

大分類 17 ナノカーボン・二次元材料 報告書

取りまとめ: 乗松 航 (早稲田大学)

大分類 17 ナノカーボン・二次元材料では、80 件のポスター発表、140 件の口頭発表があった。秋季講演会では例年 100~110 件程度の口頭発表であったが、北海道大学での開催ということもあり盛況で、初日午前から最終日午後までセッションで埋められたのみならず、3 件の関連シンポジウムと並列にせざるを得ないほどであった。また、大分類 17 では今回から中分類を大幅に再編した。春季講演会までは、17.1 カーボンナノチューブ、他のナノカーボン材料、17.2 グラフェン、17.3 層状物質であったが、17.3 の件数が他と比較して極端に多いなどの問題を改善するために、17.1 成長・成膜・構造制御、17.2 基礎物性、17.3 応用技術とした。またキーワードとして、カーボンナノチューブ、フラーレン、グラフェン、六方晶窒化ホウ素、遷移金属ダイカルコゲナイド (TMDC)、ヘテロ構造、その他・新材料を設定した。再編にあたって混乱も予想されたが、特に致命的な混乱は報告されていない。そのため次回も同じ運用とし、必要があれば修正していく予定である。以下に、各中分類での口頭セッションについて報告する。

17.1 成長・成膜・構造制御

9/8 の TMDC に関するセッションでは、 MoS_2 、 WS_2 、 WSe_2 などの TMD について、スパッタや CVD、さらにポストアニールを組み合わせた成膜技術に関して報告があった。また、膜の構造形成では、ウェーハスケール成膜、3 次元構造への被覆、位置選択成膜、ナノワイヤーテンプレート成膜など多様なアプローチが見られた。解析面では、LFM による MoS_2 のドメイン可視化や、CTR 散乱による MoS_2 /サファイア界面の構造理解など、成膜過程や構造をより深く解明する研究発表があった。全体を通して、活発な質疑応答が行われた。

9/9 のカーボンナノチューブおよびその他ナノカーボン材料の成長・分離技術、分光評価に関するセッションでは、複数の元素を組み合わせた触媒を用いた成長技術が続けて報告され、ナノチューブの構造制御と収量をバランスよく最適化する意図が見受けられた。関連して、収量と直径の支配因子を同定しようとする研究など、基礎的ながら応用を見据えた研究が行われている印象を受けた。カーボンナノチューブ以外にも、長鎖カーボンチェーンや SiC を含む複合的な材料、さらにはカーボンマイクロコイルなどへの展開が見られ、継続的に成長技術を探求する流れとナノカーボン材料の裾野を広げる流れが共存している様子が伺えた。

9/10 の TMDC 関連セッションでは、2D 半導体の薄膜成長、結晶性評価、FET 応用に関する報告が行われた。2D 半導体 FET のコンタクト形成に関する講演では、エピタキシャル膜やアモルファス膜、さらには縮退ドープ半導体などを利用する新規手法が提案された。また、 MoS_2 の三次元積層構造の形成手法に関する報告や、 MoS_2 や WSe_2 などの第 6 族 TMDC とは異なる新奇カルコゲナイド系半導体材料の成長と FET 応用に関する報告もあり、2D 半導体の薄膜成長とデバイス応用の新たな展開を見ることができた。

17.2 基礎物性

9/8のTMDCセッションでは、TMDCヘテロ構造や積層構造の物性解明に関して、 $\text{WSe}_2/\text{MoSe}_2$ でモアレ励起子に由来する光シュタルク効果を狙った超短パルスのポンプ・プローブ測定を行う試みや、ねじれを導入した2~3層の WSe_2 では、垂直電場の印加によってドメイン壁の動きを制御する研究が紹介された。 $\text{MoS}_2/\text{MoO}_x$ では、 NH_3 と NO_2 に対するガス応答の極性が、デバイス構造や層数に応じて変わることが報告された。一方で GeAs ではp型デバイスに向けた表面酸化条件の検討、 FeSe ではマイクロ波共振器による慣性インダクタンス測定、 $\alpha\text{-In}_2\text{Se}_3$ では面外方向のバルク光起電力測定、 SnS では偏光フォトリフレクタンスによるzigzag/armchairの直接遷移エネルギー測定に関して報告されるなど、新たな材料プロセスや物性評価の手法が提案され、活発な質疑が行われた。

9/11午前のセッションでは、遷移金属ダイカルコゲナイド(TMDC)を中心とする二次元物質について、量子輸送、スピン・バレー物性、モアレ超格子、キャリア分布、ドーピング制御、構造変調、デバイス作製およびヘテロ界面評価など、実験・理論を含む11件の講演が発表された。 $\text{WSe}_2/\text{h-BN}$ 量子井戸における共鳴トンネルや、Fe配置秩序に伴う異常ホール効果、cold metalを用いた負性微分抵抗デバイスなど、基礎物性からデバイス応用まで幅広い研究成果が示された。また、バレー緩和、Ising-Rashbaスピン軌道状態、 WTe_2 の1次元モアレ超格子など、新しい物性制御に向けた理論研究も注目を集め、セッション全体を通して活発な議論が行われた。

9/11午後のセッションでは、遷移金属ダイカルコゲナイド(TMDC)およびそのヘテロ構造を対象として、励起子・層間励起子、モアレ励起子、ダークエキシトン、励起子-プラズモン結合、界面電子状態などに関する実験研究を中心に10件の講演が発表された。 WS_2/WSe_2 および $\text{MoSe}_2/\text{MoS}_2$ ヘテロ構造の層間励起子ダイナミクス、架橋型 WSe_2 でのダークエキシトン発光増強など、二次元材料特有の光物性に関する着実な進展が見られた。また、 ReSe_2 の積層秩序に起因するキラリティと円偏光ガルバニック効果や、 MoS_2 界面の電子状態・バンドアライメント、ハイエントロピーTMDCの短距離秩序なども注目を集め、セッション全体を通して活発な議論が行われた。

17.3 応用技術

9/9午前のセッションでは、TMDCの応用を目指し、作製、物性制御、機能開拓について発表が行われた。まず、ロボットによる自動積層やレーザー加工により、再現性の高いデバイス作製が示された。さらに、電極誘起歪み、置換ドーピング、シリサイド形成等によるコンタクト抵抗低減と伝導性・移動度の向上や、極薄ゲート電極、抵抗スイッチング、歪み制御・イオンゲル応用による発光デバイスといった多様な機能素子が報告された。

9/9午後のセッションでは、TMDCの作製・物性制御・素子応用に関する発表が行われた。自動作製や伝導制御をはじめ、フレキシブル素子、SAW、神経模倣素子、ReRAM、高感度ガスセンサなど、多角的な応用技術が報告された。

9/9午後に行われたグラフェンおよび関連する二次元材料の応用技術セッションでは、電子デバイス、光デバイス、センサ、メモリ、超伝導接合など多様なデバイス応用に関する発表が行われた。特に、界面・接合構造の制御や電子輸送特性、光応答特性の理解を通じたデバイス性能向上に関する研究が多く報告された。グラフェンについては、チャネル材料、透明電極、接合電極など

様々な役割で活用されており、目的に応じたデバイス設計の重要性が示された。また、テラヘルツ放射を利用した二次元材料の新しい評価技術の提案もあり、本分野のさらなる発展が期待される内容であった。

9/10 午後のセッションでは、CNT・ナノカーボン材料を用いたガス・湿度センサ、熱電・熱放射デバイス、トランジスタなど、多様な応用展開に関する発表が行われた。SWCNT 薄膜と誘電体の複層化による 850 K での近赤外放射率向上や、カーボン源を用いた欠陥修復による CNT スポンジの導電性向上など、構造・プロセス制御によって CNT の特性を引き出す研究が報告された。また、MOF との複合化によって CO₂/N₂ 選択性と CO₂ 応答性を向上させたガスセンサなど、CNT に新たな機能を付与する材料設計が報告された。全体として、ナノカーボンそのものの物性利用に加え、異種材料との複合化、デバイス構造の最適化、表面・界面制御を組み合わせることで、センサやエネルギー・エレクトロニクス分野への実用展開を目指す研究が旺盛に進められていることが感じられた。