## 不純物を持つ Si-p/n 接合におけるトンネル電流; 3次元計算による検討

## Tunneling Current through Doped Si-p/n Junction; Three-dimensional Simulation 千葉大理<sup>1</sup> <sup>0</sup>(D1)趙 祥勲<sup>1</sup>, 中山 隆史<sup>1</sup>

## Chiba Univ.<sup>1</sup> <sup>o</sup>Sanghun Cho<sup>1</sup> Takashi Nakayama<sup>1</sup>

## E-mail: acda1899@chiba-u.jp

p/n 接合での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 p/n 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]。我々は 以前、簡単な 1 次元2バンド強束縛近似モデルを用いて、不純物を p/n 接合にドープした 時、孤立した不純物状態が Si の連続状態と共鳴することがトンネル電流増大の起源である ことを示した[3]。しかし、1 次元モデル系と実際の実験の 3 次元系では共鳴の様子は異なる と考えられ、定量的な議論のためには 3 次元系での計算が必要となる。そこで本研究では、 sp3s\*の 3 次元強束縛近似モデルと非平衡グリーン関数法を用いて、Si-p/n 接合に Al-N ペア 不純物をドープした時のトンネル電流を調べ、電流増大起源の妥当性を再検討した。

Fig.1 にダイオードの p/n 接合(10nm)に Al-N 不純物をドープした時のトンネル電流の電 場強度依存性を示す。Non-dope 時の結果も示す。但し計算での不純物濃度は実験値(10<sup>17</sup>-10<sup>18</sup>cm<sup>-3</sup>)より高いので、電流値は濃度に比例すると仮定した。不純物がドープされると Nondope 時よりトンネル電流が 3-5 桁増大する。Non-doped 及び不純物ドープ時のこれら電流値 は実験と一致することから、本3次元計算では電流増大が再現されていると考えられる。

電流増大の起源を詳しく見るために、Fig.2に(a)1次元モデル及び(b)3次元モデルにおけるトンネル電子のエネルギー分布を示す。トンネル電流は、いずれの次元でも、Siの連続状態と共鳴した不純物状態が担い、電流増大は共鳴状態によるトンネル距離の減少にあることが分かる。一方、分布の共鳴幅から1次元の場合は共鳴の強さは強いことが分かる。これは低次元ほどポテンシャル変調の効果が大きくなる(つまり共鳴しやすくなる)ためと考えられる。Fig.3に、3次元系における(a)強束縛近似モデル(@2MV/cm 電場下)と(b)第一原理計算(@3.6MV/cm)より求めた共鳴状態の電子密度を示す。3次元の場合でもAl-N 不純物状態とSi 伝導帯の連続状態との混成が明確に確認できる。以上から、Mori らの実験におけるトンネル電流増大の起源は共鳴状態の形成にあることが確認された。

講演ではトンネル電流の次元依存性や不純物濃度依存性についても議論する予定である。

T. Mori et al., Appl. Phys. Lett. 106, 083501 (2015).
T. Mori et al., Jpn. J. Appl. Phys. 57 04FA04 (2018).
S. Cho, T. Nakayama, Jpn. J. Appl. Phys. 58 061004 (2018).
S. Iizuka, T. Nakayama, Appl. Phys. Express, 8 (2015) 081301, Jpn. J. Appl. Phys. 55 (2016) 101301.



Fig.1 Calculated tunneling current at Sip/n junction with (a) Al-N dopants (red) and (b) no dopants, as a function of electric field.





Fig2. Energy distribution of tunneled carriers within the tunneling window ( $-1 \sim 0eV$ ) for (a) 1-dimensional and (b) 3 dimensional models.

Fig.3 Resonance state between an isolated Al-N state and Si-conduction-band-states in the cases of (a) 3-dim tight-binding model and (b) first-principles calculation model around Si-p/n junction.