

JAERI-Research

95-090



シリコン窒化膜の γ 線照射による電子-正孔対発生量評価
およびMNOS構造の電荷捕獲現象の解析
(協力研究)

1996年1月

大西一功*・高橋芳浩*・小松 茂*・吉川正人

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越してください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1996

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 株原子力資料サービス

シリコン窒化膜の γ 線照射による電子-正孔対発生量評価
およびMNOS構造の電荷捕獲現象の解析

日本原子力研究所高崎研究所材料開発部
大西 一功*・高橋 芳浩*・小松 茂*・吉川 正人

(1995年12月12日受理)

シリコン窒化膜中で放射線照射により発生する電子-正孔対の発生数を評価する目的で、照射中の絶縁膜電流測定システムの構築を行い、測定結果を検討した。大気中での γ 線照射下での電流を測定した結果、観測電流の大部分は被測定素子近傍の大気の電離に起因することがわかり、照射環境の減圧が必要であることがわかった。真空雰囲気においてX線照射による誘起電流を測定した結果、シリコン窒化膜中での電荷発生量の評価が可能となり、シリコン酸化膜での発生量のほぼ20%程度であることがわかった。この結果を用いてシリコン酸化膜・窒化膜を絶縁膜としたMIS構造(MNOS構造)の絶縁膜中の電荷発生、捕獲に対するモデルを提案し、 γ 線照射によるミッドギャップ電圧の変化について評価し、照射中の電荷捕獲機構について検討を行った。

本報告書は、日本原子力研究所と日本大学との協力研究の成果である。

高崎研究所：〒370-12 群馬研高崎市綿貫町1233

*日本大学

Evaluation of Number of Hole-electron Pairs Induced by Irradiation in Silicon-nitride Layers and Analysis of Charge Trapping Mechanisms in Metal-insulator-semiconductor Structures with silicon-nitride layers

Kazunori OHNISHI*, Yoshihiro TAKAHASHI*, Shigeru KOMATSU*
and Masahito YOSHIKAWA

Department of Material Development
Takasaki Radiation Chemistry Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Watanuki-cho, Takasaki-shi, Gunma-ken

(Received December 12, 1995)

In order to evaluate the number of hole-electron pairs induced by irradiation in a silicon-nitride film, leakage current in metal-insulator-semiconductor (MIS) structures with a silicon-nitride layer were measured during irradiation.

The most part of the leakage current measured in air pressure was related with a large amount of ions induced by irradiation surrounding the samples. However, the current induced in vacuum shows good correlation with the generation of hole-electron pairs in the silicon-nitride layers by irradiation. It was found that the number of carriers which contribute to the leakage current in the silicon-nitride layer is approximately 20% of those in the oxide layer. We propose a model for generation and trapping of radiation-induced carriers in the silicon-nitride layers based on the experimental results, and investigate the mechanism of mid-gap voltage shift of MIS structure with a silicon-nitride layer using the proposed model.

Keywords: Silicon-nitride Layer, Gamma-rays, Hole-electron Pairs, Amount of Charges Generation, MIS Structure, MNOS Structure, Charge Capture, Midgap Voltage

This research has reported for results of joint-study between Japan Atomic Energy Research Institute and Nihon University.

* Nihon University

目 次

はじめに	1
1. 照射による絶縁膜内での電子—正孔対発生量評価方法	3
2. γ 線照射中の絶縁膜電流測定	6
2.1 使用器具	6
2.2 電流測定方法	10
2.3 非照射雰囲気における電流測定	11
2.4 γ 線照射による放射線誘起電流測定	15
2.4.1 素子未装着時の電流測定	15
2.4.2 MOSキャパシタ素子装着時の電流測定	18
2.4.3 検 討	20
2.5 ま と め	21
3. 真空雰囲気中での電子線照射中の絶縁膜電流測定	22
3.1 実験方法	22
3.2 絶縁膜電流測定結果	24
3.3 検 討	26
3.4 ま と め	27
4. MNOS構造の γ 線照射による電荷捕獲現象	28
4.1 測定方法	28
4.2 測定結果	30
4.3 検 討	32
4.3.1 MNOS構造の電荷トラップモデル	32
4.3.2 計算結果	35
4.4 ま と め	37
5. 結 論	38
謝 辞	39
参考文献	40

Contents

Introduction	1
1. Evaluation of Radiation-induced Generated Charges in Insulator of MIS Structure	3
2. Measurement of Leakage Current of MIS Structure during Gamma-ray Irradiation	6
2.1 Electronic Appliance	6
2.2 Measurement Method of Leakage Current	10
2.3 Measurement of Leakage Current before Irradiation	11
2.4 Measurement of Radiation-induced Current	15
2.4.1 Radiation-induced Current in Electronic Appliance	15
2.4.2 Radiation-induced Leakage Current of MOS Capacitor	18
2.4.3 Discussion	20
2.5 Summary	21
3. Measurement of Leakage Current of MIS Structure during Electron-beam Irradiation under Vacuum	22
3.1 Experiment	22
3.2 Results	24
3.3 Discussion	26
3.4 Summary	27
4. Evaluation of Charge Trapping Behavior in MNOS Structure during Gamma-ray Irradiation	28
4.1 Experiment	28
4.2 Results	30
4.3 Discussion	32
4.3.1 Modeling of Charge Trapping Phenomena in MNOS Structure	32
4.3.2 Simulated Results of Mid-gap Voltage Shift due to Irradiation	35
4.4 Summary	37
5. Conclusion	38
Acknowledgments	39
References	40

はじめに

近年の宇宙開発の進展に伴い、LSIをはじめとした半導体素子は人工衛星の必要不可欠な電子部品となっている。しかし宇宙空間は、電子線、陽子線、粒子放射線、銀河宇宙線などの放射線環境であり、衛星内で使用される半導体素子の放射線照射による劣化が問題となる。通常、地球の周回軌道を回る人工衛星については、その使用期間（ミッション期間）を10年とした場合、この期間に静止軌道上で衛星が受ける総線量は、素子の搭載場所によっても異なるが約 10^5 rad(Si)と考えられる。したがって、宇宙放射線環境で使用される半導体素子は、種々の状況を考慮して1Mrad(Si)の耐放射線性が要求される。

現在の半導体集積回路の多くはシリコン基板上に構成され、その基本構造としてMetal-Oxide-Semiconductor (MOS)構造が使用されている。MOS構造の放射線照射による特性変化を把握することは素子の耐放射線性の強化において重要であり、これまでに多くの研究が行われている。MOS構造素子に放射線が照射されると、しきい値電圧の変動や相互コンダクタンスの低下が引き起こされることは良く知られている。これは、酸化膜中の固定正電荷量、およびSi-SiO₂界面における界面準位密度が放射線照射により増加するためであり、これらの現象は、照射によって酸化膜中で発生した電子-正孔対のうち、正孔がSi-SiO₂界面付近で捕獲されることに起因するという報告がある^{1,2)}。したがって、酸化膜中で発生した電荷を界面から離れた絶縁膜中で捕獲することができれば、これらの特性劣化を抑制できるものと考えられる。この観点に立って提案された耐放射線構造として、Metal-Nitride-Oxide-Semiconductor (MNOS)構造がある。本構造の絶縁膜はシリコン酸化膜およびシリコン窒化膜の2層構造であり、窒化膜中に存在する電子および正孔トラップに、照射によって発生した電荷を捕獲させることにより界面での電荷捕獲を抑制するものである。これまでに、放射線照射による電気的特性の変化がMOS構造とは異なることが報告されているものの³⁻⁶⁾、照射中の電荷捕獲機構についての詳細な検討は少なく、また定量的な考察も十分には行われていない。これは、放射線照射下における窒化膜中の電荷発生および電荷捕獲現象が明確にされていないことに起因する。シリコン窒化膜中の放射線照射によるこれら電荷捕獲現象の把握は、MNOS構造の照射効果を明らかに

し、耐放射線性素子として最適化を行う上で非常に重要である。
本研究では、 γ 線照射時の窒化膜における電子-正孔対発生量を評価することを目的に、照射中の絶縁膜電流測定システムを構築し、測定結果から放射線照射下のMNOS構造における電荷捕獲機構について検討を行った。第1章では、電子-正孔対発生量の評価原理について述べる。第2章では、 γ 線照射中の絶縁膜電流測定について述べる。大気中における γ 線照射下での絶縁膜電流測定について検討した結果、測定電流の大部分が素子近傍の大気電離に起因するものであることが確認され、減圧雰囲気中での照射が重要であることがわかった。第3章では、SEM装置を用いた真空雰囲気での電子線照射中の絶縁膜電流測定結果について述べ、また第4章では、これらの測定により得られたシリコン窒化膜中での電子-正孔対発生量、およびMNOS構造絶縁膜中の電荷トラップモデルを用いて、照射中の電荷捕獲機構について評価を行い、総括的に検討する。

1. 照射による絶縁膜内での電子-正孔対発生量評価方法

物質に電離放射線が照射されると、物質中の構成原子と相互作用を起し、放射線のエネルギーが失われる。その相互作用は電離放射線によって異なるが、本研究で特に注目している ^{60}Co - γ 線やX線では光電効果、コンプトン効果、電子対生成が起こる。なかでもコンプトン効果の生じる確率が大きく、これによる電子-正孔対の生成が照射効果を考える上で重要となる。シリコン酸化膜中において、一对の電子-正孔対生成に必要なエネルギーは、実験的に約18eVであることが求められている⁷⁾。MOS構造のシリコン酸化膜中で発生した電子-正孔対のうち、一部は発生後直ちに再結合により消滅するが、初期の再結合を逃れたものは電子、正孔に分離して自由キャリアとして移動可能となる。この電子-正孔対が分離する割合は酸化膜中の電界に依存する。図1に実験的に求められた酸化膜内電界強度に対する電子-正孔対の分離効率を示す⁸⁾。電界強度の増加に伴い分離の割合は増加する。電子線、X線、 γ 線の場合は、2MV/cm以上の電界強度で70%以上となる。この分離した電荷が電荷捕獲や界面準位の発生に寄与するので、この電荷量の評価は照射による電気的特性変化を検討する上で非常に重要である。初期の再結合を逃れた電子-正孔対の数を狭義の発生量として定義する（以下、電荷発生量と記す）と、絶縁膜電流は単位時間当たりの絶縁膜全領域における電荷発生量に等しくなる。また、測定電流は絶縁膜厚および印加電界に依存し、照射により生ずる絶縁膜電流を、絶縁膜厚、印加電界をパラメータとして測定することにより、被測定絶縁膜における単位体積、単位線量、単位時間当たりの電荷発生量が決定できる。

放射線照射によるシリコン酸化膜中での電荷発生量についてはいくつかの報告がある。Boeschらは、酸化膜厚の異なるMOS構造のX線照射中の酸化膜電流測定から、電荷発生量の印加電界依存性を実験的に求めている。図2は10keVのX線を吸収線量率8.55krad(SiO_2)/sで照射したときの酸化膜厚に対する絶縁膜電流測定結果で、印加電界は0.1~6MV/cmである。結果より、絶縁膜電流は絶縁膜厚および印加電界と共に増加しているのがわかる。図3に、この測定結果より得られた電荷発生量の印加電界依存性を示す。図のように電荷発生量は電界と共に増加しており、これは先に示した発生直後の再結合に起因したものと考えられる。

このように、照射により誘起される絶縁膜電流（放射線誘起電流）の測定は、絶縁膜における電荷発生量評価の上で非常に有効な手法である。

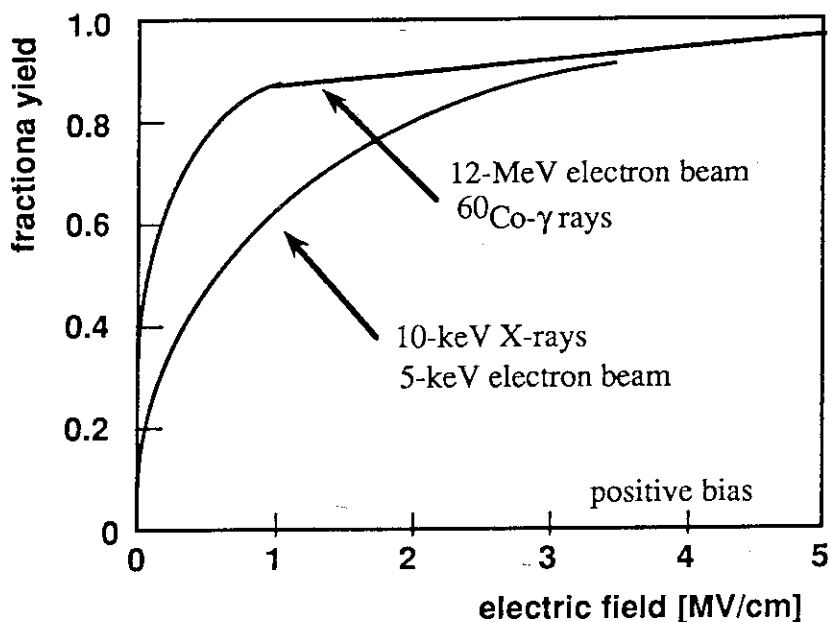


図1. シリコン酸化膜における電子-正孔対分離効率 (文献8による)。

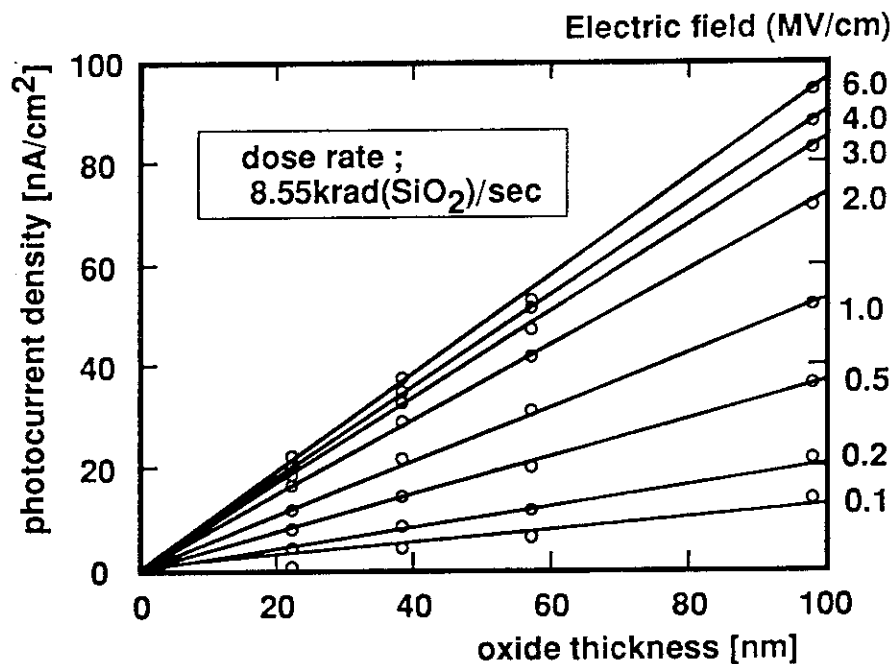


図2. MOS構造のX線 (10keV) 照射による酸化膜電流測定結果 (文献8による)。

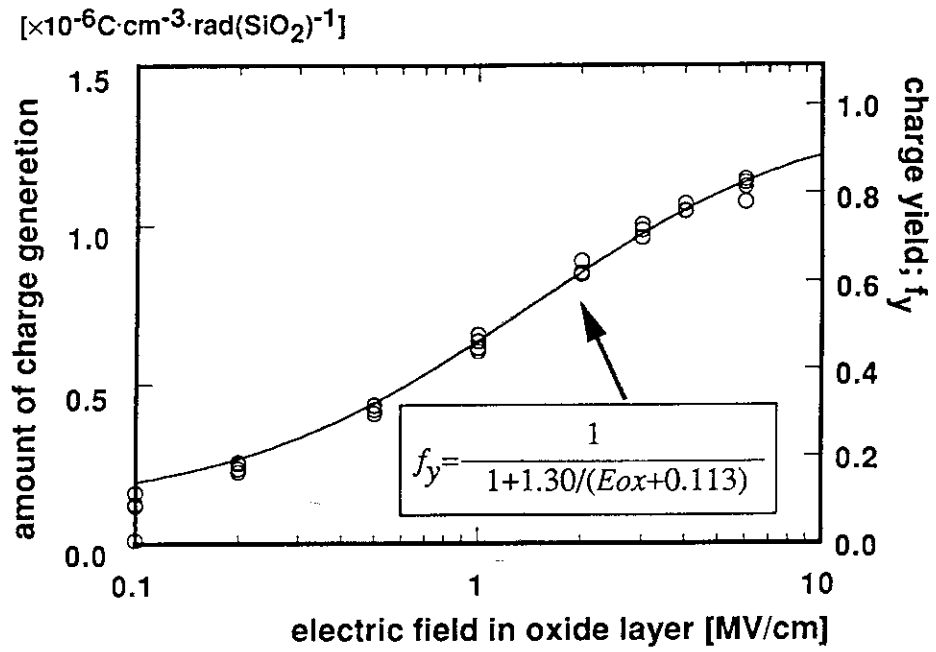


図3. X線 (10keV) 照射時の酸化膜中での電荷発生量の印加電界依存性 (文献8による) .

2. γ 線照射中の絶縁膜電流測定

2.1 使用器具

MIS構造の放射線誘起電流は非常に微小であり、高精度の測定器が必要となる。また、電圧源および電流計などの測定器に使用されているデバイスの放射線による特性劣化などを避けるために、測定器は照射室外に設置する必要がある。図4は絶縁膜電流測定の基本回路構成である。また図5に、本実験で用いた照射室、および被照射素子、測定器の設置図を示す。10m以上の伝送ケーブルを使用する必要があり（図4のA-B間距離に相当）、伝送ケーブルから発生する電流、および素子以外の被照射体による放射線誘起電流などの雑音電流の抑制が重要となる。以下に、本実験で使用した測定器、伝送ケーブルについて説明する。

本測定で使用する測定器は、HP-4142B (MODULAR DC SOURCE/MONITOR)であり、プラグイン方式の各種電源または測定ユニットを自由に組み合わせて、広範囲、高分解能、高速な直流測定を行うことができる。使用したプラグインユニットは電源/測定ユニット(SMU: Source/Monitor Unit) 41420Aである。このユニットには電圧、電流源および電圧、電流計が内蔵されており、定電圧出力/電流測定、または定電流出力/電圧測定の両機能を使用できる。またケルビン接続用の入出力端子、独立したガード端子を備えている。最大定格は1A/200Vであり、定電圧出力/電流測定時には出力分解能 $100\mu\text{V}$ 、測定分解能 20fA 、また定電流出力/電圧測定時には出力分解能 50fA 、測定分解能 $40\mu\text{V}$ である。本実験では、被測定素子のゲート電極および基板にそれぞれSMUを接続することにより、ゲート電極電流と基板電流をそれぞれ独立に測定し、4台のSMUにより同時に2素子の電流測定を行った。なお、本測定器の制御および測定値取得はGP-IB接続されたコンピュータ(PC-9801)を用いて行った。

次に、使用した伝送ケーブルについて述べる。一般に、微小電流測定には同軸ケーブルが用いられ、外部導体を接地電位として使用し、中心導体を流れる電流を測定する。この場合、両導体間に生じた電位差のために発生する漏れ電流が、測定電流に影響を与えることが懸念される。また照射室内に設置したケーブルの誘電体に放射線が照射されることによって発生した電荷が電界により分離し、電流として観測されることも予想される。特に10m以上のケーブルが使用されることを考慮すると、誘電体に印加される電界

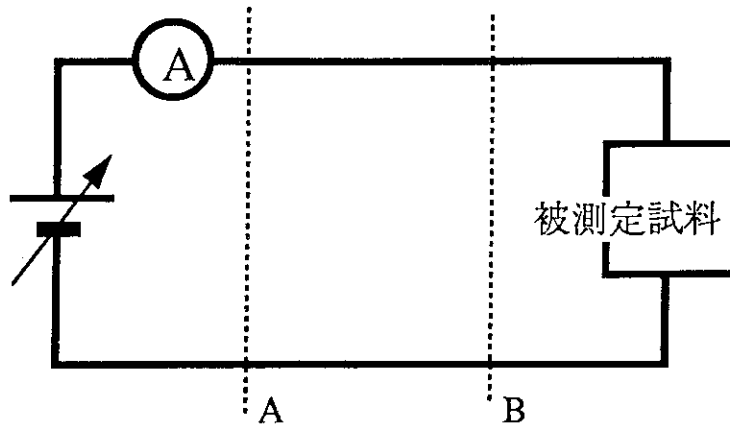


図4. 絶縁膜電流測定の基本測定回路.

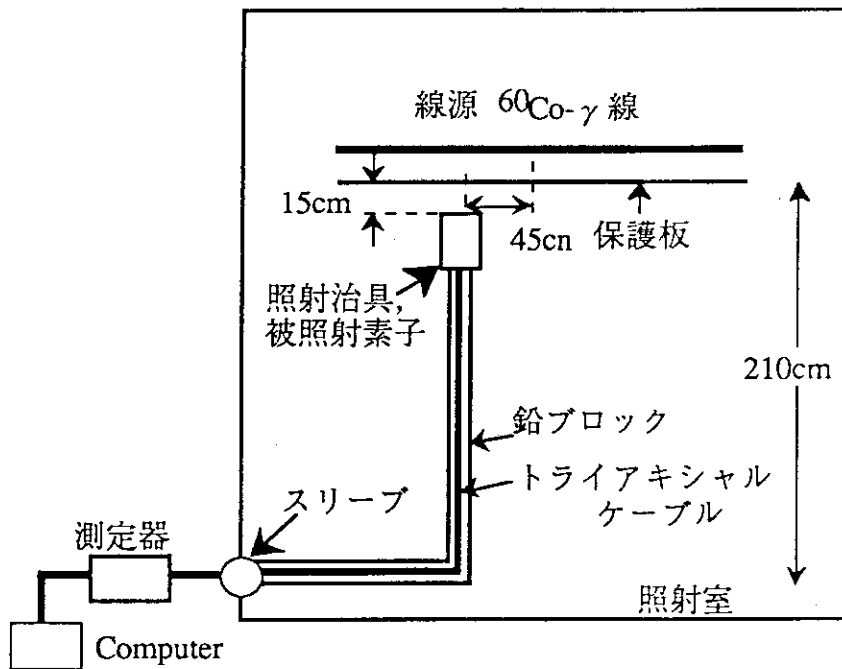


図5. 照射室における被照射素子, 測定器の設置図.

を抑制する必要がある。これらの影響を最小にするため、本実験では伝送ケーブルとして三重同軸ケーブルを使用した。三重同軸ケーブルは、中心導体、内部シールド導体、外部シールド導体からなる同軸ケーブルであり、各導体間は誘電体により絶縁されている。三重同軸ケーブルを用いて電流を測定する際には、外部シールドを接地電位とし、中心導体を流れる電流を測定する。また内部シールドを中心導体と同電位となるように接続することにより、中心導体-内部シールド導体間の電界発生を抑制し、電界に起因する漏れ電流および照射による誘起電流が最小限に抑えられる。一般に、同軸ケーブルの誘電体としてはTEF（テフロン：四ふっ化エチレン）が多用されている。しかしTEFは電気陰性度が高く、放射線が照射されると、結合鎖が切れ真性的な破壊を招くことが予想される。そこで本実験では、誘電体として耐放射線性に優れているETFE（テフゼル：エチレン四ふっ化エチレン（ラトラフルオロエチレン-エチレン共重合体））を使用した。ETFEはTEFと誘電率がほぼ同じであるため伝送特性は変化せず、また融点が270℃であり、低温から180℃までの温度で使用可能である。また、耐衝撃性にすぐれ、酸素指数は他のふっ素樹脂と比べると小さいという特徴を有する。図6に本測定における基本的な接続図を示す。なお、三重同軸ケーブルの長さは12mである。

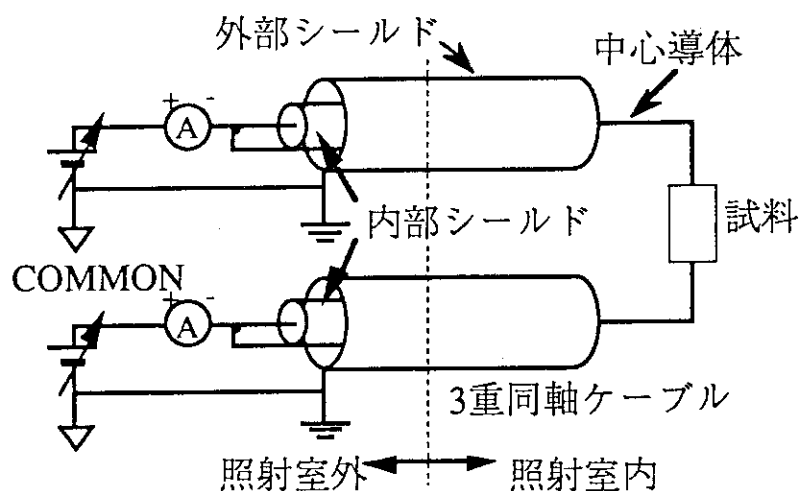


図6. 測定機器接続図。

放射線照射実験は、 ^{60}Co - γ 線源を用いて空間線量率29R/sで行った。また、 γ 線照射による伝送ケーブル中の誘起電流およびケーブル劣化を防ぐために、素子以外の部分を鉛ブロックで覆い電流測定を行った。また、被測定MIS素子はTO-5パッケージにボンディングし、封止せずに環境大気中に暴露した状態で照射を行った(図7)。伝送ケーブルと素子との接続は図8に示すような照射治具を用いて行った。照射治具は、コネクタ、ケーブル、プリント基板上に構成したICソケットにより構成されている。また、被照射素子の環境電界からのシールド、および二次電子平衡条件を満たすために、素子を含めた治具全体を3mm厚のAl板で囲んだ。

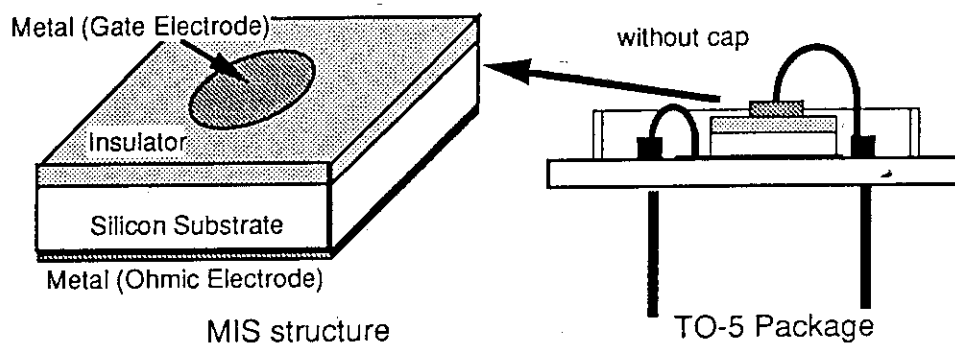


図7. 測定で使用したMIS構造素子.

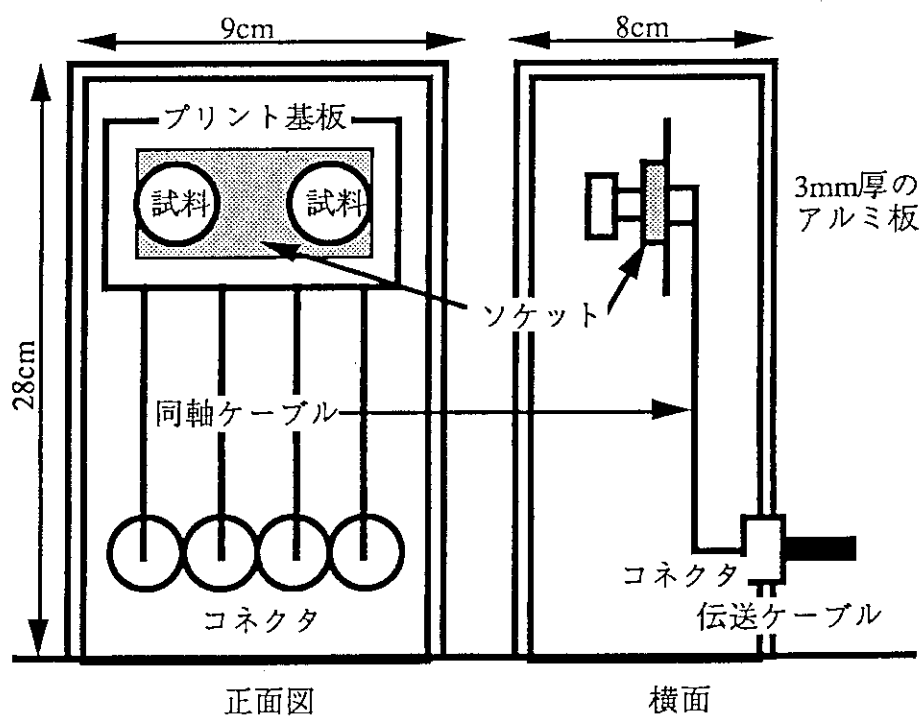


図8. 照射治具.

2. 2 電流測定方法

図9に、印加電圧に対する絶縁膜電流測定 (I-V測定) のタイムチャートを示す。ゲート・基板間を等電位とした状態から測定開始電圧をゲートに印加する。ステップ状の電圧を印加すると変位電流が流れる。この電流は、伝送ケーブルの分布回路定数、ケーブル長、および被測定素子容量に起因したもので、変位電流の減衰特性はこれらの条件により変化する。絶縁膜の正味の電流を測定するには変位電流が十分減衰した後に行う必要があり、これに要する時間を t_h と定義する。電圧印加後、時間 t_h 保持した後に測定を行い、その後設定したステップ電圧を印加する。この時も変位電流が流れるために、同様に十分減衰させる必要がある。このための時間を t_d と定義する。このように、I-V測定を行うためにはこれらの時間定数を予め決定する必要がある。これらの定数は、ステップ電圧印加後の電流の時間的変化 (I-t測定) を測定することにより決定できる。種々の測定条件における変位電流の減衰特性を測定し、各時間定数を決定することとした。

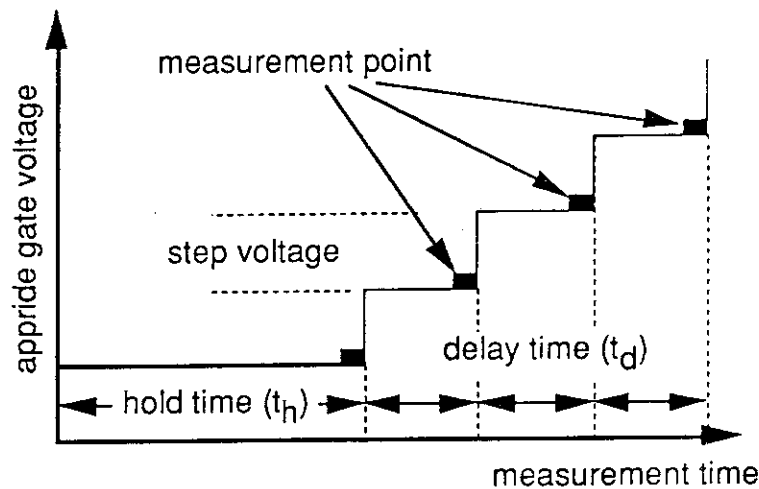


図9. 電流-電圧特性測定のタイムチャート.

2. 3 非照射雰囲気における電流測定

本実験では、変位電流の減衰特性についての評価を行い、I-V測定における時間定数を決定する。また、伝送ケーブルの長さ、設置方法に対する影響について検討し、得られた絶縁膜電流より本測定システムの有効性を評価した。

被測定素子として用いたMOSキャパシタは、抵抗率 $3\sim 6\Omega\text{cm}$ 、面方位(100)のn形シリコン基板に乾燥酸素を用いて100nmの酸化膜を温度 1100°C で成長させた後、真空蒸着法により $1\text{mm}\phi$ のアルミゲート電極を形成することにより作製した。また、基板電極は基板裏面（非鏡面）にアルミを蒸着する事により形成した。TO-5パッケージへの装着は銀ペーストを用いて行い、ゲート電極とパッケージ内電極とをワイヤボンダを用いて接続した。

本実験の電流-電圧特性測定における測定条件は、電圧掃引範囲 $-10\sim +10\text{V}$ 、ステップ電圧 0.5V とする。ここでは、本測定条件における t_h （保持時間）を決定する目的で、 $0\rightarrow 10\text{V}$ の階段状電圧印加後の絶縁膜電流の時間特性を測定した。また、伝送ケーブルの長さが電気特性に及ぼす影響を評価するために、 2m および 12m の伝送ケーブルを用いて電流測定を行った。図10、図11にそれぞれのケーブルを使用した場合の電圧印加後の電流の時間的变化（I-t特性）を示す。電圧印加直後に数百pA程度の変位電流が流れ、約20秒後には測定電流がほぼ一定値となることがわかる。またケーブルの長さに対して測定値の変化がほとんど認められないことから、この変位電流は非測定素子の容量および絶縁膜抵抗、基板抵抗により決定される。以上の実験結果より、 12m のケーブルは変位電流の減衰特性に対しては悪影響を及ぼさないことが確認された。またI-V特性測定における t_h は、2倍以上の余裕をみて60秒と決定した。なおステップ電圧印加後の t_d は、同様に 0.5V の階段状電圧印加によるI-t測定結果より30秒と決定した。

このようにして得られた時間定数を用いて、MOSキャパシタのI-V特性測定を行った。結果を図12に示す。結果より、絶縁膜電流はゲート電圧にほぼ比例していることがわかり、本システムにより微小電流の評価が可能であることがわかった。また、本実験では伝送ケーブルの設置方法についての検討も行った。同軸ケーブルを曲げた場合、導体と絶縁体との間に摩擦が生じ、これにより発生した静電気により電流が流れる。また絶縁体に力学的ストレスが加わると、圧電効果により電流が発生することが考えられる。これらの影響を評価するために、 12m のケーブルを半径 50cm 程度の円形に巻いて設置した

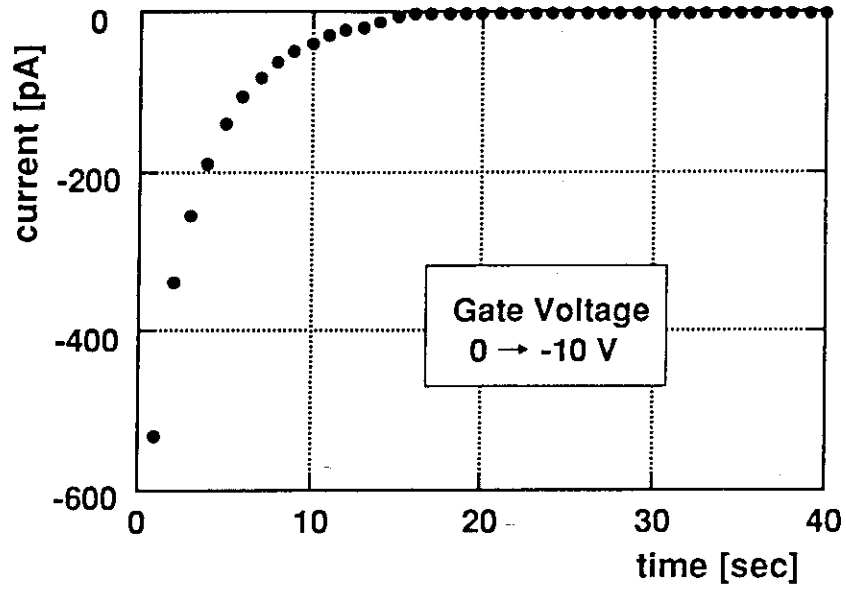


図10. 電圧印加後の酸化膜電流の時間的变化 (ケーブル長: 2m) .

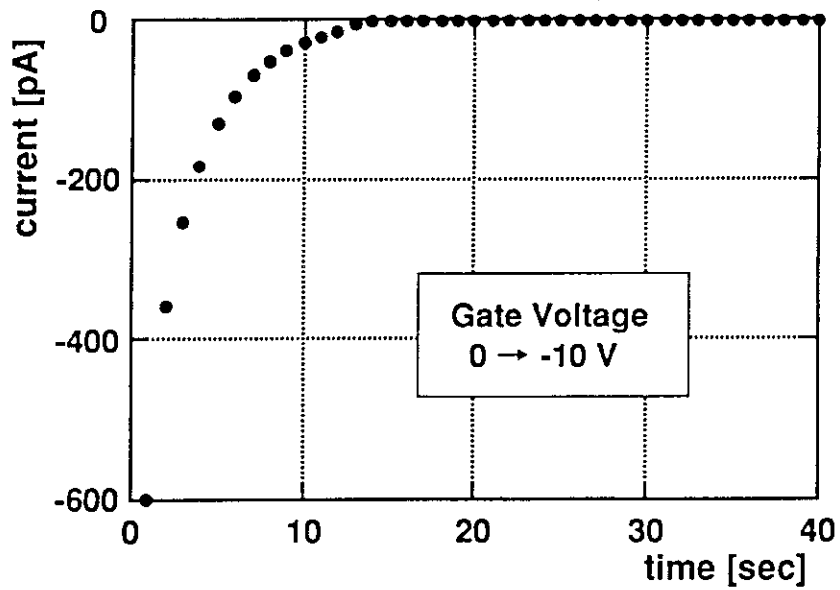


図11. 電圧印加後の酸化膜電流の時間的变化 (ケーブル長: 12m) .

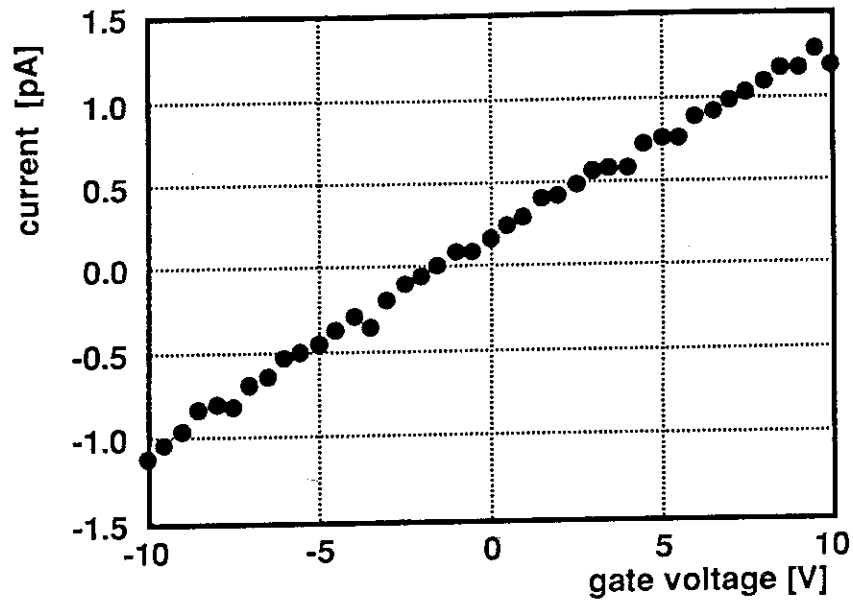
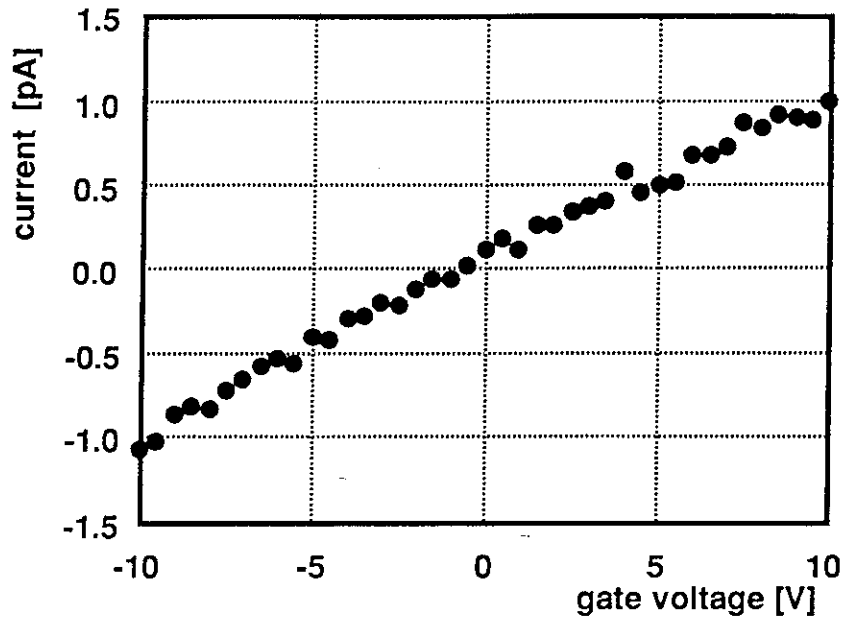
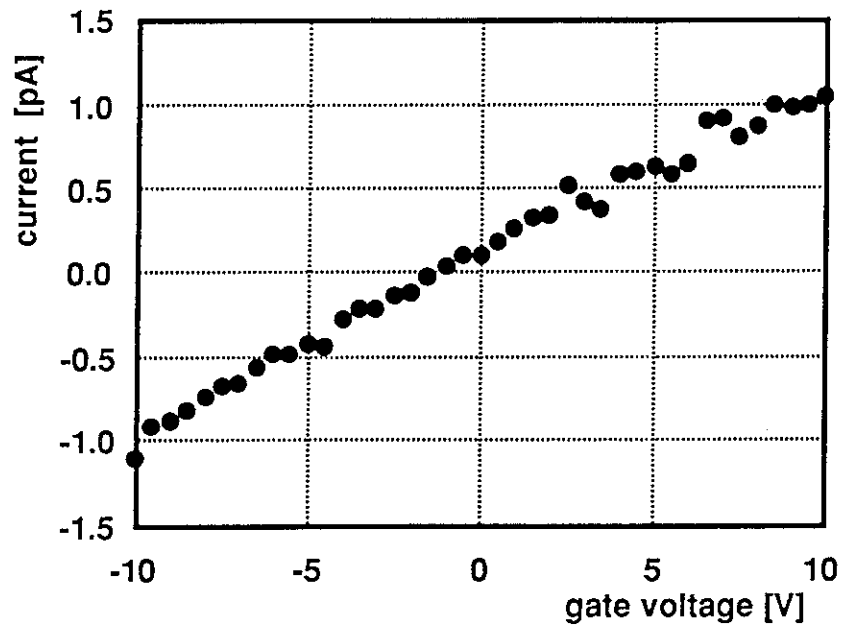


図12. 被照射時のMOSキャパシタのI-V特性.

場合の電流を測定した。図13に右巻きおよび左巻きの場合のI-V特性測定結果について示す。図より、ケーブルの設置形状による電流値の変化は認められず、上記の力学的ストレスに起因した電流は、絶縁膜電流に比べて十分小さいことが確認された。また、MOSキャパシタを装着しない状態で電流測定を行った結果、得られる電流値は試料電流に比べてきわめて小さいことも確認した。これらの実験結果より、本測定システムがMOSキャパシタの絶縁膜電流測定を行う上で有効に機能することが確認された。



a) 伝送ケーブル：右巻き



b) 伝送ケーブル：左巻き

図13. 伝送ケーブルを円形に巻いた場合のMOSキャパシタのI-V特性.

2. 4 γ 線照射による放射線誘起電流測定

2. 4. 1 素子未装着時の電流測定

放射線照射中の放射線誘起電流を評価する場合、素子誘起電流のほかに照射室内に設置された伝送ケーブルや照射治具において発生する誘起電流も観測される可能性があり、これら素子以外で発生する誘起電流を十分抑制する必要がある。本実験では素子の絶縁膜電流を測定する前に素子非装着時の電流を測定し、設置方法などの改善による放射線誘起電流の抑制の効果を調べた。

素子以外で発生する誘起電流の測定は、図14に示すように伝送ケーブルおよび照射治具を接続し、素子取り付け部を開放状態としてを行った。なお、伝送ケーブルの周囲およびケーブル照射治具とのコネクタ部分近傍は鉛ブロックにより放射線より保護し、ソケット周辺はアルミにより覆いを施している。この状態での放射線未照射時における電流を測定したところ、印加電圧10Vにおいて80fAと測定値の測定限界に近い値が得られた。しかし、この状態で放射線 (^{60}Co - γ 線, 29R/s) を照射すると、変位電流が十分減衰した後であっても、883pAと非常に大きな電流が観測された。この電流値は放射線未照射時のMOSキャパシタの絶縁膜電流に比べて非常に大きい。この誘起電流の発生原因を調べるために、照射治具を取り外しケーブル先端を開放とすることにより伝送ケーブルにおける放射線誘起電流を測定した。測定の結果、31.8pA (10V印加時)の誘起電流が得ら

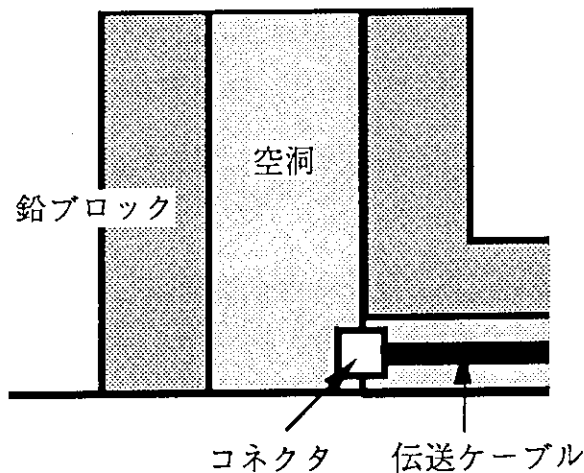


図14. 伝送ケーブルによる放射線誘起電流測定時の設置図.

れ、素子以外の放射線誘起電流のほとんどは、照射治具により発生した電流であることがわかった。ただし、これまでの報告によると、本実験で用いた素子、および照射条件では、10V印加時に数pA程度の放射線誘起電流が被測定絶縁膜において発生するものと予想され、素子以外における誘起電流の抑制が不可欠であることがわかる。そこで、伝送ケーブルやコネクタなど各構成部分を放射線照射より保護した場合の、誘起電流の抑圧効果について評価した。

最初に、伝送ケーブルにおける放射線誘起電流の抑制について検討を行った。上記の測定では、ケーブル周囲については鉛ブロックにより放射線からの保護を施しているものの、先端部（コネクタ部）においては、上部（素子取り付け位置方向）より反射、散乱された放射線の照射を受けているものと考えられる。我々は、伝送ケーブルによる放射線誘起電流の主要因がケーブル先端部の照射によるものと予想し、図15のようにコネクタ上部を鉛ブロックで遮蔽して電流測定を行った。測定の結果、11.8pA（10V印加時）が得られ、上部の遮蔽により誘起電流は半分以下に抑制できることがわかった。さらに、コネクタ下部の床面の影響も検討した。本実験で使用した照射室において、機器接地面はステンレスで構成されており、この金属より放射される2次電子によりコネクタ部が照射されていると予想される。そこで、図16のようにコネクタと床面との間に鉛ブロックを設置し、コネクタ周辺を完全に鉛により遮蔽した状態で電流を測定した。その結果、コネクタ部を含む伝送ケーブルにおける放射線誘起電流は7.8pA（10V印加時）まで抑制できることがわかった。以上の実験より、伝送ケーブルの放射線誘起電流は主にコネクタ部での放射線照射に起因し、鉛により散乱、反射、2次電子による照射を抑制することにより、誘起電流が低減可能であることがわかった。

以上の結果を踏まえて、照射治具を取り付けた場合の誘起電流測定を行った。この実験では、図17に示すように治具のコアキシャルケーブル部分のわずかな隙間以外に鉛ブロックを設置することにより、コネクタへの照射を抑制した。測定の結果、10V印加時に883pAの誘起電流が観測され、コネクタの鉛による遮蔽の効果は見られなかった。これは、測定された電流の大部分が照射を受けているソケット周辺において発生していることを示している。しかし被測定素子を照射雰囲気中に暴露する場合、ソケット周辺の照射抑制は困難であり、図17に示すような測定系を用いて素子装着時の電流を測定することとした。

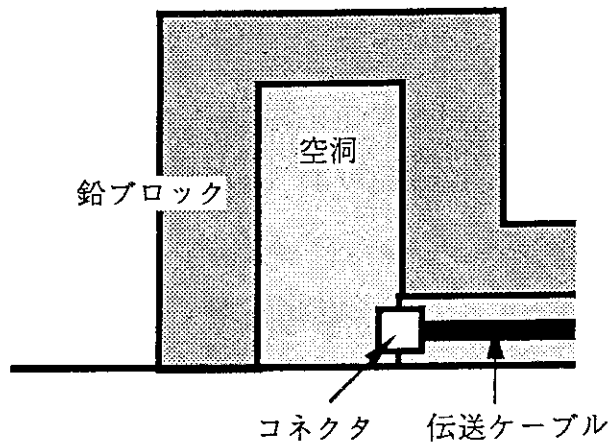


図15. コネクタ上部を鉛ブロックで遮蔽した場合の設置図.

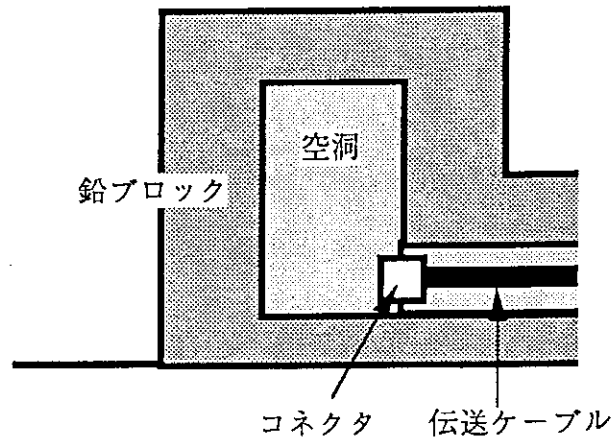


図16. 接地面からの2次電子を鉛ブロックで遮蔽した場合の設置図.

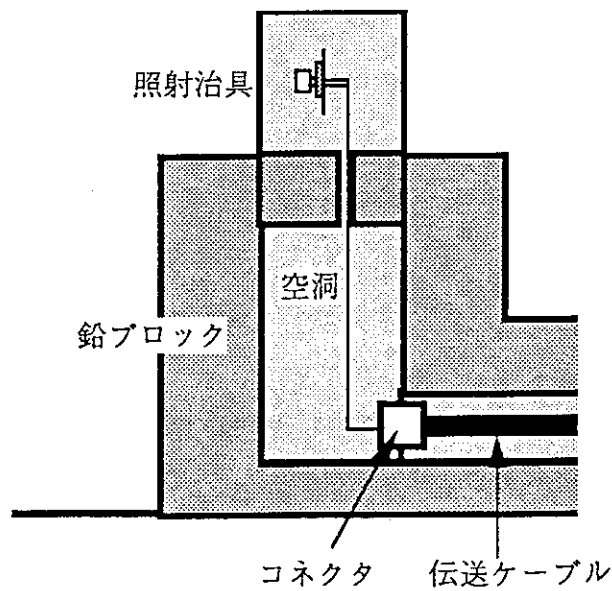


図17. 絶縁膜電流測定時の設置図.

2. 4. 2 MOSキャパシタ素子装着時の電流測定

図17のように設置した照射治具にMOSキャパシタを装着して、放射線照射中のI-V特性測定を行った結果を図18に示す。本測定における時間定数は2.3節で記述したように $t_h=60(s)$, $t_d=30(s)$ としており、I-t測定により、この時間により変位電流が十分減衰していることを確認している。図より、ゲート印加電圧にほぼ比例した電流が観測されていることがわかる。ただし、先の素子非装荷時の結果において883pA（10V印加時）が得られていることから、これらの電流は、素子における誘起電流と素子以外において発生した誘起電流との合成電流であると言える。図19に素子非装荷時におけるI-V測定結果を示す。図より素子以外の環境に起因する誘起電流も印加電圧に対して比例していることがわかる。素子において誘起されたキャリアがケーブル伝送中に再結合により消滅することが無いと仮定すると、MOSキャパシタによる誘起電流は、これら素子装着時、非装着時における測定電流の差として求められる。図20にこのようにして評価されたMOSキャパシタによる誘起電流を示す。結果より、評価された電流はゲート電圧にほぼ比例した電流とはなっているものの、10V印加時に1.5nA程度と非常に大きな電流となっていることがわかった。

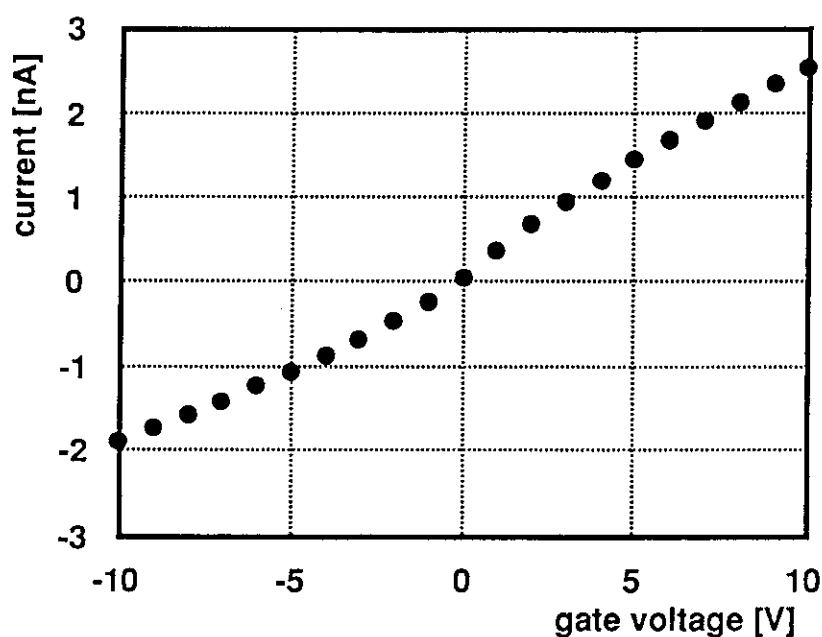


図18. γ 線照射中のMOSキャパシタ絶縁膜電流特性.

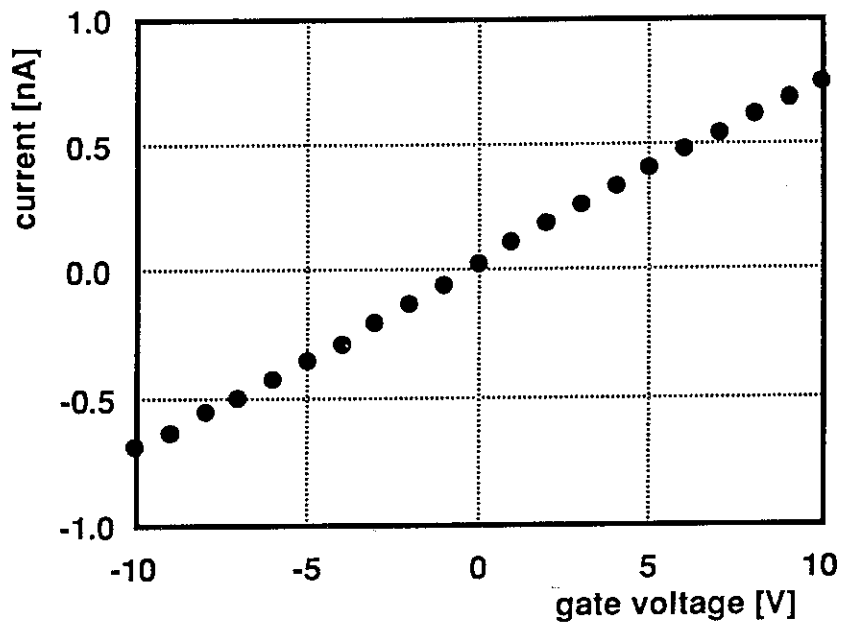


図19. 素子非装着時における照射中のI-V特性.

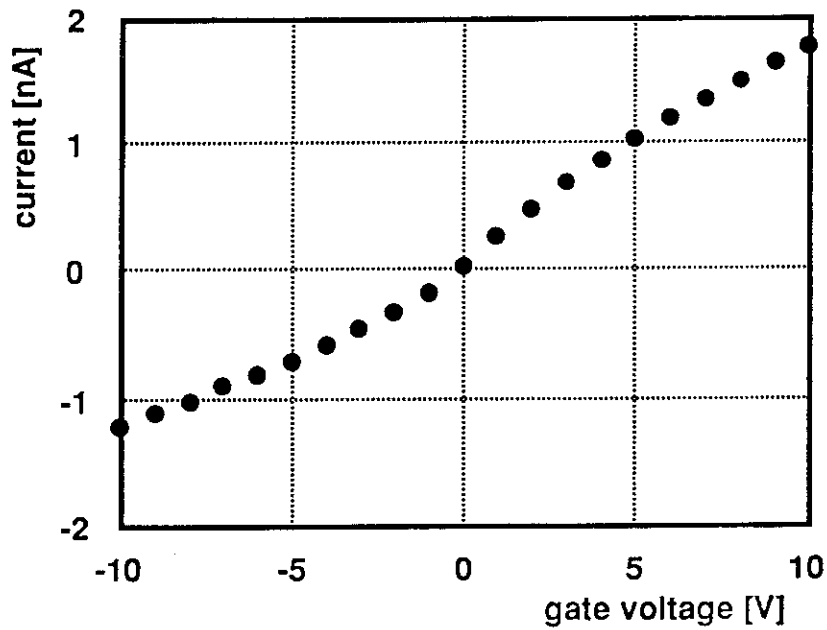


図20. MOSキャパシタによる放射線誘起電流評価結果.

2. 4. 3 検討

次に、本測定で得られたMOSキャパシタによる誘起電流の評価結果（図20）について検討を行う。

先に示したように、MOS構造の酸化膜における放射線照射による電荷発生量についてはこれまでに多くの報告がある⁸⁻¹¹⁾。そこで我々はBenedettoらが示した実験値を用いて、MOSキャパシタによる誘起電流を評価した。Benedettoらは酸化膜における⁶⁰Co- γ 線照射による電荷発生量 ρ を次式のように示している⁸⁾。

$$\rho = K_{ox} \cdot f_y \cdot \Delta D \cdot D_{ox} \cdot A \quad (1)$$

$$f_y = (0.27/(E_{ox} + 0.084) + 1) - 1 \quad (2)$$

ただし、

$K_{ox} = 1.30 \times 10^{-6} [\text{C}/\text{cm}^3/\text{rad}(\text{SiO}_2)]$: 電荷発生定数

f_y : 電荷発生確率（初期の再結合による）

ΔD : 吸収線量率 [rad(SiO₂)/sec]

D_{ox} : 酸化膜厚 [cm]

A : 電極面積 [cm²]

E_{ox} : 酸化膜電界 [MV/cm]

上式に、本実験の条件（ $\Delta D = 27.8 [\text{rad}(\text{SiO}_2)/\text{sec}]$, $D_{ox} = 1 \times 10^{-5} [\text{cm}]$, $A = 7.85 \times 10^{-3} [\text{cm}^2]$ ）を代入すると、10V印加時（ $E_{ox} = 1.0 [\text{MV}/\text{cm}]$ ）の1秒あたりの電荷発生量は、 $\rho = 2.3 \times 10^{-12} [\text{C}/\text{sec}]$ と算出できる。すなわち、ゲート電圧10Vにおいて予想される放射線誘起電流は2.3pAであり、測定値（約1.5nA）に比べて2桁以上小さな電流値である。以上の結果より、測定された電流のほとんどは、酸化膜以外において発生した電荷による電流であることがわかった。

被測定素子はTO-5パッケージに実装されており、電極間やボンディングワイヤーとパッケージ金属間に大気を絶縁体とした容量が構成され、素子容量に並列に装荷されているものと考えられる。我々は、この大きな測定電流が素子近傍の大気の電離に起因しているものと考え、有効的な電離空間体積を評価した。300K, 1atmにおける大気（平均分子量：29）に1Rの放射線が照射したときの発生電荷量は $3.04 \times 10^{-10} [\text{C}/\text{cm}^3]$ である。すなわち、本実験における照射条件（29R/s）での発生電荷量が $8.82 \times 10^{-9} [\text{C}/\text{s}/\text{cm}^3]$ であるとする

と、1.5nAの電流は 0.17cm^3 (0.55^3cm^3) の大気の電離により発生したものと考えられる。この有効体積は素子実装構造によって決定されるものであり、本形状の素子を用いる限り抑制のできない因子である。

ただし、大気から発生する電荷量は気圧により変化し、真空中の測定では大気の電離による電流値が抑制できるものと考えられる。先に示したように、酸化膜による放射線誘起電流は2pA程度と予想されることから、低圧化により、大気の電離により発生する電流をこれと同程度に抑制できれば、酸化膜中の電荷発生量が評価可能となる。 0.17cm^3 の大気の電離により発生する電流が2pAとなるためには、真空度が 1.7×10^{-6} [Torr]でなければならない。これらの結果より、 2×10^{-6} [Torr]程度以下の真空雰囲気中で照射を行うことにより、酸化膜での放射線誘起電流が評価され、他の絶縁膜を有するMIS構造素子における電流測定との比較により、種々の絶縁膜における放射線照射による電荷発生量が評価可能となることがわかった。

2. 5 まとめ

^{60}Co - γ 線照射による絶縁膜中での電荷発生量を評価することを目的に、MOSキャパシタの絶縁膜電流測定システムを構築し、 γ 線照射中における電流測定と、その検討を行った。また本測定系では、測定機器を照射室外に設置する必要から、長さ12mの三重同軸ケーブルを電流伝送ケーブルとして使用した。放射線を照射しない場合には良好な絶縁膜電流の測定が可能であることを示した。しかし放射線を照射した場合、予想される酸化膜誘起電流に比べて非常に大きな電流が観測された。ケーブルおよび照射治具の設置方法を種々変化して実験を行った結果、測定された放射線誘起電流の大部分は素子近傍の大気の電離による電流であることがわかった。大気の電離を抑制する方法として、被測定素子周辺の低圧化に注目し、酸化膜での電荷発生量評価が可能となる真空度を求めた結果、 2×10^{-6} [Torr]程度以下の雰囲気が必要であるとの結論を得た。ただし、 γ 線照射室内においてこのレベルの真空雰囲気を実現することは難しく、本測定システムでは酸化膜における電荷発生量の評価は困難であるという結論を得た。本研究の目的は窒化膜における電荷発生量の評価ではあるものの、窒化膜を絶縁膜としたMISキャパシタを使用した場合の測定電流も、大気の電離により決定されることは明らかであり、電荷発生量の評価には被測定素子近傍の真空化などの改善が必要であることがわかった。

3. 真空雰囲気中での電子線照射中の絶縁膜電流測定

第2章において、 γ 線照射中の絶縁膜電流測定より放射線照射による電荷発生量を評価するためには、被測定素子周辺の真空化が必要であることを示した。しかし、 γ 線照射室を真空雰囲気にするには非常に困難である。一方、 ^{60}Co - γ 線の照射による酸化膜中の電荷発生量が12MeVの電子線照射により発生する電荷量とほぼ等しいという報告がある(図1参照)。そこで我々は、真空雰囲気中での電子線照射によるMIS構造誘起電流について測定を行い、照射による電荷発生量について評価、検討を行った。

3. 1 実験方法

真空雰囲気中で電子線を照射できる装置として、我々は走査型電子顕微鏡装置(SEM)に着目した。SEMにおける照射ビームは、5~30keVに加速された電子線であり、電磁レンズにより10nm程度のビーム径に絞って素子上に照射される。また、走査コイルに電流を印加することにより、試料上を二次元的にビーム走査可能で、照射により発生した二次電子および反射電子を検出することにより顕微鏡として機能するものであり、SEM装置を用いた照射実験では、照射中の位置および照射範囲を画像として確認できる。しかし、 ^{60}Co - γ 線照射に相当する12MeVの電子線の発生は不可能であり、SEMを用いた照射中のMIS構造素子電流測定では、 ^{60}Co - γ 線照射による電荷発生量を直接評価するのは不可能である。そこで我々は、MOSキャパシタによる誘起電流、および窒化膜を絶縁膜としたMNSキャパシタによる誘起電流の両者を測定し、これらの比を求めることにより窒化膜における電荷発生量を評価することとした。また本評価に際して、酸化膜における電荷発生量は、先に示したBoeschらの実験値を用いた。なお、本実験で使用したSEM装置では、 1.5×10^{-6} [Torr]の真空雰囲気において5~35keVの電圧を用いた電子の加速が可能である。

本実験において絶縁膜電流の測定には、微小電流測定器Keithley 617を使用した。本測定器には、定電圧源および微小電流計が内蔵されており、電圧源として最大 $\pm 102\text{V}/20\text{A}$ 、分解能50mV、また電流計として感度0.1fA、入力バイアス電流5fA以下の各性能を有する。また、SEM装置においては電子線照射範囲が限定されるために、伝送ケーブルが電子線照射を受ける確率が低い。このことから、本実験では伝送ケーブルとして取り

扱いの容易な二重同軸ケーブルを使用した。図21に電子線照射実験の測定系を示す。

被測定素子は、酸化膜および窒化膜を絶縁膜としたMOSキャパシタおよびMNS (Metal-Nitride-Si) キャパシタである。半導体基板には抵抗率 $3\sim 6\Omega\text{cm}$ のSi(100)基板を用い、酸化膜は 1100°C の乾燥酸化法で、また窒化膜は 700°C のLPCVD法 ($\text{NH}_3/\text{SiH}_2\text{Cl}_2=3$) でそれぞれ基板上に膜厚100nmの膜を堆積させ、真空蒸着法により1mm ϕ のアルミゲート電極を形成した。また、各素子はTO-5パッケージに装着 (キャップは未装着) した。

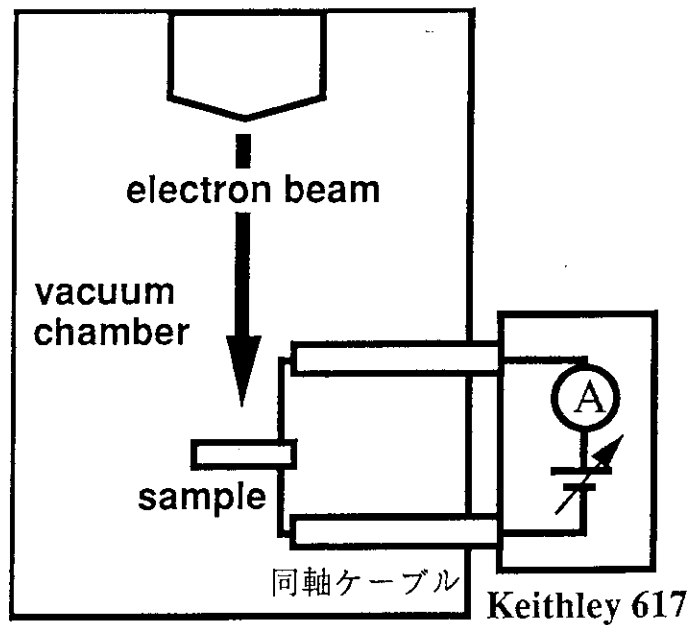


図21. SEM装置を使用した電子線照射実験の測定系。

3. 2 絶縁膜電流測定結果

最初に、MOSキャパシタのゲート電圧を20V一定として、電子線加速電圧に対する放射線誘起電流の測定を行った。図22に電子線未照射時、および照射時における絶縁膜電流測定結果について示す。電子線照射による誘起電流が、照射時、未照射時の測定電流の差として求められると考えると、結果より明らかに、加速電圧の増加に伴って放射線誘起電流も増加していることがわかる。先に示したように、このエネルギー範囲では ^{60}Co - γ 線照射時（12MeV程度の電子線照射に相当）の電荷発生量を直接評価できないため、本実験では酸化膜、窒化膜における誘起電流の比から発生量を予測した。電荷収集量から考えると加速電圧は高いほうが好ましく、またこの条件では誘起電流量も大きいことから、本実験では35keVの電子線照射下で絶縁膜電流測定を行うこととした。ここで、電子線が測定電流へ及ぼす影響について考える。電子線の飛程が短く、絶縁膜厚とほぼ同等の場合、電子線照射によって運ばれる電荷そのものが絶縁膜電流として観測されることが予想される。ただし、35keVの電子線の酸化膜および窒化膜に対する飛程および阻止能（単位長あたりに吸収されるエネルギー）はそれぞれ、7~9 μm および約3eV/nmであり、絶縁膜を通過するに十分なエネルギーを有している。これより、観測された誘起電流へ及ぼす電子線の線電流の効果は非常に小さいものと考えて検討を行うこととした。

図23に、35keVの電子線照射によるMOS、MNS各キャパシタでの照射誘起電流の絶縁膜電界依存性を示す。ここで誘起電流は照射時、未照射時の測定電流の差として求めており、また、絶縁膜電界は半導体表面電圧を無視して評価した（ゲート電圧/絶縁膜厚により算出）。結果より、誘起電流は印加電界に依存していること、また酸化膜に比べて窒化膜における誘起電流が非常に小さいことがわかった。また、本測定における電界の範囲では、窒化膜における誘起電流は酸化膜における誘起電流の約20%となっていることがわかった。

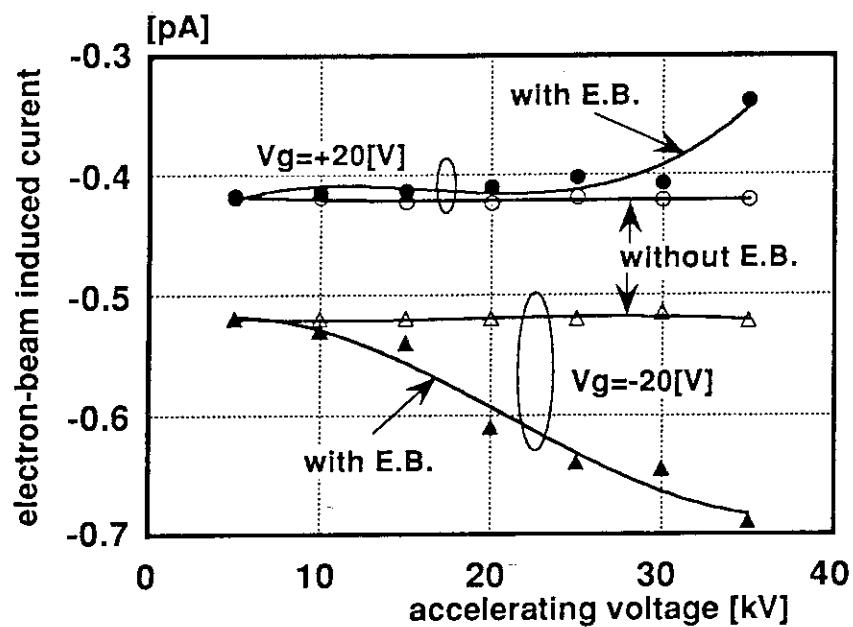


図22. 電子線未照射時，照射時のMOS構造絶縁膜電流.

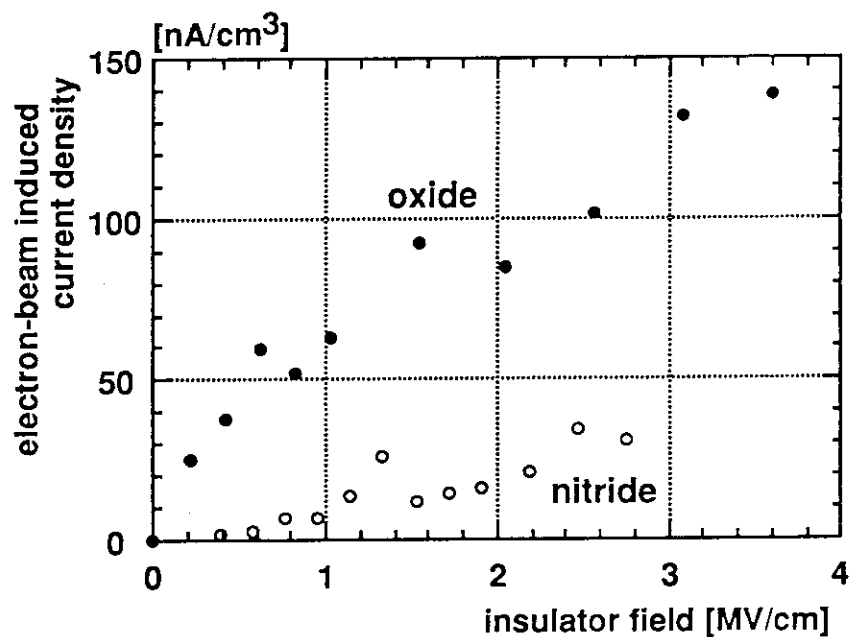


図23. 電子線照射による絶縁膜中（シリコン酸化膜，シリコン窒化膜）での誘起電流の印加電界依存性.

3. 3 検討

放射線照射による物質中での電子-正孔対発生量は、一般にその物質における吸収線量に比例すると考えられる。また同じ照射線量の放射線照射を受けた場合の物質中の吸収線量は、各物質における質量減衰係数 (μ) に比例する。質量減衰係数は密度に反比例した定数であり、各原子について報告されている。我々は結果に対して検討を行う前に、シリコン酸化膜およびシリコン窒化膜の質量減衰係数の評価を行った。ただし、これらの物質はSi, OおよびSi, Nを構成原子とした化合物であり、各原子の質量減衰係数を用いて化合物中の質量減衰係数を評価する必要がある。化合物における質量減衰係数は、次式に示すように各構成元素の重量比 (ω) と質量減衰係数の積を全元素分たし合わすことにより求められる。

$$\mu_{all} = \sum \omega_i \mu_i \quad (3)$$

表1.にSi, O, N各元素の質量減衰係数およびSiO₂, Si₃N₄の重量比を示す。なおこの値は⁶⁰Co- γ 線照射によるものである。この値を用いて酸化膜、窒化膜の質量減衰係数を評価した結果、シリコン酸化膜では0.0266[cm²/g], シリコン窒化膜では0.0265[cm²/g]となり、ほとんど同じ吸収係数であることがわかった。

表1. 各元素の質量減衰定数および質量数 (⁶⁰Co- γ 線照射時)。

	μ_m (cm ² /g)	質量数	重量比
N	0.022665	14.0067	—————
O	0.02664	15.9994	—————
Si	0.02648	28.0855	—————
SiO ₂	—————	60.0843	$\omega(\text{Si}/\text{SiO}_2)=46.7\%$, $\omega(\text{O}_2/\text{SiO}_2)=53.3\%$
Si ₃ N ₄	—————	140.283	$\omega(\text{Si}_3/\text{Si}_3\text{N}_4)=60.1\%$, $\omega(\text{N}_4/\text{Si}_3\text{N}_4)=39.9\%$

しかし、電子線照射の測定結果では各絶縁膜における放射線誘起電流に顕著な差が確認された。先に、放射線誘起電流として観測されるキャリアは、初期の再結合により消滅することなく印加電界によりドリフトを起こしたものであることを述べた。すなわちこの結果は、シリコン窒化膜ではシリコン酸化膜に比べて膜内における再結合確率が高いことを示しているものと考えられる。シリコン窒化膜中の電荷トラップについては、3つの窒素原子と結合したSi原子のダングリングボンド（K-centerと呼ばれる）が電子、正孔の両極性トラップを形成するというモデルなどが報告されている¹²⁾。これらの報告より我々は、シリコン窒化膜では放射線により発生した電子-正孔対の多くがトラップを介して再結合することにより消滅し、電流として観測される量が小さくなるものと考えた。

すなわち、照射による発生電荷量（初期の再結合を逃れた電子-正孔対の量）は放射線誘起電流から評価できるものと考え、図23の測定結果より、シリコン窒化膜の電荷発生量はシリコン酸化膜の約20%であるという結果を得た。

3. 4 まとめ

真空雰囲気における電子線照射中の絶縁膜電流測定を、SEM装置を用いることにより行った。照射雰囲気の真空化により大気電離による測定電流へ及ぼす影響を抑制でき、測定の結果、MNSキャパシタの放射線誘起電流は、MOSキャパシタに比べて非常に小さいことが確認された。結果より、シリコン窒化膜における35keVの電子線照射時の電荷発生量はシリコン酸化膜の約20%程度であることがわかった。

4. MNOS構造の γ 線照射による電荷捕獲現象

MOS構造に放射線を照射すると、酸化膜中の固定正電荷の増加、しきい値電圧の負方向シフトなどが生じる。これは、Si-SiO₂界面付近の構造遷移領域に存在する酸素空位などの正孔トラップに、照射により酸化膜中で発生した正孔が捕獲されることに起因した現象であり、照射中の印加電圧の極性に拘わらず、しきい値は照射により負方向にシフトすることが報告されている⁶⁾。一方、シリコン酸化膜、シリコン窒化膜の2層構造を持つMNOS構造は、耐放射線を有する構造の一つとして研究されており、照射中のゲート電圧によりしきい値電圧がシフトする方向が異なるという結果が報告されている^{4,6)}。これらの現象は、窒化膜中における電荷発生や電荷捕獲に起因したものであると予想されるが、照射下におけるMNOS構造の電荷捕獲現象についての詳細な解明は行われていない。

本章ではMNOS構造の放射線照射による電荷捕獲現象の解明を目的に、絶縁膜厚および照射中のゲート電圧を種々変化させた場合のミッドギャップ電圧の変化を測定し、我々が提案したトラップモデルを用いた数値計算より測定結果の検討を行う。また、計算において、シリコン窒化膜中での照射による電荷発生量は、前章で得られた電子線照射の結果を用いて評価する。

4. 1 測定方法

本実験で用いたMNOSキャパシタは抵抗率8~12 Ω cmのn形Si(100)基板上に形成した。一般的な洗浄プロセスの後、膜厚70nmのシリコン酸化膜を1040 $^{\circ}$ Cの乾燥酸化法により成長し、その後、シリコン窒化膜を酸化膜上に700 $^{\circ}$ CのLPCVD法(NH₃/SiH₂Cl₂=3)により堆積した。また真空蒸着法により1mm ϕ のアルミゲート電極を形成した。電気的特性の窒化膜厚依存性を調べるために、窒化膜厚を0(MOS構造)、50, 100, 150nmとそれぞれ変化させた。照射実験では、⁶⁰Co- γ 線を照射線量率500krad(Si)/hで2時間(全吸収線量: 1Mrad(Si))照射し、照射雰囲気は室温、大気圧とした。また、照射中のゲート電圧は+6V, -6Vの2種類について実験を行った。

MIS構造絶縁膜中の捕獲電荷量は、一般的にしきい値電圧やフラットバンド電圧により評価されている。しかし図24に示すように、これらの電圧値は膜中の捕獲電荷量のみでなく、Si-SiO₂界面準位に帯電した電荷量によっても変化する。一方、Si表面がミッド

ギャップ状態の場合には界面準位は中性状態となっているものと考えられ（図25参照），この時のゲート電圧（ミッドギャップ電圧： V_{mg} ）を測定することにより，捕獲電荷量が評価できると考えられる．そこで本実験では，照射による絶縁膜中での電荷捕獲量の変化をミッドギャップ電圧の変化から評価した．なお， V_{mg} は高周波（1MHz）容量-電圧特性（C-V特性）測定により評価を行った．

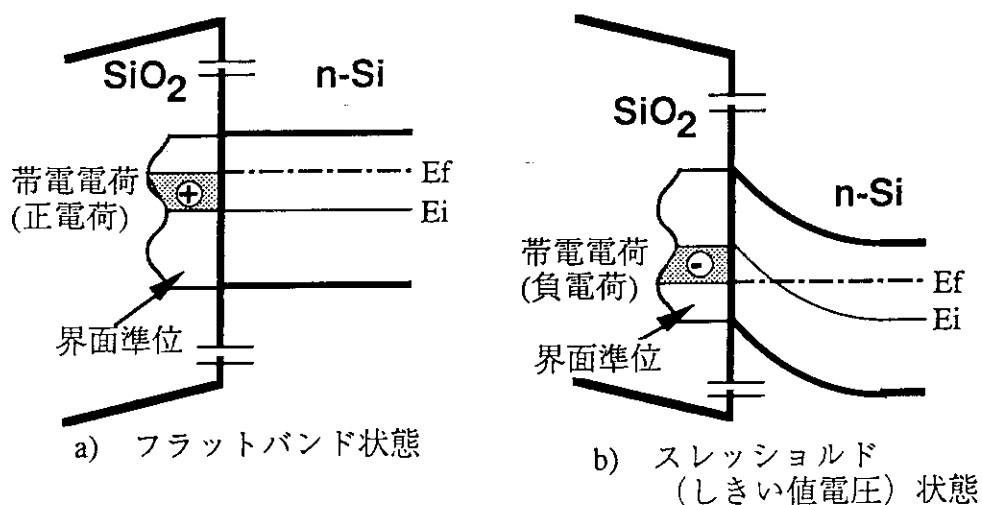


図24. フラットバンド状態およびしきい値電圧状態での半導体表面準位の帯電状態.

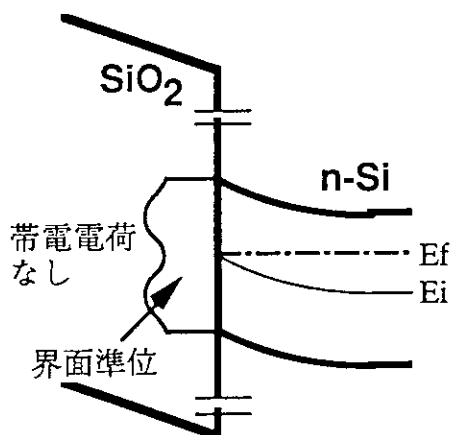


図25. ミッドギャップ状態での半導体表面準位の帯電状態.

4. 2 測定結果

図26に、酸化膜厚70nmのMOS構造の γ 線照射前後におけるC-V特性を示す。図より、C-Vカーブは照射により負方向にシフトし、また照射中のゲート電圧が+6Vの場合には-6Vに比べて照射によるシフト量が大きいことがわかる。これは、先に述べたように照射により発生した正孔が酸化膜中のトラップに捕獲されたことにより引き起こされた現象である。またシフト量は捕獲された正孔の量に比例することから、照射中のゲート電圧が正の場合には、負電圧印加に比べて正電荷捕獲量が多いことを示している。図27に、酸化膜厚70nm、窒化膜厚100nmのMNOS構造の γ 線照射前後におけるC-V特性を示す。図より、照射中のゲート電圧が-6Vの場合はMOS構造同様に負方向に変化するものの、+6Vでは正方向に変化していることがわかる。この現象は、絶縁膜内における正電荷の減少ないしは負電荷の増加に起因しているものと考えられる。ただし、MOS構造ではこれらの現象が見られないことから、窒化膜中での電荷発生、捕獲現象による効果と予想される。

これらの測定結果を基に、放射線照射前後におけるミッドギャップ電圧を評価した。図28に、照射前後における V_{mg} を示す。結果より、-6V印加時では窒化膜厚に拘わらず V_{mg} は負方向にシフトし、そのシフト量は窒化膜厚の増大に伴い大きくなることがわかった。一方、+6V印加時には窒化膜厚が50nm以上でシフト方向は正となり、そのシフト量は窒化膜厚を増大してもほぼ一定になることがわかった。

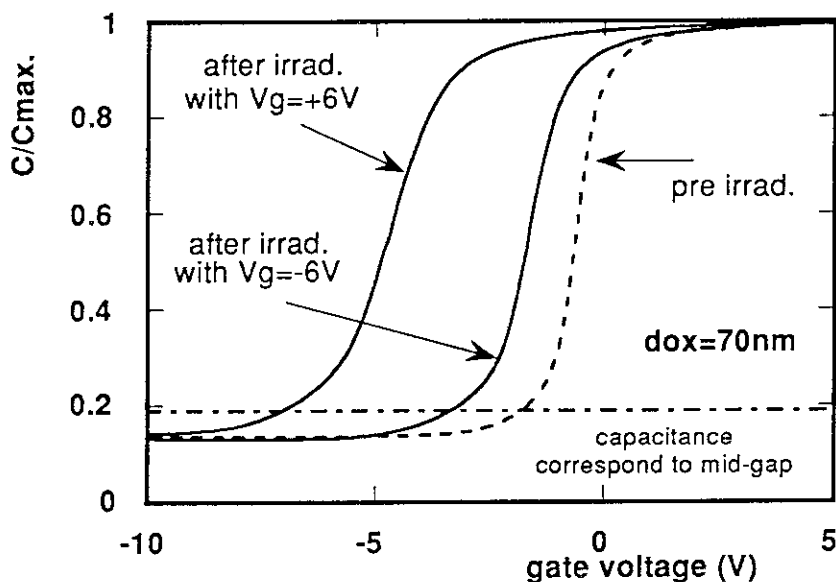


図26. MOS構造（酸化膜厚：70nm）の γ 線照射前後におけるC-V特性。

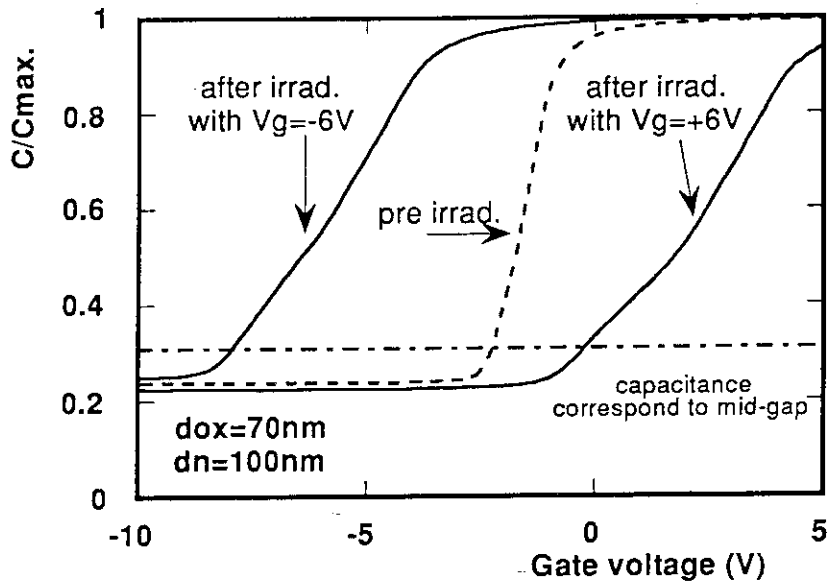


図27. MNOS構造（酸化膜厚:70nm, 窒化膜厚:100nm）の γ 線照射前後におけるC-V特性.

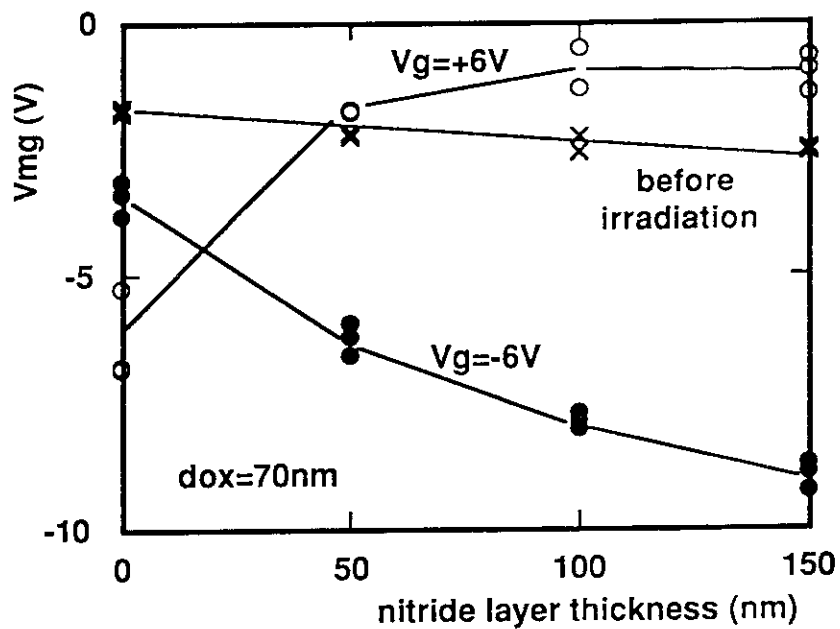


図28. MNOS構造（酸化膜厚:70nm）の γ 線照射前後におけるミッドギャップ電圧測定結果.

4. 3 検討

4. 3. 1 MNOS構造の電荷トラップモデル

MOS構造の放射線照射による固定正電荷量の増加には、Si-SiO₂界面付近のシリコン酸化膜中に正孔トラップが局在するとしたモデルを用いて定量的な解析が行われている¹³⁾。

しかし、MNOS構造の照射による絶縁膜中での電荷捕獲機構の評価、および捕獲電荷量の定量的な解析については行われていない。そこで我々は、MNOS構造の電荷トラップのモデルを提案し、照射中の電荷注入をシミュレーションにより検討した。

シリコン窒化膜中での電荷トラップについては、電子トラップ、正孔トラップの両者の存在が報告されている。神垣らは、MNOS不揮発性メモリの電荷放出特性より窒化膜中の各トラップ密度を評価しており¹⁴⁾、作製時のNH₃/SiH₂Cl₂流量比が5~25のシリコン窒化膜において、正孔トラップ密度 (N_{h}) = 1.2×10^{20} (cm⁻³)、電子トラップ密度 (N_{e}) = 7×10^{18} (cm⁻³) が得られている。また、これらの値は他の研究者により報告されているものとはほぼ一致している。本測定で使用したシリコン窒化膜の作製時の流量比は3であり、神垣らの実験条件と同じであると仮定し、上記の密度の正孔および電子トラップがシリコン窒化膜中に一様に存在するものとしたモデルを用いた。図29に我々が提案するMNOS構造の電荷トラップモデルを示す。本モデルにおいて、Si界面付近の酸化膜中には正孔トラップが局在し、窒化膜中には正孔および電子トラップが一様に分布するものと仮定した。また、酸化膜中の正孔トラップ密度および捕獲断面積 ($N_{\text{ho}}, \sigma_{\text{ho}}$) は、これまでの研究から 5×10^{18} (cm⁻³)、 6×10^{-14} (cm²) (1MV/cm印加時)¹⁵⁾ とし、Si界面から5nmの領域に矩形分布するものとした。

次に照射による電荷注入量のシミュレーションの手法について述べる。図30に本計算のフローチャートを示す。この計算では全吸収線量を微小分割し、各微小照射における絶縁膜中各深さでの電荷発生量、捕獲電荷量を繰り返し計算することにより全吸収線量照射による捕獲電荷量を求める。また、電子-正孔対の分離効率およびトラップ捕獲断面積は、膜中の印加電界により変化することから、各微小照射ステップにおいて電界分布の再評価を行いながら計算を行った。ここで、各計算の詳細を以下に示す。

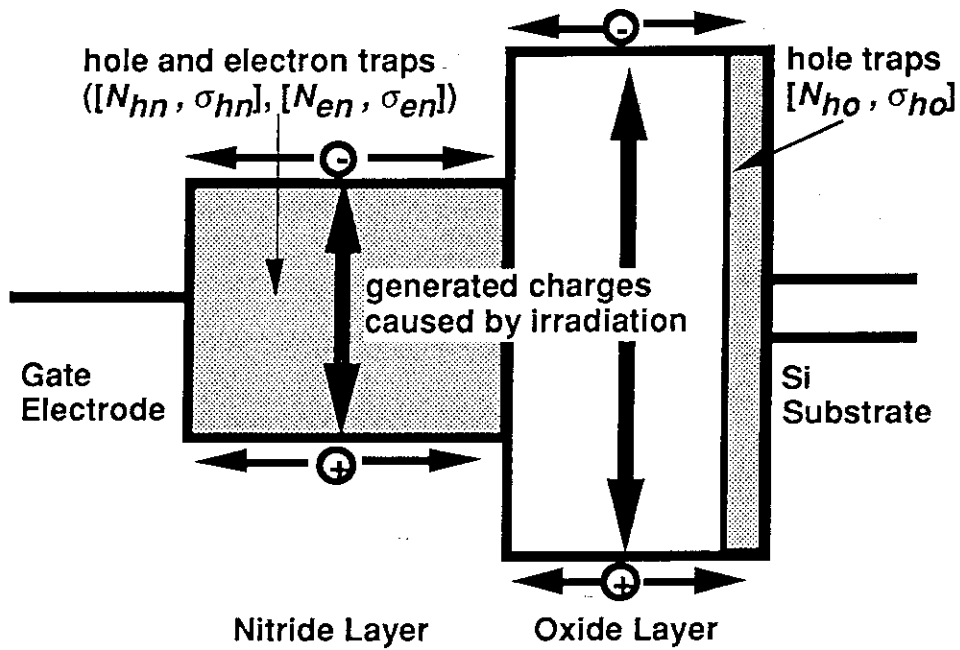


図29. MNOS構造の電荷トラップモデル.

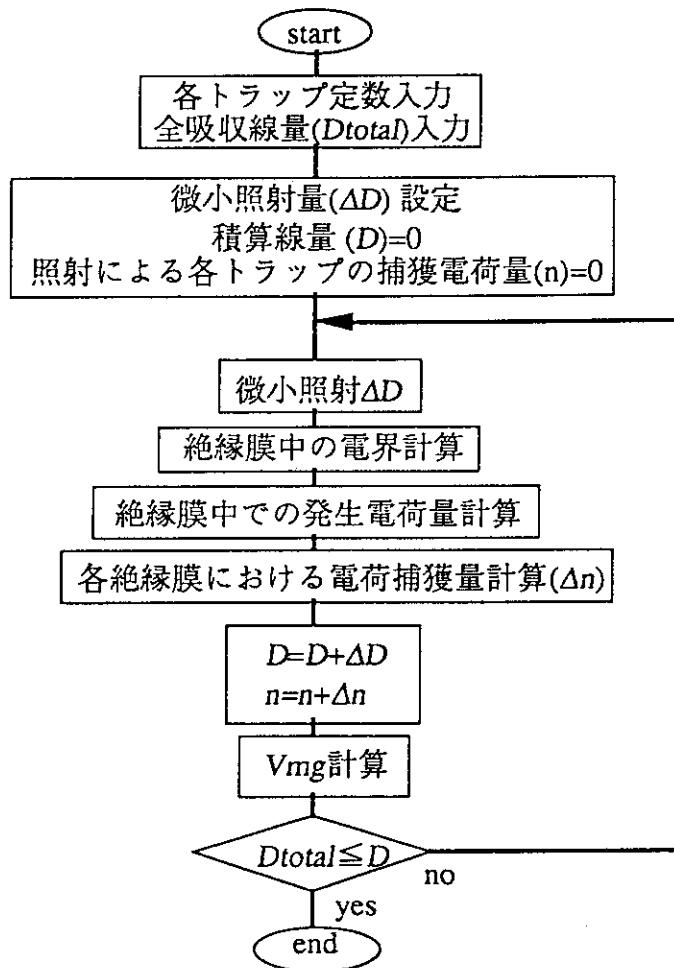


図30. 本計算のフローチャート.

1) 絶縁膜中での電荷発生量

微小照射（吸収線量： ΔD ）による絶縁膜中各深さ（微小厚さ： Δd ）における単位面積あたりの電荷発生量（ ρ ）は、次式により計算できる。

$$\rho = K \cdot f_y \cdot \Delta D \cdot \Delta d \quad (4)$$

$$f_y = (0.27/(E+0.084)+1)^{-1} \quad (5)$$

K は各絶縁膜での電荷発生定数であり、シリコン酸化膜中において 1.30×10^{-6} [C/cm³/rad(SiO₂)], シリコン窒化膜中では測定結果より酸化膜の20%とした。なお、 E は各深さにおける印加電界[MV/cm]である。また本計算での深さ方向の分割幅（ Δd ）は5nmとし、この領域では印加電界が一定であるとして分割を行った。

2) トラップによる捕獲電荷量

照射により発生した電荷は印加電界によりドリフトし、トラップにより一部は捕獲される。また、捕獲を逃れたキャリアはドリフトを続け、その先のトラップでの捕獲に寄与することになる。すなわち、各電荷トラップにおいて捕獲に寄与する電荷は、各領域で発生した電荷、および他のトラップでの捕獲を逃れた電荷を足し合わせたものとなる。各トラップ位置におけるこのような電荷束を F とすると、深さ方向の単位幅における電荷捕獲量 n' は次式により求められる。

$$n' = F \cdot \sigma \cdot (N-n) \quad (6)$$

ここで、 N および n はトラップ密度、および既存する捕獲電荷密度であり、また σ は捕獲断面積である。なお、捕獲を逃れる電荷束は $F-n'$ であり、ドリフト方向に存在する次のトラップによる電荷束として、その間の発生電荷に加算される。このようにして、微小照射による絶縁膜中全領域での捕獲電荷量の計算を行った。なお、窒化膜中においては深さ方向5nmの幅で捕獲量は一定であるとして場所的分割を行った。

各照射ステップにおいて、以上の計算を全吸収線量まで繰り返し行い、最終的に得られた捕獲電荷量より照射後の V_{mg} を評価した。なお、絶縁膜中の捕獲電荷量が既知の場合、 V_{mg} は次式を用いて評価できる。

$$V_{mg} = -\frac{1}{\epsilon_{ni}} \int_0^{d_{ni}} \rho_{ni}(x) \cdot x dx - \frac{1}{C_i} (\rho_{ox} + \rho_B) + \phi_{ms} + \phi_B \quad (7)$$

ここで、

x	: ゲート電極からの深さ
$\rho_{ni}(x)$: 窒化膜中深さ x での面電荷密度
ρ_{ox}	: 酸化膜中 (Si-SiO ₂ 界面) での面電荷密度
ρ_B, ϕ_{ms}	: ミッドギャップ状態での半導体表面電荷密度および表面電位
ϕ_{ms}	: ゲート電極-半導体の仕事関数差 (V)
d_{ni}	: 窒化膜厚
C_i	: 単位面積あたりの絶縁膜容量

4. 3. 2 計算結果

提案したトラップモデルを用いて照射による V_{mg} の変化を計算により評価する場合、シリコン窒化膜中の各トラップにおける捕獲断面積を決定する必要がある。我々は、これら2つの未知定数をパラメータとして測定値にフィッティングを行った。その結果、シリコン窒化膜中の正孔、電子トラップの捕獲断面積がそれぞれ、 1×10^{-16} (cm²)、 3×10^{-13} (cm²)のときに、測定結果の傾向と最も良く一致した。電子トラップの捕獲断面積については、Arnettらの報告¹⁶⁾ (5×10^{-13} (cm²))とほぼ一致している。放射線照射前後における V_{mg} の計算結果を、測定値と共に図31に示す。なお、本シミュレーションでは、1 stepあたりの吸収線量を5krad(Si)として行っており (1Mrad(Si)を200分割)、この分割数は計算結果の収束に十分小さなものであることを確認している。

次に、得られた計算結果を用いて放射線照射によるMNOS構造絶縁膜中での電荷捕獲について述べる。図32に、正、負のゲート電圧を印加した状態におけるMNOS構造のバンド図をそれぞれ示す。ゲート電圧が正の場合、酸化膜中で発生した正孔の一部は酸化膜中で捕獲され、電子の一部は窒化膜中で捕獲される。また窒化膜中で発生した電子、正孔は、主に窒化膜中での捕獲に寄与する。窒化膜厚が薄い場合、(7)式からわかるように窒化膜中の捕獲電荷が V_{mg} へ与える影響は小さく ((7)式第1項の寄与が小さい)、照射により酸化膜中で捕獲した正孔により V_{mg} は負方向にシフトすることがわかった。一方、窒化膜厚が厚くなると窒化膜中の捕獲電荷による影響が大きくなり、 V_{mg} は正方向に変化することがわかる。これは窒化膜中で捕獲された電子数が、酸化膜中で捕獲された正孔数よりも多いことを示しており、この現象は窒化膜中の電子トラップの捕獲断面積が非常

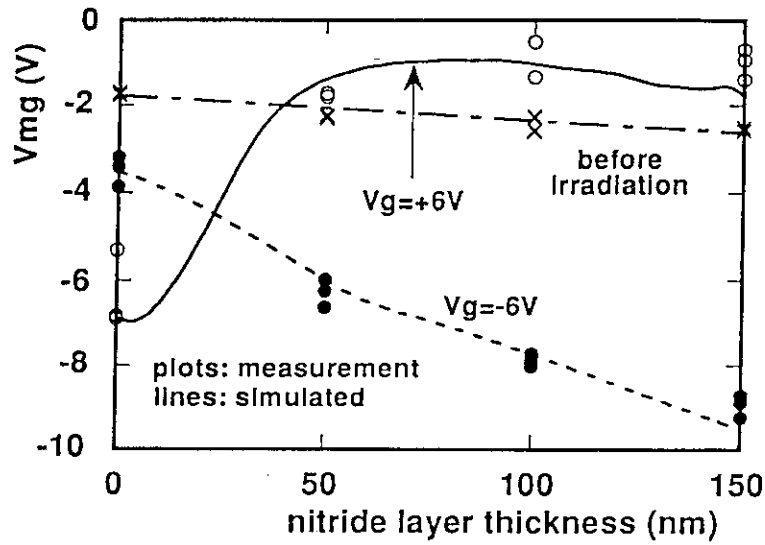


図31. MNOS構造（酸化膜厚:70nm）の γ 線照射前後におけるミッドギャップ電圧測定結果およびシミュレーション結果.

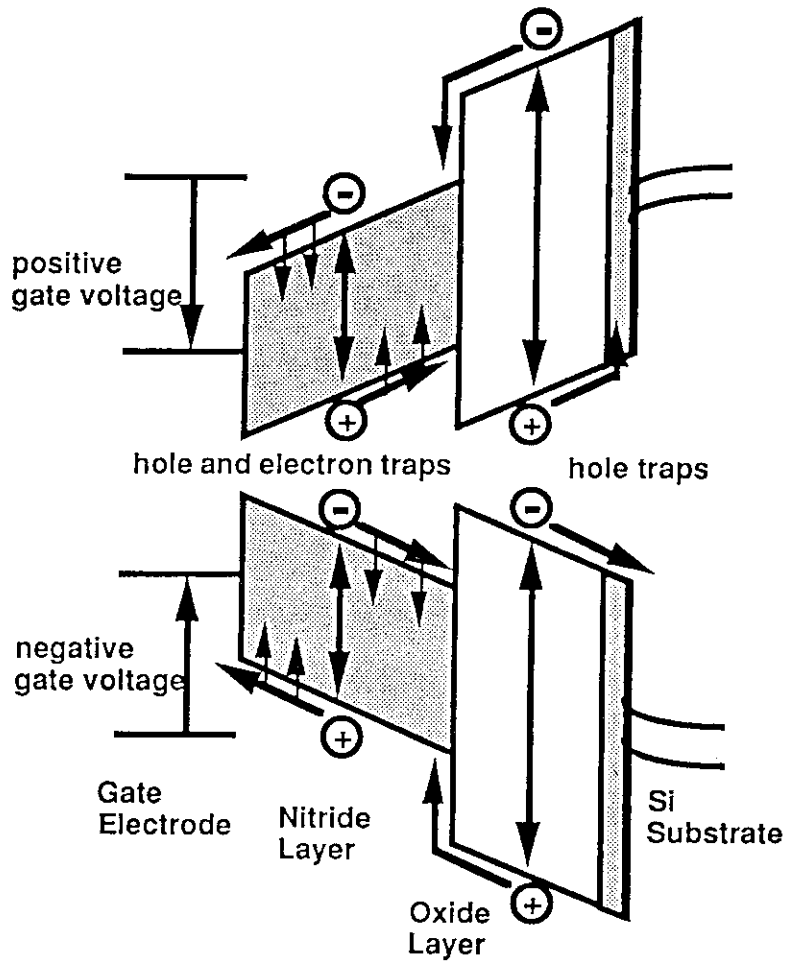


図32. γ 線照射中のMNOS構造絶縁膜中のゲート電圧印加時における電荷発生および捕獲機構.

に大きいことに起因している。また、窒化膜厚が100nm以上になると照射による V_{mg} のシフト量が飽和している。照射量の増加に伴う絶縁膜内電界の変化を計算により評価したところ、窒化膜中での電子捕獲により酸化膜電界が緩和し、照射中にほぼ0になることがわかった。またこの状態になると、酸化膜中での電子-正孔対の分離効率が低下し、照射量をそれ以上増加させても V_{mg} の変化は非常に小さくなることがわかった。すなわち、 V_{mg} のシフト量の飽和は酸化膜電界の緩和により生じることが本解析により明らかとなった。

照射中のゲート電圧が負の場合、酸化膜中の正孔捕獲に寄与する電荷が存在しないことから、主に窒化膜中での電荷捕獲により V_{mg} の変化が生じる。また窒化膜、酸化膜の両絶縁膜において発生した正孔が、窒化膜中での捕獲に寄与することから、窒化膜中の正孔捕獲数は電子に比べて多くなり、 V_{mg} は照射により負方向にシフトすることがわかった。窒化膜中での捕獲正孔密度を評価したところ、正孔は酸化膜-窒化膜界面付近にはほぼ局在していること、またその量は窒化膜厚増加に伴い減少することがわかった。この捕獲量の減少は、絶縁膜厚増加による酸化膜電界の減少（印加電圧一定）に起因した分離効率の低下による減少である。ただし(7)式から明らかのように、 V_{mg} に対する酸化膜-窒化膜界面付近の電荷が及ぼす影響は窒化膜厚に比例して強くなることから、照射による V_{mg} のシフト量は窒化膜増大に伴い増加するものと説明できる。

4.4 まとめ

実験により得られた、照射による窒化膜中の電荷発生量を考慮したMNOS構造のトラップモデルを構築し、シミュレーションにより照射による V_{mg} の変化を評価した。窒化膜中の電子、正孔トラップの捕獲断面積をパラメータとしてフィッティングを行った結果、実験結果を良好に説明できることがわかった。この結果を用いて照射中のMNOS構造における電荷捕獲現象について検討を行った結果、照射中、正のゲート電圧を印加した場合の照射による V_{mg} の正方向シフト、および負のゲート電圧を印加した場合の照射による V_{mg} の負方向シフトは、主に窒化膜中での電荷捕獲に起因していることがわかり、また厚い窒化膜を有するMNOS構造では、窒化膜中の捕獲電荷による酸化膜電荷の緩和が V_{mg} シフト量の飽和を引き起こすことがわかった。

5. 結 論

放射線照射中の絶縁膜電流を測定することにより、照射による絶縁膜中での電子-正孔対発生量が評価できることを示し、測定によりシリコン窒化膜の電荷発生量を求めた。また、得られた電荷発生量を用いてMNOS構造のトラップモデルを構築した。このモデルを用いて、ミッドギャップ電圧の γ 線照射による変化をシミュレーションにより評価した結果、測定結果を良く説明できることがわかり、これより照射中のMNOS構造の電荷捕獲現象について考察を行った。以下に、本研究により得られた結果を述べる。

大気雰囲気中における γ 線照射時の絶縁膜電流測定システムを構築し、MOSキャパシタを試料として測定を行った。素子非装着状態での測定により、伝送ケーブルなど被測定素子部分以外での放射線誘起電流は、三重同軸ケーブルの使用や、鉛ブロックによる放射線の遮蔽により十分抑制可能であることが確認できた。しかし、素子装着状態で測定を行った結果非常に大きな放射線誘起電流が観測された。この電流は素子近傍の大気電離に起因するものと考えられ、照射雰囲気の低圧化が必要であることがわかった。

走査型電子顕微鏡 (SEM) 装置を使用して、真空雰囲気中における電子線 (35keV) 照射雰囲気中での絶縁膜電流測定を行った。照射雰囲気の真空化により、照射による大気電離に起因した電流の低減が可能であることがわかった。シリコン酸化膜およびシリコン窒化膜を絶縁膜としたMIS構造の絶縁膜電流測定を行った結果、本照射条件ではシリコン窒化膜の照射による電荷発生量は、シリコン酸化膜の約20%程度であることがわかった。

γ 線照射によるMNOS構造のミッドギャップ電圧の変化について検討を行うために、Si-SiO₂近傍の酸化膜中には正孔トラップが局在、窒化膜中には一様に正孔および電子トラップが分布するとしたMNOS構造絶縁膜中のトラップモデルを構築した。このモデルにおいて、酸化膜中における電荷発生量はこれまでに報告されている値を引用し、窒化膜中での発生量は、本実験により得られた結果を用いて酸化膜中の発生量の20%と設定した。本モデルを用いてシミュレーションを行った結果、照射中のゲート電圧、および窒化膜厚の変化に対する照射前後でのミッドギャップ電圧の測定値を良く表現できることがわかり、トラップモデルの有効性、および実験により得られた電荷発生量の妥当性を確認した。また、計算結果を基に照射中の電荷捕獲について検討を行った。その結果、

窒化膜中における照射による捕獲電荷は照射中のゲート電圧に依存し、正、負それぞれのゲート電圧に対してそれぞれ電子、正孔が捕獲されることがわかった（酸化膜での正孔捕獲は正電圧印加時に生じる）。窒化膜が厚い場合には、窒化膜中の捕獲電荷により酸化膜電界の緩和が起こり、酸化膜中での発生電荷量が急激に減少することがわかった。

謝 辞

本研究の遂行にあたり多大なご援助を賜った日本原子力研究所高崎研究所材料開発部技術開発課課長梨山勇氏に深謝いたします。また電子線照射実験においてご協力を頂いた日本大学理工学部電気工学科専任講師鈴木薫氏に深謝いたします。

窒化膜中における照射による捕獲電荷は照射中のゲート電圧に依存し、正、負それぞれのゲート電圧に対してそれぞれ電子、正孔が捕獲されることがわかった（酸化膜での正孔捕獲は正電圧印加時に生じる）。窒化膜が厚い場合には、窒化膜中の捕獲電荷により酸化膜電界の緩和が起こり、酸化膜中での発生電荷量が急激に減少することがわかった。

謝 辞

本研究の遂行にあたり多大なご援助を賜った日本原子力研究所高崎研究所材料開発部技術開発課課長梨山勇氏に深謝いたします。また電子線照射実験においてご協力を頂いた日本大学理工学部電気工学科専任講師鈴木薫氏に深謝いたします。

参 考 文 献

1. K. H. Zaininger and A. G. Holmes-Siedle: *R. C. A. Rev.*, 28, 208 (1967).
2. P. M. Lenahan and P. V. Dressendorfer: *J. Appl. Phys.*, 55, 3495 (1984).
3. K. Watanabe, M. Kato, T. Okabe and M. Nagata: *IEEE Trans. Nucl. Sci.* NS-33, 1216 (1986).
4. C. W. Perkins, K. G. Aubuchon and H. C. Dill: *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, NS-15, 176 (1968).
5. P. F. Schmidt, M. J. Rand, J. P. Mitchell and J. D. Ashner: *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, NS-16, 211 (1969).
6. J. R. Cricchi and D. F. Barbe: *Appl. Phys. Lett.*, 19, 49 (1971).
7. G. A. Ausman and F. B. McLean: *Appl. Phys. Lett.*, 26, 173 (1975)
8. J. M. Benedetto and H. E. Boesch, Jr.: *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, NS-33, 1318 (1986).
9. L. Onsager: *Phys. Rev.*, 54, 554 (1938).
10. R. C. Hughes: *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, NS-18, 281 (1971).
11. H. E. Boesch, Jr. and J. M. McGarrity: *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, NS-23, 1520 (1976).
12. W. L. Warren, J. Kanicki, F. C. Rong and E. H. Poindexter: *J. Electrochem. Soc.*, 139, 880 (1992).
13. H. E. Boesch, Jr., F. B. McLean, J. M. Benedetto and J. M. McGarrity: *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, NS-33, 1191 (1986).
14. Y. Kamigaki, S. Sinami and H. Kato: *J. Appl. Phys.*, 68, 2211 (1990).
15. Y. Takahashi, K. Asaka and K. Ohnishi: *IEICE Technical Report*, SDM92-26, 1 (1992).
16. P. C. Arnett and B. H. Yun: *Appl. Phys. Lett.*, 26, 94 (1975).