

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 佐藤洋平

電界効果トランジスタ(FET)は、半導体の電気伝導度を制御するデバイスであり、電子回路の基本素子として、ありとあらゆる電子機器に利用される最も重要な素子である。最近、電気二重層トランジスタという非常に高濃度の電荷蓄積が可能なトランジスタが開発され、超伝導などの物性研究で広く使われつつある。イオン伝導体である電解液と半導体などの電子伝導体の間の電気化学的な界面に生じる電気二重層は非常に大きな静電容量をもつため、最大で半導体格子あたり0.1個程度もの電子数を制御できる。このトランジスタは特に移動度が小さく高いスイッチング性能を持つFETの作製が困難な有機物半導体で、大きなon/off比を持つスイッチング素子としての研究もおこなわれ、高速なスイッチング動作を目指した研究がおこなわれてきた。一方、電気二重層トランジスタは液体を用いるために従来の半導体プロセスで作製できないという問題がある。この問題を解決するため、固体電解質薄膜を用いた全固体の電気二重層トランジスタが報告されているものの、これらの研究では「物性が変化した」「on/off比がどれくらいか」を報告する段階にとどまっており、動作周波数や動作機構に関する研究はほとんどされていないのが現状である。

さて、FETのスイッチング特性で重要な物性の一つが半導体のバンドギャップである。たとえば、層状物質として有名なグラフェンは室温で非常に高い移動度を持つものの、バンドギャップを持たないために電気が流れないOff状態を作ることができない。グラフェンに限らず、層状物質はFETを作るのに適した表面準位の少ない表面を持つが、表面が劣化して移動度が減少しやすい、バンドギャップが狭いなどの理由により特性の良いFETを作ることは困難である。また、これらの物質は電気化学的に安定でないため、電気二重層トランジスタの構造を用いて電気化学的にエッチングを行うことができる。そのため、剥片の試料をエッチングすることにより原子数層単位で厚さを制御する試みも行われてきた。層状物質では原子1, 2, 3層と厚さを変えることでバンド構造が変わり、バンドギャップなどの物性が変化することが知られている。また、基板に用いる物質と層状物質の相互作用によってもバンド構造が変化し、原子単層で高い転移温度を持つ超伝導が発現されるなどの報告がある。

このような背景に対して、佐藤洋平氏は以下の二つの観点から電気二重層トランジスタの機能性向上を目指した研究を行った。

1. 全固体デバイスの実現、および固体デバイスのキャリアの蓄積機構の解明、微細化による動作速度向上
2. 界面での電気化学反応を利用したトランジスタ特性の向上と半導体の物性制御

電気二重層トランジスタを高速化するためには、まず第一に電解液の中のカチオンやアニオンが変化したときにデバイスの特性がどのように変化するかを調べる必要がある。第三章ではデバイス特性が良くわかっている SrTiO₃ 単結晶表面をチャンネルとする電気二重層トランジスタについて、さまざまな有機電解液とイオン液体を用いて電気二重層トランジスタを作製し、デバイス特性の電解質依存性を調べた。その結果として半導体界面に吸着するイオン種、さらにイオンの配列の不均一性によって SrTiO₃ チャンネルの電子移動度が変化することがわかった。

第四章は全固体電気二重層トランジスタの開発と、その微細化による動作速度向上について述べている。半導体の SrTiO₃ にセラミックスのリチウムイオン伝導体である a-Li₃PO₄ を固体電解質として積層させた薄膜トランジスタの構造を持つ電気二重層トランジスタで良好なトランジスタ動作が確認された。また、室温～低温での輸送特性から、HfO₂ 膜や H イオン伝導体の多孔質絶縁膜などの従来の固体絶縁膜よりも一桁程度大きな静電容量を持ち、10¹⁴/cm² という高濃度の静電的なキャリア蓄積を実現した。また、微細化によりスイッチング特性が改善し、100Hz 程度でのスイッチングが実現している。

第五章では黒リンという層状半導体に電気化学エッチングを用いた新しいデバイス開発について述べている。黒リンは非常に高い移動度を持ち、バンド計算や光電子分光などの真空中の測定では 1～5 原子層にまで薄層化することで直接遷移型のバンドギャップが 0.3 eV から 2 eV にまで増大することが知られている。しかし、化学的に不安定な性質のために大気中で劣化しやすく、極薄膜でのデバイスの実現が困難であるとされていた。佐藤洋平君はこの材料に電気化学エッチングを行うことで膜厚を制御し、数原子層の厚さにまで加工した。その結果、数原子層の厚さでのトランジスタ動作を実現し、エッチングによりデバイス特性が向上することを初めて示した。さらに、バンドギャップの大きさをデバイス特性から直接得ることができ、膜厚変化によるバンドギャップの変調を初めて実現した。

このように、本研究は、電気二重層トランジスタをスイッチング素子としての視点から見直し、二つの方向性から高性能のスイッチング素子の実現可能性を明らかにしたもので、その学術的な価値は極めて高いと評価できる。なお、これらの研究結果のうち、電解液依存性の研究成果は 1 報の論文としてすでに印刷公表されており、引き続きそれ以外の結果について 2 報の論文としてそれぞれ投稿準備中である。これらの研究は上野和紀、片山裕美子、土井聖将との共同研究であるが、ほとんどすべての内容は論文提出者が主体となり実験、解析、考察を行ったものであり、論文提出者の寄与が十分であると判断した。

よって本審査委員会は、博士（学術）の学位を授与するにふさわしいものと認定する。