

## 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  
(静岡大学大学院 工学研究科)  
佐藤 弘明  
(静岡大学 電子工学研究所)

### [2] 研究経過

エレクトロニクスを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、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高周波特性の難易度が高く、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2年目である。これまで、単電子デバイスの研究者のみの参画であったが、今年度からはマイクロ波からTHzにわたる周波数のアンテナ、回路、計測の専門家にも参画を

願い、対象とするデバイスの範囲もパタン依存酸化法 (PADOX 法) シリコン単電子トランジスタ (SET) や斜め蒸着を利用した金属 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や強磁性体 SET に広げた。また、比較対象のデバイスとしてショットキーダイオードやボロメータなども加えた。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、2015年2月18日に静岡大学電子工学研究所にて以下に列挙する発表内容で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。

- Fe グラニューラー薄膜を用いた強磁性 SET の作製と評価
- 高速単電子転送デバイス ～量子計測三角形の実現に向けて～
- テラヘルツアンテナ結合マイクロボロメータの研究動向
- 金属 SET の作製と高周波特性評価

### [3] 成果

#### (3-1) 研究成果

- $\text{MgF}_2$  下地上に nm オーダーの島状の (グラニューラー) Fe 薄膜を蒸着し、さらに  $\text{MgF}_2$  薄膜で覆って横型の強磁性 SET を作製した。磁気抵抗評価を行ったところ、Fe 薄膜の厚さや構造に依存して 10% 弱の磁気抵抗比を得ることができた。この結果は、SET 特性が磁場で変調できることを示すのみならず、SET の新しい作製法も提示しており、高周波応用につながる可能性がある。
- pチャネル Si MOSFET を利用した可変バリア型単一ホール転送デバイスでは 1 GHz 動作を実証し、17K における最小の転送エラー率は  $10^3$  であった。エラー率の温度依存性から、転送確率は非平衡状態における電荷島からソースへの熱ホッピングに支配されていることが分った。
- MOSFET のゲート電圧制御による局在したトラ

ップ準位への電子の捕獲と同準位からの電子の放出を利用した単電子転送デバイスでは、17Kにおいて3.5GHzの動作周波数で $10^{-3}$ より高い精度で電子転送できることが示された。捕獲された電子の活性化エネルギーは大きく、電界の印加により放出・捕獲時間も25ps以下にできるため、正確で高速な単一電子操作にトラップ準位は有用であることが分った。

•1THz用アンテナ結合ポロメータを想定し、Si基板上に幅と長さの比率1:10の半波長ダイポールアンテナを形成したとするとアンテナの共鳴長と共鳴抵抗はそれぞれ $52\mu\text{m}$ と $38\Omega$ となる。この場合、Si表面の実効波長を辺の長さとする正方形領域に入射する電力の約20%が負荷抵抗に吸収されることから、ダイポールアンテナの効率は決して低くはないと考えられる。実際、Tiを負荷抵抗とサーミスターに使ったポロメータでは、電気感度と光学感度の関係を矛盾無く説明できた。

•SETの高周波特性を測るために、直列寄生抵抗の小さな金属SETを、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により作製を試みている。本年度は高周波用GSGプローブに適したパッド配置とし、良品SETの収量を上げるために寸法パラメータを限定して作製したが、金微粒子の凝集により良品が得られなかった。多重連結島を形成され難くするために、金微粒子を固定するチオール分子を短くした点に再検討の余地がある。

•2つの偏波方向に対応したアンテナを4つ配置し、ダイオードの接続方法に改良を加えることにより円偏波を含む任意方向の偏波に対応するレクテナを作製した。5.8GHzにおいて偏波角に関わらず40%以上のRF-DC変換効率が得られる事を実証した。

### (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。

レクテナやポ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。

このために、次年度は相互の協力関係をさらに深

めて行く予定である。

### [4] 成果資料

- (1) Masaki Kudo, Masashi Arita, Yuuki Ohno, and Yasuo Takahashi "Filament formation and erasure in molybdenum oxide during resistive switching cycles," Appl. Phys. Lett., **105**, 173504 (2014).
- (2) Takafumi Uchida, Masashi Arita, Akira Fujiwara, and Yasuo Takahashi "Coupling capacitance between double quantum dots tunable by number of electrons in Si quantum dots," J. Appl. Phys., **117**, 084316 (2015).
- (3) Toshihiro Yokono, Eita Sato, Yosuke Murakami, Masashi Arita, and Yasuo Takahashi: Magnetoresistance and microstructure of Fe-MgF<sub>2</sub> single layer granular films, The 6th IEEE International Nanoelectronics Conference, (INEC 2014), (2014.7.28-31, Hokkaido Univ., Japan).
- (4) Gento Yamahata, Takeshi Karasawa, and Akira Fujiwara "Gigahertz single-hole transfer in Si tunable-barrier pumps" Appl. Phys. Lett. **106**, 023112 (2015).
- (5) Gento Yamahata, Katsuhiko Nishiguchi and Akira Fujiwara "Gigahertz single-trap electron pumps in silicon" Nat. Commun. **5**:5038 doi: 10.1038/ncomms6038 (2014).
- (6) N. Hiromoto, A. Tiwari, M. Aoki, H. Satoh, M. Takeda, and H. Inokawa, "Room-Temperature THz Antenna-Coupled Microbolometer with A Joule-Heating Resistor at the Center of A Half-Wave Antenna," 39th Int. Conf. on Infrared, Millimeter, and THz Waves (IRMMW-THz 2014), (Univ. Arizona, Tucson, AZ, USA), R3A-27.6 (18 Sep. 2014).
- (7) R. Nakashima, E. Nishiyama, and I. Toyoda, "Performance of 5.8-GHz Multi-Polarization Rectenna for Linearly/Circularly Polarized Wave Reception," IEEE Wireless Power Transfer Conf. (WPTC2014), P-Th-18, pp. 208-211, May 2014.
- (8) R. Nakashima, E. Nishiyama, and I. Toyoda, "Performance Evaluation of a 5.8-GHz Current Aggregation Type Multi-Polarization Rectenna," 2014 Int'l Symp. on Antennas and Propag. (ISAP2014), FR4D-03, Kaohsiung, Dec. 2014.

## 出張報告

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27年2月18日～2月19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「Fe グラニューラー薄膜を用いた強磁性 SET の作製と評価」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