

実験概要

K3 IS カメラおよび STEMx システム

タイトル

微分位相コントラスト法を用いた二次元ヘテロ構造の電場マッピング

Gatan社使用装置

K3[®] IS カメラは、リアルタイムの電子カウンティング処理による低電子線照射量観察、高速連続データ取得機能、広視野観察のすべてを実現しています。4D STEM 実験においては、STEMx[®] システムがカメラのフレームレートと走査電子プローブを正確に同期させ、高速データ取得を実現しデータ取得漏れの可能性を排除します。

研究の背景

二次元(2D)ヘテロ構造は、次世代のオプトエレクトロニクスの構造と量子情報科学において様々な特性を実現する材料として開発が進められてきました。これらのヘテロ構造には、グラフェン、ボロンナイトライド(h-BN)、ダイカルコゲナイドといった様々な二次元材料があります。そしてこれらの性能と機能は、様々な二次元界面あるいは接触界面における電荷移動のダイナミクスに大きく依存します。

単なる構造情報だけでなく、4D STEMを用いることでCBED図形の強度変動を測定し短周期と長周期の静電場と電荷の分布を捉えることが可能です。得られた微分位相コントラスト像は、各ビーム位置における電場による入射電子ビームの偏向量を測定することで、試料の静電場と入射電子線との間の相互作用による運動量の伝達を示しています。高速取得が可能なカメラを用いることで、試料に外部バイアスを受けた際にどのように静電プロファイルが変化するかを測定するためのダイナミックな実験方法にこの手法を適用することが出来ます。

材料と測定手法

K3 IS カメラと STEMx システムを4D STEMデータの取得に使用しました。日本電子株式会社製JEM-ARM300F (S)TEMを使用し加速電圧300 kV、ビーム収角30 mradで、電子カウンティング処理を行い約300フレーム毎秒でデータ取得しています。金くし形電極を用いhBN基板上的のMoS₂のモノレイヤーから構成された試料を測定しています(図1a)。電荷のキャリアはhBN絶縁層を通じた量子力学的なトンネル効果が可能であり、半導体MoS₂層へと通過されます。

0と5V時の走査方向と平行なCoMと相当する静電場マップをGatan Microscopy Suite[®]プラグインを用いて生成しました。外部バイアス印加時のトンネル接合の領域の半導体部における電場分布の明瞭な変化が観察されました(図1c、1d)

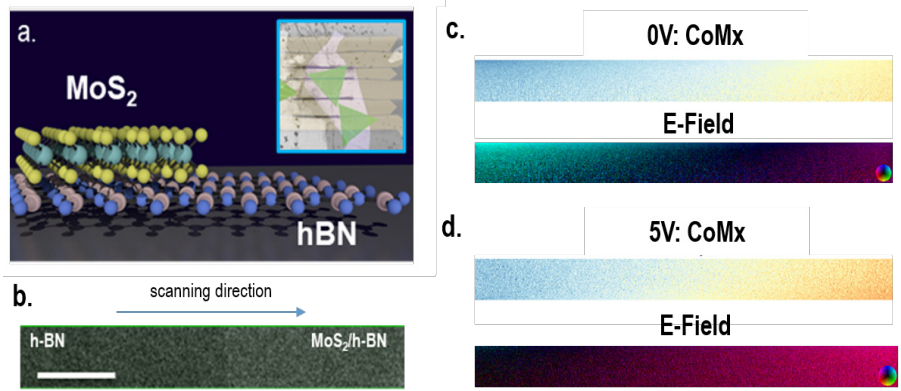


図1 a)解析を行ったMoS₂/hBN試料の模式図。挿入図はhBN(薄紫)上のMoS₂(緑)の最終的な構造の光学像を示す。b)データ取得時間136秒、680×60×1048×1048ピクセルの完全なデータを取得した走査領域。c)外部バイアスが印加されていない場合の試料のCoMと静電場マップ。d)外部バイアス5V印加時の試料のCoMと静電場マップ。カラーホイールのスケールは、CoMから抽出された電場の規格化された強度と方向を示す。

まとめ

K3 ISとSTEMxを組み合わせることで、ハードウェア同期による4D STEMデータが非常に高速(256×256ピクセル時に>3500 fps)、かつ最高のシグナルノイズ比(電子カウンティング処理を使用)で取得可能です。本概要で紹介したように、電場の印加と4D STEM DPCを組み合わせることで多次元の測定が実現し、MoS₂/hBNのヘテロ構造中の静電プロファイルが外部電場によってどのように変化するか調べることが可能となりました。

謝辞

A special thanks to Akshay A. Murthy, Stephanie M. Ribet, Roberto dos Reis, and Vinayak P. Dravid, Northwestern University.

Gatan社は、試料作製から像観察や分析までの電子顕微鏡の能力を拓ける装置とソフトウェアの世界トップレベルのメーカーです。

This material is based upon work supported by the National Science Foundation under Grant No. DMR-1929356. This work made use of the EPIC, Keck-II, and SPID facilities of Northwestern University's NUANCE Center, which has received support from the Soft and Hybrid Nanotechnology Experimental (SHyNE) Resource (NSF ECCS-2025633); the MRSEC program (NSF DMR-1720319) at the Materials Research Center; the International Institute for Nanotechnology (IIN); the Keck Foundation; and the State of Illinois, through the IIN. A.A.M. gratefully acknowledges support from the Ryan Fellowship and the IIN at Northwestern University. Research reported in this publication was supported in part by instrumentation provided by the Office of The Director, National Institutes of Health of the National Institutes of Health under Award Number S10OD026871. The content is solely the responsibility of the authors and does not necessarily represent the official views of the National Institutes of Health.