

文中の英文文字について：現行の「材料」では CenturyOldStyle という書体を使用していますが、このテンプレートでは Windows 標準フォントである「Times New Roman」および「Century」、一部に「Bookman Old Style」を使用しています。

印刷用 PDF を J-stage 登録用テンプレートとするために、従来のフォントサイズから 0.5 単位（Word での最小変更単位）で変更している箇所、また TimesNewRoman と Century を使い分けて差異をつけている箇所があります。

巻数、ページ、原稿種別は印刷データ制作時に入れるため Word テンプレートに含まず

「+」記号は Alt キーを押しながら「0134」とタイプで出す。文字スタイルを「sup」（上付き）にする

スタイル名：Title\_main\_J 15pt 和文タイトル：材料学会 Word テンプレート Ver 1.0

名前の区切りに白文字で「・」（中黒）を入力

スタイル名：Auther\_J 11pt、右揃え（従来は頭揃え） 材料 一郎\* 材料 二郎\*\* 材料 三郎\*\* 材料 四郎\*\* 材料 五郎\*\*\*

スタイル名：Title\_main\_E 13pt A Sample of Manuscript of Submitted Paper to Journal of the Society of Materials Science, Japan

途中改行するときは「shift+enter」で段落内改行とすること

スタイル名：by 9pt by

スタイル名：Auther\_E 10.5pt（従来は 11pt） Ichiro ZAIRYO\*, Jiro ZAIRYO\*\*, Saburo ZAIRYO\*\*, Shiro ZAIRYO\*\*, Goro ZAIRYO\*\*\*

スタイル名：Abstract\_E 9.5pt（従来は 9pt） Wide-bandgap semiconductor ZnO potentially exhibits high radiation hardness since large displacement threshold energy of constituent atoms can be expected due to the small lattice constant and large bandgap energy. To study the radiation hardness, the effect of proton irradiation on single-crystalline n-type ZnO films was examined. These films were grown by molecular beam epitaxy, and irradiated by 8 MeV protons with fluences of  $1.4 \times 10^{15}$ ,  $2.8 \times 10^{15}$ ,  $5.6 \times 10^{15}$  and  $1.4 \times 10^{16}$  p/cm<sup>2</sup>. A rapid increase of electrical resistance by a decrease of carrier density was observed with a threshold fluence of about  $1 \times 10^{15}$  p/cm<sup>2</sup>. This change in electrical properties was associated with a steep deterioration of the near-bandedge emission intensity in cathodoluminescence. These radiation damages were found to recover after a thermal annealing over 600°C. Such high radiation hardness of ZnO exceeds that of GaN, indicating promising application of this material to space- and nuclear-electronics.

スタイル名：KeyWord\_head Key words: スタイル名：KeyWord ZnO, 8 MeV protons, Radiation damage, Radiation hardness, Thermal annealing, 9.5pt（従来は 9pt）  
XXXXXXXXXX, XXXXXXXXXXX, XXX, XXXXXXXXXXXXX

スタイル名：Header\_01 1 緒 言 9pt

日本材料学会誌「材料」に投稿できる原稿は、投稿規定 6.に定める論文、資料、総説、講座、解説、国内外トピックス、委員会報告、巻頭言、討論のいずれかである。

論文はその内容が一般に公表されている国内外の印刷物に未投稿のものであって、理論、実験等に誤りがなく、材料学に関して独創的な研究で、価値ある結論あるいは事実を含むものでなければならない。

スタイル名：body\_01 9pt それぞれの原稿は、A4 用紙に 25 字×51 行×2 段=2550 字、横書き（刷上がり 1 ページに相当）に執筆する。所定の投稿申込用紙の正 1 部、コピー 2 部ならびに原稿の鮮明なコピー 3 部を本会編集委員会宛に提出する。正原稿は編集委員会において掲載可が決定され本会より提出の依頼があるまで著者が保管する。

場合、次の事項を番号順に必ず記載する。(1)和文題名(15 ポイント)、(2)和文著者名(11 ポイント)、(3)英文題名(13 ポイント)、(4)英文著者名 (10.5 ポイント)、(5)英文要旨(9.5 ポイント)、(6) 英文キーワード(9.5 ポイント)。また、最下段に本文との間に線を入れて(7)和文の会員種別・所属・所在地、英文の所属・所在地を記載する。その他の原稿では記載事項が異なるので原稿執筆上の規約を参照すること。

本文(9 ポイント)は、見本のように上記(1)~(6)を記述した後に、1 行空けて書き始める。

図、表および写真は、論文、資料、委員会報告については、見本のように用紙にそのまま貼り込める大きさに用意し、本文中の説明と離れない位置に貼り付ける。図・表どうし、あるいは図、表と本文は 1 行以上間隔をあけるようにする。カラー写真掲載希望の場合は、編集委員会でその必要性が認められた場合に限り掲載することができるが、それに係わる経費は著者負担である。

## 2 ABC 照射試料の準備

分子線エピタキシー (MBE) 装置を用いて Fig. 1 に示すノンドープの単結晶 ZnO 薄膜を製作した。まず、A 面サファイア基板上に 15 nm の Zn<sub>0.85</sub>Mg<sub>0.15</sub>O 薄膜を 300°C で成膜した。真空中で 800°C・30 分間の熱処理を経て、300

0.5pt 黒の線「+原稿受理～」の字の上部から 1.5mm 上へ

スタイル名：Header\_01-01 1・1 原稿の執筆上の注意 9pt

原稿の書き方は、投稿規程および原稿執筆上の規約に従う必要があるが、第 1 ページおよび図などは本ページに示す見本を参照するとよい。左右に 21mm、上 23mm、下 18mm のマージンをとる。本文は 2 段組としコラム幅は 80mm、コラム間隔を 10mm とする。論文および資料の

7pt † 原稿受理 平成 年 月 日 Received ©2011 The Society of Materials Science, Japan スタイル名：Accept  
\* 正 会 員 大阪工業大学 ナノ材料マイクロデバイス研究センター 〒535-8585 大阪市旭区大宮  
□ Nanomaterials Microdevices Res. Center, Osaka Inst. of Tech., Asahi-ku, Osaka 535-8585. スタイル名：from\_01\_J  
\*\* 大阪工業大学 ナノ材料マイクロデバイス研究センター 〒535-8585 大阪市旭区大宮  
□ Nanomaterials Microdevices Res. Center, Osaka Inst. of Tech., Asahi-ku, Osaka 535-8585. スタイル名：from\_01\_E  
\*\*\* 若狭湾エネルギー研究センター 〒914-0192 敦賀市長谷  
□ The Wakasa Wan Energy Res. Center, Tsuruga-shi Nagatani, Fukui 914-0192. (従来は和文英文が同じ行)

上の行と同じく「\*～」を白文字で入力する。頭揃えは、フォント→詳細設定から「倍率」を変更して頭揃えにすること

ページ下部から 18mm 空きとする

：欧文書体名「Century」の箇所。その他の欧文は「TimesNewRoman」（Key Word：の部分のみ Bookman Old Style）

### 赤字部分について：

J-stage 登録データ制作ツールにおいて、著者および所属先を認識するための記号が必要となるので、印刷では出力されない白文字で記号を入力した状態のデータを作成する必要がある。

図のキャプションは 8pt TimesNewRoman、図中の文字については、基本的には画像とするのが望ましいと思います。文字を使用する場合は 1 ページ目の書体および後述の「参考文献」と被らない書体、大きさとする。「参考文献」は 8.5pt Century)

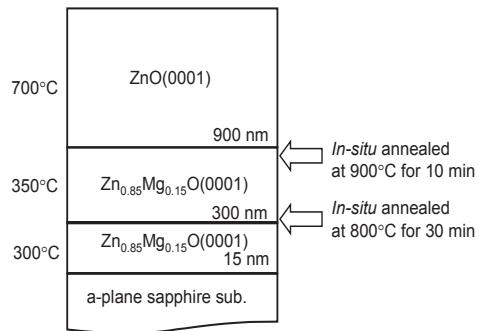
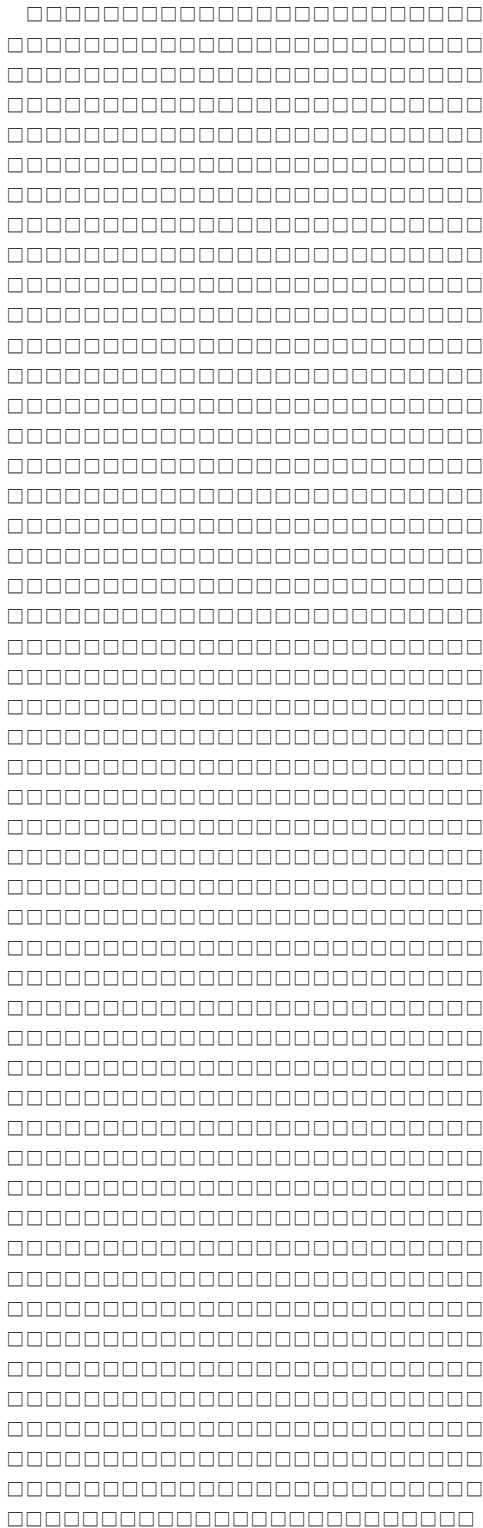


Fig.1 Schematic diagram of a sample structure.

スタイル名 : Fig\_01 8pt

Table 1 Electrical properties of a single-crystalline ZnO film.

	Resistivity ( $\Omega$ cm)	Hall mobility ( $\text{cm}^2/\text{Vs}$ )	Carrier density ( $\text{cm}^{-3}$ )
300 K	0.107	103	$5.64 \times 10^{17}$
77 K	0.273	302	$7.57 \times 10^{16}$

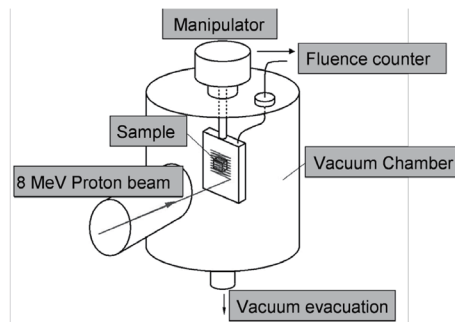


Fig. 2 Schematic diagram of an experimental setup of 8 MeV proton beam irradiation.

スタイル名 : Fig\_01 8pt

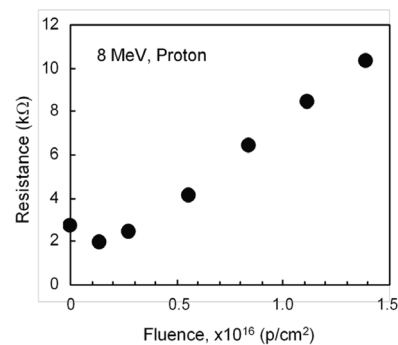


Fig. 3 Change of the electrical resistance during 8 MeV proton irradiation.

スタイル名 : Fig\_01 8pt

#### 4 放射線照射による損傷メカニズム

以上の結果を踏まえて、放射線損傷のメカニズムを考察した。まず、ZnO 薄膜に 8 MeV のプロトンビームを照射したときのプロトンの飛跡を調べるため、SRIM ソフトウェア<sup>14)</sup>を用いてシミュレーションを行った。その結果、照射したプロトンビームは ZnO 薄膜を貫通して、厚さ 500 μm のサファイア基板の内部（表面から約 280 μm）に達することがわかった。

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left( \frac{Z_1 Z_2 e^2}{8\pi\epsilon_0 M_1 v^2} \right)^2 \text{cosec}^4 \frac{\theta}{2} \quad (1)$$

#### 6 結 言

MBE 成長した単結晶 N 型 ZnO 薄膜に対して 8 MeV プロトンビームを照射し、電気特性と発光特性により放射線損傷を調べた。その結果、損傷が始まる照射量は約  $1 \times 10^{15}$  p/cm<sup>2</sup> と非常に大きく、ZnO が放射線耐性に優れた材料であることがわかった。また、照射によって主として Zn 原子が変位すること、それによって生成された Zn 空孔が 2 価のアクセプター準位を形成する非発光センターとして働いている可能性を述べた。さらに、損傷を受けた試料に対して熱処理を施し、600°C 程度の熱処理でほぼ回復することを明らかにした。このように高い放射線耐性をもつ ZnO は、宇宙・航空用途のみならず、原子炉等の放射線環境下で使用する半導体デバイスの材料として有望である。

#### 参 考 文 献

- 1) K. Ohnishi and S. Matsuda, "Radiation effects on semiconductor devices: Recent trends of research works", *Journal of the Institute of Electronics and Communication Engineers of Japan*, Vol.85, No.9, pp.662-669 (2002).
- 2) S. Gonda, H. Tsutsumi, Y. Ito, T. Mukai and S. Nagahama, "Proton radiation effects in nitride lasers and light emitting diodes", *Physica Status Solidi (a)*, Vol.204, Issue 1, pp.231-235 (2006).
- 3) J. W. Corbett and J. C. Bourgoin, in "Point defects in solids", Eds. J. H. Crawford and L. M. Slifkin, p.136 (1975) Plenum Press.
- 4) J. H. Warner, R. J. Walters, S. R. Messenger, G. P. Summers, S. M. Khanna, D. Estan, L. S. Erhardt and A. Houdayer, "High-energy proton irradiation effects in GaAs devices", *IEEE Transaction on Nuclear Science*, Vol.51, No.5, pp.2887-2895 (2004).
- 5) S. Gonda, "Radiation hardness of InGaAsP semiconductor lasers", *International conference on InP and Related Materials (IPRM)*, WeP29, Versailles France, 2008 May.
- 6) A. Hallén, M. Nawaz, C. Zaring, M. Usman, M. Domeij and M. Östling, "Low-temperature annealing of radiation-induced degradation 4H-SiC bipolar junction transistors", *IEEE Electron Device Letters*, Vol.31, No.7, pp.707-709 (2010).
- 7) S. M. Khanna, D. Estan, L. S. Erhardt, A. Houdayer, C. Carlone, A. I. Nedelcescu, S. R. Messenger, R. J. Walters, G. P. Summers, J. H. Warner and I. Jun, "Proton energy dependence of the light output in gallium nitride light-emitting diodes", *IEEE Transaction on Nuclear Science*, Vol.51, No.5, pp.2729-2735 (2004).
- 8) M. Nakano, T. Makino, A. Tsukazaki, K. Ueno, A. Ohtomo, T. Fukumura, H. Yuji, Y. Nishimoto, S. Akasaka, D. Takamizu, K. Nakahara, T. Tanabe, A. Kamisawa and M. Kawasaki, "MgxZn1-xO-based schottky photodiode for highly color-selective ultraviolet light detection", *Applied Physics Express*, Vol.1, No.12, pp.121201-1-121201-3 (2008).
- 9) K. Nakahara, S. Akasaka, H. Yuji, K. Tamura, T. Fujii, Y. Nishimoto, D. Takamizu, A. Sasaki, T. Tanabe, H. Takasu, H. Amaike, T. Onuma, S. F. Chichibu, A. Tsukazaki, A. Ohtomo and M. Kawasaki, "Nitrogen doped MgxZn1-xO/ZnO single heterostructure ultraviolet light-emitting diodes on ZnO substrates", *Applied Physics Letters*, Vol.97, No.1, pp.013501-1-013501-3 (2010).
- 10) S. Sasa, T. Hayafuji, M. Kawasaki, K. Koike, M. Yano and M. Inoue, "Improved stability of high-performance ZnO/ZnMgO hetero-MISFETs", *IEEE Electron Device Letters*, Vol.28, No.7, pp.543-545 (2007).
- 11) E.g., "Recent development of thin film compound semiconductor photovoltaic cells", Ed. T. Wada (2007) CMC Press.
- 12) S. O. Kucheyev, P. N. K. Deenapanray, C. Jagadish, J. S. Williams, M. Yano, K. Koike, S. Sasa and M. Inoue, "Electrical isolation of ZnO by ion bombardment", *Applied Physics Letters*, Vol.81, No.18, pp.3350-3352 (2002).
- 13) S. M. Khanna, J. Webb, H. Tang, A. J. Houdayer and C. Carlone, "2 MeV proton radiation damage studies of gallium nitride films through low temperature photoluminescence spectroscopy measurement", *IEEE Transaction on Nuclear Science*, Vol.47, No.6, pp.2322-2328 (2000).
- 14) SRIM simulation, <http://www.srim.org/>
- 15) A. Janotti and C. G. Van de Walle, "Native point defects in ZnO", *Physical Review B*, Vol.76, Issue 16, pp.165202-1-165202-21 (2007).
- 16) A. F. Kohan, G. Ceder, D. Morgan, C. G. Van de Walle, "First-principles study of native point defects in ZnO", *Physical Review B*, Vol.61, Issue 22, pp.15019-15027 (2000).
- 17) F. Tuomisto, V. Ranki and K. Saarinen, "Evidence of the Zn vacancy acting as the dominant acceptor in n-type ZnO", *Physical Review Letters*, Vol.91, No.20, pp.205502-1-205502-4 (2003).
- 18) G. P. Summers, E. A. Burke, P. Shapiro, S. R. Messenger and R. J. Walters, "Damage correlations in semiconductors exposed to gamma, electron and proton radiations", *IEEE Transaction on Nuclear Science*, Vol.40, No.6, pp.1372-1378 (1993).
- 19) G. R. Hopkinson, "Displacement damage in photonic devices and ICs", *Proceedings of the 7th International Workshop on Radiation Effects on Semiconductor Devices for Space Application*, Oct.16-18, 2006.