

〔研究〕

高エネルギーイオン・マイクロビームによる半導体デバイス分析技術の研究

Research of Si, SOI and GaAs Diodes Device Using a High Energy Ion Micro-Beam Induced Charge (IBIC) Imaging

西島 俊二 関口 弘喜 平尾 敏雄
T. NISHIJIMA H. SEKIGUCHI T. HIRAO

Silicon, Silicon On Insulator (SOI) pn junction diode and a GaAs Schottky diode were prepared for the study of the basic mechanism of charge collection followed by high energy charged particle incidence in order to improve the resistance against single event upset. A $2\mu\text{m}$ wide and $20\mu\text{m}$ long rectangular Al electrode attached to a circular Al electrode with a $50\mu\text{m}$ diameter was made on a $2.5\mu\text{m}$ thick epilayer. Al electrodes with a $30\mu\text{m}$ diameter was made on a $2\mu\text{m}$ thick epilayer grown on a $0.12\mu\text{m}$ insulator on Si substrate ($625\mu\text{m}$). And Both a Schottky electrode of Al ($5\mu\text{m} \times 110\mu\text{m}$) and two ohmic electrodes of AuGe/Ni ($110\mu\text{m} \times 110\mu\text{m}$) were made on a $2\mu\text{m}$ thick epilayer grown on a semi-insulating GaAs substrate ($350\mu\text{m}$). The internal device structure was examined by the IBIC (Ion Beam Induced Charge) method using a 2 MeV He^+ ion microbeam ($2\mu\text{m}\phi$). IBIC images clearly show an Al electrode, the SiO_2 , and an epilayer. These results were then used to improve the qualities of the test diodes.

§ 1. はじめに

耐熱・耐放射線半導体素子のための材料基礎技術に関する研究の一環として、高エネルギーイオンマイクロビーム¹⁾を用いて、シングルイベント²⁾に対する耐性向上に必要なデバイスのプロセス・パラメータの研究を行ってきた。いろいろなTEGを試作し、非常に早い過渡電流波形や電荷収集量の測定および試作した試料へ入射するイオンビームの位置との関係などを究明するため、イオン照射実験を行なった。しかし、これらのTEG (Test Element Group) は試作品のため、どうしても試料の製作の過程や実装に問題が出て、設計値が満たされずデバイスの構造や性能が得られない事が有る。従来このようなデバイスの性能をチェックするには、電子線による観察 (EBIC; Electron Beam Induced Charge) がよく用いられてきた。しかしながら電子線ではビームの散乱が大きく、飛程が短く試料内部の鮮明な像が得られない等の欠点がある。高エネルギーイオンマイクロビームを用いた誘起電荷収集 (IBIC; Ion Beam Induced Charge) 法は固体と入射イオンとの相互作用を観察するのに非常に敏感である^{3,4)}。この方法を使った集積

回路のシングルイベント反転 (SEU; Single Event Upset) 現象⁵⁻⁷⁾や半導体デバイスの照射損傷⁸⁻¹⁰⁾の研究に応用されている。

我々はすでに SEU 基礎過程の研究を高速デジタイジングサンプリングオシロスコープを用いて、テスト用マイクロダイオードに高エネルギーイオンが入射した際に誘起される過渡電流を測定してきた¹¹⁻¹⁶⁾。この誘起電荷収集 (IBIC) 法は、デバイスの数 $10\mu\text{m}$ の深さ情報を鮮明に得る事が出来る。

また $1\mu\text{m}$ 当たり 2 個程度の少ないビーム量で、デバイスの照射損傷の影響が少ないデータを得ることが可能である。また、ビームを走査させ測定することにより、デバイス内部の平面的なデバイスの構造やデバイスの感応分布、バイアスを印加した時の空乏層の広がり、電界強度分布、電極や絶縁層の構造や厚さ分布等を像として鮮明に得る事ができる。また、空乏層の広がりやバイアス電圧の関係からエピ層の濃度を想定する事も可能である。

本報告ではイオンマイクロビームを用いて、シングルイベントの過渡電流測定用に試作した Si, SOI (Silicon On Insulator), GaAs の 3 種類のテスト用マイクロショット

KEY WORDS: 族窒化物半導体, 電子デバイス, ワイドギャップ半導体

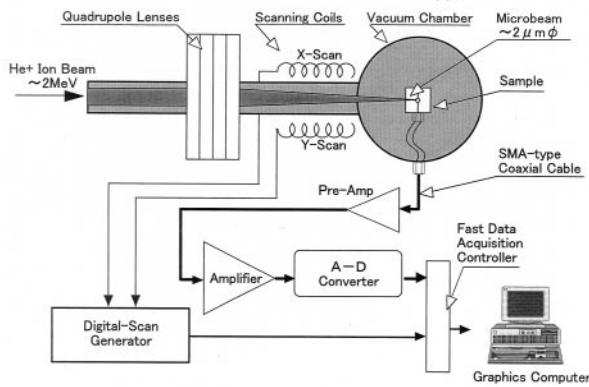


Fig.1 Block diagram for data acquisition system.

キー・ダイオードについて、デバイスの表面および内部情報の分析結果について報告する。

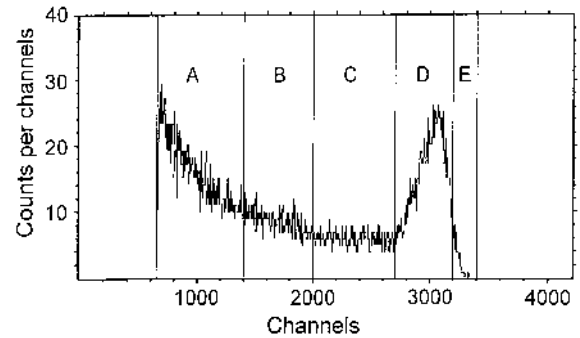
§ 2. 実験方法

Fig.1 に高エネルギーイオンマイクロビームを用いた IBIC の実験構成図を示す。ターゲットのビーム強度はテストダイオードの照射損傷生成率を最小にするためと、過渡電流のパイルアップを避けるために、入射イオン数を 1000n/s (0.16fc) 以下で測定した。このビームを制御する方法はすでに詳細にわたって報告してある³⁾。実験では 2MeV の He^+ イオンのマイクロビーム (約 $2\mu\text{m}\phi$) を用いた。試料には Si 及び SOI 構造及び GaAs の 3 種類のショットキー・ダイオードを使用した。この試料を特性インピーダンス 50Ω に設計したチップキャリア上に接続した。IBIC の測定には試料に電荷感応型前置増幅器 (ORTEC240A) を接続し、時定数 $0.5\mu\text{s} \sim 10\mu\text{s}$ で増幅後、波高分析を行った。得られた IBIC のスペクトルから任意のスペクトルを取りだし、ビーム走査位置情報と同期させてコンピュータで処理して画像を得た。

§ 3 実験結果および議論

3.1 Siダイオード

試作した測定試料は高濃度基板の上にエピ層 $2.5\mu\text{m}$ を成長させ、Si ダイオード $50\mu\text{m}\phi + 20\mu\text{m} \times 2\mu\text{m}$ を作成したものである。Fig.2 に Si ダイオードの IBIC によって得たスペクトルを示す。実験には $180\mu\text{m} \times 180\mu\text{m}$ の範囲でマイクロビームを走査させ測定した。試料にはバイアス電圧 -5V を印加した。得られたスペクトルの X 軸のチャンネルは、プリアンプに到達したパルスの電荷量に比例している。したがって高いチャンネルは大きい電荷領域を示す。Y 軸はカウント数を表し、カウント数の多いチャンネルは

Fig. 2 Observed IBIC spectrum for the thin Si pn junction diode with a 2.0 MeV He^+ microbeam.

同じ電荷が多い事を示している。このスペクトルの測定で 650 チャンネル以下は、ノイズカットのため測定していない。Fig.2 に測定されたスペクトルは高いチャンネル側に大きなピークのスペクトルを示した。一般にイオンビームがデバイスに入射した場合、発生した電荷は電界の存在する場所ではドリフトにより移動する。また電界の存在しない場所では拡散によって移動する。従って、測定したスペクトルから、高いチャンネルのピークはドリフト成分で高い電荷を示し、低いチャンネル側では電極から遠い箇所から到達した電荷や拡散成分の弱い電荷を測定している。このスペクトルからデバイス上で操作されたビーム位置と、そこで発生した電荷量の信号を使って、IBIC 像を描く事が出来る。Fig.3 は Fig.2 のスペクトルから、A は $500 \sim 1400$ チャンネル、B は $1400 \sim 2000$ チャンネル、C は $2000 \sim 2700$ チャンネル、D は $2700 \sim 3200$ チャンネル、E は $3200 \sim 3400$ チャンネルのスペクトルを取り出し画像を描いた。この IBIC の画像では、画素の変化をスペクトルのカウント数をカラー表示することができる。収集電荷量の多い場所やカウント数の多い場所は高い画素値を表している。A は、非常に低いポテンシャル領域での拡散成分の電荷を集めている。デバイスの真下部分からも拡散成分と思われる電荷を集めており、X 軸に $90\mu\text{m}$ 、Y 軸に $113\mu\text{m}$ の卵型を示した。B では X 軸に $113\mu\text{m}$ 、Y 軸に $87\mu\text{m}$ 、太さ $8\mu\text{m}$ のドーナツ形を示し生成された電荷を見る事が出来、このスペクトルは空乏層より $12 \sim 20\mu\text{m}$ 遠い所からの生成電荷まで測定している。C では X 軸に $96\mu\text{m}$ 、Y 軸に $71\mu\text{m}$ 、太さ $8\mu\text{m}$ のドーナツ形状に生成された電荷を測定している。D では直径 $58\mu\text{m}$ の領域に加えて細長い電極の部分と対応する画像を示した。この $58\mu\text{m}\phi$ の領域はバイアス電圧 -5V を印可した空乏層の広がり計算値とほぼ一致した。また IBIC 像から $50\mu\text{m}$ の電極と細長い電極の接点でのポテンシャル分布は電極の形と違いならかなポテンシャル分布を示すことが分かる。E では直径

49 μm 太さ5 μm のドーナツ形状を見る事が出来る。ドーナツの空洞部30 μm はAl電極と基板との接触部を意味していると考えられる。このテスト用Siショットキー・ダイオードの製造行程に従うと、エピ層上のSiO₂膜が直径30 μm にわたって取り除かれ、直径50 μm にわたってAl電極が蒸着される。したがって厚さ0.5 μm の単一層Al電極と厚さ1 μm のSiO₂とから成る二層電極が形成される。このドーナツ形状部分について、2MeVのヘリウムビームが入射した時の線形エネルギー付与率(LET)をTRIM92¹⁷⁾コードにより計算すると、Al電極(0.5 μm)とSiO₂(1 μm)を通過したLETは289 KeV/ μm 、中心部の空洞のAl電極(0.5 μm)を通過したLETは237 KeV/ μm と計算され、この僅かなLETの違いを測定している事を裏付けた。

3.2 シリコン基板の埋め込み酸化膜構造
ショットキー・ダイオード

SOI構造ダイオードは上層Si層2 μm 、埋め込み酸化膜0.12 μm のベース基板上に30 $\mu\text{m}\phi$ の電極を設けた。コンタクト用電極は30 $\mu\text{m}\phi$ の電極より、70 μm 離して3方向を囲む形で30 μm の幅で製作した。シングルイベントではSOI構造デバイスの埋め込み酸化膜厚が薄いデバイスにイオンが侵入した際、酸化膜内の電離により導電性経路が発生し下層基板から電荷の吸い上げが起こりSOI基板効果が薄れることが懸念される。本試料はこのような従来から期待された電荷収集の抑制効果が維持されるかを見出すために作成したものである。これらの試料が設計どおり製作されているか確認するため、70 $\mu\text{m} \times 70\mu\text{m}$ の範囲でマイクロビームを走査させ測定した。試料にはバイアス-10Vを印加した。SOI構造ダイオードのIBICによって得たスペクトルをFig.4に示す。このスペクトルとビームの位置情報

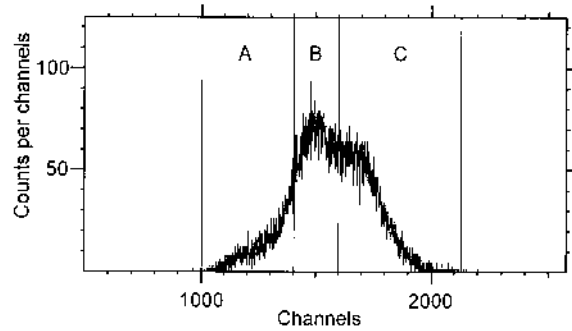


Fig.4 Observed IBIC spectrum for the thin SOI pn junction diode with a 2.0 MeV He⁺ microbeam.

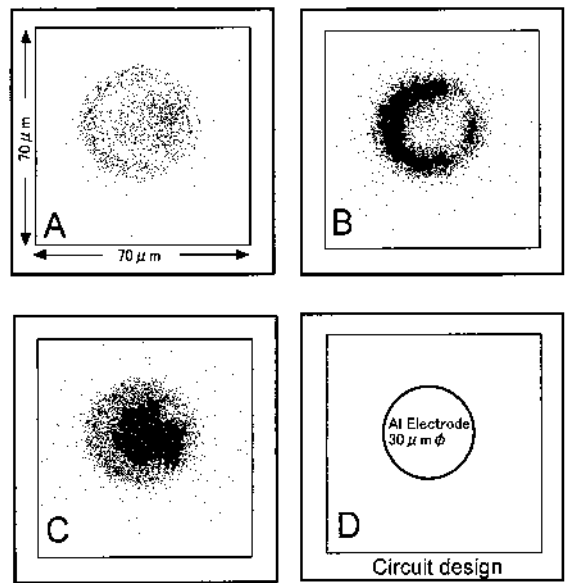


Fig.5 The IBIC images of thin SOI pn junction diode. Windows A, B and C correspond to the regions A, B, C of fig. 4, respectively. Beam scanning range was 70 $\mu\text{m} \sim 70\mu\text{m}$. D is the circuit design of SOI pn junction device with the same scale as IBIC images.

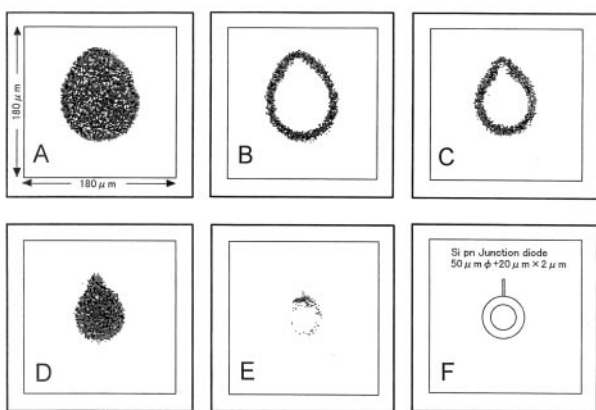


Fig. 3 The IBIC images of thin Si pn junction diode. Windows A, B, C, D and E correspond to the regions A, B, C, D and E of fig.2, respectively. Beam scanning range was 180 $\mu\text{m} \sim 180\mu\text{m}$. F is the circuit design of Si pn junction device with the same scale as IBIC

を基に画像処理をした結果をFig.5に示す。Fig.5はFig.4のスペクトルから、Aは1000～1400チャンネル、Bは1400～1600チャンネル、Cは1600～2000チャンネルのスペクトルを用いて描いたIBIC画像である。画像Aでは、デバイスは33 $\mu\text{m}\phi$ 全体から弱い電荷を集めている。Bは33 $\mu\text{m}\phi$ から電荷を集めている。また中央部分に大きさ17 μm 程度の部分から比較的まとまった電荷を収集している。Cの画像からはBの17 μm の部分が無い33 μm のドーナツ形状から電荷を集めている。この33 μm はバイアス電圧-5Vを印可した空乏層の広がりを意味している。設計上はBのスペクトルとCのスペクトルは同じ電荷のスペクトルを示さなければならない。しかしながら、この試料では直径33 μm の中央部に異なった電荷を発生する個所が存在することを明らかとした。これらの実験結果から、デバ

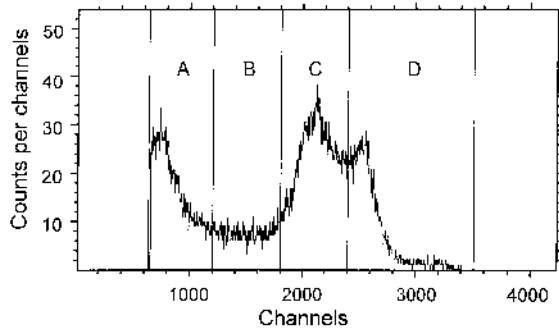


Fig. 6 Observed IBIC spectrum for the thin GaAs Schottky diode with a 2.0 MeV He⁺ microbeam.

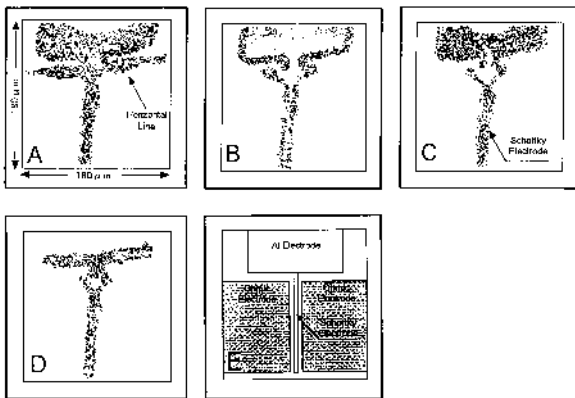


Fig. 7 The IBIC images of the thin GaAs Schottky diode. Windows A, B, C, and D of Fig. 6, respectively. Beam scanning range was 180 μ m \times 180 μ m. E is circuit design of GaAs Schottky diode to same scale as IBIC images.

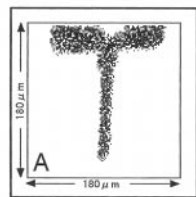


Fig. 8 An IBIC image of the thin GaAs Schottky diode with the window A (650-1200 channels) after reducing Ni contamination.

イスの製作行程に起因する素子の不均一性が観測されたと考えられる。即ち、素子の製作行程では30 μ m ϕ の電極を蒸着し電極のコンタクトを良くするためシンター作業を行う。この温度制御が不確実でこのような2つの感度分布を持つデバイスが製作されたものと考察した。

3.3 GaAsショットキー・ダイオード(半絶縁タイプ)

GaAs基板は濃度 $1 \times 10^7 \Omega \cdot \text{cm}$ の半絶縁タイプを使用した。その基板の上に2 μ mのエピ層(濃度 $9.5 \times 10^{15} / \text{cm}^3$)を設け、2つのオーム性電極110 μ m \times 110 μ m, その2つのオーム性電極の中央部から5 μ m離してゲート電極110 μ m

\times 5 μ mのデバイスを作成した。Fig.6にGaAsショットキー・ダイオードのIBICによって得たスペクトルを示す。実験では2MeVヘリウムイオンのマイクロビームを用い、180 μ m \times 180 μ mの範囲を走査させた。Fig.7はFig.6のスペクトルを用いて画像処理したIBIC像を示す。画像はFig.6のスペクトルから、Aは650 ~ 1200チャンネル、Bは1200 ~ 1800チャンネル、Cは1800 ~ 2400チャンネル、Dは2400 ~ 3500チャンネルのスペクトルを用いて描いたIBIC像である。Aではゲート電極5 \times 110 μ mと電極120 μ m \times 120 μ mの全体に拡散成分と思われる非常に弱い電荷を集めている。また、オーム性電極と電極との間のエピ層から15 μ m \times 170 μ mの範囲で弱い電荷を集めている。Bでは剥き出しのエピ層から弱い電荷を集めている。このデバイスはエピ層が剥き出しのため、エピ層に試料作成中に作業の汚れが附着してしまったと推測した。Cの画像では電極部分120 μ m \times 120 μ mからの電荷を多く集めている。細いゲート電極の部分からも少し電荷を集めている事が伺える。Dの画像はスペクトルの一番高いピークと対応するもので、エピ層の上に載ったゲート電極110 μ m \times 5 μ mからのものである。画像からは細長い電極は8 μ m, 右端の四角い部分は120 μ mと測定された。このときバイアス電圧-10Vの空乏層の広がり、1.24 μ mと計算でき5 μ mのAl電極の両側に広がるので7.5 μ mとなり、IBIC像から細長い電極は8 μ mと測定され実験値とほぼ一致した。またFig.7Dの画像から明らかのように、電極の一部がFig.7の模式図と違ってエピ層が大きく電極までずれて製作されていた事も確認できた。また右中央の電荷収集のない部分は金リード線の影であり、入射したマイクロビームが金リード線(25 μ m)によってデバイスまで到達していない事を示す。試料は同じ物を、洗浄等の取り扱いに注意して作り直しを行い、同じ条件で実験を行なった。作り直した試料のスペクトル650 ~ 1200チャンネルを用いて描いたIBIC像をFig.8に示す。その結果、作り直した試料からは、Fig.7Aで見られたようなオーム性電極とAl電極との間の、縦の像(15 μ m \times 170 μ m)やゲート電極との交点部分の乱れは見られない。またFig.7B電極の周りで見られた弱い電荷の収集も見られない。バイアス電圧-10Vの印加によってゲート電極では10 μ m ϕ \times 100 μ m及びAl電極は130 μ mの範囲から弱い電荷を集めている。この試料の設計どおりのデバイスが作られている事を確認した。

§ 4 まとめ

2MeVのヘリウムイオンのマイクロビームを用いたIBIC像による微細なデバイスの評価について報告した。IBIC像からデバイスの構造を平面的に捕らえる事がで

き、得られたスペクトルからデバイスの収集電荷の感度分布を見る事ができる。Siダイオードでは、その分解能はAl(0.5 μm)とSiO₂酸化膜(1 μm)を通過したビームのLETと、エピ層のみを通過したビームのLETの違いを画像として得ることができた。Fig.2のスペクトルからA, B, Cチャンネルの生成された電荷は、メインスペクトルと違い小さなエネルギーである。Siの場合イオンビームが入射して生成した電荷のライフタイムはエピ層濃度が $7 \times 10^{15}/\text{cm}^{-3}$ のとき $3.52 \times 10^{-5}\text{sec}$ と長く、IBICの測定では電極から遠く離れた位置からも到達している事を示している。

埋め込み酸化膜構造ショックダイオードのIBIC像からは、電極に2つの異なった感度の部分を見つけた。原因として電極のコンタクトを良くするためシンター作業に問題があったと考えられる。即ち、30 $\mu\text{m}\phi$ の電極の中心部にAlSi層等がわずかに形成され、2つの異なった電極が形成されたと考察した。またGaAsダイオードのIBIC像では、電極を通過して誘起した電荷と直接エピ層に入射して誘起した電荷の違いなど観察した。Fig.7A, BのIBIC像からエピ層や電極側面からの弱い電荷の発生は、デバイス構造からは考えにくく、デバイスの作製時に問題があったと判断された。即ち電極を付ける作業行程では、まず基板にニッケルを蒸着し、マスクをして化学エッチングをし、次に金ゲルマニウム合金を付け化学エッチングして電極を作る。この試料ではこの様な作業の中でニッケル等がきれいに取りきれいでなかったと推測し作り直した。SiダイオードのFig.3 AとGaAsダイオードのFig.7AのIBIC像でデバイスの全体から弱い電荷を収集している。スペクトルからこの電荷はメインピークと離れており拡散成分と考えられる。また2MeVのビームの飛程はSiで約7 μm 有り、0.5 μm のA1電極と2 μm の薄いエピ層を通過したビームは、バルク基板の奥深く入り込んで生成された電荷をも集めている。同じようにGaAsダイオードでも電極、エピ層を通過したビームは半絶縁基板の奥深く入り込んで生成された電荷も集めている。GaAsダイオードのバルク基板でも同じ結果であった事を付け加えたい。このようにデバイスにバイアスを印加した時の空乏層の大きさを平面的に確認すると共に、デバイスのポテンシャル分布を画像として見る事が出来た。また拡散成分を使って描いたIBIC像はSiとGaAsのキャリア寿命の差を明確にすることが出来た。我々はシングルイベントに関する研究を行い非常に早い過渡電流波形と電荷量の測定を行ない幾つかの報告を行なっている。報告ではそれらの実験に用いるため試作したデバイスのIBIC像による製品検査について考察した。当然ではあるが、問題の有ったデバイスは作り直しを行なっている事を付け加えたい。

本研究は、冒頭で述べたように「耐熱・耐放射線半導体素子のための材料基礎技術に関する研究」の一環として実施したものであるが、このうち特に放射線効果評価技術の研究開発として行ったものである。半導体素子に対する放射線効果としては、従来より集積線量効果(トータル・ドーズ効果)の評価が主として行われてきたが、宇宙環境や将来の核融合炉環境で重要となる高エネルギー粒子線や中性子線によるはじき出し損傷が及ぼす効果やSEU等についてはその評価手法が確立されておらず、確実な評価が困難であった。本研究で述べたIBIC法はこの点を改善する手法の一つであり、過渡電流測定法と併せて素子におけるダイナミックな放射線効果の評価法として確立することが出来たと言える。本研究ではSiやGaAsの素子を利用してその評価手法としての特性を明らかにしたが、今後は耐熱・耐放射線半導体素子として期待されるSiC素子についてもこの手法を適用し、そのダイナミックな放射線効果を評価していく予定である。

謝 辞

本研究の遂行にあたりご協力戴きました宇宙開発事業団の松田純夫氏、日本電子部品信頼性センターの塩野昇氏にご協力戴きましたこと、ここに深甚の謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 西島俊二, 関口弘喜, 梨山勇, 小林直人: 電子技術総合研究所彙報 第54巻 第4号(1990) 395-410
- 2) 関口弘喜, 西島俊二, 平尾敏雄, 梨山勇: 応用物理 第65巻 第2号(1996) 126-131
- 3) M.B.H. Breese, G.W. Grime and F. Watt, Nucl. Instr. and Meth. B77 (1993) 301.
- 4) M.B.H. Breese, J. Appl. Phys. 74 (1993) 3789.
- 5) B.L. Doyle, K.M. Horn, D.S. Walsh and F.W. Sexton, Nucl. Instr. and Meth. B64 (1992) 313.
- 6) F.W. Sexton, K.M. Horn, B.L. Doyle, J.S. Laird, M. Cholewa, A. Saint and G.J.F. Legge, IEEE trans. Nucl. Sci. NS40 (1993) 1787.
- 7) K.M. Horn, B.L. Doyle, F.W. Sexton, J.S. Laird, A. Saint, M. Cholewa and G.J.F. Legge, Nucl. Instr. and Method. B77 (1993) 355.
- 8) M.B.H. Breese, G.W. Grime and M. Dwllith, Nucl. Instr. and Method. B77 (1993) 332.
- 9) F.W. Sexton, K.M. Horn, B.L. Doyle, M.R. Shaneyfelt and T.L. Meisenheimer, IEEE trans. Nucl. Sci. NS42 (1995) 1940.
- 10) M.B.H. Breese, A. Saint, F.W. Sexton, K.M. Horn, H. Schone,

- B.L. Doyle, J.S. Laird and G.J.F. Legge, J. Appl. Phys. 77 (1995) 3734.
- 11) I. Nashiyama, T. Nishijima, H. Sekiguchi, Y. Shimano and T.Goka, Nucl. Instr. and Meth. B54 (1991) 407.
- 12) I. Nashiyama, T. Hirao, T. Kamiya, H. Yutoh, T. Nishijima and H. Sekiguchi, IEEE trans, Nucl. Sci. NS40 (1993) 1935.
- 13) T. Nishijima, H. Sekiguchi, S. Matsuda, M. Takeuchi, N. Shiono, H. Anayama and A. Morio, Nucl. Instr. and Meth. B104 (1995) 528.
- 14) T. Hirao, I. Nashiyama, T. Kamiya, T. Nishijima, Nucl. Instr. and Meth. B104 (1995) 509.
- 15) T. Nishijima, H. Sekiguchi, T. Hirao, I. Nashiyama, N. Nemoto, S. Matsuda, N. Shiono, Nucl. Instr. and Meth. B130 (1997) 528.
- 16) T. Nishijima, H. Sekiguchi, S. Matsuda, N. Shiono, Nucl. Instr. and Meth. B130 (1997) 557.
- 17) G.J. F. Ziegler, TRIM-92 The Transport of Ion in Matter (Version 95.9). IBM-Research, Computer program (1995).
(1999.2.12 受付)