[2024206001]

# 化合物半導体を用いた IoT 向けデバイスの耐放射線特性解明 Investigation of radiation tolerance of compound semiconductors for IoT devices

杉山 睦<sup>A)</sup>,小出 祐菜<sup>A)</sup>,金井 綾香<sup>B)</sup>, Mutsumi Sugiyama<sup>A)</sup>, Yuna Koide<sup>A)</sup>, Ayaka Kanai<sup>B)</sup> <sup>A)</sup> Tokyo University of Science <sup>B)</sup> Nagaoka University of Technology

This study investigates the effects of oxygen defects in ZnO on the electrical properties of NiO/ZnO transparent solar cells. ZnO thin films were fabricated via RF magnetron sputtering, with controlled oxygen partial pressure and radiation exposure to modify vacancy (Vo) and interstitial (Oi) defects. JV measurements revealed that Vo reduction improved charge transport, enhancing short-circuit current, while excessive oxygen incorporation introduced deep-level defects, lowering efficiency. Optimization of ZnO thickness (~300 nm) and oxygen partial pressure (0–3%) minimized leakage current. These findings contribute to the defect control strategies for enhancing transparent solar cell performance.

Keyword: NiO, ZnO, semiconductors, solar cells, proton irradiation

## 1. はじめに

近年、持続可能なエネルギー供給に対する関心が 高まり、再生可能エネルギーの活用が求められてい る。特に、IoTデバイスの普及に伴い、これらのデバ イスの低消費電力化が進み、それに対応する新たな エネルギーハーベスト技術の開発が重要視されてい る。その中で、可視光透過型太陽電池は、可視光を 透過させながらエネルギーを収集できるため、建築 物の窓やディスプレイ、センサーシステムなどへの 応用が期待されている。

我々は、IoT 化に向けたモノリシック構造のエネル ギーハーベストデバイスとしての利用を目的とし、 可視光透過型太陽電池の作製を行っている[1,2]。本 研究で作製する可視光透過型太陽電池は、ワイドバ ンドギャップを持つ酸化物半導体を用いており、主 な光吸収領域は紫外光に限定される。そのため、従 来の Si 型太陽電池と比較すると光吸収量は約 3%程 度に留まるものの、近年の IoT デバイスの省電力化 に伴い、十分なエネルギー供給が可能であると考え られる。また、透明であるため、IoT デバイスに取り 付けた際にデザイン性を損なわないという利点があ る。さらに、Si 型太陽電池と比較して光吸収係数が 約 100 倍程度大きく、薄膜化による軽量化が可能で ある。

このような背景のもと、本研究では、p層に NiO を、n層に ZnO を用いた NiO/ZnO 積層構造を採用し ている。この構造の採用理由として、NiO の移動度 が ZnO と比較して低いため、光吸収層には n型の ZnO を使用することが適していると考えられる。し かしながら、p層に関する研究報告は比較的多い一 方で、n層に関する報告は少ない。特に、ZnO の電気 特性は膜厚や酸素分圧比に強く依存し、点欠陥(酸 素空孔: Vo)や酸素インタースティシャル(Oi)が電 気特性に大きな影響を及ぼすことが示唆されている。 酸化物半導体のキャリア輸送特性や欠陥制御は、透 明太陽電池の性能向上に直結する重要な要素であり、 本研究ではこれらの特性を詳細に調査する。

本研究では、陽子線の照射量を変化させることで

ZnO 層の酸素欠陥の量を変化させたときの、 NiO/ZnO 太陽電池の電気特性への影響を検討した。 具体的には、ZnO の膜厚を変化させることによる陽 子線照射の影響、および酸素分圧比の調整による欠 陥制御を行い、それらが太陽電池特性に与える影響 について詳細に解析を行った。また、従来研究と比 較して、透明性と変換効率のバランスを取るための 最適なパラメータを明らかにし、より実用的なデバ イス開発に貢献することを目的としている。

## 2. 実験方法

本研究では、RFマグネトロンスパッタ法を用いて NiO/ZnO 積層構造を作製した[1,2]。酸素欠陥の制御 方法としては、ZnO の膜厚および酸素分圧比を調整 することに加え、陽子線照射を実施し点欠陥の数の 変化を引き起こした。陽子線照射は、意図的な加熱 を行わず、真空中で380kVのイオン注入装置を用い て照射した。陽子線照射量は1×10<sup>14</sup> cm<sup>-2</sup>とした[1,3-6]。作製した NiO/ZnO 太陽電池について、JV 測定、 CV 測定などを行い、電気特性を評価した。

#### 結果及び考察

放射線照射による ZnO 膜厚依存性を調査した結果、 放射線照射によるはじき出し損傷効果により、ZnO 内に点欠陥が生成されることが確認された。特に、 ZnO の空孔形成エネルギーは Zn よりも O の方が小 さいため、Vo に着目し、その影響を評価した。 NiO/ZnO 太陽電池の劣化に対する放射線照射量依存 性を調査したところ、照射量が 10<sup>14</sup> cm<sup>-2</sup> の場合にお いて劣化を伴わず、Vo の影響のみを評価できること が確認された。以下、NiO/ZnO 太陽電池に陽子線を 10<sup>14</sup> cm<sup>-2</sup> 照射した太陽電池の電気特性を示す。

JV 測定の結果、ZnO 膜厚に対する短絡電流密度 (Jsc) 依存性を Figure 1 に示す。Jsc は陽子線照射 前の値で照射後の値を規格化した。ZnO の膜厚が約 300nm 以下の場合に Jsc が減少することが分かった (図中①)。これは、空乏層幅と拡散長の減少により励

# [2024206001]



Figure 1. Relationship between short-circuit current density (Jsc) and ZnO film thickness, obtained from JV measurements. Jsc values were normalized to the pre-irradiation values.



Figure 2. Relationship between the Jsc and oxygen partial pressure ratio during deposition, with the ZnO layer thickness fixed at 380 nm.

起されるキャリアの数が増大したためと推測される。 一方、ZnOの膜厚が約300nm以上の場合にはJscの 値が減少することが確認された(図中②)。これは、拡 散長を超える膜厚となることで再結合する電子が増 加し、光電流が減少したためと考えられる。

次に、ZnOのVoを減少させることを目的とし、 ZnO層成膜中の酸素供給分圧比を調整した結果、Jsc の変化が確認された。Figure 2にZnO層の膜厚を約 380nmに固定し、成膜中の酸素分圧比変化に対する Jsc 依存性を示す。酸素分圧比が 0~3%の範囲(図中 ①)では Vo が減少し、キャリア密度が低下したこと で空乏層幅が広がり、リーク電流が減少したことが 示唆された。一方、酸素分圧比が 3~30%の範囲(図 中②)では Oi が形成され、バンド内に深い準位を形 成したことでキャリア再結合が増加し、短絡電流の 低下が引き起こされたと考えられる。また整流比の 増大が確認され、高抵抗化によりリーク電流の低下 が示唆された。

## 4. 結論

本研究では、NiO/ZnO 太陽電池における ZnO の酸 素欠陥の影響を評価した。放射線照射および酸素分 圧比の調整により Vo および Oi の変化を制御し、そ の結果、ZnO の膜厚や酸素分圧比が短絡電流やリー ク電流に大きく影響を与えることを明らかにした。 特に、ZnOの膜厚が約300nm以下の場合には短絡電 流が増大する一方で、それ以上では再結合が増加し 短絡電流が減少することが分かった。また、酸素分 圧比 0~3%の範囲では Vo が減少し、リーク電流の 低下と整流比の向上が確認されたが、3~30%の範囲 では Oi の増加によりキャリア再結合が進行し、短絡 電流の低下が観察された。本研究の成果は、IoT 化に 向けたエネルギーハーベストデバイスとしての NiO/ZnO 太陽電池の最適設計に貢献するものであり、 さらなる最適化に向けた指針を提供するものである。 今後は、さらなる最適化を目指し、酸素欠陥の詳細 な形成メカニズムの解明や、NiO 層の特性最適化も 含めた全体的なデバイス性能の向上に取り組む予定 である。また、作製プロセスの再現性向上や、より 高効率なエネルギーハーベストデバイスの開発に向 けた研究を継続する。

# 参考文献

- N. Kato and M. Sugiyama, Jpn. J. Appl. Phys. 59, 101004 (2020).
- [2] N. Kato and M. Sugiyama, Jpn. J. Appl. Phys. 60, 048001 (2021).
- [3] Y. Hirose, M. Warasawa, I. Tsunoda, K. Takakura, and M. Sugiyama, Jpn. J. Appl. Phys. 51, 111802 (2012).
- [4] I. Khatri, T. Y. Lin, T. Nakada, and M. Sugiyama, Phys. Status Solidi RRL 13, 1900519 (2019).
- [5] M. Sugiyama, S. Aihara, Y. Shimamune, and H. Katagiri, Thin Solid Films. 642, 311 (2017).
- [6] T-Y. Lin, C-F. Hsieh, A. Kanai, T. Yashiro, W-J. Zeng, J-J. Ma, S-F. Hung, and M. Sugiyama, Journal of Materials Chemistry A, 12, 7536 (2024).