

○戦略目標「新たな半導体デバイス構造に向けた低次元マテリアルの活用基盤技術」の下の研究領域

ナノ物質を用いた半導体デバイス構造の活用基盤技術 (C ナノ物質半導体)

研究総括：齋藤 理一郎 (東北大学 名誉教授)

研究領域の概要

本研究領域では、令和5年度戦略目標「新たな半導体デバイス構造に向けた低次元マテリアルの活用基盤技術」に基づいて、グラフェンや遷移金属ダイカルコゲナド物質に代表される二次元物質やナノチューブ、ナノワイヤーに代表される一次元物質（以下ナノ物質）を用いた半導体デバイスを近未来に活用するための基盤技術を構築します。

ここで基盤技術とは、生産性の向上において波及効果が大きい基本原理・技術を指します。具体的には、ナノ物質を用いた半導体ウエハー・デバイス作製と動作回路の構築、ならびにナノ物質に特化したデバイスの動作原理を指します。対象はナノ物質を用いた半導体です。電界効果トランジスタ (FET) 論理回路、フレキシブルデバイス、pn/ヘテロ接合素子、熱電素子、太陽電池、LED 発光・受光素子、THz 遠赤外素子、化学/生物物質センサー、人工筋肉、MEMS など様々なデバイスを対象とします。素子単独だけでなく回路・システムとして総合的に構築し、実用に向け「死の谷（注：基礎研究と実用の間にある困難を象徴する言葉）にかけたる橋」を目指します。

システムを構築するために、研究実績のある研究者間で異分野の融合チームを組み、高度な基礎学理に基づき、ナノ物質材料の創製と提供、デバイス作製、回路構成等の成果を研究期間前半で創出し、さらにプロセス技術も含めて、将来の実用に繋がる次世代の革新的半導体基盤技術を創出します。

募集・選考・領域運営にあたっての研究総括の方針

戦略目標で示した3つの到達目標を実現する課題を募集します。キーワードは、低次元マテリアル（ナノ物質）で作る半導体デバイスです。以下、具体的に説明します。

1. 背景

(1) ナノ物質半導体のデバイスへの道のり

Si 半導体は、工業的に 2nm の単位でプロセスが進む中、半導体の究極の微細化において移動度の低下が現れるなど本質的に不可避な問題が指摘されています。一方 nm の厚さ（細さ）を持つ二次元（一次元）ナノ物質は、原子的に平滑な面や線を確保すれば、この問題を回避できることから、ナノ物質は半導体ロードマップの近未来半導

体材料として登場しています。すでに、研究室レベルでは半導体デバイスとしての理想的な数値を実現していますが、ナノ物質を将来の集積回路に実装するには、長い道のりが予想されます。ナノ物質を用いた各種半導体応用の基盤技術を構築し、若い研究者を育成することが我が国の半導体戦略として望まれています。

ア) 実用に向けた開発研究の難しさ

従来の Si 半導体の集積回路では既に基盤技術は確立されています。Si 半導体技術ではロードマップを掲げて年次ごとに達成レベルを更新しています。しかし、Si の集積回路の中にナノ物質の半導体を導入することは現実的ではありません。一方、ナノ物質半導体による単一の FET は作られていて、評価方法も確立しています。しかしナノ物質探索や基礎研究では、回路に実装したときに発生する問題点まで手を出すことは難しいのが現状です。半導体回路の知識とナノ物質科学の融合による研究分野の創設によって社会にアピールできる、目に見える成果が期待できます。

イ) Si デバイスではできないことに挑む

ナノ物質半導体を用いて、今日の Si の集積回路に匹敵する集積度を得ることも現実的ではありません。逆に Si デバイスにできないこと、例えばフレキシブル基板上や、皮膚の上など動く曲面上に半導体デバイスを作ることは、薄いナノ物質が有利です。また、動作電圧、周波数、温度、などを Si デバイスの想定する範囲外で動作をする半導体デバイスをナノ物質で作りに上げることができます。Si デバイスではできない動作に挑むことを目指すべきです。

ウ) 半導体に関する技術基盤を作る

我が国は、かつて半導体の大規模集積回路を作ることを選択せず、メモリーやカスタム IC などの技術を選択しました。その結果、大規模論理回路 (CPU) の微細化に関しては、国内の技術に対する投資がありません。ナノ物質に関して、世界のなかで実績のある我が国が、今後ナノ物質半導体デバイスにおいて一定の立場を確保するために、若手の育成を含めて半導体に関する基盤技術を作る必要があります。

(2) ナノ物質科学の進歩

フラーレン、ナノチューブ、グラフェン、原子層物質、2.5 次元物質などのナノ物質の発見とナノサイエンスの基礎学理の構築は、今日まで大きな成果を得ました。ナノ物質を合成し、提供する研究室・企業も国内外に多く存在し、世界中で活発な研究がおこなわれています。また大学や研究所においてもクリーンルームを共用で有するところも少なくなく、小規模な半導体回路を作る研究基盤はあると考えています。

カーボンナノチューブでは、印刷技術や成膜技術を用いてフレキシブルな基板上に回路を作成したという実績が国内外にあります。また原子層物質では、原子的に平滑な h-BN 基板上に半導体素子を作り、半導体素子としてのトップデータを得ています。

さらに、原子層物質のヘテロ積層、面内ヘテロ構造によって、LED などの発光素子なども実現しています。ナノチューブでは、技術を結集した 16bit CPU などが米国で作られています。

このように、ナノ物質の探索、積層技術、単一デバイスの作成、試料評価、理論による基礎学理は、既存もしくは進行中のプロジェクトによって十分成熟してきたと考えられます。本研究領域は、単一デバイスの作成の次のステップとして「実用化が見えるような半導体回路」実現を目指し、その課題を総合的に分析し、ナノ物質半導体の基盤技術の確立とナノ物質に関する基礎科学の発展を目指します。

2. 想定する研究分野

(1) ナノ物質半導体を含むデバイス構造の基盤技術

今日までに達成している、1次元、2次元物質（ナノ物質）による半導体デバイス構造を出発点とし、技術的に困難な点を基礎学理に基づき克服し、実用化を視野にいれた基盤技術を構築します。ここでデバイス構造とは、半導体素子が動作する回路も含まれますが、集積度は追求しません。

ア) FET を用いた論理回路、LED などの光学素子、熱電素子、MEMS 素子、人工筋肉などを駆動するデバイス構造を含めた基盤技術までを対象とします。

イ) 基盤技術の出発点となるデバイス構造を既に作成実績がある、もしくは初期に実現できることを想定しています。出発点における問題点の抽出や、その後の革新的な基盤技術の提案を想定しています。

(2) ナノ物質半導体デバイスの基本技術と動作原理

今日までにナノ物質半導体デバイスでは多くの実績がありますが、その問題点も指摘されています。この問題点を克服するため、産業界や学会ではいろいろな提案がなされています。それらの提案以外の全く新しい動作原理、アイデアを持つ場合には、その有効性と実現性を科学的観点から客観的に示していただければ、基盤技術の一つとしてテーマになります。しかし、この場合にも（1）のような総合的なチーム構成であることが望まれ、その目標はデバイス構造の基盤技術の創製に科学的に貢献するものであることが必要です。

(3) 戦略目標に合致した、基盤技術に関する想定外の提案

研究対象は、ナノ物質半導体に限られますが、研究領域が想定しない革新的な内容の提案も積極的に採択を検討します。この場合でも、提案するナノ物質半導体が動作し、基本原理に基づき妥当性をもって特性を提示できるようなチーム構成であることが必要です。

3. 選考方針

(1) 基本方針

本研究領域では、基礎科学に基づき、近未来半導体の基盤技術につながるような挑戦的かつマイルストーン（重要な一歩）となるよう、ナノ物質を用いた半導体デバイスを実現できる研究チームを採択します。一つのチームは複数のグループからなり、一つのグループに複数の研究者がいる構成を想定しています。

ア) 総合的なプロジェクトを推進するため、従来の CREST と比較しても多くのグループで構成する大きなチームを積極的に採択したいと思います。試料創製とその提供、試料評価、回路作製などに実績があるグループから構成され、デバイス構造作製の実績があることを期待します。デバイス構造作製がゴールではなく出発点になります。

イ) アの出発点から、どのような基盤技術を得るか、誰もが納得するような客観的な根拠の説明を期待します。国内外のナノ物質科学の分野が発展するために、チーム外とも連携を模索するなど、当該研究分野をリードし異分野とも機敏なコミュニケーションが取れる研究代表者を期待します。

ウ) さらに、これまで実績がない異分野の研究者、また女性研究者や地方大学や企業の若手研究者などを積極的にチームに取り込み、次世代の研究者の育成を考慮されることなど、社会に対する公平な取り組みを期待します。

(2) 成果イメージ

各チームの中間評価時点での成果は、常温常圧で動作する半導体回路の特性を提示できるようなものをイメージします。この時点の成果をもとに、チーム間さらには異なる研究領域間の共同研究などを通じアイデアの共有を実現し、戦略目標に向けて大きな成果にまとまるような力の結集による最終成果を期待します。最終的な成果イメージは、「ナノ物質半導体を用いた回路の実用化が期待できそうだ」、と社会に分かりやすくアピールすることです。最終的な成果イメージの中には、企業との研究を先行して実現し、社会においてもその重要性を認識できるような展開も含まれます。

4. 領域運営方針

本研究領域では戦略目標に関連する、現在進行中の CREST やさきがけとの連携も図っていきます。連携に必要な取り決めは、原則としてチーム間で行いますが、研究領域間やチーム間の成果が共同の成果になるように、必要であれば JST と協力し、研究領域間で相談していきます。これらの取組を通じて、より効率的かつ効果的な領域運営を行い、緊急性が高く強力な技術基盤の出現に柔軟に対応できるように、領域アドバイザーとともに領域を運営します。

本研究領域は研究促進のための国際共同研究を強く推奨します。そのための研究者相互派

遣などの人的交流や国内外のナノ物質に関する関連学会、国際会議におけるシンポジウム開催などの連携を推進します。

5. 留意事項

研究期間は5年半以内とします。研究費総額は1課題あたり2～3億円とします。

最終的に実現可能な提案であるかどうかを判断するために、中間評価時点で成果イメージの達成度を評価します。提案の募集は3年にわたって行います。現在大型予算が進行中の研究者は、研究内容の重複や、研究費の過度の集中を避けるため、申請時期、予算配分も含めてご留意いただくことを希望します。