Si-pn 接合中の SiGe 量子井戸の共鳴準位による トンネル電流の増大

Enhancement of Tunneling Currents by Resonant States of SiGe Quantum Wells in Si-pn Junctions

千葉大理¹, 産総研², ^O(D2) 趙祥勲¹, 加藤公彦², 飯塚将太², 森貴洋², 中山隆史¹

Chiba Univ.¹, AIST², ^oSanghun Cho¹, Kimihiko Kato², Shota Iizuka²,

Takahiro Mori², Takashi Nakayama¹

E-mail: acda1899@chiba-u.jp

pn 接合におけるトンネル電流を使った電界効果トランジスタ(TFET)は、低電力で動作する 次世代のデバイスとして注目されている。特に、Si を使った TFET はデバイス技術との整合性に 優れるが、Si は間接ギャップであるため ON 電流が小さいという問題があった。近年、Mori ら は Si の pn 接合に Al と N を同時ドープすることで、ON 電流の改善に成功した[1,2]。我々のグ ループは、第一原理計算と数値シミュレーションを行い、Al+N のペアによって Si のバンドギャ ップ中に電子非占有の不純物準位が発生し、その不純物準位が電場下で n-Si の連続な伝導帯状 態と共鳴することで電流が増大することを明らかにした[3-5]。この結果は、ドーピング以外の方 法でも、ギャップ中に共鳴準位を作り、キャリアのトンネル距離を短くできれば、トンネル電流 の増大が可能であることを示唆する。そこで本研究では、不純物ドープよりも位置制御に有利な pn 接合中の量子井戸構造に注目した。特にここでは SiGe 量子井戸(QW)に着目し、pn 接合中の SiGe 量子井戸構造が誘起するトンネル電流を、sp³d⁵s*軌道の 3 次元強結合近似モデルと非平衡 グリーン関数法を用いて調べ、トンネル電流が pn 接合中の量子井戸によってどのように変化す るか、特に量子井戸の厚さや位置依存性について系統的に調べた。

Fig.1 に、Si-pn 接合(p-Si/空之層/n-Si)におけるトンネル電流を、空之層域(~10nm 厚)に加 えた電圧の関数として示す。トンネル電流は、量子井戸がない単純な pn 接合の場合と、2.3nm の 厚さの量子井戸が pn 接合の真ん中にある場合について示している。量子井戸がある場合、単純 な pn 接合の場合に比べてトンネル電流が 4-6 桁増大する。Fig.2(a)に、電場強度が 2.1MV/cm 時 の透過関数スペクトルを示す。赤線が量子井戸がある場合、黒線が量子井戸がない場合である。 量子井戸がある場合、透過関数は大きく増大し、エネルギー位置-0.5eV 付近に複数のピークが発 生する。これらピークの発生原因を調べるために、局所状態密度(LDOS)の解析を行った。Fig.2(b) に、pn 接合中に量子井戸がある場合の pn 接合周辺の LDOS(電場強度が 2.1MV/cm の場合)を、 エネルギーと位置の関数として示す。この図から、透過関数のピークに対応するエネルギー位置 (~-0.5eV)に、量子井戸(位置~6nm)によって作られた複数の準位が価電子帯上部に存在すること が分かる。これら準位は p-Si の価電子帯の連続状態と共鳴することで、価電子帯から伝導帯へ のトンネル距離が短くなり、トンネル電流が増大した。講演では、トンネル電流増大の原因と量 子井戸の厚さ・位置依存性について詳しく議論する予定

である。



Fig1. Calculated tunneling currents for Si-pn junctions with (red line) and without (black line) a SiGe quantum well (QW), as a function of applied voltage.



Fig2. (a)Transmission function as a function of energy, for Sipn junctions with/without a SiGe QW. (b) Local density of states (LDOS) around Sipn junction with a SiGe QW, as functions of the energy and the position.

[1] T. Mori et al., Appl. Phys. Lett. 106, 083501 (2015).
[2] T. Mori et al., Jpn. J. Appl. Phys. 57 04FA04 (2018).
[3] S. Cho, T. Nakayama, Jpn. J. Appl. Phys. 58 061004 (2018).
[4] S. Iizuka, T. Nakayama, Appl. Phys. Express, 8 (2015) 081301.
[5] S. Iizuka et al., Mater. Sci. Semicond. Process. 70, 279 (2017).