

CaF₂/Si/CaF₂ 共鳴トンネル量子井戸構造を用いた 抵抗スイッチング特性の理論解析

Analysis of resistance switching characteristics of CaF₂/Si/CaF₂ quantum-well structures

東工大工学院 [○]金子拓海, 熊谷佳郎, 廣瀬皓大, 利根川啓希, 三上萌,

富澤勘太, 佐藤穂波, 渡辺正裕

Tokyo Institute of Technology [○]T. Kaneko, Y. Kumagai, K. Hirose, H. Tonegawa, K. Mikami,
K. Tomizawa, H. Sato, and M. Watanabe

E-mail: kaneko.t.bd@m.titech.ac.jp

【はじめに】 フッ化カルシウム(CaF₂)はシリコン(Si)との良好な格子整合性や、そのヘテロ界面における大きなバンド不連続量(1–2.3 eV)から、Si をベースとした室温動作可能なヘテロ構造デバイス材料として有望である[1]。これまでに、CaF₂/Si/CaF₂ 二重障壁共鳴トンネル量子井戸構造の両側に Si と CaF₂ の同時蒸着法により作製するシリコンナノ結晶(nc-Si)[2]を第二障壁層とすることで電荷の注入・保持・引き抜きの機能を発現する抵抗スイッチングメモリが提案・実証されてきた[1]。しかし、近年の我々の研究結果から、nc-Si 第二障壁層を用いずとも、井戸層である i-Si の欠陥準位に電荷がトラップされることでメモリ動作が発現する可能性が示唆された。本研究では素子の動作原理を今回提案するモデルで理論的に解析し、素子の電流電圧特性及び ON/OFF 比等の見積もりを行った。また、この解析を通して、本構造において不揮発メモリ動作を実現するために、欠陥準位が存在しなくてはならないエネルギーの幅 E_t を明らかにしたので報告する。

【計算方法】 本研究で提案する素子の抵抗スイッチング原理としては、量子井戸(QW)内に電荷が蓄積されていない状態で流れていた共鳴トンネル電流が QW に用いられている i-Si の欠陥準位への電荷トラップによるポテンシャル上昇によりブロックされるコンダクタンス制御モデルを仮定する(Fig.1)。そこで QW 内に蓄積される電荷量をパラメータとして、共鳴トンネル電流の I-V 特性を計算し、ON/OFF 比を見積もった。トランスファーマトリックス法と Esaki-Tsu の式を用いて電流密度を算出した。次に、欠陥準位にトラップされた電荷は n-Si と p-Si の禁制帯をトンネリングしないと仮定する。このとき外部印加電圧 0V で電荷を保持するため、欠陥準位は E_t [eV]以下でなければならない。一方、 V_{reset} [V]で引き抜くためには、 E_2 [eV]以上の範囲にある必要がある。 E_1 と E_2 を計算し、メモリ動作するための欠陥準位の範囲幅として、これらの差 E_t を求めた。材料パラメータとして、CaF₂の有効質量 m_{CaF_2} 及び Si と CaF₂間の ΔE_C は報告された膜厚依存性[3]を計算に取り入れた。

【結果と考察】 量子井戸内に蓄積された電子密度

N_{QW} [cm³]をパラメータとした電流電圧特性の計算結果をFig.2に示す。 N_{QW} を増やしていくと 1.1×10^{19} [cm³]から 3.2×10^{19} [cm³]で急激に ON/OFF 比が上昇するが、これは電荷トラップによるポテンシャル上昇により、井戸層である i-Si も障壁となることで、電流値が非常に小さくなるからであると考えられる。また、 N_{QW} と E_t の関係を Fig.3 に示す。 N_{QW} が大きくなるほど E_t が減少していき、最終的に 0 になり、 N_{QW} が大きすぎるとメモリ動作しなくなる。以上より、不揮発性スイッチング動作を発現するために必要な電荷を保持するエネルギー準位の深さの範囲と密度を明らかにした。実験結果との整合性についても議論する。

【参考文献】

- [1] Y. Kuwata et al., *Appl. Phys. Express* 9 074001 (2016)
- [2] 古閑他, 2011 年度秋季第 72 回応用物理学会 31a-ZH-5
- [3] K. Suda, Y. Kuwata, and M. Watanabe, *Jpn. J. Appl. Phys.* 54 04DJ05 (2015)

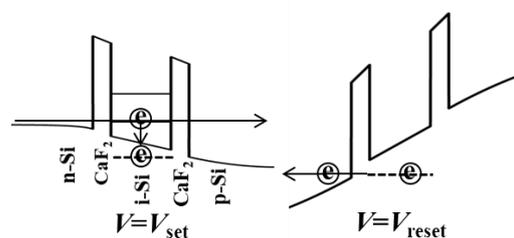


Fig.1 電荷の蓄積(V_{set})と引き抜き(V_{reset})

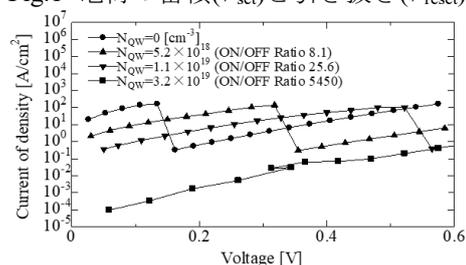


Fig.2 電流電圧特性

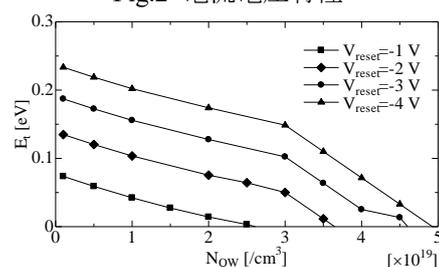


Fig.3 N_{QW} と E_t の関係