

Ge イオン注入 ZnO バルク単結晶の核反応分析：酸素格子変位の評価**Nuclear reaction analysis of Ge ion-implanted ZnO bulk single crystals****: The evaluation of the displacement in oxygen lattices**法政大学¹, 大阪教育大学², 産総研³○上岡 一馬¹, 尾賀 孝宏¹, 井澤 佑介¹, 栗山 一男¹, 串田 一雅², 木野村 敦³Hosei Univ.¹, Osaka kyouiku Univ.², AIST³○Kazuma Kamioka¹, Takahiro Oga¹, Yusuke Izawa¹, Kazuo Kuriyama¹, Kazumasa Kushida²,Astushi Kinomura³

E-mail: kazuma.kamioka.8z@stu.hosei.ac.jp

我々は ZnO バルク単結晶中に Ge イオン注入を行うと n 型伝導を示し、比抵抗が $10^3 \Omega \text{cm}$ (未注入) から $10^{-2} \Omega \text{cm}$ (注入直後) へと低抵抗化することを明らかにしてきた[1]。ラザフォード後方散乱 (Rutherford Backscattering Spectrometry: RBS) 測定において、注入直後の試料で約 50% の Zn 原子の変位が観測された。さらに表面から 60–180 nm におけるチャネリングディップの半値角測定により、注入直後の試料において、Zn 原子が格子中で約 $0.7 \text{\AA}$ 変位していることを明らかにした。この結果から、低抵抗化の起源の 1 つとして、Zn の格子間原子 (Zn_i : 伝導帯下 $\sim 30 \text{ meV}$ [2]) であることが考えられる[3]。一方、酸素原子は軽元素であるため、RBS 法では検出が困難であり格子変位の評価を行うことができない。本研究では核反応分析 (Nuclear Reaction Analysis: NRA) を使用して酸素原子の格子変位の評価を行った。

TRIM シミュレーションに基づき、100–250 nm の注入深さまで均一な濃度プロファイル ($2.6 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$) が得られるように Ge イオン注入を行った。注入エネルギーは 160、270、520 keV である。出発材料は水熱合成法で成長させた ZnO バルク単結晶を使用し、注入後 Ar 雰囲気中 800–1000 °C で 30 分間熱処理を行った。

NRA 法に用いた分析ビームは重水素 (D_2^+) で、加速エネルギー 2.6 MeV である。NRA 測定の結果から、 $^{16}\text{O}(\text{d}, \text{p}_1)^{17}\text{O}$ 、 $^{16}\text{O}(\text{d}, \text{p}_0)^{17}\text{O}$ 、 $^{12}\text{C}(\text{d}, \text{p})^{13}\text{C}$ に起因するピークが検出された。 $^{16}\text{O}(\text{d}, \text{p}_1)^{17}\text{O}$ ピークの最小収量に着目すると、未注入、注入直後、1000 °C アニール試料でそれぞれ 24.2、78.1、68.8 % であった。さらに最小収量から酸素原子の変位濃度を算出すると、注入直後の試料で 71 %、1000 °C アニール試料で 59 % であった。これらの結果から、注入直後および 1000 °C アニール試料では酸素原子の格子変位が存在し、熱処理後も酸素の格子変位の完全な回復は認められない。

フォトルミネッセンス (PL) 法では、注入直後および 1000 °C アニール試料において、530 nm、580 nm にそれぞれブロードなピークが観測された。注入直後のピークは主に酸素原子空孔 V_O (527 nm) に起因しており、1000 °C アニール試料では主に格子間酸素 O_i (580 nm) が起因している[3, 4]。したがって、注入直後および 1000 °C アニールにおいて、酸素欠陥の存在が明らかとなった。この結果は、NRA 法による酸素原子の格子変位の存在と一致する。

- [1] K. Kamioka, T. Oga, Y. Izawa, K. Kuriyama, and K. Kushida, in proceedings of the 31st International Conference on the Physics of Semiconductors, Zurich, Switzerland, 29 July to 3 August, 2012 (to be submitted).
- [2] D.C. Look, J.W. Hemsky, J.R. Sizelove, Phys. Rev. Lett. **82**, 2552 (1999).
- [3] T. Oga, Y. Izawa, K. Kuriyama, K. Kushida, and A. Kinomura, J. Appl. Phys. **109**, 123702 (2011).
- [4] X. L. Wu, G. G. Siu, C. L. Fu, and H. C. Ong, Appl. Phys. Lett. **78**, 2285 (2001).