単結晶酸化亜鉛薄膜に対する 8MeV プロトンの照射効果[†]

小 池 一 歩^{*} 天 野 武 志^{**} 青 木 隆 裕^{**}
藤 本 龍 吾^{**} 佐 々 誠 彦^{**} 矢 野 満 明^{*}
権 田 俊 一^{**} 石 神 龍 哉^{***} 久 米 恭^{***}

Irradiation Effect of 8MeV Protons on Single-Crystalline Zinc Oxide Films

by

Kazuto KOIKE^{*}, Takeshi AMANO^{**}, Takahiro AOKI^{**}, Ryugo FUJIMOTO^{**}, Shigehiko SASA^{**},
Mitsuaki YANO^{*}, Shun-ichi GONDA^{**}, Ryoya ISHIGAMI^{***} and Kyo KUME^{***}

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 8MeV protons with fluences of 1.4×10^{15} , 2.8×10^{15} , 5.6×10^{15} and 1.4×10^{16} p/cm². A rapid increase of electrical resistance by a decrease of carrier density was observed with a threshold fluence of about 1×10^{15} p/cm². 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.

Key words : ZnO, 8MeV protons, Radiation damage, Radiation hardness, Thermal annealing

1 緒 言

人工衛星や宇宙ステーションを運用するうえで、エネルギーの確保や情報収集ならびに通信に各種の半導体デバイスが不可欠である。しかし、宇宙に数多く存在する高エネルギー粒子（放射線の一種で、85%がプロトン粒子、14%が α 粒子、残りが重粒子と電子）¹⁾が半導体デバイスに衝突すると、シングレイベント効果（一時的あるいは永久的な損傷を与える単発現象）やトータルドーズ効果（性能の劣化が進行する長期的現象）を引き起こす。^{1), 2)}この効果の影響は船外に露出して使用するセンサーや太陽電池パネルで特に大きく、長期間の運用にあたってはトータルドーズ効果による特性劣化が少ない半導体材料の使用が重要である。

一般に、原子を変位させるエネルギーが大きい材料は、放射線入射による変位損傷を生じにくい。ここで、変位損傷が始まるしきい値エネルギー E_d は近似的に Corbett の経験式 $E_d = 0.895 (10/a_0)^{4.363}$ で与えられ、格子定数 a_0 の小さいワイドギャップ半導体は高い放射線耐性を持つと期待できる。³⁾これまでに、シリコン (Si) は勿論、砒化ガリウム (GaAs) や、磷化インジウム (InP) と GaAs の混晶半導体である InGaAsP、近年では、ワイドギャップ半導体の代表である炭化シリコン (SiC) や窒化ガリウ

ム (GaN) に MeV 級の高エネルギー粒子を照射する実験がなされ^{2), 4)~7)}GaN や SiC が高い放射線耐性を有することが確認されている。

一方、GaN とほぼ同じ格子定数とバンドギャップを有する、酸化亜鉛 (ZnO) を対象とした報告例はごく僅かである。しかし、最近、ZnO は紫外線領域の受光素子⁸⁾や発光素子⁹⁾高電子移動度トランジスタ¹⁰⁾といったキーデバイスが試作され、高効率な薄膜太陽電池にも応用されている。¹¹⁾かかる観点から、ZnO は宇宙空間で使用するデバイスの材料として有力な候補であると考え、若狭湾エネルギー研究センターのタンデム加速器で 8MeV のプロトンビームを照射して単結晶 ZnO 薄膜の放射線耐性を調べた。本論文では、その結果を報告する。

2 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 薄膜を作製した。まず、A 面サファイア基板上に 15nm の Zn_{0.85}Mg_{0.15}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、300nm の Zn_{0.85}Mg_{0.15}O 薄膜を 350°C で成膜し、再び、真空中で 900°C・30 分間の熱処理を行った後、900nm の ZnO 薄膜を 700°C で成膜した。このように 2 段階の熱処理を施すことで、バッファ層の結晶性が改善され、その

[†] 原稿受理 平成 23 年 3 月 3 日 Received Mar. 3, 2011 ©2011 The Society of Materials Science, Japan

^{*} 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.

^{**} 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

^{***} 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, Tsuruga, 914-0192

Fig. 1 Schematic diagram of a sample structure.

上に良質な単結晶 ZnO 薄膜を形成することができる。

作製した試料に対して $2\theta/\omega$ と正極点の X 線回折測定を行い、回転ドメインを含まない c 面成長の単結晶 ZnO 薄膜が形成されていることを確認した。また、ZnO (0002) 回折ピークに対してロッキングカーブを測定し、そのピーク半値幅が 373 arcsec と比較的小さい高品質膜であることを確認した。次に、電気特性を調べるため、3mm 角に切り取った試料の四隅にインジウム (In) でオーミック電極を形成し、Van der Pauw 法でホール測定を行った。Table 1 に 300K と 77K の電気特性を示す。いずれも N 型の伝導性を示し、低温でキャリア密度が減少して移動度が増加する、通常の半導体の振る舞いを示した。

3 8MeV プロトンビーム照射実験

作製した単結晶 N 型 ZnO 薄膜に対して、8MeV のプロトンビームを照射した。Fig. 2 に照射実験のイメージ図を示す。高エネルギーのプロトンが大気との衝突で減衰しないよう、照射実験は高真空中で行った。1つのウェーハ

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

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

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

から切り出した 3mm 角の試料 4 枚 (#1 ~ #4) をガラスエポキシ基板に 15mm 間隔で貼り付け、それをステンレス製の基盤台に装着してマニピュレーターに接続した。マニピュレーターは上下左右、回転の遠隔操作が可能である。試料の電気抵抗をその場測定するために、試料表面に形成したオーミック電極へ金線を取り付け、電流導入端子を介して真空容器の外へ引き出した。また、試料の近くに蛍光板を取り付け、プロトンビームの照射位置と照射面積の調整に用いた。試料の部分のみ窓開けしたアルミ板で基盤台全体を覆い、照射中にアルミ板からグラウンドに流れる電流をモニターすることでプロトンの照射量を決定した。本実験では、ビーム電流を 100nA に、照射範囲を 1cm 角に設定した (1 時間当たりのプロトン照射量 $2.3 \times 10^{15} \text{p/cm}^2$ に相当)。

まず、#1 の試料に対して 8MeV のプロトンビームを $1.4 \times 10^{16} \text{p/cm}^2$ まで照射した。照射中は、装置内の圧力を $5 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-4} \text{Pa}$ に保った。Fig. 3 に、プロトンビーム照射中に測定した電気抵抗の変化を示す。照射量が $1.4 \times 10^{15} \text{p/cm}^2$ に達するまでは電気抵抗が一旦減少したが、その後は照射量とともにほぼ線形的に増加した。初期の電気抵抗の減少は、照射による自己アニーリング効果 (内部摩擦による発熱) で表面に吸着していた水分子等が脱離し、表面近傍のキャリア空乏層が減少したためと確認されている。その後の電気抵抗の増加が一般的に報告されている特性劣化の特徴と合致し、照射によって結晶中の格子欠陥が増加した影響と考えられる。¹²⁾ 従って、Fig. 3 の結果から、損傷を受け始める最小照射量 (劣化を生ずるしきい値) はおよそ $1.5 \times 10^{15} \text{p/cm}^2$ と見積もられる。残り 3 つの試料 #2 ~ #4 に対しては、それぞれ 5.6×10^{15} , 2.8×10^{15} , $1.4 \times 10^{15} \text{p/cm}^2$ のプロトンビームを照射した。

試料を取り出した後、照射前後の表面状態の変化を調べるため、原子間力顕微鏡 (AFM) で表面観察を行った。Fig. 4 (a) と (b) に、試料 #1 (照射量 $1.4 \times 10^{16} \text{p/cm}^2$) の AFM 像を比較して示す。照射前は原子ステップが観測される平坦な表面であったが、照射後は直径が数 100 nm の結晶粒が現れ、平均自乗 (RMS) 粗さが一けた以上大

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

Fig. 4 AFM images before (a) and after (b) the 8 MeV proton irradiation with 1.4×10^{16} p/cm² fluence.

きくなった。このような変化は、前述した照射中の自己アニーリング効果による表面温度の上昇で、表面原子の再配列と蒸発が生じたためと考えている。

次に、試料 #1 ~ #4 に対して、 $2\theta/\omega$ の X 線回折と ZnO (0002) 回折ピークのロッギングカーブを測定した。その結果、いずれの試料についても、照射前と比較して回折ピークの強度や形、半値幅の変化はほとんど認められなかった。このことから、巨視的には、照射による構造変化は生じていないといえる。

より詳しく損傷の程度を調べるため、300K と 77K でホール測定を行った。Table 2 に試料 #1 ~ #4 の電気特性を、Fig. 5 に照射量に対する抵抗率、移動度、キャリア密度の変化を、それぞれの照射前の値で規格化して示す。最も照射量の大きかった試料 #1 はホール電圧が不安定であったため、Fig. 5 において目安値を白抜きでプロットした。いずれの試料についても照射前後の移動度に有意な変化は見られなかったが、キャリア密度は照射量の増加に伴って減少し、これが抵抗率増加の原因であることがわかった。

さらに、発光特性の観点から損傷の度合いを調べるため、300K でカソードルミネッセンス (CL) 測定を行った。Fig. 6 は、電子ビームの加速電圧を 4kV (電子ビームの進入深さは約 100nm) に固定して測定した、試料 #1 ~ #4 に対する照射前後の CL スペクトルである。照射量の増加に伴って、約 3.3eV に位置する自由励起子によるバンド端発光が減衰した。一方、欠陥に基づく深い準位からの長波長発光に目立った増加は観測されなかった。

Table 2 Electrical properties measured at 300K and 77K after proton irradiation.

	Fluence (p/cm ²)		Resistivity (Ωcm)	Hall mobility (cm ² /Vs)	Carrier density (cm ⁻³)
300 K	1.4×10^{16}	#1	15.4	-	-
	5.6×10^{15}	#2	0.367	87.4	1.95×10^{17}
	2.8×10^{15}	#3	0.169	89.7	4.13×10^{17}
	1.4×10^{15}	#4	0.133	98.6	4.77×10^{17}
77 K	1.4×10^{16}	#1	-	-	-
	5.6×10^{15}	#2	-	-	-
	2.8×10^{15}	#3	0.634	216	4.55×10^{16}
	1.4×10^{15}	#4	0.410	236	6.45×10^{16}

Fig. 5 Change of electrical parameters normalized to the pre-irradiation values as a function of proton fluence.

Fig. 6 CL spectra measured at 300K before and after proton irradiation.

Fig. 7 に、照射量に対するバンド端発光の強度変化を、照射前のピーク強度で規格化してまとめた。比較のため、図には文献値から引用した GaAs と GaN の測定結果も示した¹³⁾ただし、GaAs は 1.2MeV プロトン照射の、GaN は 2MeV プロトン照射の結果である。ZnO が損傷を受け始める照射量のしきい値は約 1×10^{15} p/cm² と見積もられ、キャリア密度が減少し抵抗率が増加し始める照射量と一致する。しきい値以上で発光強度が急速に低下する様子は GaAs や GaN と同じであるが、ZnO のしきい値は他の 2 者よりもはるかに高くなっている。このエネルギー範囲ではプロトンのエネルギーが小さいほど損傷を受けやすくなるが、それを考慮しても ZnO の放射線耐性が GaN と同等以上であることを後述する。

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 8MeV 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¹⁴⁾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 500μm のサファイア基板の内部 (表面から約 280μm) に達することがわかった。

Fig. 7 Change of luminescence intensities normalized to the pre-irradiation values as a function of proton fluence. The data of GaAs and GaN are also shown for comparison.¹³⁾

プロトンビームが貫通した ZnO 薄膜中には、原子が正常な位置から外れた欠陥が形成される。すなわち、ノックオンされた原子は格子間原子となり、その原子が存在した場所には原子空孔が形成される。格子間原子と原子空孔の両者が形成されるので、どちらか一方が優先的に形成される結晶成長中の欠陥と差異がある。

8MeV のプロトンビーム照射では、結晶を構成する原子との衝突に核力の影響が生じ始めているが、主たる相互作用はクーロン力によるラザフォード散乱と考えられる。そこで、単純化のためにラザフォード散乱のモデルを用いて結晶中での欠陥形成メカニズムを考えた。

ターゲット原子に対して十分に質量の小さい粒子が入射したときの微分散乱断面積を下式に示す。ここで、 Z_1 と Z_2 は入射粒子とターゲット原子の原子番号、 M_1 は入射粒子の質量、 v は粒子の入射速度、 θ は散乱角、 ϵ_0 は真空中の誘電率である。

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

同一の粒子ビームに対して微分散乱断面積はターゲット原子の原子番号の 2 乗に比例するので、原子番号が大きい Zn 原子の散乱断面積は O 原子のそれよりも約 14 倍大きい。従って、ノックオンは主として Zn 原子で発生し、Zn の原子空孔 (V_{Zn}) と格子間原子 (Zn_i) がカスケード的に形成されたクラスター状の複合欠陥が多数生成される。Janotti や Kohan らは、第一原理計算により、ZnO 結晶中に発生する点欠陥の中で V_{Zn} の生成エンタルピーが最も低く、それが 2 価の深いアクセプター準位を形成することを報告している。^{15), 16)} このことから、今回の照射でキャリア密度が減少したのは、結晶中に形成された 2 価の V_{Zn} が伝導電子を捕獲したためと考えられる。

そこで、今回の照射によって ZnO 薄膜中に形成される V_{Zn} の密度を、文献に報告された値から見積もった。Tuomisto らは、ZnO バルク結晶に対して 2MeV の電子ビームを $6 \times 10^{17} \text{e}/\text{cm}^2$ 照射すると、 V_{Zn}^{2+} の欠陥が $2 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ の密度で形成され、結果として電子密度が減少

することを報告している。¹⁷⁾ ここで、一般に放射線照射による損傷度合いは、原子変位を生じさせる粒子当たりの全エネルギーすなわち非イオン化エネルギー損失 (NIEL) に比例することが知られている。¹⁸⁾

Fig. 8 はシリコンに対する電子とプロトンの NIEL¹⁹⁾ であるが、その他の半導体材料の NIEL も同程度であることがわかっている。²⁰⁾ この図から、8MeV のプロトンビームは 2MeV の電子ビームよりも約 150 倍大きい損傷を与えると見積もられる。前述の Tuomisto らの結果にこの見積もりを適用すると、8MeV のプロトンビームを $1.4 \times 10^{16} \text{p}/\text{cm}^2$ 照射した試料 #1 では、約 $7 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ の V_{Zn}^{2+} が形成されたと推定される。 V_{Zn}^{2+} が 2 価のアクセプターであることを考慮すると、伝導電子の密度が $1.4 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 減少することになり、実験結果とオーダーが一致する。

また、照射量の増加でバンド端発光が減衰する一方欠陥準位からの発光は増大しなかった Fig. 6 の結果は、照射によって形成された欠陥が非発光性の再結合中心として働くことを示している。Chichibu らは ZnO 結晶中に存在する V_{Zn} と Zn_i の複合欠陥 ($V_{\text{Zn}}\text{Zn}_i$) が非発光性の再結合中心として働くことを報告しており、²¹⁾ 照射を受けた ZnO 中に V_{Zn}^{2+} が形成されるという我々の解釈は、発光特性の変化とも矛盾しない。

なお、Fig. 8 に示した入射エネルギー依存性は、2MeV のプロトンが与える損傷は 8MeV の場合よりも 4 倍ほど大きいことも示している。これを利用して Fig. 7 に示した n 型 GaN の 2MeV プロトンに対する劣化特性を 8MeV 照射に換算すると、ZnO の放射線耐性は GaN よりも 10 倍以上高いことになる。実際、Khanna らは pn 接合の GaN 系青色発光ダイオードに 10MeV のプロトンビームを照射し、照射量 $1 \times 10^{15} \text{p}/\text{cm}^2$ ではすでにしきい値を越えて、光出力強度が初期値の 7% に減衰することを報告している。⁷⁾ これはデバイスとしての特性劣化で我々の結果と単純に比較できないが、Fig. 7 の結果を勘案すると、ZnO の放射線耐性は十分 GaN を凌ぐと考えてよい。

Fig. 8 Non-ionizing energy loss (NIEL) as a function of particle energy for Si.¹⁹⁾

5 熱処理による損傷回復

次に, 最も照射量の大きい試料 #1 ($1.4 \times 10^{16} \text{p/cm}^2$) に対して, 酸素雰囲気中で 10 分間, $200 \sim 700^\circ\text{C}$ の範囲で熱処理を行い, 放射線損傷の回復過程を調べた. Fig. 9 に, 熱処理温度に対する電気特性の変化を, 照射前の値で規格化して示した. 熱処理温度が 200°C を超えるとキャリア密度が上昇し始め, 600°C に達した時点で照射前のレベルにほぼ回復した. ただし, 熱処理温度 400°C 以下ではホール電圧が不安定であったため, 目安値を白抜きでプロットしている. さらに, 熱処理による発光特性の回復過程も調べた. Fig. 10 に, CL 測定で得たバンド端発光のピーク強度の, 熱処理温度に対する変化を示す. 熱処理温度 200°C で発光強度が回復し始め, 600°C 付近で照射前のレベルに到達することがわかる.

Kucheyev らは, 同じく *c* 面 ZnO 単結晶膜に $0.6 \sim 3.5 \text{MeV}$ の各種高エネルギー粒子ビームを照射したときの, 熱処理による回復過程を報告している.¹²⁾ 彼らは $200 \sim 400^\circ\text{C}$ で回復し始めたシート抵抗が 700°C では完全に復旧するとしており, 我々の結果と一致している. Kucheyev らは *c* 面 GaN 単結晶膜についても同様な実験を行っており, 500°C から始まる GaN の回復には完全復旧に 1000°C 以上を要すると報告している.²²⁾ また, Tuomisto らは,

Fig. 9 Change of electrical parameters normalized to the pre-irradiation values as a function of annealing temperature.

Fig. 10 Change of luminescence intensity as a function of annealing temperature.

2MeV の電子ビームを $1 \times 10^{17} \text{e/cm}^2$ まで照射して高抵抗化した ZnO 結晶と GaN 結晶について, 前者は 600K で後者は 1100K の熱処理で損傷が回復することを報告している.²³⁾

我々の結果も含めたいずれの結果も, ZnO が GaN よりも低温で放射線損傷が回復することを示している. この差異を理解する上で, 我々は, イオン性が強い ZnO では, カチオン半径が大きく ($\text{Zn}^{2+}: 74 \text{pm}$, $\text{Ga}^{3+}: 62 \text{pm}$), ボンドアングルの柔軟性が高い²⁴⁾ことに注目する. カチオン半径が大きいことは Zn_i のポテンシャルエネルギーが高いことを, ボンドアングルの柔軟性が高いことは Zn_i の格子間移動が容易なことを意味する. 実際, Janotti らは, 第一原理計算で Zn_i は室温付近でも拡散可能なことを導いている.¹⁵⁾ このことから, 回復過程は Zn_i の拡散による V_{Zn} との再結合で支配されていると思われる. この推定は, GaN よりも ZnO の放射線耐性が高い理由の 1 つが, 照射に伴う自己アニーリング効果による Zn_i のその場拡散である可能性も示唆するが, 詳細を明らかにするためには今後さらなる検討が必要である.

6 結 言

MBE 成長した単結晶 N 型 ZnO 薄膜に対して 8MeV 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 $1 \times 10^{15} \text{p/cm}^2$ 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.

本研究の実施に当たって若狭湾エネルギー研究センターの小林紘二郎所長にご支援を賜りました. 装置のセットアップや放射レベルの計測など, 照射実験全般について同センター研究員の高田卓志様とチュルーンバートル・バトチュルーン様, ハセテック・サービス社長の長谷川崇様にご協力をいただきました.

本研究の一部は, 科学研究費補助金 (若手研究 (B)): 課題番号 22760306, 小池) の支援を受けたものである.

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, 2008May.
 - 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, "Mg_{1-x}Zn_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 Mg_{1-x}Zn_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, "2MeV 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 and 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.
 - 20) I. Jun, M. A. Xapsos, S. R. Messenger, E. A. Burke, R. J. Walters, G. P. Summers and T. Jordan, "Proton nonionizing energy loss (NIEL) for device applications", IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol.50, No.6, pp.1924-1928 (2003).
 - 21) S. F. Chichibu, T. Onuma, M. Kubota, A. Uedono, T. Sota, A. Tsukazaki, A. Ohtomo and M. Kawasaki, "Improvement in quantum efficiency of excitonic emissions in ZnO epilayers by the elimination of point defects", Journal of Applied Physics, Vol.99, Issue 9, pp.093505-1-093505-6 (2006).
 - 22) S. O. Kucheyev, H. Boudinov, J. S. Williams, C. Jagadish and G. Li, "Effect of irradiation temperature and ion flux on electrical isolation of GaN", Journal of Applied Physics, Vol.91, No.7, pp.4117-4120 (2002).
 - 23) F. Tuomisto, D. C. Look and G. C. Farlow, "Defect studies in electron-irradiated ZnO and GaN", Physica B, Vol.401-402, pp.604-608 (2007).
 - 24) J. C. Phillips and G. Lucovsky, "Bonds and bands in semiconductors", Chapter 2 & 3 (2009) Momentum Press.