

二次元半導体をチャネル材料としたトンネル電界効果トランジスタの 電気伝導特性及び回路ミュレーション

Electrical conduction characteristics and circuit simulation of tunnel field effect transistors using two-dimensional materials as channel materials

神戸大院工¹, ○山口 航輔¹, 相馬 聡文¹

Kobe University¹, ○Kosuke Yamaguchi¹, Satofumi Souma¹

近年、LSI 集積回路の様々な分野、例えば脳型コンピュータ等への応用の広がりにより、その構成要素である電界効果型トランジスタ (FET) の微細化と高性能化の需要が更に高まっており、主に集積回路に用いられるトランジスタはすでに十数 nm スケールまで小さくなっている。FET の微細化は集積率の上昇に直結するが、同時にオフリーク電流の増加や疑似的なキャパシタの形成などの問題も生じるため、これを防ぐための様々な手法が模索されているが、その一つが二次元半導体において期待される優れた静電制御特性の利用である。

二次元半導体の中でも、適度なバンドギャップと高い移動度を兼ね備えた材料として、リン (P) の同素体の一つであるフォスフォレンが注目されている。フォスフォレンはバックリング構造 (Fig.1) という特殊なうねりを有する半導体で、光学異方性や電気伝導異方性を有するため様々な応用が期待されている。また、FET のスイッチング特性を高める新規構造としてトンネル電界効果トランジスタ (TFET) が近年期待されているが、これはスイッチング機構に量子トンネル効果を利用したトランジスタ (Fig.2) であり、従来型の FET と比較して ON 時の電流密度の大きさは劣るものの、スイッチング性能 (急峻なサブスレッショルドスイング (SS または S 値)) と OFF 時の電流密度の小ささにおいては優れているといった特徴を持つ [1]。これらの事からフォスフォレンを用いた TFET の応用に期待されるが、基本的な電気伝導特性についてはこれまで多くの研究があるものの、これを回路の構成要素として用いた場合に期待される優位性についてはこれまで十分に調べられていない。そこで本研究では、フォスフォレン TFET について、デバイスシミュレーションと回路シミュレーションの両側面から包括的な議論を行う。

シミュレーション手法としては、まず強束縛近似法を用いてバンド構造や有効質量を算出し、それを元に多バンド有効質量方程式及び散乱行列法でチャネル領域の透過率を計算、さらにランダウアー・ビュッティカー公式を利用して電流密度を導いた。ここで、等価モデルの導入により、電荷蓄積の影響を考慮するために必要なポアソン方程式と電子密度計算の自己無撞着計算をある程度の精度を保ったまま高速化する事に成功し、これにより、回路シミュレーションとの連携が可能となった (Fig.3)。講演では、計算の詳細や他材料との比較、またフォスフォレン TFET を種々の CMOS 回路に用いた場合の回路シミュレーション結果について報告する。

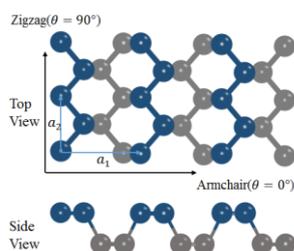


Fig.1: Crystal structure of phosphorene.

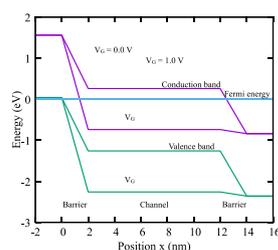


Fig.2: Band structure of TFET. The drain voltage was fixed at 0.1V and the gate voltage was changed.

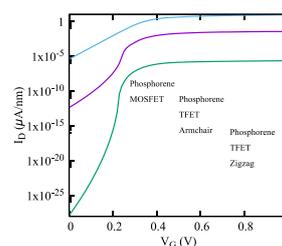


Fig.3: Comparison with Phosphorene MOS-FET.

[1] S Souma and M Ogawa, J. Appl. Phys. **127**, 094304 (2020)