

「二次元材料を集積回路に！」

開催日時：2022 年 3 月 24 日（木）13：00～17：45

場所・形式：青山学院大学相模原キャンパス+オンライン

協賛・共催：シリコンテクノロジー分科会、TIA かけはし

世話人：松木武雄（産総研）、安藤淳（産総研）、蓮沼隆（筑波大）

本シンポジウムは、シリコンをその半導体材料として利用してきた大規模集積回路（LSI）に対して、シリコンの次の半導体材料として、二次元層状物質が適用できないかという問いかけに対して、LSI を形成するための回路も含めて“集積化”技術の現状と課題を議論することを目的に開催された。グラフェンをはじめ、二次元層状物質をチャネルとした FET 技術、コンタクト・配線技術、回路設計に向けたモデリングまで集積化に必要な技術分野を広範囲にわたる招待講演（5 件）と一般講演（4 件）、更に、招待講演者とこれまでシリコン LSI 技術にかかわってきた研究者・技術者でパネルディスカッションを通して集積化技術の現状・課題整理をした。

招待講演は、研究開発ファンディング機関である科学技術振興機構（JST）からの本材料系への期待を含め、様々な研究機関から EFT デバイス技術、集積化プロセス、回路モデリングの観点で講演いただいた。

JST 研究開発戦略センター（CRDS）曾根上席フェローからは、“二次元材料、ナノエレクトロニクス応用への大いなる期待”として、シリコン LSI トレンドと比較しながら、二次元層状物質の応用に対するこれまでの JST の取り組み、取り巻く研究開発の環境変化、国内外の動向を含めたデバイス技術トレンド分析がわかりやすく紹介された。東京大学長汐教授は、“MoS₂FET から 10 年：何が解決して何が未解決か？”として、歴史を振り返りながら、現状を俯瞰し、pMOSFET の形成に課題が残されているとした。東北大学吹留准教授は、“二次元材料成膜・形成および機能発現評価の課題”として、FET デバイス動作に大きな影響がある界面状態の評価に関して、微細領域での欠陥評価をオペランド計測することの重要性を主張した。東工大若林教授は、“二次元材料デバイス集積化技術”として、国内外での最新レポートのレビューを含めて、LSI 化する際に検討必須な膜界面の機械的安定性などの課題の解決の必要性を強く述べた。また、広島大学 HiSIM センターの飯塚研究員は、回路設計と FET や個別素子とつなぐ物理モデル、コンパクトモデルの必要性和二次元層状物質の FET のモデル化の方向性などについてわかりやすい説明とアプローチ案が述べられた。

一般講演として、成膜、不純物ドーピング、界面でのキャリア状態、更にはコンタクト界面のポテンシャルモデルなど集積化技術として重要なテーマに関して最新の研究成果が講

演された。産総研安藤氏から、“異なる Mo 源による MoS₂ 化学気相成長膜の合成”として、下地そのものの膜原料化の可能性が示された。大阪府大院四谷氏から“ホスフィン分子の極薄膜形成による MoS₂ への電子ドーピング”として、FET 形成熱プロセスの影響も含めて、二次元層状物質での積層膜からの注入されるキャリアを利用するドーピングを適用した FET 特性での議論がなされた。筑波大丸山氏は、“キャリアをドーピングした MoS₂/WS₂ 面内ヘテロ構造体の蓄積キャリア分布”として、シミュレーションを用いた理論的検討をし、MoS₂/WS₂ 面内ヘテロ構造体では、キャリア注入量によってチャネルの次元性を制御できることを示した。産総研植田氏は、“二次元半導体トランジスタにおけるコンタクト、チャネル領域の役割”として、MoS₂FET のコンタクト抵抗、チャネル抵抗成分を電流モデルを用いた load-line 解析とドリフト拡散法によるデバイスシミュレーションによって解析した。サブスレッショルド領域ではチャネル抵抗が、飽和領域ではコンタクト抵抗が電流を制限することを示した。どの一般講演も、集積化に向けて検討が不可欠な課題に取り組んでおり、充実した討議であった。

招待・一般講演の後、招待講演者とシリコンデバイス技術にかかわってきた研究者・技術者を加えて本シンポジウムテーマである“二次元材料を集積回路に！”をテーマにパネルディスカッションをおこなった。招待講演者の講演トピックスを改めてまとめながら、シリコン集積化に関連する技術研究を行ってきた研究者からの材料のポテンシャルやプロセス技術に関する将来的な展望などが1時間にわたって議論された。特に、電子回路をレイアウトすることとは、“選択的”に材料パーツを基板表面に配置する技術である。それを踏まえると、成膜、加工、ドーピング、評価技術の高選択性・高性能・高精度化のみならず、製造イールドも考慮したプロセスダメージなど、シリコンデバイスでも行われてきた広範囲かつ地道な材料プロセスの基本的な研究開発が必須であることが、改めて確認された。

今回、講演会の技術領域として、“半導体”でシンポジウムを開催することで、二次元層状物質の CMOS 化・集積回路化の議論活性化を図ったが、オンライン・会場を含めて、盛んな議論がなされた。これを機に、今後の本テーマの議論の拡がりや深まりを期待するものである。