

大分類 17 ナノカーボンでは、通常の講演のほかにチュートリアル（「グラフェンと 2 次元物質の基礎と 2020 年代の重点課題」、斎藤理一郎先生（東北大）、9 月 8 日）とシンポジウム（T17「二次元物質科学：二次元物質と集積構造を拓く新しい科学と応用」世話人：吾郷浩樹（九大）、長汐晃輔（東大）、神田晶申（筑波大）、9 月 10 日）を開催した。また、会期中に開催された JSAP-OSA Joint Symposia 2020 における 4.5 Nanocarbon and 2D Materials をコードシェアセッションとした。いずれも多くの質疑応答がなされ盛況であった。以下では、各中分類について報告する。

17.1 カーボンナノチューブ、他のナノカーボン材料

「成長」関連では、熱 CVD 法、プラズマ CVD 法、SiC 表面分解法に関する報告があった。また、CNT のゲル化のための分散剤の検討、ナノポーラスカーボンの高圧下での水素吸蔵特性の報告もあり、活発な質疑応答が行われた。

「基礎物性」関連では、CNT の光学特性 9 件、電気特性 1 件、機械強度 2 件の発表があった。ほかに、MoS₂ ナノチューブの電子状態、新規 3 次元炭素同素体カーボンナノボックスの力学的特性、圧縮焼結させたカーボンナノホーンの導電特性の発表があった。また、高いパワーファクターをもつ配向 CNT 膜の作製に関する発表がアメリカからなされた。

「デバイス応用」関連では、CNT フィルムの PN 接合を集積化した光熱起電力センサによる、黒体輻射の広帯域パッシブ計測と液体検査への応用が報告された。従来の電磁波検査と比較して光源を必要としない点で画期的であり、今後の様々な分野における応用・実用化が期待される。また、CNT と他の物質の複合材料を用いた新規エレクトロニクス素子に関する発表が行われた。CNT が安価かつ大面積に作製できる利点を生かし、CNT を鎖状に繋げたバンドルと糸、紙、高分子酸を組み合わせた複合材料の作製とそのトランジスタ、アクチュエーター、熱電素子に適用できる事例が紹介された。こちらも今後の実用化が期待される。

17.2 グラフェン

「成長」関連では、ねじれ 2 層グラフェン(Twisted bilayer graphene (TBG))の大面積形成技術の報告が相次いだ。SiC 上エピタキシャルグラフェンの基板のオフ角による TBG 制御、転写手法、CVD 法による TBG 形成の報告があった。まだ理想的な TBG の形成には至っていないが、今後の進展が期待される。また、a 面サファイア上へのグラフェンの直接

成長の報告があった。2 インチ基板でも単層で均一性が高いことから産業化への重要な技術であると期待される。さらに、ロックイン赤外線発熱解析法によりミリメートルサイズの測定視野でグラフェンの欠陥を評価する技術の報告があり、グラフェンの伝導特性の理解に非常に有用であることがデモンストレーションされた。

「基礎物性」関連では、ランダウ準位発光、開放量子ドットといった、高移動度半導体 2 次元電子ガスで行われてきた研究のグラフェンバージョンの報告があり、グラフェンの高品質化が実感された。ほかにも、電極を接続しないグラフェンへの電界効果キャリアドーピング、THz 測定技術を用いた無電極電気特性評価、グラフェン伝導特性を介した hBN 結晶の評価、金属—グラフェン接合の第一原理計算による理解など、興味深い発表が相次いだ。

「デバイス応用」関連では、グラフェンの赤外線センサやガスセンサへの応用についての発表が多くあり、非常に高い性能が出ていることが報告された。また、高品質な単層あるいは 2 層グラフェンのデバイス特性や量子ドットの報告があり、デバイス特性を介して基礎物性の理解が深まっていると感じた。

17.3 層状物質

「成長・構造」関連では、遷移金属ダイカルコゲナイド (TMDC) の成膜技術および分析を中心とした報告がなされた。成膜技術においては、TMDC 合金 (混晶) の作製方法や組成と相分離に関する定量評価の手法が提案された。また、結晶構造 (相転移) に起因する物性をイオン注入や熱処理によって制御したり、ドーパントの導入により p および n 型を制御するなどの新しい取り組みも報告された。そのほか、従来法では層数の同定が難しい hBN に関して、走査型の近接場顕微鏡によりナノスケールで層数が評価できる手法が新たに提案された。積層構造や結晶性に起因して変化する hBN の誘電率の測定にも応用できるものであり、今後の展開を期待できる内容であった。

「基礎物性」関連では、TMDC を中心に種々の層状結晶に関する報告があった。特に、非常に大きな磁気抵抗効果が観測されることで知られる WTe_2 に関して、層数を制御した膜の形成と、角度分解光電子分光による電子構造の観察結果が報告されたことは、 WTe_2 の応用にとっても重要な基礎的知見となるものと考えられる。また、単独の層状物質ではなく、異種あるいは同種の層状結晶を積み重ねた構造に関する講演も多くあった。積層系にとって重要なパラメータとなる積層角度は、これまでの 3 次元的な結晶構造を有する物質系では変化させ難かったものであり、層状物質の特徴を捉えた本研究分野の方向性を反映したものである。

「デバイス応用」関連では、TMDC のガスセンサへの応用や分子吸着による物性変調をテ

ーマとした発表がなされた。MoS₂を用いた NO₂ センサ応用では、光照射によりガスセンシング感度が向上するほかりカバリー特性も改善することが示され、そのメカニズムとともに大変興味深い内容であった。また、表面への分子吸着によりデバイス特性や光物性を変調させる取り組みも精力的に行われている。成長技術セッションにおいて報告された組成・結晶構造制御技術と合わせて、TMDC の物性を制御する応用研究は多岐にわたる広がりを見せており、今後の進展が大いに期待される。また、超薄膜が得られるという層状物質の構造的な特徴を反映し、センサ応用に関する報告が数多くあった。特に、MoS₂を用いた有機化合物センサに関して、ジメチルホルムアミドに対する選択性を有するセンシング特性の報告があり、今後のメカニズム解明が待たれる。また、層状物質の電子デバイス応用先として注目されるトンネル電界効果トランジスタに関して、通常の電界効果トランジスタの動作限界である 60 mV/decade よりも急峻なスイッチング特性を示すデバイスの報告があった。オン電流の増大という課題は残るが、今後の可能性を示す重要な成果と思われる。