

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)
藤原 聡
(NTT 物性科学基礎研究所)
豊田 一彦
(佐賀大学大学院 工学系研究科)
廣本 宣久
(静岡大学 創造科学技術大学院)
佐藤 弘明
(静岡大学 電子工学研究所)

[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 ($R_q = e^2/h \approx 25.8 \text{ k}\Omega$) 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高速動作には適さないと考えてきた。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ではなかった。また、新しい電子デバイスが切望されているGHzからTHzの高周波領域では測定の難易度が高く、従来の単電子デバイス研究では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、本研究では学際的な協力のもと、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3年目である。昨年度に引き続き、単電子デバイスの研究者に加えてマイクロ波から THz にわたる周波数のアンテナ、回路、計測の専門家や微細構造作製・観察に関わる透

過電子顕微鏡技術の専門家にも参画を願い、対象とするデバイスも金属やシリコン(Si)の単電子トランジスタ(SET)のみならず、可変バリアやトラップ準位を利用した単電子転送デバイスも含めた。また、比較対象の整流デバイスとしてショットキーダイオードなども加えた。このようにして、幅広い知見を融合する形で単電子デバイスの高周波特性に関する共同研究を展開した。

今年度は、それぞれに研究機関において上記のデバイス、回路、アンテナ、計測技術、細構造作製・観察などに関わる実験的な評価と、理論的な検討を行った。これらの評価や検討を踏まえて、2016年2月22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研究会を開催し、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

- ・絶縁膜上のSi (SOI: silicon on insulator)にパタン依存酸化法を適用して3重ドットの単電子トランジスタを作製した。酸化前のSi層をナノワイヤの根元部分でくびれた特殊な構造とすることで3重ドットを実現した。SETを覆う単一のゲートに交流信号を加えると作製したSETは単電子転送を行うターンスタイルとして動作した。モンテカルロ法によるシミュレーションより、トンネル接合やゲートの容量の不均一性がターンスタイル動作に重要な役割を果たしていることが示唆された。
- ・高速で動作する単電子ポンプは、素電荷と周波数にもとづいて電流単位(アンペア)を再定義する量子電流標準への応用の観点で、近年注目を集めている。Siナノワイヤー-MOSFETは、可変バリア型単一電子(ホール)転送デバイス、もしくは局在準位への電荷捕獲・放出を利用する転送デバイスとしてGHzオーダーの周波数で動作する。最近NTTは英国立物理研究所(NPL)と協力して転送精度の評価を行い、2GHzの動作周波数でppmレベルの精度が得られる事を測定により確認した。
- ・同相・逆相給電マイクロストリップアレーアンテナに無給電素子を装荷することによる高利得化について検討した。無給電素子を半波長の位置に装荷することにより、約2dBの利得向上ができ、無給電素

子の間隔は給電素子の間隔と同じ $0.8\lambda_0$ が最も利得が高くなることがわかった。この結果はSETなどの整流素子を含むレクテナの広角化のために有用である。

•基板の無い自立した SiN 薄膜上に Au 細線を形成し、透過電子顕微鏡(TEM)で観察することにより、エレクトロマイグレーション(EM)による破断過程をその場観察することに成功した。通電の初期段階においては細線内にランダムにボイドが発生するが、時間経過に伴い、電子流上流側(負極側)のボイドのみが大きく成長する事を確認した。継続的なEMによる細線窄化により細線を構成する結晶粒径と細線幅が近づくと、狭窄部はバンブー構造となって狭窄速度が大きく低下すると共に、バンブー構造が伸長する現象が見られた。これらの知見は、金属SETを作製する際のナノギャップ形成に有用と考えられる。

•フレネル反射・透過を含めた光線追尾解析手法を開発し、直線偏光のTHz波によって照射されたSiレンズのパワー流密度の分布を評価した。本手法は簡便で計算量が少なく、電磁波としての干渉や回折の効果を考慮していないにも関わらず、電磁界シミュレーションに基づく精密な計算結果と良い一致を示した。

•SET整流作用の周波数特性を評価するために、時間依存のマスター方程式法によるシミュレーションを時間ステップの設定などの観点で慎重に行った。整流出力は途中の周波数で減少するものの、さらに高い周波数では一定の値を保ち、動作周波数の限界は認められなかった。

高周波特性を実測するために、空中に浮いたマスクを介した2方向からの斜め蒸着と金微粒子の付着を利用して、直列寄生抵抗の小さな金属SETの作製を試みているが、ソース・ドレイン間ギャップの寸法設定の問題で歩留まりが低くシミュレーションの検証には至らなかった。

(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。

また、単電子転送デバイスがより高い周波数で高精度に動作すると新SI単位系を実現する新しい電流標準が得られる。

レクテナやボロメータなどのアンテナ、回路、計測技術は上記の高周波応用を高度化する基礎としての寄与や、研究分野の融合による新しい展開が期待

される。

[4] 成果資料

- (1) M. Jo, T. Uchida, A. Tsurumaki-Fukuchi, M. Arita, A. Fujiwara, Y. Ono, K. Nishiguchi, H. Inokawa and Y. Takahashi, "Fabrication and single-electron-transfer operation of a triple-dot single-electron transistor," J. Appl. Phys., Vol. 118, No. 21, pp. 214305_1-6, Dec. 7, 2015.
- (2) G. Yamahata, K. Nishiguchi, S. P. Giblin, M. Kataoka and A. Fujiwara, "Ultrafast single-charge transfer in silicon up to 8 GHz," Silicon Quantum Electronics Workshop, VII-2, p. 42 (Takamatsu, Japan, Aug. 3-4, 2015)
- (3) A. Fujiwara, G. Yamahata and K. Nishiguchi (Invited), "Gigahertz Single-Electron Pump Towards a Representation of the New Ampere," 2015 Int. Conf. Solid State Devices and Materials (SSDM) H-3-1 pp. 918-919 (Sapporo,, 2015.9.27-30)
- (4) H. Satow, E. Nishiyama and I. Toyoda, "Gain Enhancement of a Dual Feed Microstrip Array Antenna Using Parasitic Elements," Int. Symp. on Antennas and Propagation (ISAP2015) pp. 761-764 (Tasmania, Australia, Nov. 9-12, 2015)
- (5) 佐藤 博, 西山 英輔, 豊田 一彦, 「同相・逆相給電マイクロストリップアレーアンテナの無給電素子を用いた高利得化」2015年電子情報通信学会通信ソサイエティ大会、B-1-39, 通信講演論文集1, p. 39 (仙台市、2015.9.8-11)
- (6) E. Bründermann, A.-S. Müller, N. Hiromoto, and H. Inokawa, "Terahertz diagnostics of ultra-short pulses at high repetition rates from relativistic electron sources," 2nd Int. Symp. on Frontiers in THz Technology (FTT 2015) TuA1.4 (Hamamatsu, Japan, Aug. 30-Sep. 2, 2015)
- (7) Catur A. S., Eko T. R. and N. Hiromoto, "Ray tracing method with Fresnel's transmission for a Silicon lens antenna irradiated with linearly polarized THz wave," *ibid.*, TuA1.4.
- (8) T. Ueta, Y. Suzuki, H. Satoh, A. Tiwari, N. Hiromoto, E. Bründermann, and H. Inokawa, "Study on THz Antenna-Coupled Bolometer utilizing SOI MOSFET," *ibid.*, Pos1.33st.
- (9) H. Inokawa and Y. Takahashi, "Identification of Double Quantum Dots in Nanowire Devices by Single-Gate Sweeps," JJAP Conf. Proc. Vol. 4, pp. 011201_1-5, 2016

出張報告

氏名：有田 正志、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28年2月22日～2月23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研究会に参加し「エレクトロマイグレーションを用いたナノギャップ形成の試み」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」に関わる打合わせを行った。

主たる対応者：猪川 洋

氏名：豊田 一彦

所属：佐賀大学大学院 工学系研究科

期間：平成28年2月22日～2月23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研究会に参加し「ディファレンシャルレクテナー高周波ダイオードのマイクロ波電力伝送への応用」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」に関わる打合わせを行った。

主たる対応者：猪川 洋