

令和 3 年 5 月 6 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K04979

研究課題名(和文) 導電性ナノ粒子の2次元ランダム配列を用いた低コストな確率論的単一電子素子作製法

研究課題名(英文) Stochastic fabrication process of single-electron devices comprising a two-dimensional random array of conductive nanoparticle

研究代表者

水柿 義直 (Mizugaki, Yoshinao)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授

研究者番号：30280887

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、微小ナノギャップの作製やナノ粒子の精密配置を排除した、単一電子素子の新しい作製方法を提案し、その有効性の実証を目指した。実験においては、数百nmの電極ギャップ内への金ナノ粒子の配置に「コロイド溶液滴下法」「コロイド溶液液浸法」「誘電泳動法」を採用し、いずれの方法においても単一電子帯電効果(クーロン閉塞やクーロン振動)が現れる素子の作製に成功した。数値計算においては、三角格子にランダムにナノ粒子を配置した場合のパーコレーション接続をシミュレーションするとともに、パーコレーション接続した場合の抵抗値やクーロン閉塞閾値電圧を求め、それらの相関関係を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ナノ粒子を島電極として利用する単一電子素子の研究は20年以上続けられており、優れた研究成果が多く報告されているが、ナノギャップにナノ粒子を精密配置する必要がある。本研究では、ナノ粒子の精密配置をせずに、パーコレーション接続を利用した確率論的作製プロセスを提案・実証した。高コストな精密配置法とは対照的に、確率的ながらも低コストな作製プロセスとなる。また、パーコレーション接続でのクーロン閉塞閾値電圧のシミュレーションは過去に例がなく、確率論的作製プロセスで作製された単一電子素子の特性予測に活用できる。

研究成果の概要(英文)：In this project, we realized new fabrication methods for single-electron devices composed of nanoparticles randomly assembled in electrode gaps of several-hundred-nanometer widths. We employed gold-colloid dropping methods, gold-colloid immersion methods, and dielectrophoresis methods to assemble gold nanoparticles, with all of which we obtained samples exhibiting single-electron charging effects such as the Coulomb blockade and the Coulomb oscillation. In numerical approaches, on the other hand, we composed codes for percolation phenomena in triangle lattices, and then, combined them with an electric-circuit simulator and a Monte-Carlo single-electron simulator. Numerical results predicted the relationship between the resistance and the Coulomb blockade threshold voltage of assembled nanoparticles.

研究分野：電子工学

キーワード：単一電子トンネリング ナノ粒子 パーコレーション クーロン閉塞 低温実験 モンテカルロシミュレーション 電気回路シミュレーション

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

超高感度電荷センサーとして応用されている単一電子素子は、その素子サイズが小さくなるほど、動作可能温度が向上する。トンネル接合で囲まれた島電極が有する静電容量値を C_{Σ} とした場合、そこに単一電子(電気素量 e) が帯電したときの静電エネルギーは $e^2/(2C_{\Sigma})$ となる。また、素子サイズと C_{Σ} には正の相関があることから、素子サイズが小さくなるほど C_{Σ} も小さくなる。よって、素子サイズが小さくなるほど島電極の単一電子帯電エネルギーが大きくなり、結果として動作温度が高くなる。このことから、金ナノ粒子と STM 探針を用いた単一電子トランジスタの室温動作の報告 (S.-T. Yau, et al., Phys. Rev. B 57 (1998) 24) 以降、ナノ粒子を島電極に用いた単一電子素子が多数報告されている。

本研究開始時においては、ナノ粒子サイズと同程度の大きさの電極ギャップを絶縁基板上に設け、そこに 1 個ないし数個のナノ粒子を配置する作製法が主流であった。ナノギャップの形成については、種々の方式が報告されている(例: 第 70 回応用物理学会学術講演会シンポジウム「ナノギャップの作製とそのデバイス応用」ナノギャップを用いたナノエレクトロニクスデバイスに向けて」2009 年)。また、ナノ粒子の配置については、化学的吸着などを利用した巧みな方法が提案されており、成功例も多数報告されているが、ナノギャップへの精密配置は容易ではない。

我々は電子ビームリソグラフィと斜め蒸着法を用いて微小トンネル接合を作製してきた。これまでに種々の単一電子素子を作製してきたが、島電極サイズが 100 nm を大きく超えることが多く、結果として動作温度は絶対温度 1 K 以下となり、液体ヘリウム温度 (4.2 K) でも明瞭なゲート応答を得るのは困難であった。素子の動作温度向上を図るには、ナノ粒子を島電極に用いることが有効であるが、微小ナノギャップの作製やナノ粒子の精密配置には技術的困難が伴い、いわば高コストな作製プロセスが必要であった。

2. 研究の目的

本研究では、微小ナノギャップ作製やナノ粒子精密配置を排除した、新しい作製プロセスの開発を目的とした。また、従来の方法においてもナノ粒子の配置での確率要素を排除できないことから、本研究では確率論的プロセスを積極的に利用することとした。具体的には、サブミクロン程度の比較的大きな(ナノ粒子サイズの 10 倍程度の)電極ギャップにナノ粒子をランダム配置し、パーコレーション現象を利用して単一電子素子を実現することを目指した。例えば、ソース(S)・ドレイン(D)・ゲート(G)の 3 電極の形状や間隔、およびナノ粒子の径を適切に選ぶと、パーコレーション理論から、「S-D 電極間は接続され、それらと G 電極は非接続となるナノ粒子密度」が存在し、これを利用することにより容量性ゲートの単一電子素子が形成される。なお、電極ギャップ間のナノ粒子パーコレーション接続については、すでに多くの論文が出版されているが(例: P.-E. Trudeau, et al., J. Chem. Phys. 119 (2003) 5267)、そのほとんどは 2 電極間接続について取り扱っており、本研究の 3 電極間のパーコレーション接続・非接続の利用はユニークな取り組みと言える。

具体的な研究項目は次のとおりである。

- 金ナノ粒子を用いた実験によるクーロン閉塞・ゲート応答の評価。
- 磁性ナノ粒子を用いた実験によるクーロン閉塞・ゲート応答・外部磁場応答の評価。
- ナノ粒子 2 次元ランダム配列における単一電子パーコレーションモデルの構築。

3. 研究の方法

実験においては、まず、酸化膜付きシリコン基板上に、数百 nm という比較的広いギャップで隔てられた金電極を電子ビームリソグラフィと蒸着法を用いて作製した。次に、ナノ粒子を電極ギャップ間に配置し、電極間の電気抵抗を測定した。配置方法としては、ナノ粒子分散溶液滴下法、ナノ粒子分散溶液中への液浸、ナノ粒子分散溶液滴下後に誘電泳動などを試みた。電極形状、基板表面処理、ナノ粒子のサイズ、ナノ粒子の種類を変更しながら実験を行った。試料の評価としては、走査型電子顕微鏡 (SEM) による表面形状観察、室温の電極間抵抗測定、低温(主として、液体ヘリウム温度と液体窒素温度)での電流 - 電圧特性およびゲート応答特性の測定を行った。

数値計算においては、三角格子上に電極位置を設定したのち、電極ギャップ間の各ノードに、あらかじめ設定した占有確率でナノ粒子を配置した場合のパーコレーション接続を計算した。続いて、パーコレーション接続した場合の接続経路を既存の電気回路シミュレーションプログラムに入力し、2 ノード間の抵抗値で規格化した電極間抵抗値を算出した。さらに、接続経路を既存のモンテカルロシミュレーションプログラムに入力し、電極間の電流 - 電圧特性をシミュレーションし、単一電子帯電効果の指標である閾値電圧を算出した。

4. 研究成果

研究期間内に得られた主な成果は、以下のようにまとめられる。

- (1) 電極間での金ナノ粒子のパーコレーション接続にて、電極間の金ナノ粒子配列領域をレジストで制限した作製方法を開発し、単一電子素子実現を実証した(主たる外部発表: Jpn. J. Appl. Phys. 57 (2018) 098006)
- (2) 電極間での金ナノ粒子のパーコレーション接続にて、金ナノ粒子の誘電泳動法を導入し、単一電子素子を実現するとともに、誘電泳動の各種条件と形成された金ナノ粒子配列特性との相関関係を明らかにした(主たる外部発表: IEICE Trans. Electron. E103-C (2020) 62)
- (3) 強磁性体ナノ粒子として、炭素被覆コバルトナノ粒子を用いた場合に単一電子素子として動作することを実証した。(主たる外部発表: 32nd Int. Microproc. Nanotechnol. Conf. (2019) 30P-7-9)
- (4) 大小二種類の金ナノ粒子を電極間に配列し、金ナノ粒子の大きさの違いに起因する単一電子素子特性を確認した。(主たる外部発表: 電子情報通信学会 電子部品・材料研究会, 118 (2019) CPM2018-114)
- (5) 電極間のパーコレーション接続について、三角格子にナノ粒子を配置するシミュレーションプログラムを開発し、ナノ粒子占有確率と電極間接続確率の相関関係を導くとともに、パーコレーション接続した系を電気回路に置き換え、電極間の抵抗値およびクーロン閉塞閾値電圧を算出するプログラムを実現した。(主たる外部発表: IEICE Trans. Electron. E101-C (2018) 836)

これらの成果は、本研究で開発した単一電子素子の新しい作製方法の有効性を示している。以下、各項目について説明する。

(1) 電極間の金ナノ粒子配列領域をレジストで制限した単一電子素子素子作製方法の開発

パーコレーション接続の系として、金ナノ粒子を配置する領域をレジストで制限して疑似的な1次元接続の実現を試みた。具体的には、試料全体をレジストで被覆した後、電子ビームリソグラフィで電極間に数百 nm 幅のレジスト溝を明け、そこに金ナノ粒子を配置した。溝幅が広い場合は2次元のパーコレーション配列、溝幅が狭い場合は1次元のパーコレーション配列となる。図1に結果の一例を示す。試料の走査電子顕微鏡像より、電極ギャップ内に金ナノ粒子の1次元配列が形成されているのが確認できる。また、液体ヘリウム浴中での電流 - 電圧特性の測定ではクーロン閉塞が確認でき、ゲート電圧応答の測定ではクーロン振動が確認できた。これらの結果より、この作製方法の有効性が示された。

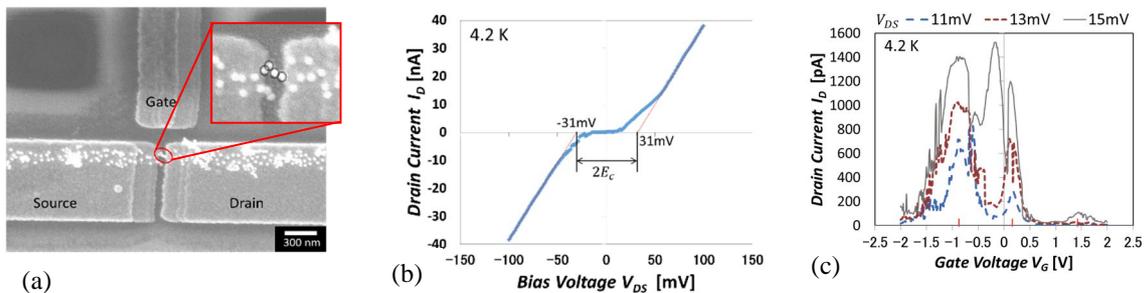


図1：金ナノ粒子の2段階液浸によって作製したナノ粒子配列。

この実験では、ナノ粒子の配列場所をレジスト溝内に限定した。

- (a) 走査電子顕微鏡像。
- (b) 液体ヘリウム浴中での電流 - 電圧特性。クーロン閉塞が確認できる。
- (c) 液体ヘリウム浴中でのゲート電圧応答。クーロン振動的な振る舞いが確認できる。

(2) 誘電泳動法を利用した金ナノ粒子配列作製と単一電子素子の実現

電極間での金ナノ粒子のパーコレーション接続にて、金ナノ粒子の誘電泳動法を導入し、単一電子素子を実現した。さらに、誘電泳動の各種条件、特に印加交流電圧の周波数と電圧振幅に対して、形成された金ナノ粒子配列の集合面積、抵抗値、および単一電子帯電効果発現との相関関係を明らかにした。

(3) 強磁性体ナノ粒子である炭素被覆コバルトナノ粒子を用いた単一電子素子の実現

ナノ粒子に強磁性体を使用することで、磁場に応答する素子の実現が期待できる。当初、強磁性ナノ粒子としてニッケルナノ粒子を使用して実験を実施したが、ニッケルナノ粒子のランダム配列では電気的な導通特性を得ることができなかった。次に、ニッケルナノ粒子に代わって炭素被覆コバルトナノ粒子を用いたところ、電気的な導通特性が得られた。そこで、炭素被覆コバルトナノ粒子を用いた素子作製条件を調査した。図2に結果の一例を示す。この実験では、電極間に交流電圧を印加してナノ粒子を集積する誘電泳動法を採用した。走査型電子顕微鏡像から、電極間に炭素被覆コバルトナノ粒子がランダムに集合していることが確認できる。液体ヘリウム浴中でのゲート電圧応答では、クーロン振動が確認でき、この試料が単一電子素子として動作していることが示された。さらに、磁場を印加すると、その掃引方向で電流値が変化することが確認できた。この磁場応答については、よく知られたトンネル磁気効果によるものか否かについて、現時点では断定はできていないが、強磁性ナノ粒子を利用した素子の磁場応答の可能性を示している。

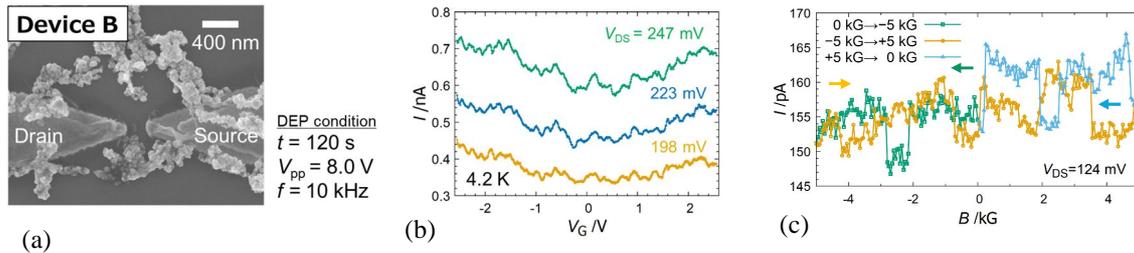


図2：炭素被覆コバルトナノ粒子を用いて作製したナノ粒子配列。
この実験では誘電泳動法を援用した。

- 走査電子顕微鏡像。
- 液体ヘリウム浴中でのゲート電圧応答。クーロン振動的な振る舞いが確認できる。
- 液体ヘリウム浴中での磁場応答。電圧固定時の電流値が、印加磁場に対してヒステリシスを伴った変化をしている。

(4) 大小二種類の金ナノ粒子を含むランダム配列の作製と電気的特性評価

大小二種類の金ナノ粒子を電極間に配列し、その電気的特性の温度変化を測定した。金ナノ粒子の大きさは、単一電子帯電効果の発現温度やクーロン閉塞電圧に影響することが知られている。本研究では、意図的に大小二種類（例えば直径 50 nm と 15 nm）の金ナノ粒子で構成されるランダム配列を作製した。コロイド溶液 2 段階液浸法で作製した試料では、電気抵抗の温度依存性が一様とならず、温度上昇に伴って急速に抵抗が減少する成分と、抵抗減少が緩やかな成分とが含まれることが確認された。また、電流 - 電圧特性ではクーロン閉塞と思われる高抵抗領域が確認できた。これらの結果より、金ナノ粒子の大きさを選択することで、素子の動作温度範囲を制御できることが示唆された。

(5) 電極間のパーコレーション接続と電気的特性をシミュレーションするプログラム開発

電極形状、電極間ギャップ、ナノ粒子密度など、パーコレーション接続のモデルだけを考えても、本研究では設定すべきパラメータが数多くある。そこで、実験を補佐する数値シミュレーションとして、最もシンプルなモデルの一つである三角格子でのパーコレーション接続をシミュレーションするプログラムを C 言語で作成し、電極の各種寸法や格子点でのナノ粒子占有確率を変えながら、パーコレーション接続確率を調査した。図3(a)(b)(c)に数値計算結果の例を示す。ここでは、S 電極もしくは D 電極との接続がある粒子のみを抽出して示している。図3に示している結果は、占有確率が 0.50、0.45、および 0.30 の場合で、S 電極と D 電極とがパーコレーション接続しているものである。これらのようなシミュレーション結果は、実験での電極レイアウト設計の際の参考情報となる。

また、パーコレーション接続の結果から電気的特性の予測を行えるよう、プログラムを拡張した。パーコレーション接続の結果から、まず、S 電極もしくは D 電極との接続があるナノ粒子を抽出し、その接続を抵抗体で置き換え、抵抗ネットワークとして既存の電気回路シミュレータで処理することで、電極間の合成抵抗値を算出した。さらに、抵抗ネットワークを微小トンネル接合ネットワークに変換し、それを既存のモンテカルロシミュレータで処理することで、単一電子素子としての特性をシミュレーションした。図3(d)では、シミュレーションで得られた電流 - 電圧特性の一例を示している。電流 - 電圧特性からクーロン閉塞閾値電圧を抽出し、抵抗ネットワークの合成抵抗値との相関関係を得ることに成功している。

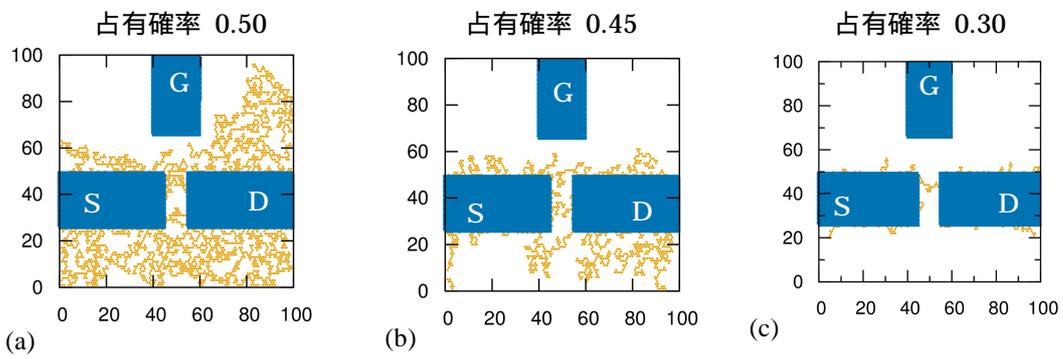
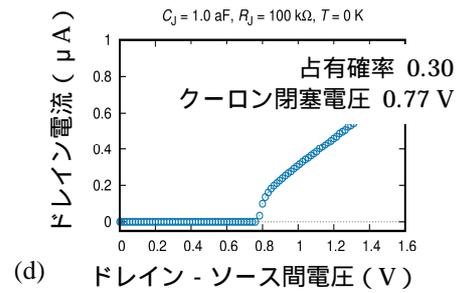


図3 : パーコレーション接続の数値シミュレーション結果の例。

上段 : S 電極もしくは D 電極と接続した粒子の配置。

占有確率は , (a) 0.50 , (b) 0.45 , (c) 0.30。

(d) 占有確率 0.30 で得た接続でのモンテカルロシミュレーション結果 (電流 - 電圧特性)。クーロン閉塞電圧 0.77 V が得られた。



以上の研究成果により , 当初の研究目的をおおよそ達成することができた。加えて , レジスト溝や誘電泳動法などが , 数百 nm 程度の電極間隔に対するナノ粒子ランダム配列の作製と単一電子素子実現に有効であることが示された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計17件（うち査読付論文 17件 / うち国際共著 2件 / うちオープンアクセス 7件）

| | |
|--|-------------------------------|
| 1. 著者名 Yamazaki Koki, Shimada Hiroshi, Mizugaki Yoshinao | 4. 巻 1590 |
| 2. 論文標題 Design and error-rate evaluation of RSFQ logic gates comprising a toggle storage loop | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series | 6. 最初と最後の頁 012042 ~ 012042 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/1590/1/012042 | 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 - |

| | |
|--|---------------------|
| 1. 著者名 Onomi Takeshi, Mizugaki Yoshinao | 4. 巻 30 |
| 2. 論文標題 Hardware Random Number Generator Using Josephson Oscillation and SFQ Logic Circuits | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity | 6. 最初と最後の頁 1 ~ 5 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TASC.2020.2992248 | 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 MIZUGAKI Yoshinao, YAMAZAKI Koki, SHIMADA Hiroshi | 4. 巻 E103.C |
| 2. 論文標題 Rapid Single-Flux-Quantum NOR Logic Gate Realized through the Use of Toggle Storage Loop | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 IEICE Transactions on Electronics | 6. 最初と最後の頁 547 ~ 549 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transele.2020ECS6005 | 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 Mizugaki Yoshinao, Arai Yuma, Watanabe Tomoki, Shimada Hiroshi | 4. 巻 29 |
| 2. 論文標題 1000-Fold Double-Flux-Quantum Voltage Multiplier Employing Directional Propagation of Flux Quanta Through Asymmetrically Damped Junction Branches | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity | 6. 最初と最後の頁 1 ~ 5 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TASC.2019.2895606 | 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 Yagai Tomoki, Matsumoto Kazuhiko, Moribayashi Makoto, Moriya Masataka, Shimada Hiroshi, Hirano-Iwata Ayumi, Hirose Fumihiko, Mizugaki Yoshinao | 4. 巻 58 |
| 2. 論文標題 Evaluation of the inter-particle distance of gold nanoparticles dispersed on silane-treated substrates to fabricate dithiol-connected arrays | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics | 6. 最初と最後の頁 SDDF09 ~ SDDF09 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1347-4065/ab1476 | 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 Mizugaki Yoshinao, Higuchi Komei, Shimada Hiroshi | 4. 巻 16 |
| 2. 論文標題 Enhanced voltage swing of rapid-single-flux-quantum distributed output amplifier equipped with double-stack superconducting quantum interference devices | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 IEICE Electronics Express | 6. 最初と最後の頁 20190331-1 ~ 4 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/elex.16.20190331 | 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 Higuchi Komei, Shimada Hiroshi, Mizugaki Yoshinao | 4. 巻 1293 |
| 2. 論文標題 Design and operation of distributed double-SQUID amplifier for RSFQ circuits | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series | 6. 最初と最後の頁 012060 ~ 012060 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/1293/1/012060 | 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 - |

| | |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名 MIZUGAKI Yoshinao, MORIBAYASHI Makoto, YAGAI Tomoki, MORIYA Masataka, SHIMADA Hiroshi, HIRANO-IWATA Ayumi, HIROSE Fumihiko | 4. 巻 E103.C |
| 2. 論文標題 Dielectrophoretic Assembly of Gold Nanoparticle Arrays Evaluated in Terms of Room-Temperature Resistance | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 IEICE Transactions on Electronics | 6. 最初と最後の頁 62 ~ 65 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transele.2019ECS6011 | 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 Mizugaki Yoshinao, Takiguchi Masashi, Tamura Nobuyuki, Shimada Hiroshi | 4. 巻 969 |
| 2. 論文標題 Magnetoresistance in single-electron transistors comprising a superconducting island with ferromagnetic leads | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series | 6. 最初と最後の頁 012154-1~6 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/969/1/012154 | 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 - |

| | |
|--|--------------------------|
| 1. 著者名 Arai Yuma, Urai Yoshiaki, Watanabe Tomoki, Higuchi Komei, Shimada Hiroshi, Mizugaki Yoshinao | 4. 巻 1054 |
| 2. 論文標題 A double-flux-quantum amplifier with a single flux-biasing line | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series | 6. 最初と最後の頁 012062-1~8 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/1054/1/012062 | 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 - |

| | |
|---|--------------------------|
| 1. 著者名 Mizugaki Yoshinao, Matsumoto Kazuhiko, Moriya Masataka, Shimada Hiroshi, Hirano-Iwata Ayumi, Hirose Fumihiko | 4. 巻 57 |
| 2. 論文標題 One-dimensional array of small tunnel junctions fabricated using 30-nm-diameter gold nanoparticles placed in a 140-nm-wide resist groove | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics | 6. 最初と最後の頁 098006-1~3 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/JJAP.57.098006 | 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 - |

| | |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名 MIZUGAKI Yoshinao, SHIMADA Hiroshi, HIRANO-IWATA Ayumi, HIROSE Fumihiko | 4. 巻 E101.C |
| 2. 論文標題 Numerical Simulation of Single-Electron Tunneling in Random Arrays of Small Tunnel Junctions Formed by Percolation of Conductive Nanoparticles | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 IEICE Transactions on Electronics | 6. 最初と最後の頁 836~839 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transele.E101.C.836 | 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 - |

| | |
|--|--------------------------|
| 1. 著者名 Moribayashi Makoto, Yagai Tomoki, Moriya Masataka, Shimada Hiroshi, Hirano-Iwata Ayumi, Hirose Fumihiko, Mizugaki Yoshinao | 4. 巻 2067 |
| 2. 論文標題 Single-electron charging effects observed in arrays of gold nanoparticles formed by dielectrophoresis between SAM-coated electrodes | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 AIP Conference Proceedings | 6. 最初と最後の頁 020019-1~8 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5089452 | 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 - |

| | |
|---|---------------------------|
| 1. 著者名 Y. Mizugaki, T. Watanabe, and H. Shimada | 4. 巻 27 |
| 2. 論文標題 Single-Flux-Quantum Bipolar Digital-to-Analog Converter Comprising Polarity-Switchable Double-Flux-Quantum Amplifier | 5. 発行年 2017年 |
| 3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity | 6. 最初と最後の頁 1400104-1-4 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TASC.2016.2625739 | 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 Huong Tran Thi Thu, Matsumoto Kazuhiko, Moriya Masataka, Shimada Hiroshi, Kimura Yasuo, Hirano-Iwata Ayumi, Mizugaki Yoshinao | 4. 巻 123 |
| 2. 論文標題 Gate-tuned negative differential resistance observed at room temperature in an array of gold nanoparticles | 5. 発行年 2017年 |
| 3. 雑誌名 Applied Physics A | 6. 最初と最後の頁 268-1-5 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00339-017-0891-8 | 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 該当する |

| | |
|--|--------------------------|
| 1. 著者名 Mizugaki Yoshinao, Urai Yoshiaki, Shimada Hiroshi | 4. 巻 871 |
| 2. 論文標題 Thermally-fluctuated single-flux-quantum pulse intervals reflected in input-output characteristics of a double-flux-quantum amplifier | 5. 発行年 2017年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series | 6. 最初と最後の頁 012066-1-6 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/871/1/012066 | 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 Huong Tran Thi Thu, Matsumoto Kazuhiko, Moriya Masataka, Shimada Hiroshi, Kimura Yasuo, Hirano-Iwata Ayumi, Mizugaki Yoshinao | 4. 巻 123 |
| 2. 論文標題 Fabrication of resistively-coupled single-electron device using an array of gold nanoparticles | 5. 発行年 2017年 |
| 3. 雑誌名 Applied Physics A | 6. 最初と最後の頁 557-1-7 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00339-017-1171-3 | 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 該当する |

〔学会発表〕 計49件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 19件)

| |
|--|
| 1. 発表者名 山崎洸生, 島田 宏, 水柿義直 |
| 2. 発表標題 トグル・ストレージ・ループを有する単一磁束量子NOTゲートのバイアスマージン改善と多入力否定論理ゲートへの拡張 |
| 3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 関根一真, 守屋雅隆, 島田 宏, 平野愛弓, 廣瀬文彦, 水柿義直 |
| 2. 発表標題 レジスト溝内に配置された金ナノ粒子ランダム配列における粒子間距離 |
| 3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 T. Yagai, M. Moribayashi, M. Moriya, H. Shimada, A. Hirano-Iwata, F. Hirose, and Y. Mizugaki |
| 2. 発表標題 Single-Electron Transistor Made of Arrays of Carbon-Coated Cobalt Nanoparticles Assembled by Dielectrophoresis |
| 3. 学会等名 32nd International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2019) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Y. Mizugaki, K. Higuchi, and H. Shimada |
| 2. 発表標題 Enhanced voltage swing of RSFQ output amplifiers equipped with double-stack SQUIDs |
| 3. 学会等名 32nd International Symposium on Superconductivity (ISS 2019) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 K. Yamazaki, H. Shimada, and Y. Mizugaki |
| 2. 発表標題 Design and Error-Rate Evaluation of RSFQ Logic Gates Comprising a Toggle Storage Loop |
| 3. 学会等名 32nd International Symposium on Superconductivity (ISS 2019) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 K. Yamazaki, H. Shimada, and Y. Mizugaki |
| 2. 発表標題 Design and operation of single-flux-quantum logic gates with a floating storage loop |
| 3. 学会等名 13th Superconducting SFQ VLSI Workshop (SSV 2020) & IEICE Technical Committee on Superconductive Electronics (SCE) (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Y. Somei, K. Yamazaki, H. Shimada, Y. Mizugaki |
| 2. 発表標題 Improved Maximum Output Voltage of Double-Flux-Quantum Amplifier Fabricated Using 10-kA/cm ² Nb integration process |
| 3. 学会等名 13th Superconducting SFQ VLSI Workshop (SSV 2020) & IEICE Technical Committee on Superconductive Electronics (SCE) (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 樋口孔明, 島田 宏, 水柿義直 |
| 2. 発表標題 二重SQUIDを採用したRSFQ分布型出力アンプの設計と動作実証 |
| 3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告(超伝導エレクトロニクス) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 谷貝知起, 森林誠, 守屋雅隆, 島田宏, 平野愛弓, 廣瀬文彦, 水柿義直 |
| 2. 発表標題 炭素被覆コバルトナノ粒子配列における単一電子帯電効果 |
| 3. 学会等名 第80回応用物理学会学術講演会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 山崎洸生, 島田宏, 水柿義直 |
| 2. 発表標題 回路面積を減じた単一磁束量子NOTゲートの設計及びエラーレートの評価 |
| 3. 学会等名 第80回応用物理学会学術講演会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 曾明裕太, 山崎洸生, 樋口孔明, 島田宏, 水柿義直 |
| 2. 発表標題 磁気結合入力を用いた並列入力型DFQ アンプ |
| 3. 学会等名 第80回応用物理学会学術講演会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 浦江哲也, 関根一真, 谷貝知起, 守屋雅隆, 島田 宏, 平野愛弓, 廣瀬文彦, 水柿義直 |
| 2. 発表標題 誘電泳動法で作製した2種類の粒径の金ナノ粒子列からなる単一電子素子 |
| 3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告(電子部品・材料研究会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 谷貝知起, 森林 誠, 守屋雅隆, 島田 宏, 平野愛弓, 廣瀬文彦, 水柿義直 |
| 2. 発表標題 外部磁場印加下での誘電泳動で作製した磁性ナノ粒子配列における単一電子帯電効果 |
| 3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 曾明裕太, 山崎洸生, 島田 宏, 水柿義直 |
| 2. 発表標題 10-kA/cm ² Nb集積プロセスを用いたDouble-Flux-Quantum Amplifierの再設計と動作検証 |
| 3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Y. Mizugaki, Y. Arai, T. Watanabe, H. Shimada, and M. Moriya |
| 2. 発表標題 1000-fold double-flux-quantum voltage multiplier employing directional propagation of flux quanta through asymmetrically-damped junction branches |
| 3. 学会等名 Applied Superconductivity Conference (ASC2018) (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1 . 発表者名 M. Moribayashi, T. Yagai, M. Moriya, H. Shimada, A. Hirano-Iwata, F. Hirose, and Y. Mizugaki |
| 2 . 発表標題 Single-electron charging effects observed in arrays of gold nanoparticles formed by dielectrophoresis between SAM-coated electrodes |
| 3 . 学会等名 The Irago Conference 2018 (Interdisciplinary Research And Global Outlook) (国際学会) |
| 4 . 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1 . 発表者名 T. Yagai, K. Matsumoto, M. Moriyabashi, M. Moriya, H. Shimada, A. Hirano-Iwata, F. Hirose, and Y. Mizugaki |
| 2 . 発表標題 Evaluation of Inter-Particle Distance of Gold Nanoparticles Dispersed on Silane-Treated Substrates for Fabrication of Dithiol-Connected Arrays |
| 3 . 学会等名 31st International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2018) (国際学会) |
| 4 . 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1 . 発表者名 K. Higuchi, H. Shimada, and Y. Mizugaki |
| 2 . 発表標題 Design and Operation of Distributed Double-SQUID Amplifier for RSFQ Circuits |
| 3 . 学会等名 31st International Symposium on Superconductivity (ISS 2018) (国際学会) |
| 4 . 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1 . 発表者名 Y. Somei, K. Yamazaki, K. Higuchi, H. Shimada, and Y. Mizugaki |
| 2 . 発表標題 Series-Connected Double-Flux-Quantum Amplifiers |
| 3 . 学会等名 12th Superconducting SFQ VLSI Workshop (SSV 2019) (国際学会) |
| 4 . 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 K. Yamazaki, K. Higuchi, H. Shimada, and Y. Mizugaki |
| 2. 発表標題 Design and Test of a CONNECT-Library-Compatible XNOR Cell Implemented with a Compact NOT Element |
| 3. 学会等名 12th Superconducting SFQ VLSI Workshop (SSV 2019) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 K. Higuchi, H. Shimada, and Y. Mizugaki |
| 2. 発表標題 Design and Operation of a Distributed Amplifier Comprising Double-SQUID Elements |
| 3. 学会等名 12th Superconducting SFQ VLSI Workshop (SSV 2019) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Y. Mizugaki, M. Moriya, H. Shimada, K. Matsumoto, M. Moribayashi, T. Yagai, A. Hirano-Iwata, and F. Hirose |
| 2. 発表標題 Single-electron devices fabricated using percolative connections of gold nanoparticles |
| 3. 学会等名 10th International Workshop on Nanostructures & Nanoelectronics (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 守屋雅隆, Tran Thi Thu Huong, 松本和彦, 森林 誠, 島田 宏, 木村康男, 平野愛弓, 水柿義直 |
| 2. 発表標題 金ナノ粒子ランダム配列において観測された単一電子トランジスタ的な特性 |
| 3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告 (電子デバイス) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|-------------------------------------|
| 1. 発表者名 樋口孔明, 島田 宏, 水柿義直 |
| 2. 発表標題 二重SQUID構造RSFQ分布型アンプの特性評価 |
| 3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 荒井祐真, 渡邊智希, 島田 宏, 水柿義直 |
| 2. 発表標題 非対称なダンピング係数によるSFQ伝搬方向制御を利用した1000倍DFQアンプの設計・試作・動作検証 |
| 3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 松本和彦, 守屋雅隆, 森林 誠, 谷貝知起, 島田 宏, 廣瀬文彦, 平野愛弓, 水柿義直 |
| 2. 発表標題 レジスト溝内での金ナノ粒子パーコレーション接続を利用した単一電子素子作製方法 |
| 3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 関根一真, 森林 誠, 守屋雅隆, 谷貝知起, 島田 宏, 平野愛弓, 廣瀬文彦, 水柿義直 |
| 2. 発表標題 粒径の異なる2種類の金ナノ粒子から成るランダム配列の電気的特性 |
| 3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告(電子部品・材料研究会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 森林誠, 谷貝知起, 守屋雅隆, 島田 宏, 平野愛弓, 廣瀬文彦, 水柿義直 |
| 2. 発表標題 単一電子素子応用を目指した誘電泳動による金ナノ粒子整列の統計調査 |
| 3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Y. Mizugaki, M. Takiguchi, N. Tamura, and H. Shimada |
| 2. 発表標題 Magnetoresistance of single-electron transistors comprising a superconducting island with ferromagnetic leads |
| 3. 学会等名 The 28th International Conference on Low Temperature Physics (LT28) (国際学会) |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 M. Moriya, M. Moribayashi, K. Matsumoto, H. T. T. Tran, H. Shimada, Y. Kimura, A. Hirano-Iwata, and Y. Mizugaki |
| 2. 発表標題 Dependence of Threshold Voltages on Temperature observed in an Array of Au Nanoparticles |
| 3. 学会等名 International Symposium on Novel Energy Nanomaterials, Catalysts and Surfaces for Future Earth (国際学会) |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 M. Moriya, M. Moribayashi, K. Matsumoto, H. T. T. Tran, H. Shimada, Y. Kimura, A. Hirano-Iwata, and Y. Mizugaki |
| 2. 発表標題 Dependence of threshold voltages on temperature observed in random arrays of Au nanoparticles |
| 3. 学会等名 International Symposium on Nanoscale Transport and Technology (ISNTT2017) (国際学会) |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Y. Arai, T. Watanabe, K. Higuchi, H. Shimada, and Y. Mizugaki |
| 2. 発表標題 ouble-Flux-Quantum Amplifier with a Single-Flux-Biasing Line |
| 3. 学会等名 30th International Symposium on Superconductivity (ISS 2017) (国際学会) |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Y. Mizugaki, Y. Arai, and T. Watanabe |
| 2. 発表標題 Double-Flux-Quantum Amplifier Designed with Adjusted Damping Parameters for Proper Propagation of SFQ Pulses |
| 3. 学会等名 The 11th Superconducting SFQ VLSI Workshop (SSV 2018) / 6th CRAVITY Symposium (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Y. Mizugaki, M. Moriya, H. Shimada, K. Matsumoto, M. Moribayashi, T. Yagai, Y. Kimura, A. Hirano-Iwata, and F. Hirose |
| 2. 発表標題 Numerical Simulation for Single-Electron Charging Effects in Random Arrays of Small Tunnel Junctions |
| 3. 学会等名 9th International Workshop on Nanostructures & Nanoelectronics (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 水柿義直, 滝口将志, 田村伸行, 島田 宏 |
| 2. 発表標題 強磁性体 - 超伝導体 - 強磁性体電極で構成される単一電子トランジスタのゲート電圧と外部磁場に対する応答 |
| 3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告 (電子デバイス) |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 森林誠, 松本和彦, Tran Thi Thu Huong, 守屋雅隆, 島田 宏, 木村康男, 平野愛弓, 水柿義直 |
| 2. 発表標題 3電極間に滴下法で作製した金ナノ粒子ランダム配列における単一電子帯電効果 |
| 3. 学会等名 第94回 低温工学・超電導学会研究発表会 |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|--------------------------------------|
| 1. 発表者名 樋口孔明, 荒井祐真, 水柿義直 |
| 2. 発表標題 DFQアンプの誤動作時における磁束量子ダイナミクス |
| 3. 学会等名 第94回 低温工学・超電導学会研究発表会 |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|-------------------------------------|
| 1. 発表者名 荒井祐真, 樋口孔明, 島田 宏, 水柿義直 |
| 2. 発表標題 シャント抵抗制御型DFQアンプの再設計と動作検証 |
| 3. 学会等名 第78回応用物理学会秋季学術講演会 |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 守屋雅隆, Tran Thi Thu Huong, 森林 誠, 松本和彦, 島田 宏, 木村康男, 平野愛弓, 水柿義直 |
| 2. 発表標題 金ナノ粒子ランダム配列において室温で観測された負性微分抵抗のゲート電圧変調 |
| 3. 学会等名 第78回応用物理学会秋季学術講演会 |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|---------------------------------------|
| 1. 発表者名 渡邊智希, 島田 宏, 水柿義直 |
| 2. 発表標題 SFQ/パルス周波数変調型D/A変換器の両極性出力化 |
| 3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会 |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 荒井祐真, 渡邊智希, 樋口孔明, 島田 宏, 水柿義直 |
| 2. 発表標題 磁束バイアス線を1本に減じたDFQアンプの設計と動作検証 |
| 3. 学会等名 電気学会研究会 金属・セラミックス/超電導機器合同研究会 |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 水柿義直, 守屋雅隆, 島田 宏, 松本和彦, 森林 誠, 谷貝知起, 木村康男, 平野愛弓, 廣瀬文彦 |
| 2. 発表標題 微小トンネル接合ランダム配列での単一電子帯電効果に関する数値シミュレーション |
| 3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告(電子デバイス) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 松本和彦, 森林 誠, 谷貝知起, 守屋雅隆, 島田 宏, 木村康男, 平野愛弓, 廣瀬文彦, 水柿義直 |
| 2. 発表標題 レジスト溝内に選択配置して作製した金ナノ粒子配列での単一電子帯電効果 |
| 3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告(電子デバイス) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 谷貝知起, 松本和彦, 森林 誠, 守屋雅隆, 島田 宏, 平野愛弓, 廣瀬文彦, 水柿義直 |
| 2. 発表標題 シラン化処理を施した基板上に作製した金ナノ粒子配列の単一電子素子への応用 |
| 3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告(電子部品・材料研究会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 守屋雅隆, Tran Thi Thu Huong, 松本和彦, 森林 誠, 島田 宏, 木村康男, 平野愛弓, 水柿義直 |
| 2. 発表標題 金ナノ粒子ランダムアレイの抵抗結合型単一電子トランジスタ的特性 |
| 3. 学会等名 第65回応用物理学会春季学術講演会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 森林誠, 松本和彦, 谷貝知起, 守屋雅隆, 島田 宏, 平野愛弓, 廣瀬文彦, 水柿義直 |
| 2. 発表標題 誘電泳動を用いて作製した金ナノ粒子配列における単一電子帯電効果 |
| 3. 学会等名 第65回応用物理学会春季学術講演会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 樋口孔明, 島田 宏, 水柿義直 |
| 2. 発表標題 RSFQ回路用分布型アンプのバイアス電流-出力電圧特性 |
| 3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会 |
| 4. 発表年 2018年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

電気通信大学 大学院情報理工学研究科 水柿研究室のホームページ
<http://www.mizugaki.es.uec.ac.jp/>

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 |
|-------|--|--|----|
| 連携研究者 | 島田 宏 (Shimada Hiroshi) (60216067) | 電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授 (12612) | |
| 連携研究者 | 守屋 雅隆 (Moriya Masataka) (80282911) | 電気通信大学・大学院情報理工学研究科・助教 (12612) | |

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 |
|---------|---------|
|---------|---------|