

[H25-1]

高速重イオンの照射過程解明と固体材料物質改質

STUDY OF COLLISION PROCESSES AND MATERIAL PROPERTY MODIFICATION USING SWIFT HEAVY ION BEAMS BY THE JAEA TANDEM ACCELERATOR

今井誠^{#,A)}, 富田成夫^{B)}, 松波紀明^{C)}, 中島薫^{D)}, 木村健二^{D)}, 岩瀬彰宏^{E)},
椎名陽子^{B)}, 野本昌成^{B)}, 林宏昭^{D)}, 松崎勝太^{D)}, 山本優輝^{E)},
笹公和^{F)}, 川面澄^{G)}, 小牧研一郎^{H)}, 柴田裕実^{I)}, 松田誠^{J)}, 石川法人^{J)}, 左高正雄^{F,J)}, 岡安悟^{J)}, 高廣克己^{G)}

Makoto Imai^{#,A)}, Shigeo Tomita^{B)}, Noriaki Matsunami^{C)}, Kaoru Nakajima^{D)}, Kenji Kimura^{D)}, Akihiro Iwase^{E)},
Yoko Shiina^{B)}, Masanari Nomoto^{B)}, Hiroaki Hayashi^{D)}, Syota Matsuzaki^{D)}, Yuki Yamamoto^{E)},
Kimikazu Sasa^{F)}, Kiyoshi Kawatsura^{G)}, Ken-ichiro Komaki^{H)}, Hiromi Shibata^{I)},
Makoto Matsuda^{J)}, Norito Ishikawa^{J)}, Masao Sataka^{F,J)}, Satoru Okayasu^{J)}, Katsumi Takahiro^{G)}

^{A)} Department of Nuclear Engineering, Kyoto University

^{B)} Institute of Applied Physics, University of Tsukuba

^{C)} School of Engineering, Nagoya University

^{D)} Department of Micro Engineering, Kyoto University

^{E)} Department of Materials Science, Osaka Prefecture University

^{F)} Tandem Accelerator Complex, University of Tsukuba

^{G)} Department of Chemistry and Materials Technology, Kyoto Institute of Technology

^{H)} Atomic Physics Laboratory, RIKEN

^{I)} Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University

^{J)} Japan Atomic Energy Agency (JAEA)

Abstract

When even a single swift heavy ion in the MeV/u energy range irradiates solid matter, unique characteristic features that cannot be brought about by any other means, like photon or electron impacts, are exhibited as a result of cumulative effects of several consecutive elastic and inelastic collisions between the projectile ion and target atoms. Such interaction of energetic ions with materials is the basis of a wide range of applications, like materials analysis, materials modification and so on. The present study is intended to clarify those collision processes inside the solid target as well as to quest for controlled modification of physical properties of solid materials. In collisions of swift heavy ions, energies transferred to target electrons via inelastic processes are much larger than those to target nucleus via elastic collisions by three orders of magnitude. Such target-electron excitations are considered to play a role in materials modification, as they take place as deep as an ion range of 10 μm inside the solid. Since each inelastic collision process is strongly affected by the charge state and electronic state of the projectile ion, information on the distribution and evolution of charge states in matter is essential for the basic study and applications of heavy-ion irradiation. Another cumulative effect of collisions of secondary ions and electrons, kicked out from the target by the projectile ions, cannot be neglected. It is also known that the intensity of such secondary particles is affected by the cluster effect, brought by vicinage effects of projectile ions. The energy of the excited target-electrons is transferred to the target lattice and provides ultrafast local heating along the ion path, through which a cylindrical damage region of several nm of diameter, *i.e.*, an ion track, is formed when the electronic energy is larger than a material-dependent threshold value. Many studies have been pursued for direct observation of ion tracks for crystal targets, but are rather limited for amorphous targets. In the present study, we extensively continue our previous efforts by measuring equilibrium and pre-equilibrium charge-state evolution for C ions after C-foil penetration, an observation of cluster effects in convoy electron yields for C-cluster ions formed in C-foils, tracing the temperature of ion tracks in amorphous Si film in ultrafast time scale, and an observation of high-energy ion impact effects on atomic lattice structure, electrical resistivity, and magnetic properties of Mn-doped ZnO semi-conductor and sintered HfO₂ non-magnetic oxides. We have achieved a quasi-equilibrium feature in charge-state evolution for C^{q+} ($q = 2-4$) projectile ions, the cluster effects in convoy electron yields formed in thin ($< 10 \mu\text{g}/\text{cm}^2$) C-foil targets, a clear demonstration of temperature distribution of ion tracks in amorphous Si film as well as changes in X-ray diffraction intensity, electrical resistivity, and magnetic susceptibility of Mn-doped ZnO, and those in lattice structure and ferromagnetism induction of HfO₂.

Keyword: high-energy heavy ion, equilibrium and pre-equilibrium charge-state distribution, convoy electron, cluster effect, thermal spike, ion track, Mn-doped ZnO, HfO₂, atomic structure, lattice structure, resistivity, magnetic property

[H25-1]

1. 本連携重点研究課題の目的

高速重イオン照射にともない、固体標的内では標的構成原子ならびに入射イオン自身の励起、電離、電子捕獲・損失などの非弾性散乱と弾性散乱が繰り返され、その重畳により他の手法ではなし得ない特徴的な効果が起こるため、材料分析、材料改質など広い分野に応用されている^[1]。本研究では、固体標的内におけるこれらの基礎過程の未解明部分を明らかにしつつ、アモルファス、酸化物、窒化物などの固体材料物性改質および物性制御への応用を探索することを目的とする。

高速重イオンの場合、非弾性過程による電子的阻止能が弾性衝突阻止能よりも 3 桁以上大きく、さらに飛程も 10 μm 程度であることから電子励起効果が固体材料表面から内部にまで及び、これが材料改質に有効に働いていると考えられる。実際、多くの酸化物、窒化物等の絶縁性・半導体セラミックスで、電子励起スパッタリング等の電子励起効果が観測されている^[2,3]。電子励起効果を引き起こす個々の非弾性過程は、衝突イオンのエネルギー、価数、電子準位の状態などに強く依存し、さらに個々の非弾性過程の衝突頻度によっても電子励起の結果が異なる。また、重イオン衝突により電離・放出された二次電子が標的の電子と衝突する二次衝突の影響も無視できない。入射イオンの近接効果により、二次粒子の強度が増加するクラスター効果も知られつつある^[4]。これら一次・二次粒子の非弾性散乱により標的の電子系に付与されたエネルギーにより形成されるイオントラックについて、結晶標的に対しては直接観察による研究が盛んに行われているが、アモルファス標的ではラマン分光などの間接的手法による研究に限定されている。我々は H19～H21 年度ならびに H22～H24 年度の連携重点研究において、特に電子励起効果に注目して、その基礎過程解明と材料物性改質への研究を進めており、可視光透明酸化物 (Al, In ドープ ZnO) における 4 桁以上の電気伝導率の増加^[5,6]や、 CeO_2 の電子励起効果^[7]を観測した。また、多くの酸化物、窒化物における電子励起効果を観測し、酸化物では 1 入射イオン当たり 1000 個以上の原子変位を生成し、固体材料内部の直径 10 nm 程度の領域に原子変位跡を残すことを明らかにした。

本研究では上記の現状と成果を踏まえ、高速重イオン衝突基礎過程解明のため、先行連携重点研究にて実施した固体標的透過後の高速重イオンの電荷分布変化測定^[8-10]に加え、固体標的衝突による励起状態からの二次電子放出機構におけるクラスター効果を通して、固体内透過中でも多くの電子を持つ重イオン（多体電子系入射イオン）の原子レベルでの衝突素過程解明を目指す。また、材料物性制御を目指して、固体表面に特徴的な二次粒子放出率、表面近傍及び内部の電子・原子構造変化、表面形態変化を観測し、原子レベルでの衝突過程研究結果とあわせて考察することによって、従来直接観測出来なかったアモルファス窒化物中のイオントラックの形成機構、

磁気特性変化などの物性改質・物性制御を探索する。

2. 各サブ・小テーマの実験と結果・考察

2.1 物質透過後の高速重イオン電荷分布変化

高速重イオンを物質に照射すると、入射イオンが標的構成原子と各種弾性・非弾性衝突を繰り返し、その重畳効果により光子入射や電子入射では見られない特徴的な変化がもたらされる。これらの基礎衝突過程は、イオンの価数と電子状態に強く依存するため、物質中を透過する高速イオンの電荷分布とその変化を知ることは、照射効果研究のため必要不可欠である^[1]。イオンが過剰な電子を持つ場合、衝突により電子損失が起きやすく、逆に過少な電子しか持たない場合、衝突により標的から電子捕獲しやすくなるため、物質透過中のイオン価数は、その入射価数に依存しない一定の平衡状態分布に達する。本研究では、極薄炭素膜 ($\sim 0.9 \mu\text{g}/\text{cm}^2$) 標的を実現することで、これまで研究例が少なかった平衡化以前の非平衡電荷分布や、平衡長すなわち平衡化に要する標的長に関する実験を可能とし、2.0 MeV/u 炭素イオンビームの非平衡および平衡電荷分布を測定した^[11]。

実験は、原子力機構原子力科学研究所タンデム加速器にて、+2～6 価の 2.0 MeV/u 炭素イオンビームを膜厚 0.9～98 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ の炭素薄膜に照射し、透過後の炭素イオン電荷を高性能スペクトロメータ ENMA により測定することで実施した。また、結果について考察するため、1 電子捕獲と 1 電子損失のみを考慮した価数分布レート方程式

$$\frac{dF_q}{dx} = \sum_{q'} F_{q'}(x) \sigma_{q'q} - F_q(x) \sum_{q'} \sigma_{qq'},$$

$$\sum_q F_q(x) = 1,$$

を解くとともに、1 電子捕獲・損失に加えて電子励起・脱励起をも考慮した ETACHA コード^[12,13]によるシミュレーションを行った。ただし、 $F_q(x)$ は衝突深さ x における q 価イオン収量、 $\sigma_{qq'}$ は q 価から q' 価へ価数を変える電子捕獲 ($q > q'$)、電子損失 ($q < q'$) 衝突断面積である。実験と計算により得られた電荷分布の平均値と分布巾を Fig. 1 に示す。入射価数が 2+, 3+, 4+ のとき、電荷分布、平均価数、電荷分布巾ともに、膜厚 5.7 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ にて一定の値となった後、膜厚 9.9 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ まで同期的に変化して最終的な平衡値に至るのに対し、入射価数が 5+, 6+ のときは、途中で一定値を示すことなく膜厚 9.9 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ での最終的な平衡値に向かって独立に変化する様子が観測された。この現象は、K 殻電子と L 殻電子が関わる電子過程の断面積の違いから起こると推定され、衝突素過程に K 殻電子が関わるような高速イオン照射においては、従来信じられてきた平衡長を再考する必要があることを示している。

[H25-1]

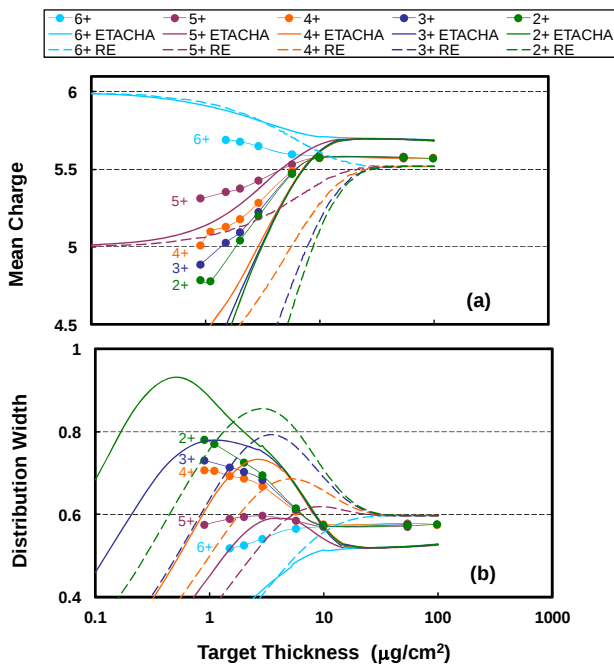


Figure 1. (a) Mean charge-state and (b) distribution width for 2.0 MeV/u C^{q+} ($q = 2-6$) incident ions after passing through C-foil targets. Filled circles are measured values, whereas the full and dashed lines denote calculations using the ETACHA code^[12,13] and solution of the rate equations accounting for single-electron transfers (RE), respectively. Thin lines with the experimental values are guides only.

2.2 クラスター照射による二次電子分光

高速重イオンを物質に照射したとき繰り返される素過程の中には、標的原子や標的中の電子が叩きだされることによって二次粒子を発生するものがあり、これら二次粒子、特に高速電子と標的物質との二次衝突により標的の電子系に与えられるエネルギーは無視できない。本研究で対象としている MeV/u エネルギーの重イオン衝突における主な高速二次電子発生機構は、入射イオンが標的原子の連続状態に電子損失、あるいは入射イオンが標的原子の連続状態から電子捕獲することにより生ずる、入射イオンとほぼ等速にて前方（ゼロ度方向）に放出されるコンボイ電子と呼ばれる電子である。コンボイ電子の発生機構については多くの研究がなされてきたが、本研究では、入射イオンの近接効果による発生機構の変化、すなわちクラスターイオンビームによる物質改質効果の効率化に着目し、炭素クラスターイオンを炭素薄膜に照射した際のコンボイ電子収量を測定した。

実験では、原子力機構原子力科学研究所タンデム加速器より得られる原子あたり 3.5 MeV/atom の炭素クラスターイオン C_n^+ を種々の膜厚の炭素薄膜に入射し、その際に発生するコンボイ電子の収量を、ゼロ度電子分光器を用いてエネルギー分析することにより測定した。Fig. 2 に実験によって得られた単原子

あたりのコンボイ電子収量の膜厚依存性を示す。十分厚い膜厚においては、我々の報告^[4]と同様に、入射原子数あたりのコンボイ電子の収量は、ほぼクラスターサイズに対して比例する傾向が見られたが、薄い膜厚においては、クラスター照射の場合に収量の増加が見られた。これは固体内を輸送中のコンボイ電子が、近接した距離を同時に透過する複数の入射粒子からのクーロン力を受けることによって、その脱出長が増加しているためと考えられる。

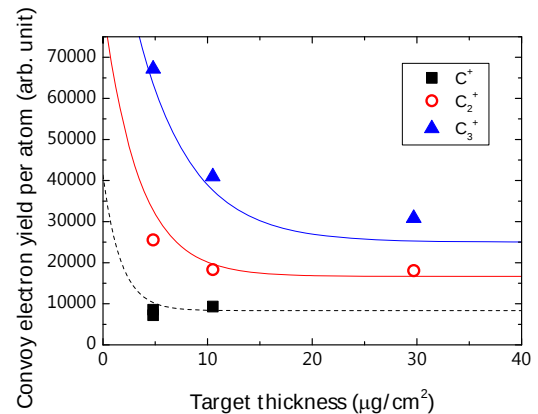


Figure 2. Convoy electron yields for 3.5 MeV/atom C^{+} , C_2^{+} , and C_3^{+} ions as a function of C-foil thickness. Lines are eye-guiding only.

2.3 高速重イオン照射点近傍の温度評価

高速重イオン照射により生じるイオントラックの生成メカニズムは、非弾性熱スパイク (i-TS) モデル^[14]やクーロン爆発モデルなどが提案されているが、いずれのモデルが正しいのかはまだ明らかになっていない。i-TS モデルでは、イオンのエネルギーが電子系の励起に費やされた後に、電子-フォノンカップリングにより原子系に伝わり、イオンの軌道に沿って高温の領域が生じ、温度が融点を超えるとイオントラックが形成されると説明されている。しかしながら、温度の上昇はピコ秒程度の短時間に、ナノメートル程度の領域で生じるため、実際に温度を評価することは困難である。我々は、金属ナノ粒子がその融点を超えて加熱されると表面から脱離することを利用して、高速重イオンの照射点近傍の温度上昇を評価する方法を提案し、それが実際に可能かどうかを検討した^[15]。

Fig. 3 に 420 MeV の Au イオンを金および白金のナノ粒子を蒸着したアモルファス窒化シリコン (a-SiN) の薄膜に照射したときの、入射表面と出射表面の温度上昇を測定した結果をプロットした。比較のため、i-TS モデルで計算した温度分布を実線で示してある。両者は良く一致しており、i-TS モデルは、高速重イオン照射時の温度上昇を良く再現できている。

[H25-1]

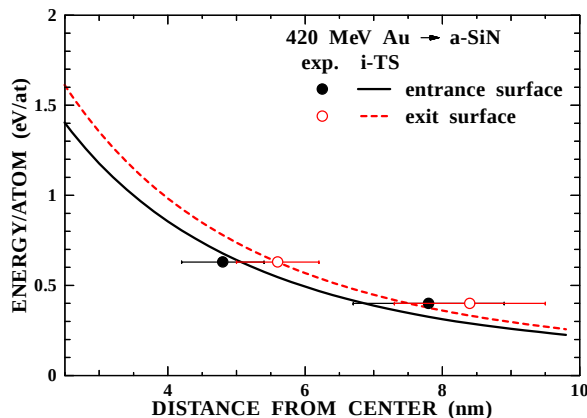


Figure 3. Temperature distributions of a-SiN films around the impact position of 420 MeV Au ions. Filled and open circles are experimental values at the entrance and exit surfaces, respectively, whereas dashed and full curves denote calculated distributions by the inelastic thermal spike (i-TS) model.

2.4 Mn ドープ ZnO 薄膜の高速重イオン照射効果

高速重イオン照射においては、電子のエネルギー付与率が弾性衝突よりも 3 桁以上大きく、多くの酸化物・窒化物等の絶縁性・半導体セラミックスで、電子励起スパッタリング等の電子励起効果が観測されており^[2,3]、電子励起効果の理解が高速重イオンによる非金属材料の物性改質への応用に資すると期待されている。本研究では、半導体酸化物である Mn ドープ ZnO 薄膜の高速重イオン照射による電気抵抗、原子構造、磁気特性変化を研究した^[16]。ZnO はウルツ鉱型六方晶構造、ワイドバンドギャップ (3.4 eV) の透明 n 型半導体と知られており^[17-19]、微量元素注入により透明性を保持したまま高電導率が得られることから、透明電極への応用が検討されている^[20]。

RF マグネトロンスパッタ法にて SiO₂ ガラス基板の上に作成した Mn ドープ ZnO 薄膜^[21]を、原子力機構東海研究所タンデム加速器より得られる 100MeV Xe, Ni イオンで照射した。比較のため、名古屋大学 200 kV 加速器にて、弾性衝突効果が支配的となる 100 keV Ne, N イオン照射した試料も用意した。

100 MeV Xe, 90 MeV Ni イオン照射試料の X 線回折[XRD]強度、ロックングカーブの半値幅、格子定数変化のイオン照射量依存性を Fig. 4 に示す。照射量 10^{12} cm^{-2} 以下では XRD へのイオン照射の影響は見られないが、照射量増加とともに XRD 強度は単調に減少し、ロックングカーブの半値幅は単調に増加しており、これらの変化にイオン種依存性がみられる。照射量 $2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 以下では格子定数が減少し、それ以上では格子定数が一定値またはわずかに増加に転じているが、格子定数減少には顕著なイオン種依存性が見られ、格子緩和（格子定数がバルク値に近づく）が格子定数減少の一因と考えられる。100 keV N イオン照射の場合、XRD 強度の減少が見え始めるのは照射量 10^{16} cm^{-2} であり、100 MeV Xe の場合

よりはるかに大きい。100 MeV Xe と 100 keV N の弾性衝突阻止能が同程度であることから、高速重イオン照射効果は電子の阻止能即ち電子励起効果であると言え、100 MeV Xe と 90 MeV Ni イオン照射効果の差異も定性的には電子的阻止能の違いで説明できる。

Fig. 5 に Mn ドープ ZnO の電気抵抗変化を示す。未照射試料の抵抗率 ($\sim 1 \text{ M}\Omega\text{cm}$) は、イオン照射により Al ドープ ZnO^[5]、In ドープ ZnO^[6]と同様な抵抗率減少 (4 桁程度) を示す。低エネルギーイオン照射 (100 keV Ne, 30 keV N 等、弾性衝突効果が支配的) にも同様な抵抗減少がみられるが、イオン種、エネルギーによって抵抗減少率が異なる。

未照射及びイオン照射した Mn ドープ ZnO 薄膜 (C-Al₂O₃ 基板) の磁気感受率 χ の温度依存性はキュリー則 $\chi = \chi_0 + C/T$ (C はキュリー定数) に従っており (Fig. 6(a))、本研究で用いた試料は常磁性である。イオン照射 (照射量 10^{12} cm^{-2}) によって C が未照射の約 1/2 になる (Fig. 6(b))。この照射量では原子構造変化は見られない (Fig. 4) ので、磁気特性と原子構造変化の関連性は低い。

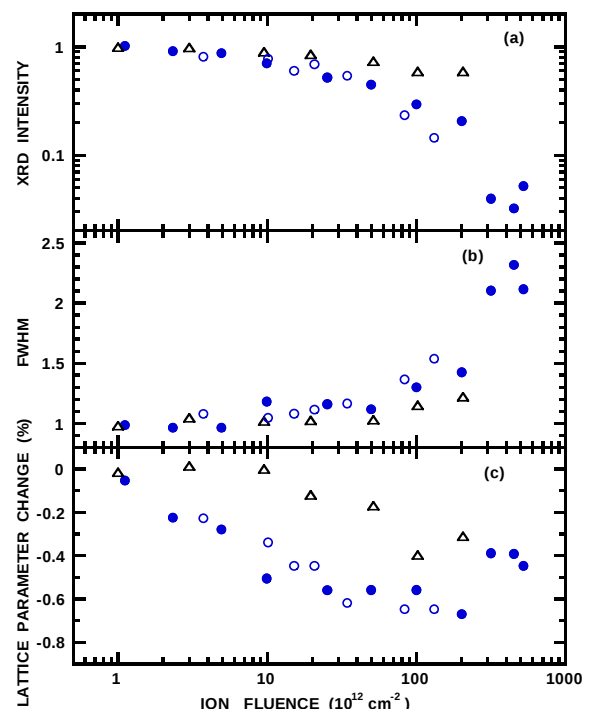


Figure 4. (a) XRD intensity normalized to un-irradiated intensity, (b) FWHM of the XRD rocking curve normalized to un-irradiated FWHM, and (c) change in c-lattice parameter as functions of ion fluence of 100 MeV Xe on Mn-doped ZnO/SiO₂ (●), 90 MeV Ni on Mn-doped ZnO/SiO₂ (Δ) and 100 MeV Xe on Mn-doped ZnO/c-Al₂O₃ (○).

[H25-1]

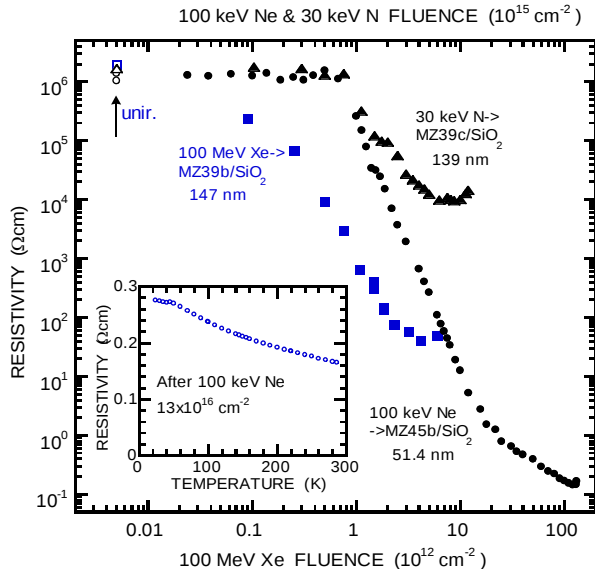


Figure 5. Resistivity of Mn-ZnO film as a function of ion fluence of 100 MeV Xe (■), 100 keV Ne (●), and 30 MeV N (▲). Open symbols indicate resistivity of un-irradiated film.

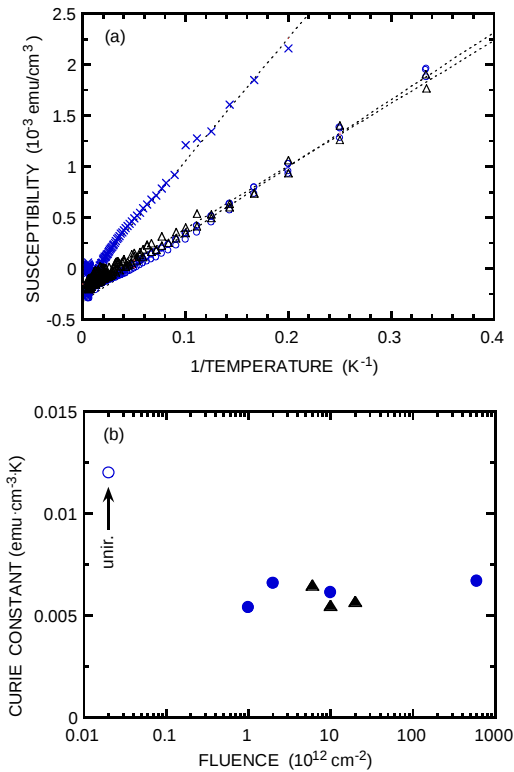


Figure 6. (a) Magnetic susceptibility of Mn-ZnO vs $1/T$, T being the temperature (K), for un-irradiated (x), 100 MeV Xe at $2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ (o) and $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ (Δ). Applied magnetic field is 0.1-1 kOe and substrate contribution is subtracted. (b) Curie constant vs fluence of 100 MeV Xe ion (●), and 90 MeV Ni ion (▲).

2.5 高速重イオン照射した HfO_2 の結晶構造と磁性

格子欠陥を多く含む非磁性酸化物において、磁性が発現する現象が最近多く見出されている^[7,22]。本研究では、格子欠陥を制御良く導入できる高速重イオン照射による HfO_2 の磁性や結晶構造変化を調べた。

HfO_2 焼結体を原子力機構原子力科学研究所タンデム加速器を用いて 200 MeV Xe イオン照射した。照射試料は、X 線回折[XRD]測定により結晶構造を、また SQUID 磁束計を用いて磁性を評価した。

照射による XRD スペクトルの変化を Fig. 7 に示す。 HfO_2 は、照射前は単斜晶であるが、イオン照射により、立方晶、または正方晶に変化することがわかる。Fig. 8 に磁場—磁化曲線 (M-H カーブ) の照射による変化を示す。 HfO_2 は、照射前は殆ど磁化は見えないが、照射により、強磁性を示す M-H カーブが出現する。この現象は CeO_2 の場合と類似しているが、発現する磁化は、 CeO_2 と比べると小さい。今後、磁性の発現機構を詳細に調べる。

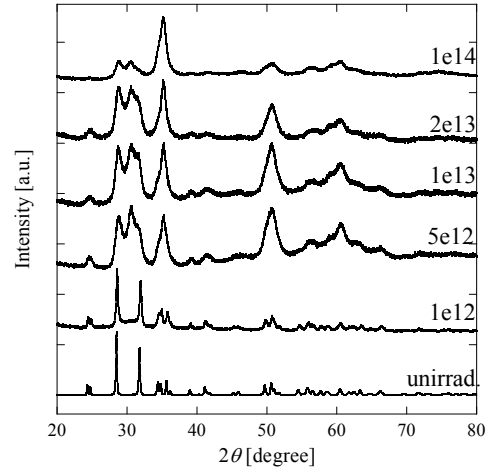


Figure 7. XRD spectra for un-irradiated and irradiated HfO_2 .

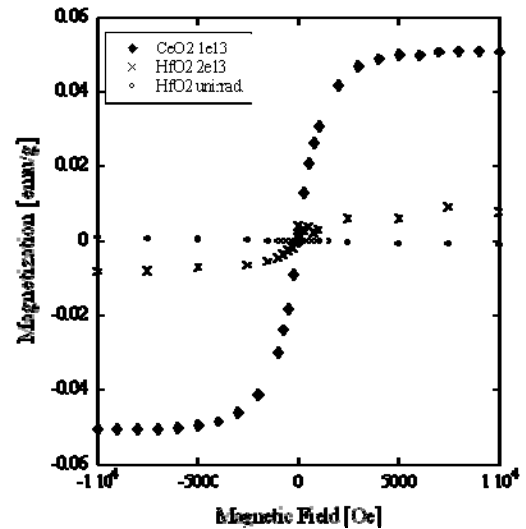


Figure 8. Magnetization-external magnetic field curves for un-irradiated and irradiated HfO_2 and irradiated CeO_2 .

[H25-1]

参考文献

- [1] H. D. Betz, “Charge States and Charge-Changing Cross Sections of Fast Heavy Ions Penetrating Through Gaseous and Solid Media”, *Rev. Mod. Phys.* 44, 465, 1972
- [2] N. Itoh, A. M. Stoneham, “Materials Modifications by Electronic Excitations”, Cambridge University Press. 2001
- [3] N. Matsunami et. al., “Electronic sputtering of CuO films by high-energy ions”, *Nucl. Instrum. Meth.* B314, 55, 2013
- [4] S. Tomita et. al., “Nonadditivity of convoy- and secondary-electron yields in the forward-electron emission from thin carbon foils under irradiation of fast carbon-cluster ions”, *Phys. Rev.* A73, 060901(R), 2006
- [5] H. Sugai et. al., “Electrical conductivity increase of Al-doped ZnO films induced by high-energy-heavy ions”, *Nucl. Instrum. Meth.* B250, 291, 2006
- [6] N. Matsunami et. al., “Electrical property modifications of In-doped ZnO films by ion irradiation”, *Nucl. Instrum. Meth.* B268, 3071, 2010
- [7] T. Kishino et. al., “Effect of 10 MeV iodine ion irradiation on the magnetic properties and lattice structure of CeO₂”, *Jpn. J. Appl. Phys.* 53, 05FC07, 2014
- [8] M. Imai et. al., “Charge state distribution and its equilibration of 2 MeV/u sulfur ions passing through carbon foils”, *Nucl. Instrum. Meth.* B230, 63, 2005
- [9] M. Imai et. al., “Charge state evolution of 2 MeV/u sulfur ion passing through thin carbon foil”, *Nucl. Instrum. Meth.* B256, 11, 2007
- [10] M. Imai et. al., “Equilibrium and non-equilibrium charge-state distributions of 2 MeV/u sulfur ions passing through carbon foils”, *Nucl. Instrum. Meth.* B267, 2675, 2009
- [11] M. Imai et. al., “Equilibrium and non-equilibrium charge-state distributions of 2.0 MeV/u carbon ions passing through carbon foils”, *Nucl. Instrum. Meth.* B354, 172, 2015
- [12] J. P. Rozet et. al., “Charge-state distributions of few-electron ions deduced from atomic cross sections”, *J. Phys.* B22, 33, 1989
- [13] E. Lamour et. al., “Extension of charge-state-distribution calculations for ion-solid collisions towards low velocities and many-electron ions”, *Phys. Rev.* A92, 042703, 2015
- [14] M. Toulemonde et. al., “Experimental phenomena and thermal spike model description of ion tracks in amorphisable inorganic insulators”, *Mat. Fys. Medd.* 52, 263, 2006
- [15] K. Nakajima et. al., “Tracing temperature in a nanometer size region in a picosecond time period”, *Scientific Reports* 5, 13363, 2015
- [16] N. Matsunami et. al., “Ion induced modifications of Mn-doped ZnO films”, *Nucl. Instrum. Meth.* B365, 191, 2015
- [17] W. Hirschwald, “ZINC OXIDE”, *Current Topics in Materials Science* Vol. 7, North-Holland, 1981
- [18] S. J. Pearton et. al., “Recent progress in processing and properties of ZnO”, *Prog. Mater. Sci.* 50, 293, 2005
- [19] U. Ozgur et. al. “A comprehensive review of ZnO materials and devices”, *Appl. Phys. Rev.* 98, 041301, 2005
- [20] T. Minami et. al., “Group III Impurity Doped Zinc Oxide Thin Films Prepared by RF Magnetron Sputtering”, *Jpn. J. Appl. Phys.* 24, L781, 1985
- [21] N. Matsunami et. al., “Growth of Mn-doped ZnO thin films by rf-sputter deposition and lattice relaxation by energetic ion impact”, *Appl. Surf. Sci.* 350, 31, 2015
- [22] T. Koide et. al., “Magnetic modification at sub-surface of FeRh bulk by energetic ion beam irradiation”, *J. Appl. Phys.* 117, 17E503, 2015