

平成 29 年 5 月 12 日現在

機関番号：13201

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25249042

研究課題名(和文) MEMS/共鳴トンネル素子集積化によるTHzサンプリング及び波形生成技術の研究

研究課題名(英文) Studies on THz sampling and signal generation technologies based on MEMS/resonant tunneling diode integration

研究代表者

前澤 宏一 (Maezawa, Koichi)

富山大学・大学院理工学研究部(工学)・教授

研究者番号：90301217

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、THz動作が可能な電子デバイスである共鳴トンネル素子(RTD)と微小電子機械システム(MEMS)、これらを統合する異種材料デバイス集積技術を基盤として、全電子式のTHzスペクトロスコピーをオンチップで実現するものである。ここでは、そのための要素技術の検討、プロトタイプデバイスの試作を行った。具体的には、RTDパルス生成器、MEMS位相シフタ、広帯域可変発振器などの信号源や、超再生検波などの検出器、それらを合わせたTHzサンプリング回路の試作を行い、その基本動作を実証した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is to develop all-electronic THz spectroscopy system on a chip based on a resonant tunneling diode (RTD), Micro electro mechanical system (MEMS) and heterogeneous integration technology. Various device and circuit technologies, such as RTD pulse generators, MEMS phase shifters, wide-range variable-frequency oscillators, and super regenerative detectors, have been investigated. A prototype circuit of the samplers for the THz spectroscopy was also fabricated and demonstrated the basic operation.

研究分野：半導体デバイス工学

キーワード：共鳴トンネル テラヘルツ MEMS サンプリング 異種材料集積 InP パルス 発振器

1. 研究開始当初の背景

最近、100GHz から 10THz とされる THz 波への興味が高まっており、通信はもとより、生体高分子や DNA の分析、複素屈折率測定など様々な応用が提案されている。しかし、その多くは光学的な発生/検出手段によっており、極短パルスレーザーによる励起や光ミキシングなど、大掛かりな実験装置が必要であった。

一方、共鳴トンネル素子(RTD) は THz を超える高速性を持つ高周波電子デバイスであり、THz 波の信号源/検出器としての可能性が注目を集めている。RTD を用いれば、コンパクトで、低消費電力な THz 信号源/検出器が可能となる。例えば、RTD を用いた 1THz を超える発振器や、ps オーダーの電氣的な極短パルス生成が報告されている。また、RTD の強い非線形性は高感度な THz 波検出器に理想的であり、ショットキーダイオードに優る特性が報告されている。しかし、RTD には、直流から負性抵抗が存在するためにバイアス不安定が生じやすいこと、さらには、二端子素子であり、入出力分離が困難であるという問題点があった

2. 研究の目的

本研究は、THz 動作が可能な電子デバイスである共鳴トンネル素子(RTD) と MEMS、これらを統合する異種材料デバイス集積技術を基盤として、全電子式の THz サンプリング、THz 信号生成、さらには THz 波形直接合成 (THz-DDS、THz Direct Digital Synthesizer) 技術をオンチップで実現しようとするものである。THz 波は様々な分野で興味を集めているが、その多くは光学的な発生/検出手段によっており、大がかりな実験装置を要する。これを RTD や MEMS を用いて実現すれば、オンチップの THz システムとなり、その応用範囲は格段に広がる。例えば、THz 波通信・レーダーや、Lab-On-A-Chip への THz 分光の導入が可能となり、大きなインパクトが期待できる。

3. 研究の方法

全電子式の THz サンプリングおよび THz 信号/波形生成技術をオンチップで実現するため、まず、その要素部品となる、極短パルス生成器、THz 検出器、MEMS 可変共振器・位相シフタについて検討を進める。また、これらを集積するための異種材料デバイス集積技術について検討する。検出器については、RTD だけでなく、挟ギャップ半導体である InSb 系の無バイアスダイオードについても検討する。次に、これらを用いた THz サンプリングシステムの試作を行い、その可能性を明らかにする。

また、THz 信号生成法としては、RTD と MEMS 共振器による広帯域可変発振器、RTD パルス生成器と MEMS 位相シフタ/アッテネータを用いた波形直接合成の二種を検討す

る。なお、RTD 回路の個別検討には InP 基板を用いるが、将来的には低損失な石英基板の採用も視野に入れて研究を進める。

4. 研究成果

(1) 極短パルス生成とその制御に関する研究

RTD パルス生成器のハイパワー化

RTD を用いた極短パルス生成器は、シンプルな構成で、容易に ps オーダーのパルスを生成できる。しかし、そのパルスパワーは非常に小さい。これは、RTD の電流-電圧特性の特徴から電圧振幅が限られるためである。このため、RTD の面積を大きくし、電流を大きくしても、負荷に供給できるパワーは増加しない。ここでは、これを解決するために、指数関数テーパ型インピーダンス変換器を集積化したパルス生成器を設計・試作した (図 1)。指数関数テーパ線路は非常に広帯域性を持ち、極短パルス生成器への応用が可能である。25 への変換により、半値幅 10ps のパルスにおいて 30% の出力増大を実証した。

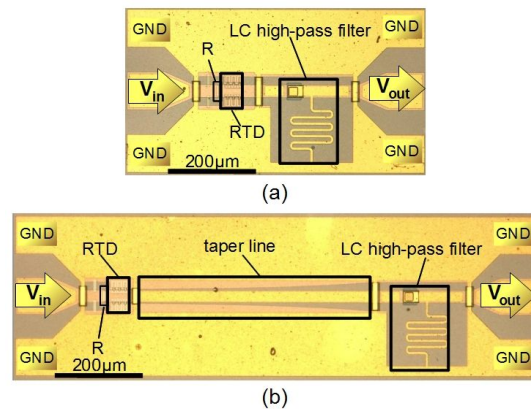


図 1 試作した RTD パルス生成器 a) 標準型、b) テーパー線路インピーダンス変換器内蔵型

THz に対応する新しい位相シフタの提案と実証

本申請テーマの重要な要素部品の一つに位相シフタがある。パルスタイミングのスweepは波形サンプリングに不可欠であり、特にパルス波形をパルス波形自身でサンプリングする時間領域スペクトロスコピーではその性能が結果に直結する。通常の MEMS 位相シフタは、可動ブリッジを伝送線路上に配置しその上下によって線路の容量を変調する。この位相シフタは離散的な構造であるため、ユニットセルの大きさに周波数帯域が制限される(ブラッグ周波数による制限)。そのため、THz 帯域では非常に微小なブリッジを大量に設置することが必要となる。

我々は、THz 帯域への応用を意図した新しいタイプの位相シフタを提案した。これは、コプレーナ線路上にグランドプレーンを設けたものである。これを上下動させることにより、信号伝搬速度を変調する。グランドプレーンが離れている時は、誘電率の高い半導体基板を通る電界により、平均誘電率は高い。グランドプレーンが近づくと、多くの電界は

信号線路とグランドプレーンの間に集まり、平均誘電率が低下する。このため、平均誘電率により決まる信号伝搬速度が上昇する。

この提案を実証するためにシミュレーション及び固定ギャップを持つグランドプレーンを用いて実験を行った。図2にシミュレーション、及び実験から得られた、信号伝搬速度のグランドプレーン高さ依存性を示す。実験とシミュレーションの結果は良い一致を示した。グランドプレーンが線路に近づくにつれて伝搬速度が増大していることが分かる。この依存性は、これまでの MEMS 位相シフトにおける容量の増大による変化とは逆の変化であり、新しい原理による位相シフトであることが明らかである。

図1 試作した RTD パルス生成器 a) 標準型、b) テーパー線路インピーダンス変換器内蔵型。

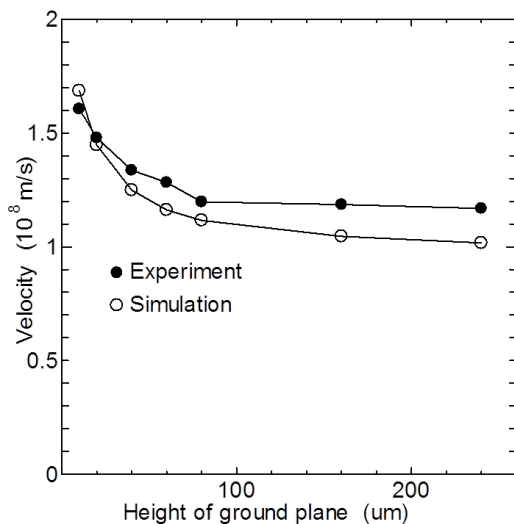


図2 信号伝搬速度のグランドプレーン高さ依存性、シミュレーションと実験結果の比較

(2) THz 検出器の研究

RTD を用いた THz センサの可能性とプロトタイプ試作

RTD 検出器はショットキーダイオードの検出器と比較して、強い非線形性に起因する高い感度を有する。我々は、RTD 検出器と RTD パルス生成器を基盤としたサンプリング回路を提案している。ここでは、その動作原理確認のために、シンプルなプロトタイプデバイスを試作した。

図3に作製した回路のチップ写真を示す。本回路は極短パルス生成器、RTD detector、ローパスフィルタから構成されている。本回路に入力信号(V_{in})として1周期500psの矩形波を入力し、出力波形を調べた。パルスタイミングのスweepにより、波形が変化することは確認できたが、入力信号とは duty 比が異なっていた。この原因は、パルス強度が非常に弱く、ノイズの影響を受けやすいためと考えられる。実際、一定電圧を入力信号とした測定により、パルス振幅は8mVであることがわかった。これは回路シミュレーションにより得られたパルス振幅50mVに対して非

常に小さい値である。この原因は回路中の寄生容量によるものと推測される。今後、チップ全体の電磁界解析を用いた設計を行う必要があると考えている。

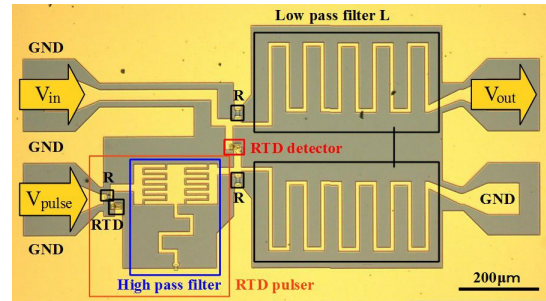


図3 試作したサンプリング回路のチップ写真

RTD を用いた超再生検波方式の提案とその実証

超再生検波方式は、間欠的に系を発振状態に持ち込み、その時の発振の立ち上がりに着目する検波方式である。発振の立ち上がりは、微小なゆらぎが増幅する過程であり、系が発振状態に置かれてから実際に発振が始まるまでの時間は最初に存在するゆらぎの大きさによって決まる。従って、入力された信号が、発振のシードとなる初期ゆらぎとして働けば、系の発振はより早く起きることになる。我々は、RTD 発振器を用いてこの方式を拡張し、超再生検波回路の発振周波数より高い周波数を検波することを提案してきた。ここでは、これを実験的に検証した。

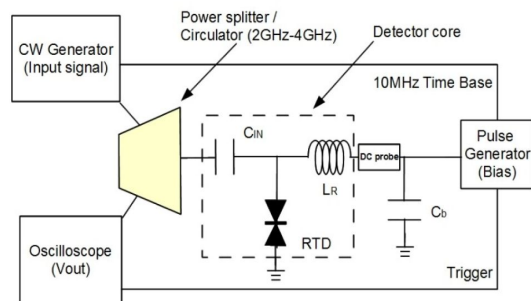


図4 実験回路の構成

回路は InP 基板上の RTD を用いて作製した。自走発振周波数は、約 1.5 GHz であった。実験回路の構成を図4に示す。入力信号は、サーキュレータあるいはパワースプリッタを通して回路に与え、同様にサーキュレータ/パワースプリッタから出力を取り出し、オシロスコープで観測した。バイアス電圧は、パルス生成器から与え、同時にオシロスコープのトリガーとして利用した。図5に50GHz、-13.5 dBm の信号を入力した場合の出力波形を示す。この場合も、信号入力により、発振が始まるタイミングが早くなっていることが見て取れる。つまり、この超再生検波回路は、自走発振周波数の32倍という高次の高調波にも応答することになる。この方式をより高い周波数に適用することにより、高感度

に THz 波の検出が行えると考えている。これは、信号増幅が困難な THz 波に適している。

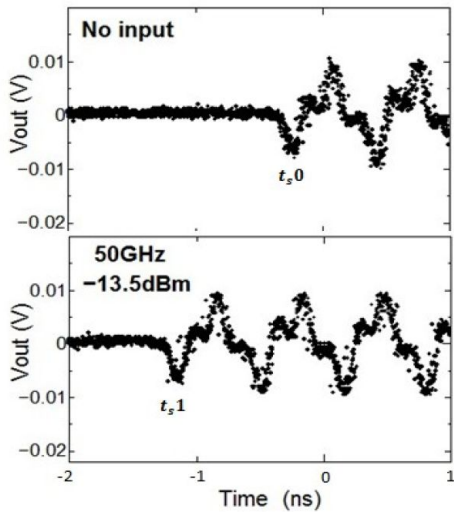


図5 自動発振周波数の約 32 倍の入力信号を与えたときの発振の立ち上がり

(3) THz 信号生成技術の研究

新位相シフタと RTD を用いた広帯域可変周波数発振器の提案と実証

RTD の特徴の一つとして dc から THz 領域まで、すべての周波数領域で負性抵抗を示す点がある。このため、どんな周波数でも発振可能である。従って、非常に幅広く共振周波数を変化できる共振器を用いれば、超広帯域な可変周波数発振器が実現できる。(1) で述べた新方式の MEMS 位相シフタはこの用途にも使用可能である。我々は、伝送線路共振器にこの位相シフタを合わせることで広帯域可変共振器を構成し、広帯域可変周波数 RTD 発振器を作ることを試み見た。

RTD 発振器は InP 基板上に作製した。これをプリント基板に取り付け、図 6 のような実験系に設置した。信号取り出しは、ワイヤーボンディング、SMA コネクタを用いた。発振周波数は SMA コネクタの帯域を考慮して 10GHz に設計した。図 6 の実験系はグランドプレーンをマイクロメータヘッドで移動できるようにしており、 μm 精度で変更できる。

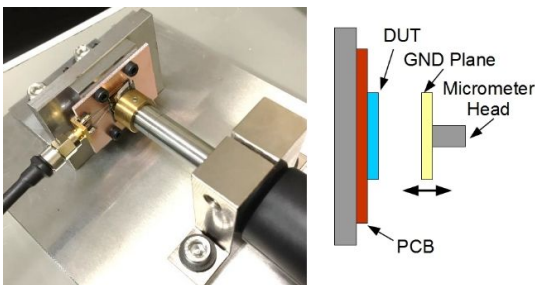


図6 実験系

図 7 に発振周波数のグランドプレーン高さ依存性を示す。シミュレーション結果も合わせて示してある。図から分かるように、グランドプレーンが基板に近づくに連れて発振

周波数は増大し、 $1\mu\text{m}$ 近辺では、約 20GHz ともとの周波数に対して 100% の増加を示した。この最大周波数は基板とグランドプレーンの傾きによって制限されており、MEMS 化によってより大きな変化が期待できる。本可変周波数発振器は、THz スペクトロスコピーにおける信号源として有望である。

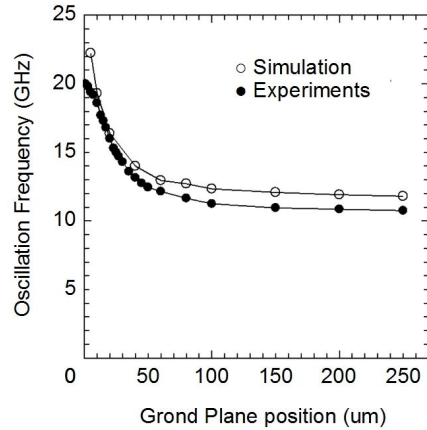


図7 発振周波数のグランドプレーン高さ依存性

RTD 装荷伝送線路発振器による高調波生成

我々はこれまで、シミュレーションを用いた検討により、RTD を装荷した伝送線路発振器において強い高次の高調波が生成されることを明らかにしてきた。これは、ミリ波、THz 波の生成に対して重要な利点がある。ここで示された高次高調波は 9 次という高いものであり、基本波発振回路の設計、作製が容易である。また、ハイパスフィルタ (HPF) を用いることにより、基本波を回路内に閉じ込め、高調波のみを取り出すことも容易である。そのため、外部負荷が基本波発振に与える影響を軽減でき、負荷変動に依らず安定した発振が得られる。

この高次高調波は RTD を装荷した伝送線路の離散性に起因したパスバンドの効果と考えられるが、詳細は明らかではなかった。我々は、この発振器を小信号線形モデルにより解析し、伝送線路パラメータに対する発振周波数、高次高調波生成条件を明らかにした。その後、さらに低位相ノイズ信号生成を狙った注入同期の可能性についても調べた。同期信号は、基本波周波数付近とし、中央の RTD に印加した。その結果、条件によっては 5% 程度の注入同期周波数範囲が得られることが分かった。本発振器では、9 次という高い高調波を出力するため、比較的低い周波数の基準発振器を利用でき、位相ノイズの小さい信号生成が期待できる。

(4) 異種材料集積技術の研究

本研究の進展には、様々な材料からなる様々なデバイスを集積化する異種材料集積化技術が必要である。我々は、その中でも Fluidic Self Assembly (FSA) に着目した。FSA は大きさが数十 μm のデバイスブロック

を液体中で散布し、ホスト基板上に形成されたリセスに捕獲するプロセスである。図8に低融点金属を用いたFSA技術の基本的なプロセスを示す。低融点金属のバンプを形成したホスト基板を液中に配置し、バンプを溶融させておくために液を加熱する。金属パッドを持った微小デバイスブロックが溶融バンプに接触すると、表面張力によって引き込まれ、電氣的・機械的・熱的接続が同時に完了する。我々は、低融点金属としてGaを用いたFSAを提案し、Si基板上へのInGaAs共鳴トンネルダイオード(RTD)の配置を行った。

しかしながら、Gaは室温でも溶融する金属であるため、熱的信頼性という大きな問題が残っている。これには機械的接続の問題だけでなく、デバイス中へのGaの異常拡散の可能性もある。これらを解決するために、デバイスブロック上にTiのバリア層を持つAuパッドを形成することで拡散を防止し、FSAプロセス後にGaをAuと合金化させることによって融点の上昇を図った。

この効果を確認するため、FSAで配置されたデバイスの高温保持試験を行った。RTDは非常に薄い二重障壁量子井戸(DBQW)構造からなり、ピーク電流はDBQWの特性に敏感である。もし液化したGaがバリア層であるTi層を越えDBQW層まで浸入すると、リーク電流の増大やデバイスの短絡故障に至ると考えられる。図9にピーク電流の保持時間依存性を示す。ピーク電流はわずかに変化しているがデバイスの短絡故障は見られず、GaがTi層を越え拡散していないことが示唆された。

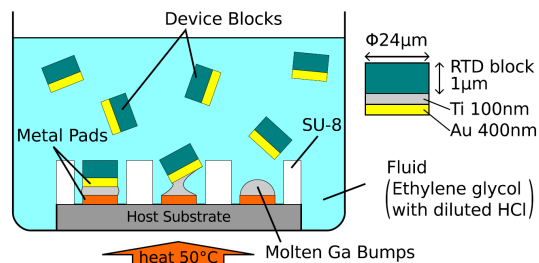


図8 低融点金属を用いたFSAの概念図

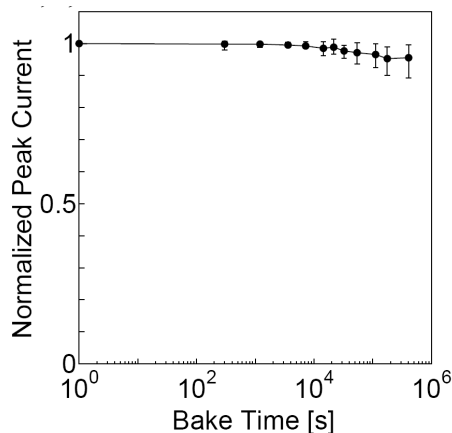


図9 高温保持試験におけるRTDピーク電流の時間変化

(5) 新しいアプリケーションの提案

本研究における最も重要な要素の一つがRTD発振器である。RTD発振器はTHz領域での発振も報告されており、THz信号源として有望である。しかし、その応用は信号源に限られない。我々は、RTD発振器のセンサ応用に関する提案を行った。このセンサは外部環境による発振器の周波数変化を基に、周波数変調(FM) アナログ・デジタル変換(ADC)の原理を利用するものである。この方式は、発振周波数が高いほど性能の向上が見込めるため、RTD発振器の応用に適している。

この方式は様々なセンサへの応用が期待されるが、ここでは、MEMS歪センサを試作し、その基本動作を実証した。図10に試作した歪センサの顕微鏡写真を示す。この回路は、RTDを装荷したカンチレバーとそのRTDを用いた発振器から構成されている。カンチレバーに力が加わるとRTDに歪みが生じ、電流電圧特性が変化する。これによる発振周波数の変化を周波数方式を用いて読み取ることで広帯域、高ダイナミックレンジのセンサを実現することを狙っている。カンチレバーにプローブの針を用いて音響信号を印加し、その出力のスペクトルを見たのが図11である。7kHzの入力信号ピークとともに、20dB/decで周波数依存するノイズシェーピングが観測された。この結果は変調が行われていることを明確に示している。

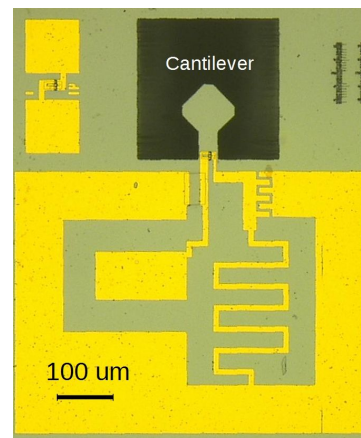


図10 RTD装荷カンチレバーを用いた歪センサ

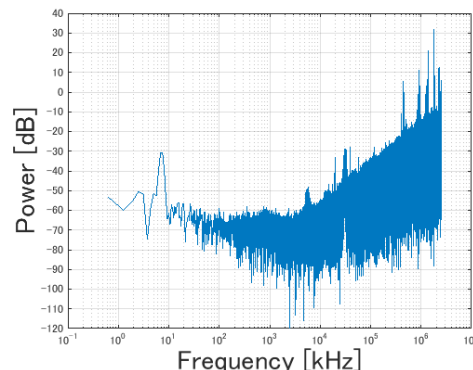


図11 歪センサの出力スペクトル

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 6 件)

(1) Takumi Tajika, Yuichiro Kakutani, Masayuki Mori and Koichi Maezawa, "Experimental demonstration of strain detection using resonant tunneling delta-sigma modulation sensors," Phys. Status Solidi A, 214, 1600548 (2016) / DOI 10.1002/pssa.201600548 (査読有).

(2) J. Pan, Y. Kakutani, T. Nakayama, M. Mori, K. Maezawa, "Resonant Tunneling Super Regenerative Detectors Detecting Higher Frequency Signals than Their Free-Running Oscillation Frequency," IEICE TRANS. ELECTRON., Vol.E98-C, No.3, pp. 260-266 (2015) (査読有).

(3) 中野純、柴田知明、森田弘樹、坂本宙、森雅之、前澤宏一、「溶融 Ga バンプを用いた Fluidic Self-Assembly で配置された微小デバイスの熱的信頼性」、電子情報通信学会論文誌 C, Vol. J97-C No.3 pp.124-125 (2014) (査読有).

(4) K. Maezawa, J. Pan, D. Wu, Y. Kakutani, J. Nakano, M. Mori, "Possibility of THz detection with resonant tunneling super regenerative detectors based on extremely high order harmonics," IEICE Electronics Express, Vol. 10, No.20 (2013) pp. 20130676 (査読有り).

(5) J. Nakano, T. Shibata, H. Morita, H. Sakamoto, M. Mori, K. Maezawa, "Fluidic Self-Assembly Using Molten Ga Bumps and Its Application to Resonant Tunneling Diodes," Jpn. J. Appl. Phys. Vol.52 (2013) 116501 (査読有).

〔学会発表〕(計 40 件)

(1) Koichi Maezawa, Takuro Kishi and Masayuki Mori, "Injection Locking and High Order Harmonic Generation in Transmission Line Oscillators Loaded with Resonant Tunneling Diodes," WOCSDICE 2016, Aveiro, Portugal, 6-10 June (2016).

(2) 前澤宏一、「共鳴トンネル素子を用いた超高周波回路とその集積技術」、有機・無機エレクトロニクスシンポジウム、2016 年 7 月 15 日、金沢、招待講演。

(3) 前澤宏一、中野純、柴田知明、森田弘樹、坂本宙、山田悟史、森雅之、「Ga 溶融バンプを用いた Fluidic Self Assembly による異種材料集積化技術」、電子情報通信学会信頼性(R)研究会報告 R2015-28、青森、8 月 27 日、(2015) (招待講演)。

(4) Koichi Maezawa, "Ultrahigh frequency circuits and a novel integration technology for resonant tunneling diodes," 2015 Vietnam Japan Micro Wave

(VJMW 2015) Ho Chi Minh City, Vietnam, 10-11th August (2015) (KEYNOTE TALK).

(5) J. Pan, Y. Kakutani, T. Nakayama, M. Mori and K. Maezawa, "Experimental Demonstration of Resonant Tunneling Super Regenerative Detectors Detecting High Order Harmonic Signals on Si substrate," SSDM 2014, Tsukuba, 8-11th September (2014).

(6) D. Nakano, M. Mori, K. Maezawa, H. Ishii, H. Andoh, "Proposal of a Simple MEMS Phase Shifter Based on Effective Dielectric Constant Modulation," SSDM 2015, Sapporo, Hokkaido, 27-30th September (2015).

〔図書〕(計 1 件)

K. Maezawa, "Resonant Tunneling Diodes," Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering, vol. 18, pp. 545-550.

〔産業財産権〕

出願状況 (計 1 件)

名称：移動シフト

発明者：前澤宏一

権利者：富山大学

種類：特許

番号：特願 2015-33217

出願年月日：平成 27 年 2 月 23 日

国内外の別：国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

前澤 宏一 (MAEZAWA, Koichi)

富山大学・大学院理工学研究部・教授

研究者番号：90301217

(2) 研究分担者

石井 仁 (ISHII, Hiromu)

豊橋技術科学大学・テラーメイド・バト

ンゾーン教育推進本部・特任教授

研究者番号：20506175

安藤 浩哉 (ANDO, Hiroya)

豊田工業高等専門学校・情報工学科・教授

研究者番号：30212674

(3) 連携研究者

森 雅之 (MORI, Masayuki)

富山大学・大学院理工学研究部・准教授

研究者番号：90303213