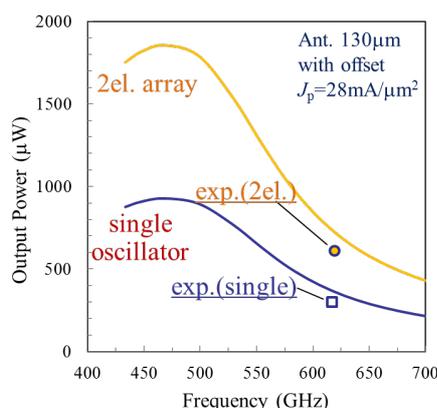


図 2: 単一発振器とアレイ化時の発振出力

以上の研究により、THz 応用に必要な $\sim 2\text{THz}$ の発振および $\sim 1\text{mW}$ の出力を達成した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 17 件)

- (1) 浅田雅洋、鈴木左文、“共鳴トンネルダイオード ~ テラヘルツ波の実用光源への期待”, 応用物理, vol.83, No.7, pp.565-570, 2014 年 7 月. (<https://www.jsap.or.jp/ap/2014/07/ob830565.xml>) 査読有
- (2) Y. Ikeda, S. Kitagawa, K. Okada, S. Suzuki, and M. Asada, “Direct

- intensity modulation of resonant-tunneling-diode terahertz oscillator up to ~30 GHz,” IEICE Electron. Express, Vol.12, No.3, 20141161(1-10), Feb. 2015. (DOI: 10.1587/elex.12.20141161) 査読有
- (3) S. Kitagawa, S. Suzuki, and M. Asada, “650-GHz Resonant-Tunneling-Diode VCO with Wide Tuning Range Using Varactor Diode,” IEEE Electron Dev. Lett. Vol.35, No.12, pp.1215-1217, Dec.2014. (DOI: 10.1109/LED.2014.2364826) 査読有
- (4) T. Maekawa, H. Kanaya, S. Suzuki and M. Asada, “Frequency increase in terahertz oscillation of resonant tunnelling diode up to 1.55 THz by reduced slot-antenna length,” Electron. Lett. Vol. 50, No. 17, pp. 1214-1216, Aug. 2014. (DOI: 10.1049/el.2014.2362) 査読有
- (5) M. Feiginov, H. Kanaya, S. Suzuki, and M. Asada, “Operation of resonant-tunneling diodes with strong back injection from the collector at frequencies up to 1.46 THz,” Appl. Phys. Lett. Vol. 104, No.24, 243509(1-4), July 2014. (DOI: 10.1063/1.4884602) 査読有
- (6) H. Sugiyama, A. Teranishi, S. Suzuki, and M. Asada, “Structural and electrical transport properties of MOVPE-grown pseudomorphic AlAs/InGaAs/InAs resonant tunneling diodes on InP substrates,” Jpn. J. Appl. Phys. vol. 53, 031202(1-6), 2014. (DOI:10.7567/JJAP.53.031202) 査読有
- (7) S. Kitagawa, S. Suzuki, and M. Asada, “Wide-Range Varactor-Tuned Terahertz Oscillator Using Resonant Tunneling Diode,” J. Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, vol. 35, no. 5, pp. 445-450, 2014. (DOI: 10.1007/s10762-014-0061-4) 査読有
- (8) 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, vol. 35, no. 5, pp. 425-431, 2014. (DOI: 10.1007/s10762-014-0058-z) 査読有
- (9) M. Asada, H. Kanaya, and S. Suzuki, “Terahertz Emission from Resonant Tunneling Diodes without Satisfying Oscillation Condition,” Jpn. J. Appl. Phys. vol. 52, 100210(1-4), 2013. (DOI: 10.7567/JJAP.52.100210) 査読有
- (10) H. Kanaya, S. Suzuki, and M. Asada, “Terahertz Oscillation of Resonant Tunneling Diodes with Deep and Thin Quantum Wells,” Electron. Express, vol. 10, pp. 1-7, 2013. (DOI: 10.1587/elex.10.20130501) 査読有
- (11) 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., vol. 19, no. 1, 8500108, Feb. 2013. (DOI: 10.1109/JSTQE.2012.2215017) 査読有
- (12) H. Kanaya, H. Shibayama, R. Sogabe, S. Suzuki, and M. Asada, “Fundamental Oscillation up to 1.31 THz in Resonant Tunneling Diodes with Thin Well and Barriers,” Appl. Phys. Express, vol. 5, 124101, Nov. 2012. (DOI: 10.1143/APEX.5.124101) 査読有
- (13) 鈴木左文、鏑木新治、金谷英敏、浅田雅洋、「共鳴トンネルダイオードのテラヘルツ発振とレーザー照射による出力の変調」レーザー学会誌「レーザー研究」vol. 40, no. 7, pp. 517-522, Jul. 2012. (http://www.lsj.or.jp/laser/40/40_7.pdf) 査読有
- (14) 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., vol. 48, no. 10, pp. 582-583, May 2012. (DOI: 10.1049/el.2012.0849) 査読有
- (15) H. Shibayama, S. Suzuki, M. Shiraishi, and M. Asada, “Dependence of Output Power on Slot Antenna Width in Terahertz Oscillating Resonant Tunneling Diodes,” J. Infrared Milli. Terahz. Waves, vol. 33, pp. 475-478, Apr. 2012. (DOI: 10.1007/s10762-012-9893-y) 査読有
- (16) A. Teranishi, S. Suzuki, K. Shizuno, M. Asada, H. Sugiyama, and H. Yokoyama, “Estimation of Transit Time in Terahertz Oscillating Resonant Tunneling Diodes with Graded Emitter and Thin Barriers,” IEICE Trans. Electron., vol. E95-C, No. 3, pp. 401-407, Mar. 2012. (DOI: 10.1587/transele.E95.C.401) 査読有
- (17) A. Teranishi, K. Shizuno, S. Suzuki, M. Asada, H. Sugiyama, and H. Yokoyama, “Fundamental Oscillation up to 1.08 THz in Resonant Tunneling Diodes with High-Indium-Composition Transit Layers for Reduction of Transit

Delay”, IEICE Electronics Express, vol. 9, no. 5, pp. 385-390, Mar. 2012. (DOI: 10.1587/elex.9.385)査読有

[学会発表](計 28 件)

- (1) M. Feiginov, H. Kanaya, S. Suzuki, and M. Asada, “1.46 THz RTD oscillators with strong back injection from collector”, International Conf. Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2014), Tucson, USA, W3/E-23.1, Sept. 17, 2014.
- (2) N. Oshima, K. Kasagi, S. Suzuki, and M. Asada, “Frequency Dependence of Radiation from Patch Antenna Coupled to Resonant-Tunneling-Diode Terahertz Oscillator”, International Symposium on Terahertz Nanoscience, Martinique, France, Dec. 5, 2014.
- (3) H. Kanaya, T. Maekawa, S. Suzuki, and M. Asada, “Dependence of Dwell Time on Well Thickness in Terahertz Oscillating Resonant Tunneling Diodes”, International Symposium on Terahertz Nanoscience, Martinique, France, Dec. 5, 2014.
- (4) M. Asada and S. Suzuki, “Room-Temperature Resonant-Tunneling-Diode THz Oscillators toward High Frequency and High Functionality” [Invited], International Symposium on Terahertz Nanoscience, Martinique, France, Dec. 4, 2014.
- (5) T. Nukariya, Y. Ueda, T. Otsuka, M. Asada, and S. Suzuki, “Drain Bias Dependence of Current Sensitivity in Terahertz Detector using InAlAs/InGaAs HEMT with Short Channel”, International Symposium on Frontier Terahertz Science (IS-FTS), Okinawa, Japan, Poster-31, Aug. 5, 2014.
- (6) S. Kitagawa, S. Suzuki, and M. Asada, “Increment in Tuning Range of Voltage-Controlled Resonant-Tunneling-Diode Terahertz Oscillator” International Symposium on Frontier Terahertz Science (IS-FTS), Okinawa, Japan, Poster-30, Aug. 5, 2014.
- (7) S. Suzuki and M. Asada, “Room-Temperature Resonant-Tunneling-Diode Terahertz Oscillator” [Invited], Int. Conf. Solid State Device and Materials (SSDM2014), Tsukuba, Japan, E-2-1, Sept. 9, 2014.
- (8) S. Suzuki and M. Asada, “Room-temperature THz Oscillators with Resonant Tunneling Diodes” [Invited], Symposium on Communication, Microelectronics, Optoelectronics, and Sensors Emerging Technologies Research, Grenoble, France, Session S2, July 7 2014.
- (9) S. Kitagawa, S. Suzuki, and M. Asada, “Varactor-Tuned Resonant-Tunneling-Diode Terahertz Oscillator”, European Optical Society THz Science and Tech. (EOS-TST), Camogli, Italy, May 13, 2014.
- (10) T. Maekawa, H. Kanaya, R. Sogabe, S. Suzuki, and M. Asada, “Oscillation of Resonant Tunneling Diode up to 1.55 THz by Optimized Slot Antenna Length”, European Optical Society THz Science and Tech. (EOS-TST), Camogli, Italy, May 13, 2014.
- (11) H. Kanaya, R. Sogabe, T. Maekawa, S. Suzuki, and M. Asada, “Frequency increase in resonant tunneling-diode terahertz oscillators using optimum collector spacer”, Int. Conf. Indium Phosphide and Related Materials (IPRM2014), Montpellier, France, Mo-C1-2, May 12, 2014.
- (12) K. Okada, S. Suzuki, and M. Asada, “Resonant-Tunneling-Diode Terahertz Oscillator Integrated with Slot-Coupled Patch Antenna”, Int. Conf. Indium Phosphide and Related Materials (IPRM2014), Montpellier, France, Mo-C1-1, May 12, 2014.
- (13) Y. Ikeda, K. Okada, S. Kitagawa, S. Suzuki, and M. Asada, “Resonant-tunneling-diode oscillator with high-frequency modulation structure for high-capacity terahertz communication”, International Conf. Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz2014), Tucson, USA, M5-P3.3, Sept. 15, 2014.
- (14) K. Okada, S. Suzuki, and M. Asada, “Terahertz Oscillating Resonant Tunneling Diode with Slot-Fed Patch Antenna”, Int. Symp. Terahertz Nanoscience, No.5, Osaka, March 14, 2014.
- (15) M. Asada, H. Kanaya, and S. Suzuki, “Spontaneous Emission of Terahertz Waves from Resonant Tunneling Diodes”, International Symposium on Advanced Nanodevices and Nanotechnology (ISANN2013), Kauai (USA), PII-14, Dec. 11, 2013.
- (16) K. Minoguchi, K. Okada, S. Suzuki, and M. Asada, “Proposal and Fabrication of Resonant-Tunneling-Diode

- Terahertz Oscillator with Structure for High Frequency Modulation”, Int. Conf. Infrared, Millimeter, and THz Waves (IRMMW2013), Mainz (Germany), ThP3-59, Sept. 5, 2013.
- (17) R. Sogabe, K. Shizuno, H. Kanaya, S. Suzuki, M. Asada, H. Sugiyama, and H. Yokoyama, “Terahertz Oscillators using Resonant Tunneling Diodes with InAlGaAs/InP Composite Collector”, Int. Conf. Indium Phosphide and Related Materials (IPRM2013), MoPl-24, Kobe, May 20, 2013.
- (18) M. Asada and S. Suzuki, “Resonant Tunneling Diodes for Room-Temperature Terahertz Oscillators”, Asia Pacific Microwave Conf. (APMC2013), T3A-1, Seoul, Nov. 7, 2013 (Invited).
- (19) M. Asada and S. Suzuki, “Compact THz Oscillators with Resonant Tunneling Diodes and Application to High-Capacity Wireless Communications”, Int. Conf. on Applied Electromagnetics and Communications, Special Session on THz, Dubrovnik (Croatia), Oct. 16, 2013 (Invited).
- (20) M. Asada and S. Suzuki, “Room-Temperature Terahertz Oscillation of Resonant Tunneling Diodes”, SPIE Int. Symp. Optics and Photonics, Terahertz Emitters, Receivers, and Applications IV, No.8846-11, San Diego, Aug. 25, 2013 (Invited).
- (21) M. Asada and S. Suzuki, “Room-Temperature THz Oscillators Using Resonant Tunneling Diodes”, Int. Symp. Microwave/Terahertz Science and Application (MTSA 2013), Session 1, Shanghai, July 22, 2013 (Invited).
- (22) M. Asada and S. Suzuki, “Room-Temperature THz Oscillators using Resonant Tunneling Diodes”, Int. Workshop. Optical THz Science and Tech. (OTST2013), Tu1-2, Kyoto, Apr. 2, 2013 (Invited).
- (23) S. Suzuki, K. Ishigaki, and M. Asada, “Dependence of bit error rate on received power in terahertz wireless communication using resonant-tunneling-diode oscillator”, Int. Symp. Frontiers THz Tech. (FTT 2012), Pos1.49, Nara, JPN, Nov. 28, 2012.
- (24) H. Kanaya, S. Suzuki, and M. Asada, “Frequency increase in terahertz oscillating resonant tunneling diodes

- with keeping bias voltage by deep- and thin-well structure”, Int. Symp. Frontiers THz Tech. (FTT 2012), Pos1.14, Nara, JPN, Nov. 28, 2012.
- (25) M. Asada and S. Suzuki, “Room-Temperature THz Oscillators Using Resonant Tunneling Diodes with Reduced Delay Times”, (Invited), Int. Symp. Frontiers THz Tech. (FTT 2012), WeP.2, Nara, JPN, Nov. 28, 2012.
- (26) M. Shiraishi, S. Suzuki, and M. Asada, “High-Power Operation of Terahertz Oscillators with Resonant Tunneling Diodes Using Offset-Fed Slot Antennas and Array Configuration”, Int. Conf. Infrared and Millimeter Waves & Terahertz Electronics (IRMMW-THz 2012), Thu-Pos-1, Wollongong, AUS, Sep. 27, 2012.
- (27) H. Kanaya, H. Shibayama, K. Shizuno, S. Suzuki, and M. Asada, “Fundamental Oscillation up to 1.31 THz Using Thin-Well Resonant Tunneling Diodes”, Indium Phosphide Related Materials (IPRM 2012), Tu-1E.5, Santa Barbara, USA, Aug. 28, 2012.
- (28) H. Kanaya, H. Shibayama, K. Shizuno, S. Suzuki, and M. Asada, “Increase in Output Power using Thin-Well Resonant Tunneling Diodes”, 3rd EOS Topical Meeting THz Science & Tech., Prague, Czech, Jun. 19, 2012.

〔図書〕(計 1 件)

- (1) M. Asada and S. Suzuki, “Resonant Tunneling Diodes for THz Sources,” Chapter 7, “Handbook of Terahertz Technologies: Devices and Applications,” Edited. by H.-J. Song and T. Nagatsuma, Pan Stanford Publishing, 2015

〔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

<http://www.pe.titech.ac.jp/AsadaLab/>
<http://www.pe.titech.ac.jp/SuzukiLab/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鈴木 左文 (SAFUMI SUZUKI)
東京工業大学・理工学研究科・准教授
研究者番号: 40550471

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし