

## p/n 接合中の共鳴不純物準位によるトンネル電流の増大： 直接・間接バンドギャップ系の比較

### Enhancement of Tunneling Current by Resonant Impurity States in p/n Junction: Comparison of Direct and Indirect Band-gap Systems

千葉大理<sup>1</sup> ◯(D1)趙 祥勲<sup>1</sup>, 中山 隆史<sup>1</sup>  
Chiba Univ.<sup>1</sup> ◯Sanghun Cho<sup>1</sup> Takashi Nakayama<sup>1</sup>  
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注目されている。TFET を構成する物質には、直接および間接バンドギャップ系の2種類があるが、どちらも ON 時の電流が小さいという問題がある。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。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、第一原理計算と1次元強束縛近似モデルのシミュレーションを用いて、Si のギャップ中に電子非占有な Al+N ペア準位が発生し、その準位が電場下で Si の連続な伝導帯状態と共鳴することでトンネル電流が増大することを明らかにした[3,4]。この結果は、他の間接ギャップ半導体、さらには直接ギャップ半導体においても、ギャップ中の不純物準位が host 物質の連続状態と共鳴すれば、トンネル電流増大が可能であることを期待させる。そこで本研究では 間接・直接ギャップ系の相違に注目して、Si には Al-N 不純物ペアを、III-V 族半導体には N 置換不純物を考え、p/n 接合中のこれらの不純物準位が誘起するトンネル電流を、sp3s\* 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検討した。

Figs.1(a), 1(b)に、間接および直接ギャップ系におけるトンネル電流を、p/n 接合部の電場強度の関数として示す。p/n 接合に不純物をドーピングした場合とドーピングしない場合（以下これを bulk と呼ぶ）のトンネル電流を示した。まず、ドーピングしない場合に注目すると、間接ギャップである Si と GaP では、価電子帯上端と伝導帯下端の状態の波数が異なるため、GaAs、InP の直接ギャップ系に比べて電流値が数桁小さいことが分かる。次に、間接ギャップ系の p/n 接合に不純物をドーピングした場合を考えると、電流値が数桁増大していることが分かる。これは、バンドギャップ中の不純物準位が host 物質の連続な伝導帯状態と共鳴し、その共鳴状態によって有効的なトンネル距離が短くなったことに原因がある。

一方、直接ギャップ系の GaAs と InP の p/n 接合に不純物がドーピングされた場合を考えると、電流は bulk の場合の電流値とあまり変わらないことが分かる。直接ギャップ系では、ドーピングした N 原子の電子非占有な 3s 状態が host 半導体の連続的な伝導帯状態と混成して伝導帯を大きく変調し、元来の伝導帯下端より低いエネルギー位置に、局在性の強い非共鳴状態と伝導帯の成分を多く持つ（あたかも伝導帯のような）共鳴状態を同時に発生させる[5]。前者はトンネル電流に寄与せず、後者はトンネル電流に大きく寄与する。その結果、総トンネル電流の大きさはドーピングしてない場合とあまり変わらない。講演では間接および直接バンドギャップ系における共鳴状態の相違を説明し、これら結果の詳細について議論する予定である。

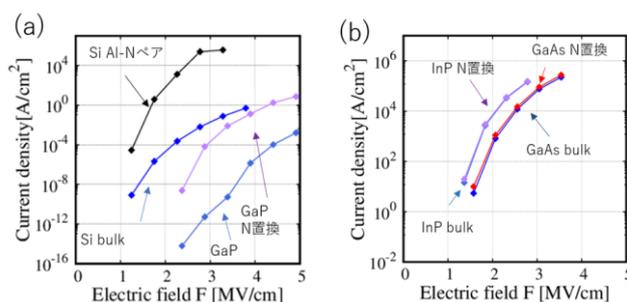


Fig.1 Calculated tunneling currents as a function of electric field in the p/n junction, for the cases of (a) Si and GaP p/n junctions with/without Al-N-pair and N dopants, and (b) GaAs and InP p/n junctions with/without N-atom dopants..

[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 et al. Jpn. J. Appl. Phys. **58**, 061004 (2018). [4] S. Iizuka and T. Nakayama, Appl. Phys. Express **8**, 081301 (2015), Jpn. J. Appl. Phys. **55**, 101301 (2016). [5] M. Ishikawa and T. Nakayama, Phys. Stat. Sol. **C8**, 352 (2011).