

研究種目：基盤研究(B)  
 研究期間：2006～2008  
 課題番号：18360173  
 研究課題名（和文） 2次元配列バイオナノドットにおける不規則トンネル伝導と  
 確率共鳴素子への応用  
 研究課題名（英文） Random Tunneling Conduction in 2 Dimensional Bio-nano Dot Arrays  
 and Application to Stochastic Resonant Tunneling Devices  
 研究代表者  
 冬木 隆 (FUYUKI TAKASHI)  
 奈良先端科学技術大学院大学・物質創成科学研究科・教授  
 研究者番号：10165459

## 研究成果の概要：

本研究では、極薄トンネル酸化膜上に形成されたナノドットとSi基板間の量子トンネル伝導による不規則電子遷移(充・放電)を利用し、ゆらぎや擾乱の中で閾値を制御する「確率共鳴素子」の基本となる量子電子物性を発現させ、次世代素子の要素構造開発を目指した。具体的には、1] ナノドット配列群からの量子トンネル現象による確率的電荷充・放電の制御、2] 完全不規則電子応答現象の誘起、3] 不規則時間応答など確率論的に閾値が制御可能な新機能素子への応用、の3課題を遂行した。

確立した極薄トンネル酸化膜形成技術を活用し、厚さ 1nm 程度の高品質トンネル酸化膜を制御性良く作成できた。その上に、ナノドットアレイを埋め込んだ構造を作成し、その電子物性を評価した。ナノドットと基板間の電子の充・放電現象を走査型プローブトンネル顕微鏡や導電性プローブを用いた原子間力顕微鏡により詳細に解析し、ナノドットからの電荷の充・放電を初めて確認し、さらに、バンドエネルギーラインアップを特定した。

配列したナノドット群からの電荷充・放電現象が、マクロに現れる容量変化の過度特性を解析したところ、秒単位以上の長い時定数を持つ過度特性が観測された。単一ドットからの放出はトンネル現象であり、時空間では極短時間(ピコ秒程度)で確率的に放出される。マクロな集団としての放出過程との関連解明を進めている。トランジスタにこの極薄酸化膜構造を組み込むと、信号の立ち上がり時間に対応して閾値が制御できることを初めて実証した。今後、ニューラルネットワークの要素素子としての応用が期待される。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	6,500,000	1,950,000	8,450,000
2007年度	5,000,000	1,500,000	6,500,000
2008年度	2,500,000	750,000	3,250,000
年度			
年度			
総計	14,000,000	4,200,000	18,200,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気・電子工学 電子デバイス・電子機器

キーワード：電子デバイス・集積回路

### 1. 研究開始当初の背景

近年、シリコン(Si)集積回路の高速化・高密度化は要素デバイスサイズや消費熱量の点で限界が見えてきており、0、1の2値論理ではない、全く新しい原理に基づく情報論理素子の開発が望まれていた。

本研究では、極薄トンネル酸化膜上に形成されたナノドットと Si 基板間の量子トンネル伝導による不規則電子遷移(充・放電)を利用した。電極間のパーコレーションパスの形成を制御し、ゆらぎや擾乱の中で閾値を導き出す「確率共鳴素子」の基本となる、“random telegram signal (RTS)”を発生する素子などの確率的に動作する素子開発が急務の課題とした。

我々がリーディングプロジェクトにおいて展開した「バイオナノプロセス」は、電子を捕獲可能な金属や半導体のナノドットの位置や密度を人為的に制御できる“ボトムアップ”ナノテクノロジーの一つとして、注目を集めた。電子捕獲ドットの空間密度や配列を制御しパーコレーションパスの人為的構成が実現できれば、従来の MOSFET 素子の演算機能である0、1のスイッチ動作ではなく、全く異なった「確率的閾値信号出力」が可能となる。その機能は物性的にも非常に興味深いと同時に、従来のノイマン型論理演算ではない“確率共鳴”を基盤とした論理演算と新機能素子への応用に直結し、デバイス工学的な展開は拡いと期待された。

### 2. 研究の目的

本研究では、極薄トンネル酸化膜上に形成されたナノドットと Si 基板間の量子トンネル伝導による不規則電子遷移(充・放電)を利用し、ゆらぎや擾乱の中で閾値を制御する「確率共鳴素子」の基本となる量子電子物性を発現させ、次世代素子の要素構造開発を目指した。具体的

には、1] ナノドット配列群からの量子トンネル現象による確率的電荷充・放電の制御、2] 完全不規則電子応答現象の誘起、3] 不規則時間応答など確率的に閾値が制御可能な新機能素子への応用、の3課題を遂行した。

### 3. 研究の方法

我々は、文部科学省 科学技術振興費「ナノテクノロジーを活用した新しい原理のデバイス開発 - タンパク質コアを利用したメモリーデバイス開発 -」のプロジェクトのもとで「バイオナノプロセス」の研究開発を行った。配列した超分子をナノドット構造作製に活用し、新規電子デバイスを実現しようとするものであり、比較的厚い酸化膜中に埋め込まれたドット配列において安定した充電状態を保持するメモリー効果を目指した研究で成果をあげた(図1参照)。

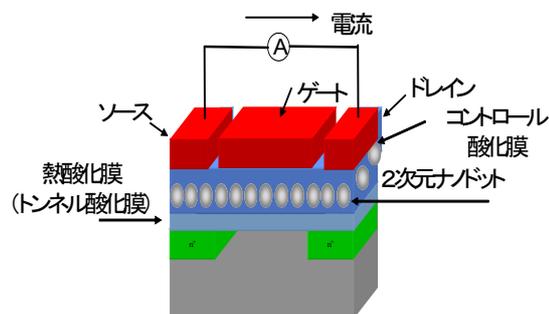


図1 ボトムアップ構造ナノメモリー素子

しかし、その実験結果の解析中に、極薄トンネル酸化膜を用いた場合にのみ、ドットからの不規則充・放電現象が発生することを実験的に確認した。この現象はメモリー応用としては不都合であり、その低減につとめる技術開発を行っているが、逆に、この現象を人為的な確率的昨

日の発生方法として活用可能であることに気づき、能動的デバイス開発まで含めた本研究を推進した。

図2に新機能デバイスの概念図を示す。動作原理は、2次元配列されたドット群の充・放電が不規則に発生し、ゲート電極に電圧を印加した場合、ソースとドレインの電極間のチャンネルがランダムに導通と断絶を繰り返す、いわゆる“パーコレーション”現象が発生し、電極間に信号が誘起される。ここで、鍵となるのはドットへの充・放電の確率論的電子伝導である

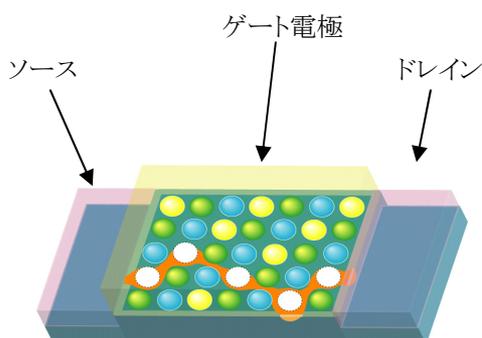


図2 パーコレーションパスの模式図

基本的にはシリコン MOS 電界効果型トランジスタのゲート酸化膜中にナノドット2次元アレイを埋め込んだ構造となっている。ゲートのバイアスを正の閾値付近に設定する。電子が充電されていないドットの直下には反転層(電子の溜まり)が形成される(充電されたドットの直下ではゲートからの電気力線がドット中の電子で終端されるため反転層は形成されない)。複数のドットの直下の反転層が連続的に繋がってソース・ドレイン間が全体でつながると電流が流れる(この反転層部の連繋をパーコレーションパスと呼ぶ。電流がソースから、いくつかの反転層部を順番に伝播して(水が濾過されるように)流れるのでパーコレーションパスと呼ばれる。)。閾値近傍では充電されたドットからの電子放出が確率論的に発生する。そのため、繋がっているチャンネルの断絶が確率的に発生し、いわゆる RTS(random telegram signal)がソース・ドレイン間に発生することになる。従来は、Si/酸化膜の界面準位がこ

のナノドットの役割を果たしていた。しかし、それはあくまでも自然発生的な物理現象で、その密度や配列は制御されていなかった。本プロジェクトでは図に示すように人為的に制御して配置したナノドットからの充放電を活用し、反転層部(電子の溜まり)の連繋を形成させることに獨創性がある。

一箇所でも反転層が途切れるとパスが断絶する。反転層の形成はドットからの自励充・放電で規定されるので、結局、パス形成は確率論的に発生し、RTS 信号が発生するのである。閾値近傍でゲート電圧を微小に制御して半導体の表面電位を変調することで、擾乱より小さい信号でもある程度の処理時間を見込めば、確率的自励充・放電が制御でき、RTSのLOWとHIGHの頻度が制御できる。これを利用すれば確率共鳴素子(信号出力(例えばLOWかHIGHか)の発生確率を制御して論理素子とする)への適用が可能となる。

#### 4. 研究成果

平成18、19年度は、確立した極薄トンネル酸化膜形成技術を活用し、厚さ1nm程度の高品質トンネル酸化膜を制御性良く作成できた。その上に、ナノドットアレイを埋め込んだ構造を作成し、その電子物性を評価した。ドット内包材料として、Fe(鉄)ならびにCo(コバルト)を内包したバイオ超分子を Si 基板上へ高密度に2次元配列した。ナノドットと基板間の電子の充・放電現象を現有の走査型プローブトンネル顕微鏡や導電性プローブを用いた原子間力顕微鏡により詳細に解析し、ナノドットからの電荷の充・放電を初めて確認し、さらに、バンドエネルギーラインアップを特定した。

平成20年度は、配列したナノドット群からの電荷充・放電現象が、マクロに現れる容量変化の過度特性を解析したところ、秒単位以上の長い時定数を持つ過度特性が観測された。

単一ドットからの放出はトンネル現象であり、時空間では極短時間(ピコ秒程度)で確率的に放出される。マクロな集団としての放出過程の場合に秒単位になる物理の解明を進めている。

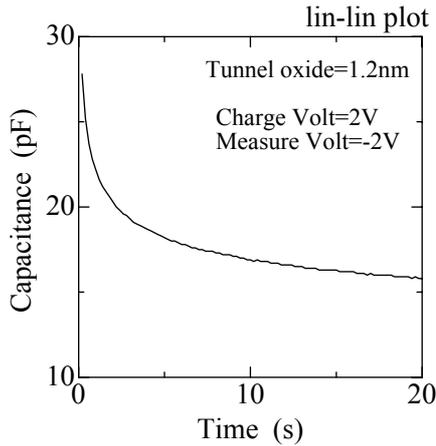


図3 マクロな長い時定数の観測結果

トランジスタにこの極薄酸化膜構造を組み込むと、信号の立ち上がり時間に対応して閾値が制御できることを初めて実証した(図4参照)。今後、ニューラルネットワークの要素素子としての応用が期待される。

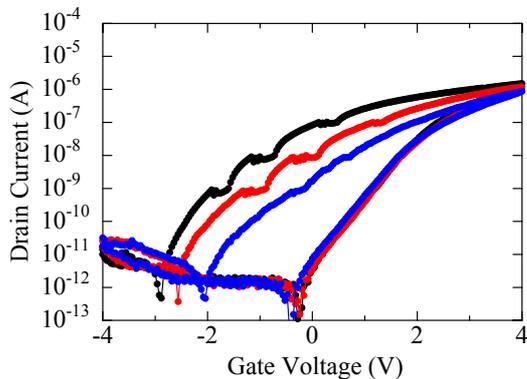


図4 閾値変動デバイス電流・電圧特性

## 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3件)

(1) A. Miura, Y. Uraoka, T. Fuyuki and I. Yamashita, Non-volatile flash memory with discrete bionanodot floating gate assembled by protein template, Nanotechnology, Vol.19, 255201 pp.1-6,

(2008) (査読有り).

(2) A. Miura, Y. Uraoka, T. Fuyuki, and I. Yamashita, Bionanodot monolayer array fabrication for nonvolatile memory application, Surface Science Letters, Vol.601, pp.L81-L85 (2007) (査読有り).

(3) 田中亮大 三浦篤志 浦岡行治 冬木隆, 走査型プローブ顕微鏡を用いた単一バイオナノドットの電気特性解析電子情報通信学会技術研究報告, SDM2006-213, pp.65-69, (2006) (査読無し)

[学会発表] (計2件)

(1) 浦岡行治, 冬木隆, バイオ系ナノ材料を用いた新規半導体デバイス, 第69回応用物理学会学術講演会, 2008年9月3日, 中部大学

(2) 河北あゆみ, 矢野裕司, 浦岡行治, 冬木隆, 極薄トンネル酸化膜上バイオナノドットからの電子放出の過渡解析, 第68回応用物理学会学術講演会, 2007年9月5日, 北海道工業大学

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

冬木 隆 (FUYUKI TAKASHI)

奈良先端科学技術大学院大学・物質創成科学研究科・教授

研究者番号: 10165459

### (2) 連携研究者

畑山 智亮 (HATAYAMA TOMOAKI)

奈良先端科学技術大学院大学・物質創成科学研究科・助教

研究者番号: 90304162

矢野 裕司 (YANO HIROSHI)

奈良先端科学技術大学院大学・物質創成科学研究科・助教

研究者番号: 40335485