

Si-p/n 接合におけるトンネル電流の理論シミュレーション; 界面ポテンシャル変調の効果

Theoretical Simulation of Tunneling Current through Si-p/n Junction; Effects of Interface Potential Modulations

千葉大理¹ ○(M1)趙 祥勲¹, 中山 隆史¹

Chiba Univ.¹ ○Sanghun Cho¹ Takashi Nakayama¹

E-mail: acda1899@chiba-u.jp

p/n 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デバイスとして期待されている。特に Si を使った TFET は、従来のデバイス基盤との整合性に優れるが、Si は間接ギャップ半導体であるため ON 時の電流が小さいことが問題であった。近年、Mori らは Si の p/n 接合に Al と N を同時ドーピングすることで、ON 電流の改善に成功した[1,2]。我々のグループは、その理由を明らかにするために第一原理計算と数値シミュレーションを行い、Al+N のペアが作る不純物準位が n-Si の伝導帯状態と共鳴すると仮定すると、トンネル電流が数桁増大することを明らかにした[3,4]。この結果は、間接ギャップ半導体であっても、p/n 接合部分のポテンシャルに適当な変調を加えると、トンネル電流増大が可能であることを期待させる。しかし従来のトンネル電流の研究では単純な p/n 接合しか考えていないことが多い。そこで本研究では、1次元強結合モデルと波束の時間発展数値シミュレーションを用い、p/n 接合のポテンシャル変調がトンネル確率に及ぼす効果を調べた。

ここでは、Fig1(a)~(c)に示す、(a)伝導帯下に不純物による trap 準位が発生する単一 trap(ST)型、(b)価電子帯にも同様な trap 準位が共存する複合 trap(CT)型、(c)異種ヘテロ界面がポテンシャル変形を起こすヘテロ界面(HI)型の3タイプの変調を考えた。

Fig.2(a)に単純な p/n 接合およびポテンシャルに変調を加えた3タイプのトンネル確率を電場の関数として示す。参考のために単純な p/n 接合の直接バンドギャップ半導体の場合の結果も示してある。間接ギャップ半導体の場合は、価電子帯と伝導帯のブロッホ波数が異なるため、トンネル確率が3~4桁小さくなる。ST型では単純な p/n 接合よりトンネル確率が数桁大きくなっている。この結果は森らの実験と符合する。CT型では低電場側でさらに確率が增大している。Fig. 2(b)、2(c)に ST、CT 型の局所状態密度を示す。CT型は、ST型と同様に trap 準位が価電子帯または伝導帯と共鳴するだけでなく、共鳴以外の価電子・伝導帯状態を変化させ、その結果有効的なトンネル距離が短くして、ST型より数桁多き良いトンネル確率を生むことが分かる。

講演では HI 形の結果も示すと共に、p/n 接合におけるトラップ準位の性質とトンネル確率の関係について詳しく議論する。

[1] T. Mori, et al., MRS Commun. 7 (2017) 541. [2] T. Mori et al., Symp. VLSI Tech. Dig., 2014, p. 86. [3] S.lizuka, T.Nakayama, Appl. Phys. Express, 8 (2015) 081301, Jpn. J. Appl. Phys. 55 (2016) 101301. [4] S.lizuka et al., Mater. Sci. Semicond. Processing 70 (2017) 279.

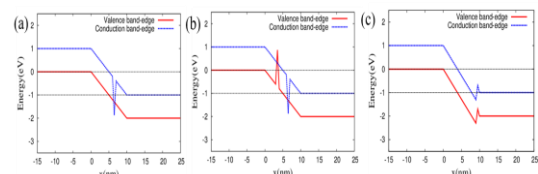


Fig.1 Potential profiles of p/n junction studied in this work; (a) single trap (ST), (b) complex trap (CT), and (c) hetero-interface (HI) types of potential modulations.

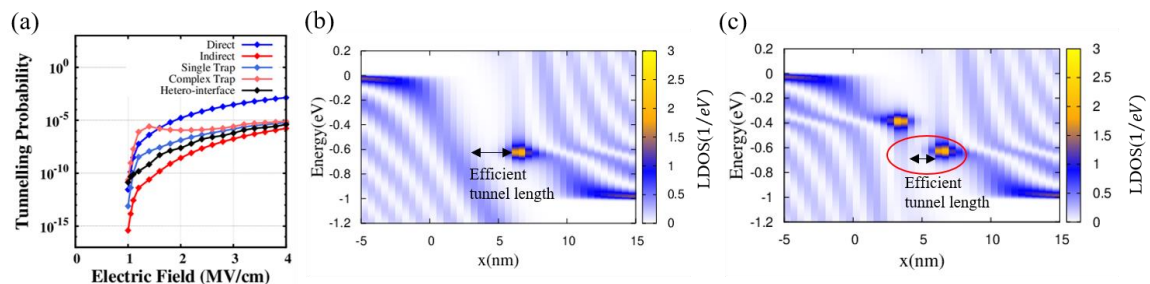


Fig.2 (a) Calculated tunneling probabilities through various p/n junctions of indirect band-gap semiconductor, as a function of electric field strength. Local density of states in the cases of (b) ST and (c) CT types of potential modulations.