

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20760051

研究課題名（和文）

高エネルギー重イオンが誘起するシングルイベント過渡電流の高位置分解能マッピング

研究課題名（英文）

High Resolution Mapping of Single Event Transient Current Due to High Energy Heavy Ion

研究代表者

小野田 忍 (ONODA SHINOBU)

独立行政法人 日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用研究部門・研究員

研究者番号：30414569

研究成果の概要（和文）：単一イオンが炭化ケイ素トランジスタに入射した時に発生する雑音電流（過渡電流）のマッピングを従来手法を用いて測定し、過渡電流の発生機構をデバイスシミュレータを用いて解明した。一方、過渡電流のマッピングを簡便に取得する新技術開発を行った。ZnS 発光体を使用し、数十 μm の位置分解能ではあるが、マッピングの取得に成功した。ZnS に代わる発光体として YAG:Ce やダイヤモンドを利用すれば、位置分解能が 10 倍程度高くできることが分かった。

研究成果の概要（英文）：The map of transient current induced by a single ion at silicon carbide transistors is measured. The mechanism of transient current is analyzed by using numerical device simulator. On the other hand, the novel mapping system has been developed. By using ZnS as a phosphor, the map of transient current is successfully observed although the spatial resolution is about several tens of micrometers. By using YAG:Ce and Diamond instead of ZnS, the spatial resolution increases about tenfold.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎、応用物理学一般

キーワード：シングルイベント過渡電流、トランジスタ、マッピング、放射線

1. 研究開始当初の背景

宇宙に代表される放射線場では、数十 MeV～数百 GeV の重イオン 1 個が半導体に入射することで、シングルイベント効果（Single Event Effect: SE 効果）と呼ばれる誤動作や故障が引き起こされる。SE 効果はシングルイ

イベント過渡電流（Single Event Transient current: SET 電流）と呼ばれる数 ns で収束する雑音電流がトリガとなり引き起こされる。高集積の LSI では、SET 電流を時間積分した収集電荷量が増加するに従い、SE 効果の発生頻度が増加する。一般に、電荷量は線エ

エネルギー付与 (Linear Energy Transfer: LET) にほぼ比例する。電荷量と LET の関係から、電荷量の代わりに LET を指標として SE 効果の発生頻度予測が行われてきた。この予測手法の利点は、LET が判明すれば SE 効果の発生頻度が分かることにある。しかし、最近になって、SE 効果が発生する LET のしきい値よりも低い LET であるにもかかわらず、高エネルギー重イオンが SE 効果を引き起こすことが報告された。また、イオンの入射位置によって SET 電流の大きさや形状が異なることも知られている。これらの現象を解明するためには、金属-酸化膜-半導体 電界効果トランジスタ (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor: MOSFET) 等のトランジスタに対して、単一の重イオンを照射する技術を開発するとともに、イオン入射位置と SET 電流との関係や、SET 電流のエネルギー依存性を明らかにする必要がある。

2. 研究の目的

(1) 従来型 TIBIC

単一の重イオンが半導体に誘起する SET 電流を測定するために、申請者の所属する日本原子力研究開発機構は、十数 MeV 及び数百 MeV 級の重イオンを約 $1\mu\text{m}$ に集束する技術、単一の重イオンを半導体の微小領域に照射する技術、イオン入射時に発生する SET 電流の強度をイメージ化する技術を保有している。これらの測定技術を TIBIC (Transient Ion Beam Induced Current) システムと呼んでいる。従来型 TIBIC は、主に 2 端子のダイオードの SET 電流を測定するために使用されてきた。本研究で使用するトランジスタは 4 つの信号端子 (ゲート、ソース、ドレイン、基板電極) を有するため、従来型 TIBIC システムの拡張を行う。さらに、図 1(a) に示すように、従来型 TIBIC を用いて、トランジスタで発生する SET 電流の高位置分解能マッピングを行う。最後に、得られた実験結果と数値解析結果を比較することで、SET 電流の発生機構を解明する。

(2) IPEM 型 TIBIC

従来型 TIBIC システムには集束型ビームが必要不可欠である。しかし、ビーム形成に長時間の調整が必要なことや、利用できるイオンが限られていることから、より簡便に数百 MeV 級重イオンを高位置精度に照射し、TIBIC イメージを測定するシステムが求められている。そこで、従来型 TIBIC のように「微小領域を狙い撃ちする」という考えを逆転し、「当たった場所を検出する」手法を取り入れる。当該手法は IPEM (Ion Photon Emission Microscopy) と呼ばれており、イオン入射位置を制御できなくとも、イオンルミネッセンスを観測することで、SE 効果が発生する場所

を検出し、従来型 TIBIC と同等の評価を行うものである。IPEM をサイクロトロン内のビームラインに組み込んだ例はなく、集束が難しい高エネルギー重イオンビームに対して、当該手法は TIBIC イメージを測定するための強力な打開策であるといえる。図 1(b) に示すように、本研究では、Am-241 からの 5.5MeV α 粒子や AVF サイクロトロンからの高エネルギー重イオンといったブロードビームを利用し、IPEM 型 TIBIC の実現を検証する。最後に、新旧の TIBIC の性能比較・評価を行う。

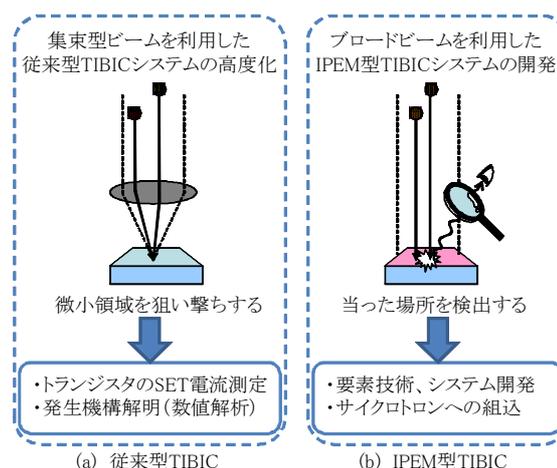


図 1. 従来型 TIBIC(a) と IPEM 型 TIBIC(b) の研究目的

3. 研究の方法

(1) 従来型 TIBIC

集束型マイクロビーム ($6\text{MeV} \sim 18\text{MeV}$, 数百 MeV) を利用した従来型 TIBIC を用いて、トランジスタ中に発生する SET 電流の高位置分解能マッピングを行う。試料は、炭化ケイ素 (Silicon Carbide: SiC) MOSFET および金属半導体電界効果トランジスタ (Metal Oxide Field Effect Transistor: MESFET) とした。得られた SET 電流のエネルギー依存性および位置依存性を明らかにするため、Synopsys 社製デバイスシミュレータ (Technology Computer Aided Design: TCAD) を用いた数値解析を行う。計算の効率を考慮して、二次元のドリフト・拡散モデルを採用する。TCAD 解析によって、トランジスタ中における電荷の伝播挙動を解析し、SET 電流が流れる過程を明らかにする。

(2) IPEM 型 TIBIC

IPEM 型の TIBIC システムを開発するために、① Am-241 からの α 粒子を利用したテーブルトップ型 IPEM を構築、② サイクロトロン内のビームラインに組み込み、高エネルギーの重イオンに対する IPEM を構築、③ コンピュータ制御による IPEM 型 TIBIC システムの自動化・高度化、を行う。具体的には、Am-241 からの α 粒子が発光体に誘起するスポット光

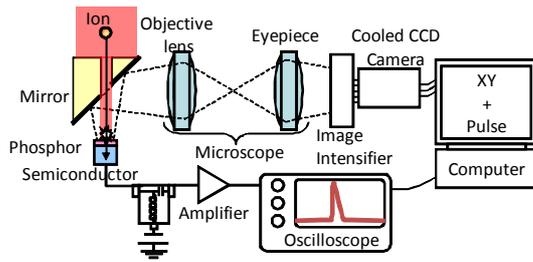


図 2. IPEM の概略図

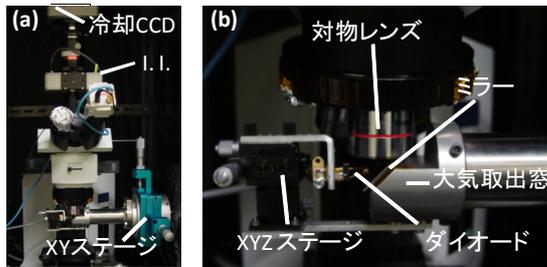


図 3. IPEM の全体写真 (a)、試料部分の拡大写真 (b)

を検出するための測定系を構築し、その後サイクロトロンビームラインに移築し、最後にマッピングを行う。測定システムの概要を図 2 に示す。

IPEM はイオン照射部、試料、発光体、ミラー、顕微鏡、2 次元位置検出器 (Position Sensitive Detector: PSD)、オシロスコープ等から構成される。図 3 にサイクロトロンに組み込んだ測定システムの写真を示す。本研究では、PSD の代わりにイメージインテンスファイア (Image Intensifier: I. I.) と高感度冷却 CCD カメラを用いた。冷却 CCD を採用することで、顕微鏡像を観察しながら光学的なアライメントをすることが容易となった。IPEM の測定では、まず、イオンが発光体を通して半導体に入射する。半導体において発生する電荷をオシロスコープで検出する。一方、発光体における発光は光学系を通じて CCD で結像する。XY 情報とパルス信号を合成してイメージを得る。

4. 研究成果

(1) 従来型 TIBIC

従来型 TIBIC を用いた実験では、2 種類の電界効果トランジスタ (SiC MOSFET 及び SiC MESFET) に対して、高位置分解能で SET 電流のマッピングを行い、ゲート、ソース、ドレイン、基板電極に誘起される SET 電流の発生機構について考察した。

① SiC MOSFET

ゲート電圧 ($V_g=0V$) およびドレイン電圧 ($V_d=20V$) を MOSFET へ印加した状態で、 $18MeV$ -酸素イオン ($18MeV-0$) を照射し、SET 電流を測定した。SET 電流の積算値 (電荷量) をマッピングした結果を図 4 に示す。

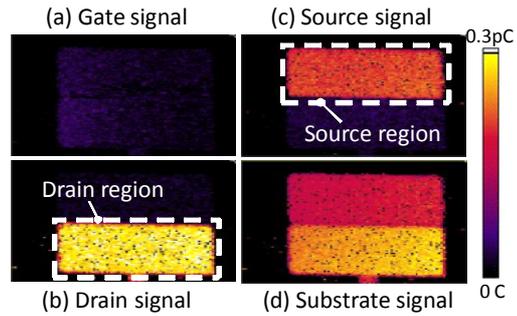


図 4. ゲート (a)、ドレイン (b)、ソース (c)、基板 (d) 電極で収集された SET 電流の積算値 (電荷量) マッピング

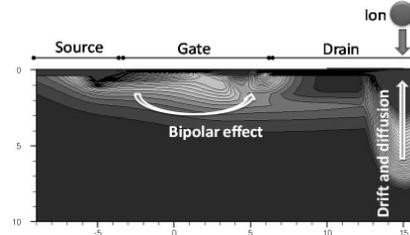


図 5. $15MeV-0$ イオンが入射した $2ns$ 後の電子電流分布

イオンがドレインに入射した時に、最も大きな SET 電流が観測され、収集される電荷量も大きくなることが分かった。さらに、ドレインの印加電圧が高くなるに従い、SET 電流のピーク値および電荷量が増加することが分かった。一般に、ドレインは、ドレイン (n^+) とエピタキシャル基板 (p) から成る n^+p 接合ダイオードと考えることが出来る。そのため、ダイオードと同様に、ドレインの印加電圧が高くなるに従い、ピーク電流値が高くなる。これは、印加電圧が高くなることで空乏層の電界強度が強くなり、イオン入射によって誘起されたキャリアのドリフト速度が速くなるためである。一方、基板電流はドレインと逆極性であることが観測された。ドレイン電流は基板電流よりも僅かに大きいことも分かった。これは、ドレインとエピタキシャル層が n^+p 接合ダイオードであると仮定しただけでは説明できない電荷増幅現象である。

電荷増幅現象を明らかにするために、Synopsys 社製 TCAD を用いて、二次元のドリフト・拡散モデルを採用した数値解析を行った。図 5 に、イオンがドレイン部分に入射してから $2ns$ が経過した時の電子電流分布を示す。図中に示したように、ドレインとエピタキシャル層から成る寄生 n^+p 接合ダイオードでは、ドリフトおよび拡散電流が流れることが分かった。ドレイン電圧が増加するに従い、ドレインおよび基板の電荷量が増加する。一方、ソース (n^+)-エピタキシャル層 (p)-ドレイン (n^+) から成る寄生バイポーラトランジスタ中を、ソースからドレインに向かって電子電流が流れていることが分かった。さらに、ドレイン電圧が増加すると、寄生バイポーラト

ランジスタ起因の電流が増加することが分かった。図6は、計算により求めた各電極の電荷量とゲート電圧の関係である。ゲート電圧が増加するに従い、ソースおよびドレインの電荷量が増加し、基板の電荷量が一定のままであることが分かった。これは、ゲート電圧が寄生 n^+pn^+ バイポーラトランジスタに影響を与えていること示しており、ゲート電圧依存性を調べることで、寄生 n^+p 接合ダイオードと寄生 n^+pn^+ バイポーラトランジスタの効果を分離できることを示唆している。

図6は、飛程がほぼ同一で LET の異なる 15MeV-酸素 (15MeV-O) および 50MeV-銅 (50MeV-Cu) がドレインに入射した時の電荷量とゲート電圧の関係を示す。Si MOSFET では、LET の増加に伴い寄生バイポーラトランジスタの増幅率が増加することが知られており、SiC MOSFET も同様の傾向を示すことが分かった。

図7(a)は、ゲート酸化膜の成膜法が異なる3種類のSiC MOSFETで収集された電荷量とドレイン電圧の関係を示す。酸化膜の成膜方法が異なることから、ゲート酸化膜内の固定電荷や界面準位密度がそれぞれで異なっている。図7(b)は、固定電荷の影響を取り除き、実効電圧 ($V_{g,eff}=5V$) がゲートに印加された場合の電荷量とドレイン電圧の関係を示す。補正後も電荷量が異なっていることから、寄生 n^+p ダイオードおよび寄生 n^+pn^+ バイポーラトランジスタを流れる電流に加え、ゲート-半導体の界面を電荷が流れていること、および界面準位が電流を抑制していること、が示唆される。TCAD シミュレーションの結果、ドレインに単一イオンが入射した後、ゲートのポテンシャルが大きく変動し、界面を電流が流れ得ることが分かった。

以上のように、従来型 TIBIC を用いて μm オーダーの大きさを持つ SiC MOSFET の SET 電流マッピングを取得し、データ解析することで、①ドレイン入射時に最も大きな SET 電流が発生する、②SET 電流は LET に依存する、③寄生 n^+p ダイオードおよび寄生 n^+pn^+ バイポーラトランジスタだけでなく、界面にも SET 電流が流れること、等を明らかにした。

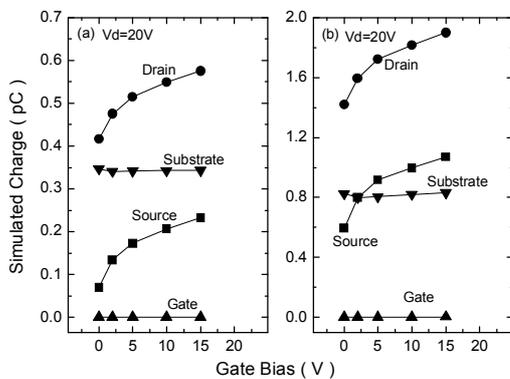


図6. 15MeV-O (a) および 50MeV-Cu (b) が入射した時に収集される電荷量とゲート電圧の関係 (計算結果)

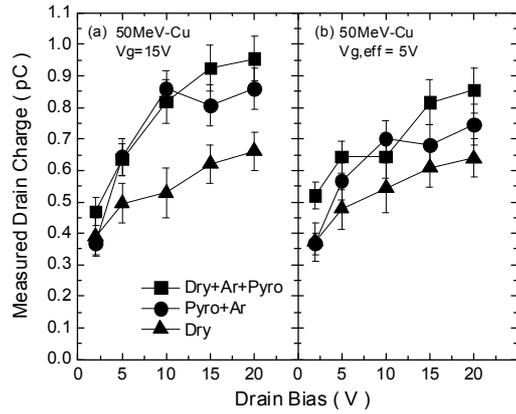


図7. ゲート電圧 $V_g = 15V$ (a)、実効ゲート電圧 $V_{g,eff} = 5V$ (b)の時、50MeV-Cu が3種類のMOSFETに誘起する電荷量とドレイン電圧の関係 (実験結果)

②SiC MEFET

ゲート電圧 ($V_g = -5V$ および $-20V$) を SiC MEFET へ印加した状態で、15MeV-O を照射し、SET 電流を測定した。SET 電流の最大値をマッピングした結果を図8に示し、SET 電流波形を図9に示す。イオンがゲートとドレインの境界に入射した時に、最も大きな SET 電流が観測され、収集される電荷量も大きくなることが分かった。

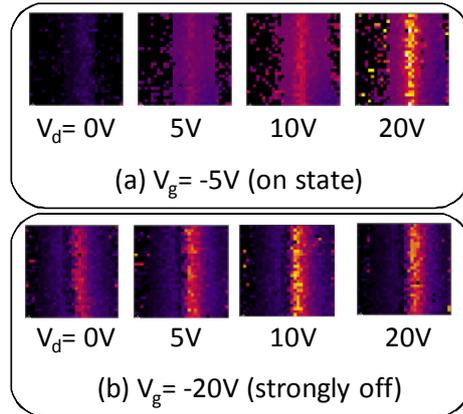


図8. ゲートに $-5V$ (a) および $-20V$ (b) の電圧を印加した MEFET に 15MeV-O が入射した時、ドレイン電極で収集された SET 電流の最大値マッピング

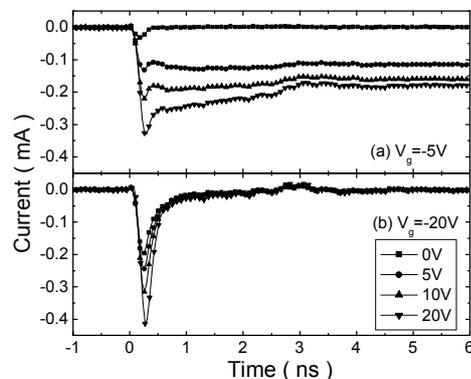


図9. ゲートに $-5V$ (a) および $-20V$ (b) の電圧を印加した MEFET に 15MeV-O が入射した時、ドレイン電極で収集された SET 電流波形

図9に示すように、MESFETがオン状態($V_g = -5V$)とオフ状態($V_g = -20V$)でSET電流波形が異なることが分かる。双方とも、寄生バイポーラトランジスタに起因する電荷増幅効果が観測されている。しかし、図9(a)に示すオン状態においては、典型的なSET電流の1000倍以上の長い時間をかけて電荷が収集されることが明らかとなった。これは、半絶縁性基板に電荷が蓄積されることで、 $-5V$ よりも低い電圧状態になり、電流が流れ続けてしまったためであると考えられる。

以上のように、従来型TIBICを用いて μm オーダーの大きさを持つSiC MESFETのSET電流マッピングを取得し、データ解析することで、①ゲートドレインの境界へイオンが入射した時に最も大きなSET電流が発生する、②寄生ダイオード、寄生バイポーラトランジスタ、および基板の電荷蓄積によってSET電流が流れること、等を明らかにした。

(2) IPEM型TIBIC

単一のイオンが半導体に入射した時に発生するSET電流と、イオン入射位置の関係をマッピングする手法であるIPEM型TIBICの測定系構築に着手した。

図10(a)は、ZnS発光体を冷却CCDで観察した顕微鏡像を示す。ノイズ信号が全面に観測された。Am-241からの α 粒子1個をZnSへ照射した時の顕微鏡像を図10(b)に示す。また、画像処理することでノイズ信号を除去した結果を図10(c)に示す。同図に示すように、

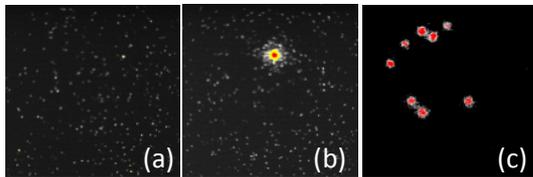


図10. ZnSの顕微鏡像(a)、 α 粒子照射時の顕微鏡像(b)、ノイズ除去後の顕微鏡像(c)

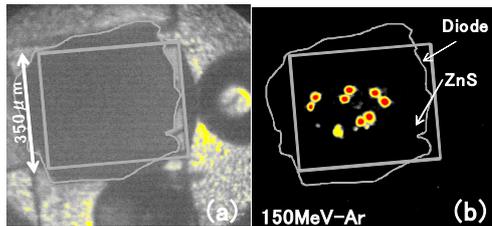


図11. 顕微鏡像(a)、イオン照射時の顕微鏡像(b)

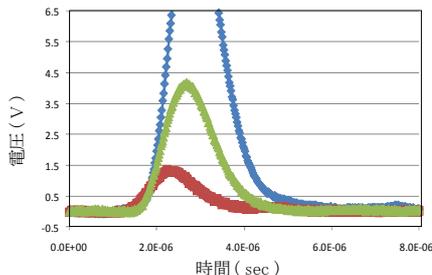


図12. 典型的なイオン誘起電荷波形

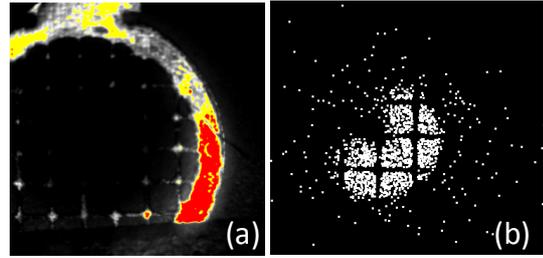


図13. ZnS上に設置したCuメッシュの顕微鏡像(a)、およびイオン誘起発光位置のマッピング像(b)

単一イオンを検出することに成功した。発光スポット径は $30\sim 50\mu m$ 程度であった。続いて、図3に示すように、当該計測システムをAVFサイクロトロンの子午線に組み込んだ。図11は、厚さが $20\mu m$ のZnSの下にダイオードを設置し、 $150MeV-Ar$ を照射した時のイオン誘起発光の顕微鏡像を示す。ZnSを通過したArイオンがダイオードに入射すると、イオン誘起電荷がオシロスコープにて検出される。図12は、典型的なイオン誘起電荷波形を示す。様々な強度の信号が検出された理由は、次のように考えることができる。まず、 $150MeV-Ar$ がZnSを通過する際、そのエネルギーの大部分をZnS中で失う。ZnSの密度が均一でないため、エネルギー付与が様々でなく、様々なエネルギーのArイオンがダイオードに入射する。イオン入射エネルギーが異なると、ダイオードへの電荷付与量が変化し、様々な波形形状の信号が検出される。以上のことから、IPEM型TIBICの開発のためには、本実験で使用したZnSより薄く、均一な発光体を模索する必要がある。次に、ナショナルインスツルメンツ製Labviewを用いて、計測ソフトウェアを開発し、マッピングを取得した。ZnS上に銅(Cu)製のメッシュを設置し、Cuメッシュを通過したArイオンがZnSおよびダイオードに入射するようにした。発光と電荷が同時に検出された場合を選定することで、図13に示すようなイオン誘起電荷マッピングを取得することができた。発光検出の位置分解能が数十 μm であるものの、IPEM型TIBICを実現することができた。IPEM型TIBICは従来型TIBICと比較して、ZnSが不均一であることや膜を薄くできないことが原因となり、位置およびエネルギー分解能が低い欠点がある。

最後に、ZnSの代わりに $CdWO_4$ 、YAG:Ceおよびダイヤモンドに $150MeV-Ar$ を照射し、単一イオン誘起発光を測定した。図14(b)に示すように、 $CdWO_4$ は発光を検出することができなかった。一方、図14(c)(d)に示すように、YAG:Ceおよびダイヤモンドは、図14(a)に示すZnSよりも約1/10倍程の発光スポット径であることが分かった。本研究で開発したIPEM型TIBICの欠点を克服するため、YAG:Ceやダイヤモンドが有用である。

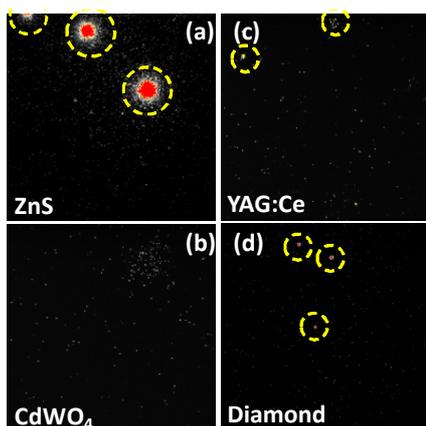


図 14. ZnS (a)、CdWO₄ (b)、YAG:Ce (c)、ダイヤモンド (d) に単一の 150MeV-Ar イオンが誘起する発光の顕微鏡像

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① 小野田忍、牧野高紘、岩本直也、Gyorgy Vizkelethy、児島一聡、野崎眞次、大島武、Charge Enhancement Effects in 6H-SiC MOSFETs Induced by Heavy Ion Strike、IEEE Transactions on Nuclear Science、査読有、57 巻、2010、3373-3379
- ② 小野田忍、Gyorgy Vizkelethy、牧野高紘、岩本直也、児島一聡、野崎眞次、大島武、Enhanced Charge Collection in Drain Contact of 6H-SiC MOSFETs Induced by Heavy Ion Microbeam、Proc. of 9th RASEDA、査読無、2010、230-233
- ③ 小野田忍、岩本直也、小野修一、片上崇治、新井学、河野勝泰、大島武、Transient Response of Charge Collection by Single Ion Strike in 4H-SiC MESFETs、IEEE Transactions on Nuclear Science、査読有、56 巻、2009、3218-3222

[学会発表] (計 8 件)

- ① 小野田忍、重イオンビームを用いたシングルイベント効果の評価技術、第 2 回半導体材料・デバイスフォーラム、2010 年 12 月 11-12 日、熊本県・熊本市・アークホテル熊本
- ② 小野田忍、Enhanced Charge Collection in Drain Contact of 6H-SiC MOSFETs Induced by Heavy Ion Microbeam、9th International Workshop on Radiation Effects on Semiconductor Devices for Space Application、2010 年 10 月 27-29 日、群馬県・高崎市・高崎シティギャラリー
- ③ 小野田忍、単一の重イオンが 6H-SiC MOSFET のドレイン誘起する過渡電流、シリコンカーバイド及び関連ワイドギャップ

半導体研究会 第 19 回講演会、2010 年 10 月 21-22 日、茨城県・つくば市・つくば国際会議場

- ④ 小野田忍、単一イオンが半導体に誘起する電荷のマッピング技術の検討、第 5 回高崎量子応用研究シンポジウム、2010 年 10 月 14-15 日、群馬県・高崎市・高崎シティギャラリー
- ⑤ 小野田忍、Charge Enhancement Effects in 6H-SiC MOSFETs Induced by Heavy Ion Strike、IEEE Nuclear and Space Radiation Effects Conference (NSREC)、2010 年 7 月 19-23 日、アメリカ・デンバー・シェラトン
- ⑥ 小野田忍、単一イオンが半導体に誘起する過渡電流の計測システムの開発、2010 年春季 第 57 回応用物理学関係連合講演会、2010 年 3 月 17-20 日、神奈川県・平塚市・東海大学
- ⑦ 小野田忍、単一の重イオンが 6H-SiC MOSFET に誘起する過渡電流の位置依存性、シリコンカーバイド及び関連ワイドギャップ半導体研究会 第 18 回講演会、2009 年 12 月 17-18 日、兵庫県・神戸市・神戸国際会議場
- ⑧ 小野田忍、Transient Response of Charge Collection by Single Ion Strike in 4H-SiC MESFETs、IEEE Nuclear and Space Radiation Effects Conference、2009 年 7 月 20-24 日、カナダ・ケベック・ヒルトン

[図書] (計 0 件)

なし

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

なし

○取得状況 (計 0 件)

なし

[その他]

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小野田 忍 (ONODA SHINOBU)

独立行政法人 日本原子力研究開発機構・

量子ビーム応用研究部門・研究員

研究者番号：30414569

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし