



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	ランダムに分布した金属ナノドットアレイにおける単電子伝導特性に関する研究 [論文内容及び審査の要旨]
Author(s)	瘧師, 貴幸
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第15540号
Issue Date	2023-03-23
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/89763
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Takayuki_Gyakushi_abstract.pdf, 論文内容の要旨



学位論文内容の要旨

博士の専攻分野の名称 博士（工学） 氏名 瘡師 貴幸

学位論文題名

ランダムに分布した金属ナノドットアレイにおける単電子伝導特性に関する研究
(Study on single-electron conduction properties in randomly distributed metal nanodot array)

従来の CMOS(Complementary Metal Oxide Semiconductor) トランジスタを用いたエレクトロニクスでは、いかにしてデバイスを微細化し、秩序的な構造を作製するかに重きが置かれてきた。しかし近年、トランジスタの高集積化に伴う消費電力の増大が深刻な問題となっている。また、素子のサイズが 10 nm 程度になると、サイズゆらぎに起因する特性ばらつきが無視できなくなる。そこで、デバイスの特性ばらつきを許容できる再構成可能コンピューティングやリザーバーコンピューティングといった新しい情報処理技術が注目されている。特に、CMOS とは異なる動作原理に基づくナノデバイスを用いることにより、これらの情報処理技術を低消費電力・高機能に実現することが期待できる。単電子デバイス (single-electron device: SED) は、電子がトンネル効果で輸送され、出力電流が入力ゲート電圧に対して振動する単電子特性を示すため、低消費電力・高機能を実現するナノデバイスの一つとして期待されている。

SED はソース・ドレイン・ゲートの電極を有しており、ソース・ドレイン電極間に単電子島と呼ばれるナノドットがトンネルバリアを介して存在する構造である。特に、1つのドットから構成される SED は単電子トランジスタ (single-electron transistor: SET) と呼ばれ、SET 同士を配線することで高機能な動作が期待できる。しかし、電子 1 個単位のトンネルを利用して動作するため、SET 間の配線の充電に時間がかかり、動作が遅くなる。さらに、ドットのサイズゆらぎによりデバイスの特性がばらつくという課題もある。SED の低い動作速度を補うためには、配線を用いることなく多数のドットを連結させ、1 個のデバイスに高い機能性を付与することが必要となる。これまでに、複数のドットから構成されたマルチドット SED が提案されており、複数の入出力端子を取り付けることで高機能な動作が可能であることが実証されている。

金属ドット系は、散布や薄膜蒸着により比較的容易に多数のドットを配置できるため、マルチドット SED の作製に有利である。しかし、この手法により形成されるナノドットアレイは、多数のドットがランダムに配置された複雑な系である。そのような複雑な系の場合、個々のドットの特性が平均化されるために、単電子特性の観測は困難であると考えられてきた。このため、複雑な系を用いた金属ナノドットアレイは可能性を秘めているものの、その単電子特性の評価・理解は進んでいない。

本研究では、複雑な系を用いた金属ナノドットアレイにおける単電子特性の特徴を明らかにすることで、デバイスの可能性を見極めることを目指した。Fe 薄膜の成長初期において形成される自己組織化ナノドットアレイを用いた SED を作製し、その電気特性を評価した。その結果、Fe 膜厚によりドットのサイズ・トンネル距離の条件を整えることで、数百個以上のドットが存在するにも関わらず 1 個のドットに由来する単電子特性が観測されることを明らかにした。そして、作製したデバイスの単電子特性を数日間にわたって評価し、比較的安定した動作特性が期待できることを示した。次に、複数のゲートを用いてナノドットアレイの単電子特性を制御できることを示した。この

結果は、複雑な系を用いたナノドットアレイデバイスの論理ゲート動作の可能性が期待できることを示唆する。最後に、Fe 膜厚や基板の状態によりドットの分散状況を変え、単電子特性とドットの分散状況の関係を調査した。その結果、複雑な系を用いたナノドットアレイにおける単電子特性は、特性に寄与するドットが直並列に何個存在し、各ドットがどの程度特性に寄与するかが重要であると示唆された。本研究により得られた知見は、金属ナノドットアレイをデバイスに利用する上での重要な基礎になるものと考えている。

以下に本論文における各章の概要を述べる。

第 1 章は序章であり、はじめに研究の背景について説明する。次に SET の動作原理と課題について説明し、その課題を解決し得る金属マルチドット SED の可能性について説明する。最後に、本研究の目的と構成について説明する。

第 2 章では、Fe ナノドットデバイスにおいて観測された単電子特性について述べる。作製したデバイスの電気特性を評価し、多数のドットがランダムに存在する系においても明瞭な単電子特性が得られることを明らかにした。さらに、Fe 膜厚を調整することにより、1 個のドットに由来する単電子特性が一定の頻度で観測されることも明らかにした。これらは、多ドット系においても個々のドットの単電子特性が抽出できることを示唆する重要な結果である。この成果は、次章以降に述べる研究に発展した。

第 3 章では、Fe ナノドットデバイスの動作安定性について述べる。作製したデバイスの単電子特性を繰り返し測定し、比較的安定した動作が期待できることを明らかにした。デバイスの安定した動作特性は、ドット周辺の可動電荷 (イオン等) の移動による影響が小さいことを示唆する。これは、材料系やデバイスの構造に起因するものと予想される。

第 4 章では、マルチゲートデバイスの作製と評価について述べる。まず、ナノドットアレイの上下に 2 つのゲートを取り付けたダブルゲートデバイスを作製し、その単電子特性を評価した。その結果、2 つのゲートを用いて単電子特性を制御できることを明らかにした。この結果から、Fe ナノドットデバイスの論理ゲート動作の可能性が期待できる。さらに、上下のゲートに対する応答が不均一であることを明らかにした。この現象は、ドットの上下非対称性および隣接ドットの立体的な効果により上下の電界分布が不均一化することに由来すると考えられ、電界シミュレーションを用いた確認も行った。ランダムに分布したドットに由来するバリエーションに富んだ出力は、デバイスの機能性を高めることにつながると期待される。本章では、3 つのゲートを取り付けたトリプルゲートデバイスにおける単電子特性についても評価を行った。その結果、各ゲートとドット間の容量が不均一であることを利用し、単電子特性にバリエーションを持たせることができる可能性が示唆された。

第 5 章では、単電子特性とドットの分散状況の関係について述べる。まず、デバイスのコンダクタンスを評価することで、アレイサイズを微細化しても抵抗体素子としての基本的な特徴は変わらないことを明らかにした。次に、Fe 膜厚と基板の状態によりドットの分散状況を変え、単電子特性を評価した。その結果、単電子特性の特徴は Fe 膜厚により系統的に変化することが分かった。さらに、単電子特性のドレイン電圧および温度依存性から、特性に寄与する実効的なドット数が Fe 膜厚により変化することが示唆された。

第 6 章では、総括について述べる。