

トランジスタの徹底した微細化、それに伴う高性能化、低消費電力化。この指導原理の下、1947 年にトランジスタが発明されてから半導体は 60 年余りの歴史を刻んできました。トランジスタの基幹材料であるシリコンは、不純物ドーピングによって初めて真価を発揮します。以来、不純物ドーピングはトランジスタの根幹たるチャネル、ゲート、ソース/ドレイン領域に適用され、トランジスタ特性制御を担ってきました。しかし、今日、ドーパント原子 1 個の存在有無が特性を左右する時代を迎えています。従来、半導体中へのドーピングは均一に行われると考えられ、多数のドーパント原子は統計平均化され、有効に機能してきましたが、微細化が進みドーパントの数や配置のゆらぎがデバイス特性に大きな影響を与えることが判明しています。これには、不純物原子の個数と位置を完璧に制御するか、あるいは全く使わないトランジスタ構造で対応するしかありません。

この難問に対し、既存の CMOS テクノロジー技術の徹底した改良、More than Moore、Beyond CMOS で創造される新技術を取り込みながら、持続的発展を遂げる"Extended CMOS"コンセプトが、日本の ITRS 探求的素子(ERD)ワーキンググループによって提唱され、知とテクノロジーの融合が図られています。

本シンポジウムでは、単一ドーパント制御を主題として、CMOS テクノロジーの延伸に資するドーパント添加デバイスの可能性、その限界を明らかにし、未来を見通すことを目的としました。プログラムでは、Extended CMOS と Deterministic ドーピングの位置付けを明確にした上で、そもそも Deterministic ドーピングとは何かを議論し、続いてドーパントデバイスを究める、すなわち 1 個のドーパントが動作の要となる単一ドーパントデバイス、それを実現する単一ドーパント制御プロセス、キャラクターゼーション、シミュレーションに関する最新の話題提供を行いました。講演者によるキーメッセージは次の通りです。

- 東京工業大学・内田建准教授「Extended CMOS の本質は、CMOS が独自の進化を続けながら、More than Moore や Beyond CMOS との融合を図り、社会が LSI に求める多様なニーズに応じて行くことである。ランダムドーパントゆらぎ問題が顕在化し、ノンドーパントチャネルデバイス開発が盛んだが、Si に変わる新チャネル材料が次々と導入される可能性を鑑みると、ドーピングの重要性は変わらない。」
- Semiconductor Research Corporation (SRC) ・Daniel Herr ディレクター「Functional devices with atomic scale placement accuracy have been demonstrated. Deterministic doping methods (i.e., single ion implantation) exhibit the potential for device development applications. High throughput deterministic fabrication may be a key enabler for ultimately scaled semiconductor devices.」
- 静岡大学・田部道晴教授「ナノ構造による量子閉じ込め効果および誘電閉じ込め効果によって、拡張ドーパントとも言うべき新しい原子のポテンシャル設計が可能となっており、単一ドーパントを用いたトンネルデバイスの室温動作は決して夢ではない。」

- 早稲田大学・品田賢宏准教授「Extended CMOS の精神に則り、独自の単一イオン注入技術を高め、進化を続ける高精細レジスト、最先端アクティベーション技術を取り込みながら 1nm 精度を目指す。」
- NTT 物性科学基礎研究所・小野行徳主幹研究員「ポテンシャルゆらぎのない理想的なトランジスタを作製すると、電界制御によって単一ドーパントの検出やドーパント準位を介する単一電荷の転送が可能となる。単一ドーパントに関わる電荷輸送現象の物理も解明されつつあり、高精度の電荷転送素子、量子情報処理への応用が期待できる。」
- 静岡大学・Daniel Moraru 研究員「*Ab initio* studies of isolated silicon clusters with discrete dopants has been intensively demonstrated worldwide. It is found that the ionization energy is sensitively affected by a single donor position in silicon nanorods with surrounding materials. This approach becomes more powerful tool for characterizing discrete dopants in nanodevices.」

この様に単一ドーパント制御を基軸として、Extended CMOS に資するデバイス、ならびにプロセス開発を通じて、シリコンテクノロジーの発展に寄与する思いや決意が語られました。なお、本シンポジウムは、シリコンテクノロジー分科会接合技術研究会、ITRS 探求的素子(ERD)および探求的材料(ERM)策定に関わる関係者によって企画されました。