

単電子デバイスの高周波特性に関する研究

[1] 組織

代表者：高橋 庸夫
(北海道大学大学院情報科学研究科)
対応者：猪川 洋
(静岡大学電子工学研究所)
分担者：
有田 正志
(北海道大学大学院情報科学研究科)
内田 貴史
(北海道大学大学院情報科学研究科)
佐藤 弘明
(静岡大学電子工学研究所)
山崎 大樹
(静岡大学工学部)

[2] 研究経過

エレクトロニクスの持続的な発展のために、より高速で低消費電力なデバイスが求められている。単電子デバイスは、電子がトンネリングで輸送され、しかも内部の静電容量を極めて小さくすることが可能なため、高速・低消費電力を実現する有力な候補と考えられる。しかし一方で、単電子デバイス中のトンネル接合の抵抗値は抵抗量子 ($R_q = e^2/h \sim 25.8 \text{ k}\Omega$) より大きい必要があるため、多くの研究者は単電子デバイスは低速であると考えてきた。加えて、従来の動作速度に関する議論は、抵抗と静電容量で決まる時定数にもとづく単純なものがほとんどで、単電子デバイスの動作原理を適切に考慮したものはなかった。また、従来の単電子デバイスはクーロンブロッケード状態を維持するために、低温・低電圧で動作させる必要があり、高周波動作に対する測定の高難易度が高く十分な検討が行われて来なかった。このような現状をふまえ、本研究では単電子デバイスの高周波特性について、理論および実験の両面から詳細な検討を加え、デバイス本来のポテンシャルを明確化することを目的として研究を行った。

本プロジェクトは、本年度が初年度であった。これまで、パタン依存酸化法 (PADOX 法) を中心としたシリコン単電子デバイスの研究を行い、安定で再現性が良く高温で動作する単電子デバイスが得

られることなどを示してきた。また、本デバイスを用いて高度な機能性を有するメモリや論理回路、単電子転送デバイスなどを構成できることも明らかにしてきた。他方、宙に浮いたマスクを介した斜め2方向からの蒸着を用いた金属の単電子デバイスについても作製技術を蓄積し、分子デバイスやその他のナノデバイスの研究に適用してきた。そこで、本プロジェクトでは、これまでの研究経過を背景にして、多様な研究者の研究ポテンシャルを融合して、共同で単電子デバイスの高周波特性に関する研究を展開した。

今年度は、それぞれに研究機関においてシリコン単電子デバイスあるいは金属単電子デバイスを用いて高周波特性の実験的な評価と、理論的な検討を行った。これらの評価や検討を踏まえて、2014年1月17日に静岡大学電子工学研究所にて共同研究プロジェクト講演会を開催し、研究結果に対する討論を行うと共に今後の研究の進め方について議論した。

[3] 成果

(3-1) 研究成果

シリコン単電子デバイスに関しては、パタン依存酸化法 (PADOX 法) によって作製したトランジスタの高周波特性を評価した。本デバイスはゲート電圧を調整することによりトンネル接合の抵抗を T (テラ) Ω 台の極めて高い値から、動作限界の抵抗量子に近い低い値まで自由に換えられる特徴がある。トンネル接合の抵抗が高い状態では、デバイス内の MOSFET による直列寄生抵抗の影響を受けずにデバイス本体の高周波特性を評価できる。ドレインに交流信号を与えた際にクーロンダイヤモンドの非対称性によって生じる整流作用の周波数依存性をトンネル接合の抵抗が高い状態で調べたところ、この抵抗と内部の静電容量で決まるカットオフ周波数 ($\sim 1 \text{ MHz}$) より1桁以上高い周波数 (50 MHz) でも整流作用が維持されるという極めて興味深い結果を得た。トンネル接合の抵抗を抵抗量子に近い値まで下げれば、THz 領域を越える周波数でも動作する可能性がある。

金属単電子デバイスにおいては、直列寄生抵抗を小さくすることが容易なため、トンネル接合の抵抗が低いデバイスでも本来の高周波特性を損なうこと

なく動作させる事ができる。今回は、宙に浮いたマスクを介して斜め2方向からの金を蒸着をすることによってナノメートルサイズのギャップを形成し、アミノチオール自己組織化単分子膜を介して単電子島となる金微粒子を付着させることにより単電子トランジスタを作製した。多重連結島が生じて理想的な単電子トランジスタ特性が得られない、測定系のインピーダンス整合が不十分で正確な高周波電圧が供給できていない可能性がある等の課題はあるものの、一部のデバイスは測定装置の上限である 3 GHz でも整流作用を示すことが確認できた。

理論的な検討としては、時間に依存したマスター方程式を解くことにより、単電子トランジスタの高周波動作を解析した。例えば、ソース接地増幅器のカットオフ周波数が 74 MHz のトランジスタでも、整流器としては3桁高い周波数で動作することが示され、実験で得られた興味深い結果を再確認することができた。モンテカルロ法による解析によれば、単電子トランジスタのドレインに正弦波の交流電圧を加えた場合、1周期におけるトンネル事象の数が数回となるほどの高い周波数でも、長時間観測すると平均的なトンネル頻度はクーロンダイヤモンドの非対称性を反映して電圧極性の正負に対して非対称になる（整流性を示す）ことが分った。

(3-2) 波及効果と発展性など

高周波領域における単電子デバイスの特性が解明され、例えば整流作用が従来のデバイスの限界を超える高周波 (>THz) でも利用できるようになると、新しい高感度な電磁波（光）検出器やイメージング

デバイスが得られる可能性が出てくる。

この様な可能性を検証するためには、より高い周波数で動作を実証したり、従来のマスター方程式法やモンテカルロ法で考慮されていない物理現象（例えばトンネル時間の有限性など）を取り入れた理論的解析を行ったりする必要がある。

このために、次年度はミリ波から THz 波における回路設計や測定技術に詳しい研究者や、単電子デバイスの物理に詳しい研究者に参画を求める予定である。また、単電子トランジスタ以外のデバイス、例えば単電子転送デバイスなどの高周波動作などについても研究対象を広げて行くことを考えている。

[4] 成果資料

(1) Yasuo Takahashi, Hiroto Takenaka, Takafumi Uchida, Masashi Arita, Akira Fujiwara, and Hiroshi Inokawa, "High-speed operation of Si single-electron transistor," ECS Trans., Vol. 58, No. 9, pp. 73-80, Oct., 2013.

(2) Hiroshi Inokawa, "High-Frequency Performance of Single-Electron Transistors," Monday Morning Forum (Shizuoka Univ., June 24, 2013).

(3) 山崎 大樹、「単電子デバイスの高周波応用に関する研究」静岡大学 工学部 卒業論文 (2014年3月).

出張報告（特別教育研究経費を使用した場合）

氏名：高橋 庸夫

所属：北海道大学大学院 情報科学研究科

期間：平成26年1月16日～1月18日

用務先：静岡大学 電子工学研究所

用務内容：共同研究プロジェクト講演会に参加し"Recent Progress of Single-Electronics and Resistance Random Access Memory"の題目で講演を行うとともに、「単電子デバイスの高周波特性に関する研究」に関する打合わせを行った。

主たる対応者：猪川 洋