

Title	MoS2ナノリボンチャネルにおける電子線照射ゲート効果の その場TEM観察
Author(s)	陳, 麗米
Citation	
Issue Date	2025-09
Type	Thesis or Dissertation
Text version	ETD
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10119/20090">http://hdl.handle.net/10119/20090</a>
Rights	
Description	Supervisor: 大島 義文, 先端科学技術研究科, 博士

氏 名	CHEN, Limi
学 位 の 種 類	博士（マテリアルサイエンス）
学 位 記 番 号	博材第 617 号
学 位 授 与 年 月 日	令和 7 年 9 月 24 日
論 文 題 目	<i>In-situ</i> TEM observation of electron irradiation gate effect in MoS <sub>2</sub> nanoribbon channels
論 文 審 査 委 員	大島 義文 北陸先端科学技術大学院大学 教授
	高村 由起子 同 教授
	水田 博 同 教授
	安 東秀 同 准教授
	長汐 晃輔 東京大学 教授

### 論文の内容の要旨

*In-situ* transmission electron microscopy (TEM) provides a powerful platform for probing the electrical behavior of two-dimensional (2D) devices under simultaneous structural observation. However, conventional gating methods are incompatible with electron-transparent TEM holders. Here, we demonstrate a non-contact gating strategy by focusing a scanning transmission electron microscope (STEM) beam onto the SiN<sub>x</sub> substrate adjacent to a few-layer MoS<sub>2</sub> channel.

We successfully fabricated a MoS<sub>2</sub> nanoribbon device on a 50 nm SiN<sub>x</sub> film designed for TEM observation. During characterization, we observed that the drain-source current  $I_{ds}$  increased upon irradiation by a sharp electron probe positioned 15  $\mu\text{m}$  away from the MoS<sub>2</sub> nanoribbon. This increase in  $I_{ds}$  was found to correlate positively with the electron beam current  $I_{beam}$ , eventually reaching a saturation value.

This behavior mirrors the  $I_{beam}$  dependence of positive charge accumulation in the SiN<sub>x</sub> film, attributed to the emission of secondary electrons induced by electron beam irradiation. The results indicate that the accumulated positive charges in the SiN<sub>x</sub> film electrostatically induce negative carriers in the MoS<sub>2</sub> channel, thereby modulating its conductance. Notably, we observed an immediate increase in  $I_{ds}$  concurrent with the initiation of electron beam irradiation and a gradual exponential decay in  $I_{ds}$  with a time constant  $\tau \approx 90$  s after turning the beam off. Such a long time constant could be confirmed by impedance spectroscopy measurements.

These findings provide compelling evidence that the SiN<sub>x</sub> film becomes positively charged due to electron beam irradiation. This charging effect acts analogously to a gate in a field-effect transistor, enabling remote and damage-free modulation of the MoS<sub>2</sub> channel. Thus, sharp electron beam irradiation of the SiN<sub>x</sub> film can function effectively as an indirect gate. This approach presents a valuable technique for evaluating the electrical properties of 2D materials without subjecting them to direct irradiation damage.

**Keywords:** *in-situ TEM, indirect electron beam gating, MoS<sub>2</sub> based-device, dielectric charging, Schottky contact*

## 論文審査の結果の要旨

その場 TEM 計測法は、材料の形状や構造をマイクロメートルスケールから原子スケールまで広いダイナミックレンジで観察しつつ、同時に電気伝導特性を解明できる強力な手法である。電子デバイス測定では一般的に、ソース・ドレイン間の電流をゲート電圧で制御するために 3 端子構成が必要となる。しかし、その場 TEM 計測法における 3 端子測定は技術的難易度が高く、これまでほとんど行われてこなかった。

本研究では、SiNx 薄膜上に作製した金電極の 2 端子（ソース・ドレイン）間に多層 MoS<sub>2</sub>膜チャネルを架橋し、走査型透過電子顕微鏡（STEM）により細く絞った電子プローブを MoS<sub>2</sub>チャネルから離れた SiNx 薄膜領域に照射した際、MoS<sub>2</sub>チャネルの伝導度が顕著に変調する現象を観測した。高エネルギー電子プローブは薄膜を透過するため、照射電子そのものが直接ソース・ドレイン電極やチャネルに流れ込むことはないが、電子照射による電子励起を介した電子が流れ込んでいないことも実験で確認しており、照射領域が間接的なゲートとして機能していることを示した点に新規性がある。

さらに、観察用デバイスのシリコン基板をゲート電極となる金属台上に設置し、ソース・ドレイン電流のゲート電圧依存性を測定した結果、MoS<sub>2</sub>チャネルの伝導キャリアが電子であることを確認した。また、電子プローブ照射によって発生する 2 次電子放出により、SiNx 薄膜が局所的に正に帯電し、その静電効果により MoS<sub>2</sub>チャネル電流が増加するというメカニズムで観測結果を説明できることも明らかにした。これらの結果は、原子層材料ナノデバイス研究における間接ゲート効果の新たな実証として高く評価できる。

審査過程では、既報において同様の系で電子照射によりソース・ドレイン電流が減少するという逆の結果が報告されている点が議論された。この差異については、キャリアタイプの違いや、電子照射領域が広く MoS<sub>2</sub>チャネル自体に直接照射が及んでいた可能性が考えられた。また、静電効果に関わる SiNx 薄膜の電気的特性についても意見が交わされた。また、今後、間接ゲート効果をより確かなものとして結論づけるためには、更なる実験および定量的解析が必要であるとの意見も合った。

本研究はその場 TEM 計測法を応用した新たな分析手法を確立し、原子層材料を用いたナノデバイスの基礎科学および産業応用の両面において重要なインパクトを持つものである。よって、本論文は博士（マテリアルサイエンス）の学位論文として十分に価値あるものと認められる。