

令和 4 年 6 月 16 日現在

機関番号：13201

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18H01495

研究課題名(和文) THz周波数 変調方式を用いた高性能センサ技術の開拓

研究課題名(英文) High performance sensors based on frequency delta-sigma modulation using a THz oscillator

研究代表者

前澤 宏一 (Maewaza, Koichi)

富山大学・学術研究部工学系・教授

研究者番号：90301217

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、THz に達する超高周波発振器を用いた周波数 変調方式に基づく新しいセンサ技術を開拓するものがある。周波数 変調方式は、高分解能・高ダイナミックレンジとともに高速動作、広帯域を特徴とするアナログデジタル変換器のコアであり、外部物理量で周波数が変化する発振器を用いることにより、シンプルな構成で高性能なセンサが可能となる。本研究では、この方式を用いた基本センサとして、空洞共振器マイクロフォンセンサの高性能化を実現するとともに、これを用いた原子間力顕微鏡など新たなセンサを提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で対象とした周波数 変調方式センサは、高分解能・高ダイナミックレンジ・広帯域であるとともに、本質的にデジタル出力であるという特徴を持つ。高性能なセンサにおける問題点の一つが高性能なアナログデジタル変換を必要とする点であり、本研究成果はこの点で大きな意義がある。また、本センサは外部物理量で周波数が変化する発振器ができれば様々な物理量のセンシングに適用でき、その効果は大きい。例えば、本研究で対象としたマイクロフォンセンサはメンブレンの変位をセンサする位置センサとしても利用でき、幅広い応用が期待できる。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to develop novel high performance sensors based on frequency delta-sigma modulation (FDSM) scheme using a THz oscillator. The FDSM is a core of the analog-digital converters featuring wide frequency bandwidth as well as high resolution, wide dynamic range. This can be applied to high performance sensors when we use an oscillator whose oscillation frequency depends on external physical parameters. In this study, we demonstrated high performance microphone sensors based on a cavity resonator oscillator, and also proposed a novel application of such sensors, such as atomic force microscopes.

研究分野：半導体デバイス

キーワード：変調 共鳴トンネル THz センサ 周波数 変調

## 1. 研究開始当初の背景

最近、安心、安全社会の実現や医療への応用に関連して、センサ技術の重要性が高まっているここでは、特にハイエンドの高性能センサを対象とするが、こうしたセンサでは高度なデータ処理も必要であり、出力のデジタル化は必須である。そのため、最終的な性能は、センサだけでなく、アナログデジタル変換器(ADC)の性能との積が決めることになる。本課題の核心をなす学術的な問いは、この性能の限界に迫る方法は何か、ということである。我々は、センサとADCが一体化した周波数 $\Delta\Sigma$  (FDSM) 方式センサという新しい技術を用いてその限界に挑む。

FDSM方式は、 $\Delta\Sigma$ A/D変換器を実現するための一つの方法として研究されている。通常の $\Delta\Sigma$ 方式に比べ、簡単な回路で実現でき、高周波特性が良いという特徴を持つためである。これらの研究は、進展著しいSi CMOS デジタル集積回路技術を利用してA/D変換器の性能を上げることを目的としている。本申請はここで用いられる電圧制御発振器を外部物理量によって周波数が変化する発振器に変えることにより高性能なセンサを構成しようというものである。

この方式は発振器の発振周波数が高いほど高性能化が狙える。この点で、化合物半導体超高速素子、特に共鳴トンネル素子(RTD)の応用に適している。共鳴トンネル素子に関しては、最近、THz波の応用が関心を集めるとともに研究が盛んになってきた。すでに1.92THzという電子デバイスとして最も高い発振周波数が報告されている。ただし、現在、RTDに関する研究のほとんどは通信応用を目指したものであり、本申請のようにセンサ応用を目的とするもの少ない。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、THzに達する超高周波発振器を用いた周波数 $\Delta\Sigma$ 変調方式に基づく新しいセンサ技術を開拓することにある。この方式の特徴は、センスすべき物理量を周波数変調(FM)信号に変換し、それを周波数 $\Delta\Sigma$ 方式でデジタル化する点にある。このため、センサ自身がADC機能をもつ事になり、雑音生成源が少なく、高ダイナミックレンジで広帯域のデジタル出力が得られる。

本申請は、外部の物理量によって周波数が変化する発振器を用いることにより、周波数 $\Delta\Sigma$ 方式のセンサ技術を開拓しようというものである。このセンサの性能は、サンプリング周波数だけでなく、対象とする物理量変化に対する周波数変化の大きさによって決まる。通常、周波数変化の割合は一定であるため、発振周波数が高いほど高性能化できる。ここに、共鳴トンネル素子(RTD)を用いる点が本申請のもう一つの特徴である。超高周波発振を特徴とする、RTDを用いることにより飛躍的な性能向上も期待できる。

## 3. 研究の方法

本研究は、理論的検討、シミュレーションとともに、実際にプロトタイプデバイスを試作、検証するものである。シミュレーションとしては、電磁界シミュレータ(Keysight EMPro)、回路シミュレータ(Keysight ADS、Analog Devices LTSPICE)を用いた。具体的なセンサとしては、空洞共振器、及び、円板型共振器を用いた二種のマイクロフォンセンサを対象として研究を進めた。これらのセンサは薄膜(メンブレン)の変位をセンスするもので、変位センサとみなすことも可能である。アクティブデバイスとしては、高移動度トランジスタ(HEMT)と共鳴トンネルダイオード

(RTD)を用いた。HEMTは市販のチップを、RTDに関しては、本研究室でフォトリソグラフィ、金属の電子ビーム蒸着、リフトオフ工程を行い作製したものを用いた。

#### 4. 研究成果

本研究における主な成果を以下に示す。

##### (1) フィールドプログラマブルゲートアレイ (FPGA) を用いたFDSM解析システムの構築

FDSM方式センサは、外部物理量で周波数が増減する発振器と、サンプリング、エッジ検出、デシメーションフィルタを含むデジタル処理部からなる。このデジタル処理部には高い周波数でのサンプリング能力と多ビットの演算能力が求められる。この両者を実現するために、XilinxのFPGAボードZCU102を用いてシステムを試作した。その結果、サンプリングレート約12.6Gbit/sでリアルタイムに96kHz帯域の32bitデジタルデータへ変換可能なFDSM解析システムを実現できた。

##### (2) FDSM方式のノイズフロアと発振器特性の関係に関する理論的、実験的検討

これまでFDSM方式センサにおいて問題となっていたノイズフロアについて検討を進めた。ノイズフロアの原因は発振器の位相ノイズとされてきたが、これまで両者の関係は不明確であった。我々は、多数の独立した振動子からなるノイズ源を用いた位相ノイズモデルにより両者の定量的関係を明らかにした。これにより、必要とされる位相ノイズの上限を示すことも可能となった。さらに、いくつかの発振器の位相ノイズと、それらの信号をFDSM方式でデジタル変換したあとのノイズフロアを比較し、上記ノイズモデルが有効であることを実証した。

##### (3) 空洞共振器発振器を用いたマイクロフォンセンサ

このセンサはマイクロ波の空洞共振器の一端を金属薄膜（ダイアフラム）とし、それが音響波の圧力により変位することに起因する共振周波数変化を用いるものである。この空洞共振器にHEMTチップあるいは、HEMTを用いた増幅器チップを接続し、10GHzの発振器を構成した。この出力を前述のFDSM解析システムに接続することにより、デジタル出力を得た。本検討では、特に発振器の位相ノイズの低減に力を注ぎ、低ノイズ化を図った。まず、空洞共振器の材質・表面状態を改善し、これまでの2倍以上のQ値を得た。次に、パラメータの最適化に有利なループフィードバック型の発振回路を採用し、位相ノイズ化を実現した。その結果、ノイズフロアを大幅に改善でき、マイクロフォンセンサとしても、96kHz帯域幅で90dB近いダイナミックレンジを得た。

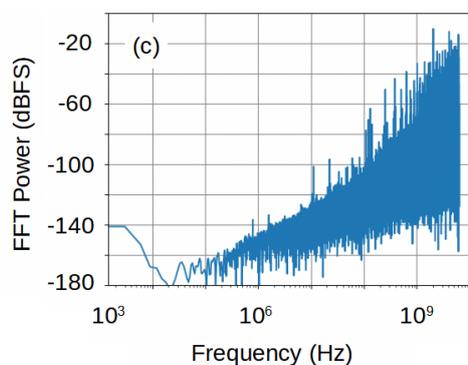
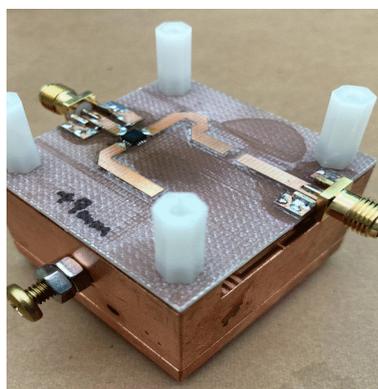


図1 空洞共振器を用いたFDSMマイクロフォンセンサ（左）とそのノイズシェーピング特性

(4) RTDとサスペンデッドマイクロストリップ共振器を用いたFDSMマイクロフォンセンサ

これは、マイクロストリップ線路の裏面のGND面を金属薄膜として、空気を挟んで対抗させることにより、音圧に依存した発振器を形成し、FDSMセンサを実現しようというものである。金属薄膜と基板裏面との距離によって伝搬速度が変化することを利用する。まず、デバイス構造、作製プロセスの検討を行い、FR-4プリント基板上にRTDチップを実装し、プロトタイプ素子を試作した。これに対し、(1)で述べたFDSM測定系による評価を行い、基本動作を実証した。また、本センサのコアである共鳴トンネル発振器についても、その安定性の向上を目指した硬い発振器を試作し、基本動作を実証した。

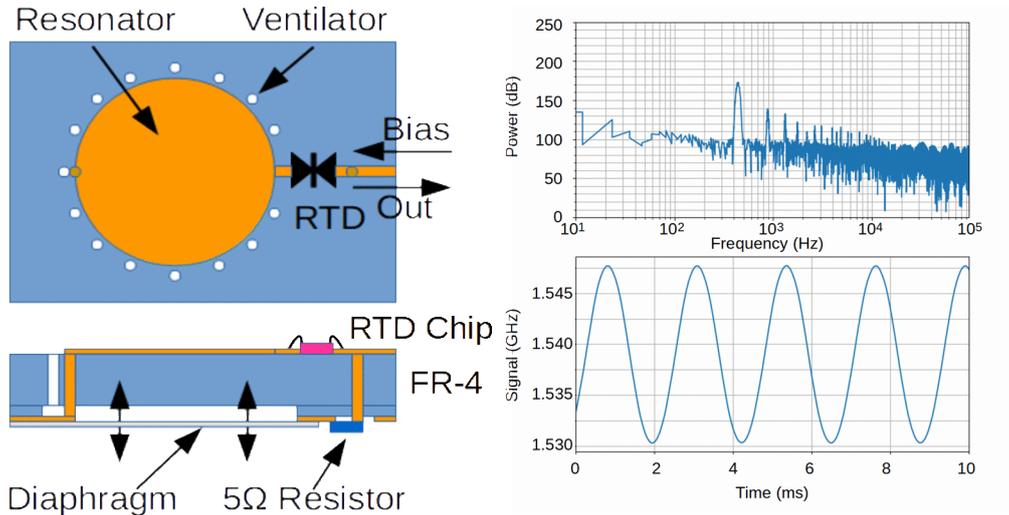


図2 サスペンデッドマイクロストリップ共振器を用いたFDSMセンサの概念図（左）と実験結果（1kHzの音響波の取得実験）の例（右）

(5) AFM/表面粗さ計への応用

さらに、ここまで検討してきたマイクロフォンセンサの新たな応用について検討を行った。このセンサはメンブレンの変位を検知するものであり、高性能な変位計としても使うことができる。ここでは本センサの特徴を生かした表面粗さ計/AFMへの応用を提案した。この方式は1mmの段差のある表面の1nm以下の微細構造の測定が可能となることが期待できる。簡易的な装置を試作しその基本動作を実証した。

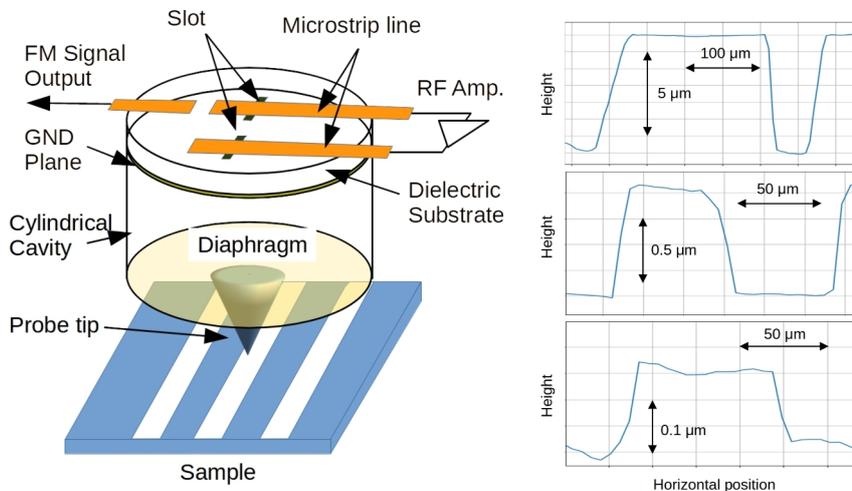


図3 空洞共振器マイクロフォンセンサを用いたAFM/表面粗さ計の概念図（左）とその出力結果の例（右）

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Maezawa Koichi, Ito Tatsuo, Mori Masayuki	4. 巻 40
2. 論文標題 Delta-sigma modulation microphone sensors employing a resonant tunneling diode with a suspended microstrip resonator	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Sensor Review	6. 最初と最後の頁 535 ~ 542
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1108/SR-03-2020-0044	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 NARAHARA Koichi, MAEZAWA Koichi	4. 巻 E104.C
2. 論文標題 Transition Dynamics of Multistable Tunnel-Diode Oscillator Used for Effective Amplitude Modulation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Electronics	6. 最初と最後の頁 40 ~ 43
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transele.2020ECS6012	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 MAEZAWA Koichi, MORI Masayuki	4. 巻 E104.C
2. 論文標題 Effects of oscillator phase noise on frequency delta sigma modulators with a high oversampling ratio for sensor applications	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Electronics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transele.2020ECS6026	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Andoh Hiroya, Tsuzuki Keita, Oikawa Dai, Sugiura Toko, Tsukamoto Takehiko, Maezawa Koichi	4. 巻 16
2. 論文標題 Study on impedance matching and maximum wireless power transfer efficiency of circuits with resonant coupling based on simplified S-matrix	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEICE Electronics Express	6. 最初と最後の頁 20190156
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/elex.16.20190156	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 MAEZAWA Koichi、MORI Masayuki	4. 巻 E101.C
2. 論文標題 Possibilities of Large Voltage Swing Hard-Type Oscillators Based on Series-Connected Resonant Tunneling Diodes	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Electronics	6. 最初と最後の頁 305 ~ 310
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transele.E101.C.305	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Narahara Koichi、Maezawa Koichi	4. 巻 15
2. 論文標題 Characterization of a hard-type oscillator using series-connected tunnel diodes	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEICE Electronics Express	6. 最初と最後の頁 355 ~ 355
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/elex.15.20180355	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 MAEZAWA Koichi、ITO Tatsuo、MORI Masayuki	4. 巻 E104.C
2. 論文標題 Experimental Demonstration of a Hard-Type Oscillator Using a Resonant Tunneling Diode and Its Comparison with a Soft-Type Oscillator	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Electronics	6. 最初と最後の頁 685 ~ 688
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transele.2021ECS6002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Maezawa Koichi、Mori Masayuki、Andoh Hiroya	4. 巻 21
2. 論文標題 Noise Floor Reduction in Frequency Delta-Sigma Modulation Microphone Sensors	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 3470 ~ 3470
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/s21103470	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計23件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 伊藤多津生、森雅之、前澤宏一
2. 発表標題 共鳴トンネルダイオードを用いたハードタイプ発振器の位相ノイズ特性評価
3. 学会等名 令和2年度(2020年)応用物理学会 北陸・信越支部 学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田端一貴、森雅之、前澤宏一
2. 発表標題 ループフィードバック型発振器を用いた周波数 マイクロフォンセンサの検討
3. 学会等名 令和2年度(2020年)応用物理学会 北陸・信越支部 学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 UMER Farooq, Masayuki MORI, Koichi MAEZAWA
2. 発表標題 Resonant Tunneling Chaos Generator on a Printed Circuit Board (PCB) Employing Bonding Wires for High Quality Inductors
3. 学会等名 令和2年度(2020年)応用物理学会 北陸・信越支部 学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大寺悠介、森雅之、前澤宏一
2. 発表標題 Fluidic Self-Assembly用Geパンプ接続のマイクロ波/ミリ波特性について
3. 学会等名 令和2年度(2020年)応用物理学会 北陸・信越支部 学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 前澤 宏一, 森 雅之
2. 発表標題 周波数 変調方式センサにおける位相ノイズのシンプルなモデル化とその実験的検証
3. 学会等名 Future Technologies from KUMAMOTO ONLINE、第12回集積化MEMSシンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Koichi Maezawa, Masayuki Mori, Hiroya Andoh, and Taiichi Otsuji
2. 発表標題 Resonant tunneling hard-type oscillators for THz applications
3. 学会等名 東北大学 電気通信研究所 令和2年度共同プロジェクト研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Koichi Maezawa and Masayuki Mori
2. 発表標題 Resonant Tunneling Delta Sigma Modulation Ultrasound Sensors Using A Suspended Microstrip Disk Resonator
3. 学会等名 13th Topical Workshop on Heterostructure Microelectronics (TWHM 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tatsuo Ito, Masayuki, Mori and Koichi Maezawa
2. 発表標題 Spurious Free Oscillations of the Resonant Tunneling Hard-Type Oscillators Having a Simple Capacitor Coupled Trigger Input
3. 学会等名 13th Topical Workshop on Heterostructure Microelectronics (TWHM 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉田素将、森 雅之、前澤宏一
2. 発表標題 共鳴トンネルダイオード発振器の回路構成と回路パラメータの位相ノイズへの影響
3. 学会等名 令和元年度応用物理学会北陸・信越支部学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 本村彰啓、前澤宏一、森 雅之
2. 発表標題 周波数 型振動センサ 用発振器に対する基板歪みの効果
3. 学会等名 令和元年度応用物理学会北陸・信越支部学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 前澤宏一、森雅之
2. 発表標題 周波数 変調方式センサに対する発振器位相ノイズの影響
3. 学会等名 電子情報通信学会、電子デバイス研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Koichi Maezawa
2. 発表標題 Resonant tunneling diode oscillators for high performance sensors
3. 学会等名 東北大学 電気通信研究所 令和元年度共同プロジェクト研究発表会（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Koichi Maezawa, Motoyuki Yoshida, Masayuki Mori
2. 発表標題 Resonant tunneling hard-type oscillators having a Schottky diode trigger circuit for stable and large voltage swing operation
3. 学会等名 The 42nd Workshop on Compound Semiconductor Devices and Integrated Circuits held in Europe (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Maezawa, T. Tajika, M. Mori
2. 発表標題 1-MHz strain detection using resonant tunneling delta-sigma modulation sensors
3. 学会等名 2018 Asia-Pacific Workshop on Fundamentals and Applications of Advanced Semiconductor Devices (AWAD 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Operating Mechanism and Voltage Swing Enhancement of the Hard-type Oscillators Based on Series-connected RTDs
2. 発表標題 Koichi Maezawa, Motoyuki Yoshida, Masayuki Mori
3. 学会等名 Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 村谷龍星、前澤宏一、森雅之
2. 発表標題 周波数 変換方式を用いたマイクロフォンセンサの帯域内雑音低減
3. 学会等名 平成30年度応用物理学会北陸・信越支部学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 本村彰啓、前澤宏一、島田知輝、山川雅輝、村谷龍星、森雅之
2. 発表標題 空洞共振器を用いた周波数 型振動センサの提案
3. 学会等名 平成30年度応用物理学会北陸・信越支部学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉田素将、森雅之、前澤宏一
2. 発表標題 共鳴トンネルダイオードを用いた硬い発振器
3. 学会等名 第4回有機・無機エレクトロニクスシンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 前澤宏一、山岡昂博、森雅之
2. 発表標題 周波数 変調型センサのための10GS/s FPGA測定系の構築
3. 学会等名 電子情報通信学会、電子デバイス研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中干場 翔伍、森 雅之、前澤 宏一
2. 発表標題 TE113モードを用いたFM 変調方式マイクロフォンセンサの特性評価
3. 学会等名 令和3年度(2021年)応用物理学会 北陸・信越支部 学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 相澤 一仙、森 雅之、前澤 宏一
2. 発表標題 共鳴トンネルダイオードを用いた周波数 方式マイクロフォンセンサの 実験的検証
3. 学会等名 令和3年度(2021年)応用物理学会 北陸・信越支部 学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Umer Farooq, Masayuki Mori, Koichi Maezawa
2. 発表標題 A microwave chaos generator circuit employing a resonant tunneling diode
3. 学会等名 2nd International Electronic Conference (IEC2021) - Enabling Nanoelectronics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 前澤宏一、森雅之
2. 発表標題 周波数 変調方式変位センサを用いたAFM/表面粗さ計の可能性
3. 学会等名 Future Technologies from HIMEJI 2021、第13回集積化MEMSシンポジウム
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	安藤 浩哉  (Andoh Hiroya)  (30212674)	豊田工業高等専門学校・情報工学科・教授   (53901)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------