

2012

生体物質の分光評価を目指した 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)

福地 厚

(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

電磁波(光)に対する分光特性(吸収係数、屈折率等の波長依存性)評価は、各種の材料の同定や定量に広く用いられている。特にタンパク質などの複雑な高分子を含む生体物質に関しては、分子間相互作用にもとづいて特徴的な分光特性が遠赤外からミリ波にわたる波長領域に現れることが知られているが、この領域の電磁波は電気信号として扱うには周波数が高く、フォトンとしてはエネルギーが低いため、高感度な検出は困難であった。

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、高周波動作の可能性は有している。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を実際に高周波で動作させるのは困難と考えてきた。加えて、従来の動作周波数に関する議論は、抵抗と静電容量で決まる時定数にもとづく単純なものかほとんどで、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高周波特性が難しく、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、本プロジェクトでは学際的な共同研究により、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。

具体的な協力関係として、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や磁性体の島を持つSETも含めて広範な可能性を探った。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、2017年3月3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

- Au ナノギャップ中にFe-フッ化物絶縁体グラニューラ膜を形成し、基板をゲートとすることにより単電子トランジスタを作製し、磁気抵抗効果の観測に成功した。
- シリコン細線をパターン依存酸化することで単一量子ドットを形成し、3本の微細ゲート電極を細線上に取付け、再度酸化することで三重量子ドットを作製できることを明らかにした。
- テラヘルツ波を利用したイメージングにおいて、パッシブ方式とアクティブ方式を比較したところ、パッシブ方式では放射率の違いにもとづくコントラ

ストが生じ物質識別が容易である利点が見出された。

・英国物理学研究所(NPL)と共同で、Si 単電子転送デバイスを 1 GHz の高周波で動作させた際の転送精度の評価を行い、 9.2×10^{-7} 以下のエラー率であることを実証した。

・2種類の平面型マジック T を用いた同相・逆相 3 給電アンテナを提案した。本アンテナは、受信波到来方向の検出、送信ビーム操作、広い方角から受信可能なレクテナなどに有用である。加えて、同相・逆相 2 給電アンテナを利用した広角レクテナを考案し、動作を実験により確認した。

・Si 単電子トランジスタの整流作用の周波数依存性を評価し、1 GHz の高周波でも整流作用が持続する事を見出した。しかし、この周波数は寄生 MOSFET に制限された値であり、単電子トランジスタ本来の性能を表すものではなかった。高周波測定に対応したパッドをもつ Si 細線 SET を試作し、室温付近での動作を確認した。

(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、生体物質の分光評価のみならず、高感度な電磁波(光)検出やイメージングが可能となる。

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。

[4] 成果資料

- (1) T. Uchida, M. Jo, A. Tsurumaki-Fukuchi, M. Arita, A. Fujiwara, Y. Takahashi, "Capacitance evaluation of compact silicon triple quantum dots by simultaneous gate voltage sweeping," *J. Appl. Phys.*, 120, 234502 (2016).
- (2) T. Uchida, M. Jo, H. Satoh, A. Tsurumaki-Fukuchi, M. Arita, A. Fujiwara, Y. Takahashi, "Evaluation of the origin of excited states appeared in small Si single-electron transistors," *Proc. 2016 Silicon Nanoelectronics Workshop (SNW 2016)*, IEEE, Picatway, NJ, USA (2016), pp. 178-179.
- (3) S. Honjo, T. Uchida, A. Tsurumaki-Fukuchi, M. Arita, Y. Takahashi, "Fabrication of single-electron transistor made of Fe-dot film and its characteristics," *Proc. Int'l Micropro-*

cesses and Nanotechnology Conf. (MNC 2016), 10P-7-30.

- (4) N. Hiromoto, K. Mori and J. Sato, "Study on Material-Classification of Objects Detected by the THz Passive Body Scanner for Security Screening," *41st Int'l Conf. Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2016)*, (Bella Center, Copenhagen), T5P.03.01 (September 2016).
- (5) G. Yamahata, S. P. Giblin, M. Kataoka, and T. Karasawa, and A. Fujiwara, "Gigahertz single-electron pumping in silicon with an accuracy better than 9.2 parts in 10^7 ," *Appl. Phys. Lett.* 109, 013101 (2016).
- (6) A. Fujiwara, G. Yamahata, K. Nishiguchi, S. P. Giblin, and M. Kataoka (Invited), "Gigahertz single-electron pump for quantum current standard," *33rd ICPS (Int'l Conf. Physics of Semiconductors)*, Beijing, 31 July- 5 August, 2016.
- (7) H. Satow, Y. Tanaka, E. Nishiyama, and I. Toyoda, "Design of an In-Phase/Anti-Phase Triple-Feed Array Antenna Using Two Types of Magic-Ts," *IEICE Commun. Express*, Vol. 5, No. 11, pp. 413-417, Nov. 2016.
- (8) I. Toyoda and E. Nishiyama (Invited), "Rectenna Design Using Electromagnetic Field Simulation Including Nonlinear Devices," *Proc. 2017 IEEE Int'l Conf. Computational Electromagnetics*, pp. 130-132, 2B1.5, Kumamoto, Japan, Mar. 2017.
- (9) H. Satow, Y. Tanaka, E. Nishiyama, and I. Toyoda, "An H-Plane Wide-Angle Rectenna Using an In-Phase/Anti-Phase Dual-Feed Antenna," *Proc. 2016 Int'l Symp. Antennas and Propag. (ISAP2016)*, pp. 532-533, POS1-124, Okinawa, Japan, Oct. 2016.
- (10) H. Sato, A. Nakamura, A. Banerjee, K. Yamada, H. Satoh, J. Temmyo and H. Inokawa, "Strong Quantum Confinement Effects in Nanometer Devices with Graphene Directly Grown on Insulator by Catalyst-free Chemical Vapor Deposition," *Current Graphene Science*, Vol. 1, 2017.
- (11) A. Banerjee, H. Satoh, A. Tiwari, C. Apriono, E. T. Rahardjo, N. Hiromoto, and H. Inokawa, "Width dependence of platinum and titanium thermistor characteristics for application in room-temperature antenna-coupled terahertz microbolometer," *Jpn. J. Appl. Phys.* 56, 04CC07 (2017).

出張報告

氏名：有田 正志

所属：北海道大学大学院 情報科学研究科

期間：平成29年3月3日～3月4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「Fe絶縁体グラニューレーデバイスの電気特性」の題目で講演を行うとともに、「体物質の分光評価を目指した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