

シリコントンネルトランジスタのスピン量子ビット応用

Silicon Tunnel Field-Effect Transistors as Spin Qubits

産総研¹, 物材機構², 理研³ ○森 貴洋¹, 森山 悟士², 松川 貴¹, 安田 哲二¹, 大野 圭司³AIST¹, NIMS², RIKEN³, T. Mori¹, S. Moriyama², T. Matsukawa¹, T. Yasuda¹, K. Ono³

E-mail: mori-takahiro@aist.go.jp

近年、新原理計算機技術として量子コンピュータが注目を集めている。その基本素子は量子ビットであり、超伝導素子が先行しているが素子サイズが数十 μm と大きい。そのため、将来の大規模集積の観点から半導体電子素子での実現が望まれており、半導体スピン量子ビットが有力な候補となっている。母材にはビットスピンを散乱する核スピンフリーの材料が望まれる中、伊藤らは ^{28}Si 同位体技術を確立し、Si の優位性が明らかである[1]。

大規模集積に向けては、動作温度も課題となる。現状電子素子型量子ビットの動作には、超伝導・半導体の類を問わず、希釈冷凍機による 100mK 以下の低温環境が必要である。しかし、量子ビットの微小な発熱の累積および制御信号伝達に伴う熱流入を考慮すると希釈冷凍機の冷却能力不足が予想されており、少なくとも 1-4K 程度で動作する量子ビットの必要性が指摘されている[2]。また同時に、高温動作は量子計算機の応用範囲を大きく広げることは論を待たない。

我々は今回、産総研が開発してきたチャンネル中に不純物準位を持つ等電子トラップ援用トンネルトランジスタ(IET-TFET)[3]がスピン量子ビットとしての応用可能であることを見だし、5K での量子ビット動作の実験実証に成功したのでこれを報告する。TFET の量子ビット応用は世界初であり、また電子素子型スピン量子ビットの動作温度としては世界最高温度を達成している。

実験は SOI 基板にプレーナー型の TFET を試作して実施した。S/D 領域を最初に形成し、Al と N とを共注入することで IET を PN 接合部に導入、最後に high-k/メタルゲート構造を形成することで IET-TFET を作製した[4]。ゲート長は 50-80nm、ゲート幅は 10 μm である。

試作した IET-TFET はある電圧条件下において、ソース・ドレイン間に 2 つの量子ドットが直列に存在する 2 重量子ドット素子の動作を示した。図 1 に 2 重量子ドットの形成を示すフォトン援用トンネル(PAT)電流を観測した結果を示す。PAT およびクーロン振動の温度依存性から、2 つのドットのうち 1 つは 200meV 程度の大きな耐電エネルギー(E_c)を有しており、またもう 1 つは数 meV の小さな E_c を有していることがわかった。なお、200meV と大きな E_c の量子ドットが存在するため、単電子トランジスタ動作は室温まで観測されている。2 重ドット動作条件下で連続マイクロ波照射によって、12K までの電子スピン共鳴応答電流が観測された。また、パルスマイクロ波照射によってパルス長に応じた電流のラビ振動が観測され、量子ビット動作の実現が確認された(図 2)。本結果はシリコン技術による高温動作量子計算機の実現可能性を拓いたものである。

【謝辞】本研究は最先端研究開発支援プログラム「グリーン・ナノエレクトロニクスのコア技術開発」、科研費 15H04000、15H05526、16H03900、17H01276 の支援により実施された。

【参考文献】[1] K. M. Itoh and H. Watanabe, MRS Commun. 4, 143 (2014). [2] L. M. K. Vandersypen et al., npj Quantum Information 3, 34 (2017). [3] T. Mori et al., MRS Commun. 7, 541 (2017). [4] T. Mori et al., Symp. VLSI Technol. Dig. Tech. Papers, 86 (2014).

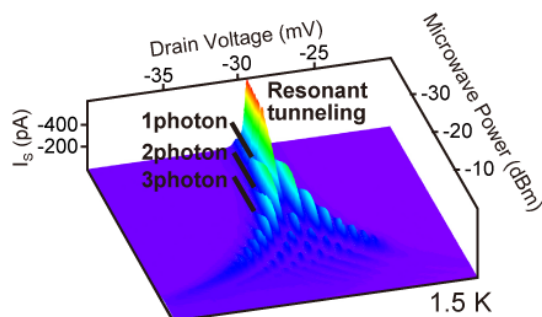


Fig. 1. Mapping of photon-assisted tunneling current under a certain bias condition. This ensures the double QD situation was realized.

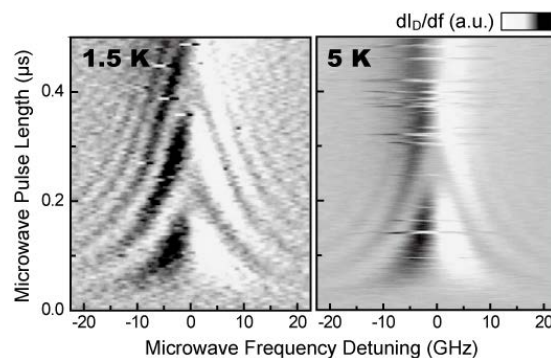


Fig. 2. Mapping of Rabi oscillation fluctuation with detuning microwave frequency. We observed a so-called Chevron pattern ensuring qubit operation up to 5 K.