

〔研究〕

六方晶炭化珪素半導体MOS構造の線照射効果

Effects of Gamma-ray Irradiation on Electrical Characteristics of 6H-SiC Metal-Oxide-Semiconductor Structures

吉川正人 大島武 伊藤久義 梨山勇
M. YOSHIKAWA T. OHSHIMA H. ITOH I. NASHIYAMA
高橋芳浩 大西一功 奥村元 吉田貞史
Y. TAKAHASHI K. OHNISHI H. OKUMURA S. YOSHIDA

Semiconductor devices used in outer space are required to operate in strong ionizing-radiation fields as well as in high-temperature atmosphere. In this paper, we investigate the effects of gamma-ray irradiation on the electrical characteristics of metal-oxide-semiconductor (MOS) structures fabricated on hexagonal silicon carbide (6H-SiC), and examine the absorbed dose dependence of depth profiles of trapped charges in oxide.

§ 1 まえがき

強い電離放射線の存在する宇宙環境で使われる人工衛星、惑星探査機などの開発が進むにつれ、放射線環境下でも安定に動作する実装密度の高い半導体素子の研究・開発が望まれるようになってきている。また、原子力・核融合システムの高機能化と高信頼化のためには、過酷な放射線場で安定に長期間動作する半導体素子・センサーの開発が不可欠である¹⁾。

一方、これら放射線場での使用が想定される半導体素子は、高温での動作、あるいは高温環境下での使用を同時に要求される場合が多い²⁾。例えば、人工衛星に使われる実装密度の高い集積回路や、パワートランジスタやパワーICを用いた電源回路は、衛星内部でかなり大きなスペースを占有するので高集積・低重量化が求められている。しかしながら、素子動作による熱発生の問題があるので、シリコン単結晶(Si)を主体とする現在の半導体素子では、高集積・低重量化の実現には限界がある。また、原子炉や核融合炉の近傍で使用される半導体センサー類等は、高温の放射線環境での使用が前提となっており、放射線と熱の問題を同時に解決するため使用温度限界の高い耐放射線性素子の開発が待たれている。

炭化珪素単結晶(SiC)は、Siに匹敵する電子移動度、高い飽和ドリフト速度、大きな禁制帯幅を持つ、化合物半導体である³⁾。禁制帯幅が広いため理論上500 eVを超える高温でも半導体としての性質を示すこと、II-VI族やIII-V族

の化合物半導体に比べて、化学的に極めて安定でしかも伝導型の制御が可能であること、熱伝導率が高いこと、格子定数が小さいので原子核の変位損傷をおこす放射線エネルギーの閾値が高く欠陥導入率が低いこと⁴⁾、そして、結晶表面をSiと類似した手法で熱酸化することにより良好な絶縁物であるSiO₂膜が作製できること、などの理由から、ダイヤモンドと共に高周波パワーデバイスや、耐熱・耐放射線性素子(ハードエレクトロニクス)を実現するための材料として古くから注目されてきた。1980年代後半の昇華法や化学気相成長(CVD)法によるSiC成長技術の飛躍的な発展により⁵⁾、素子作製に必要な大面積単結晶が比較的容易に作製できるようになってからは、素子作製の基本となるpnジャンクションやショットキーダイオード⁶⁾ばかりでなく、SiC/SiO₂界面の形成をおこなったMetal-Oxide-Semiconductor(MOS)キャパシタやMOSトランジスタ等の素子作製が盛んに試みられ、電流電圧⁷⁾、キャパシタンスー電圧(C-V)⁸⁾、コンダクタンスー電圧特性⁹⁾などの素子特性が測られ、多方面でプレーナー構造素子や集積回路作製の可能性が追求されるようになった。Siでは、実装密度の高い集積回路の作製技術が、SiO₂/Si界面の改良によって実現した事は良く知られているが、SiCも、その酸化膜や界面の性質を十分把握してプロセス技術の開発を行えば、耐熱・耐放射線性半導体素子を実現する電子材料になる可能性を秘めている。SiC MOS構造に我々が注目する理由はここにある。

日本では自動車や航空機のエンジン、あるいは原子炉近

KEY WORDS : silicon carbide, 6H-SiC, MOS, gamma-rays, oxide-trapped charges, interface traps

傍の高温環境下でも動作する半導体素子を用いて各種システムを導入したいという希望が多く、SiCに対する研究も耐熱性半導体素子という観点から素子特性の評価を行ったものが多い。SiCは耐放射線性に優れると言われてきたが、SiC素子の耐放射線性を追求した研究はほとんど無く、酸化膜と炭化珪素単結晶の界面(SiO₂/SiC界面)などの素子構造に起因する評価はあまり行われていないのが現状である。したがって、非常に強い放射線場で使用できる動作温度限界の高いSiC素子を我々が作製開発してゆくためには、SiC単結晶と素子構造、特に素子作製の基本となるMOS構造界面への照射効果の研究を、耐熱性の研究成果を常に踏まえながら行ってゆく事が重要であると考えられる。

我々はこれまでに、立方晶炭化珪素(3C-SiC)MOS構造の照射効果^{10,11)}、並びに、六方晶炭化珪素(6H-SiC)MOS構造の照射効果を¹²⁾、線を用いて調べてきた。この報告では、6H-SiC MOS構造の線照射効果の一つであるTotal Dose Effect(累積線量効果)について調べた結果を報告する。また、6H-SiC MOS構造の酸化膜中にトラップされた電荷の深さ方向分布の照射による変化についても合わせて調べ、SiO₂/6H-SiC界面の電気特性に及ぼす累積線量効果のメカニズムに言及する。

§ 2 実 験

実験に用いた6H-SiC結晶は、直径1インチでn型の無色透明な市販の単結晶を、5mm×5mm角に切断したものをを用いた。この単結晶基板の表面を有機洗浄した直後に1100°Cの酸素中に水素を吹き込んで生成した高温水蒸気で酸化を行い(水素燃焼酸化)、その単結晶表面を犠牲酸化した。その酸化膜を3%の薄いフッ酸を用いて剥離して清浄表面を露出させた後、6H-SiC基板のシリコン面に対して、1100°Cで1時間の水素燃焼酸化を再度行い、20nmの厚さのゲート酸化膜を形成した。酸化終了時に試料を反応管から引出し、試料温度を室温まで急速冷却し、SiO₂/6H-SiC界面付近の化学反応を中断させた。酸化直後の熱アニール(Post oxidation annealing)は酸化膜中の固定電荷や界面準位量を減少させる事があるが¹³⁾、今回の実験では、酸化方法や面方位がSiO₂/6H-SiC界面の照射効果に与える影響を明確にする事を目的としているため、これを行っていない。6H-SiCカーボン面に対しても、1100°Cで10分間の酸化を同様にを行い、30nmのゲート酸化膜を作製した。ゲート酸化膜を作製直後、アルミニウム(AI)を蒸着して直径0.5mmの電極を持つMOS構造を形成した。また、オーミック電極は裏面表層に成長した酸化膜を除去してから、露出した6H-SiC基板表面上にAIを蒸着して作製し

た。

得られた6H-SiCシリコン面及びカーボン面に作製したMOSキャパシタは、アルゴン雰囲気中室温で⁶⁰Co-線によって最大530 kGy(SiO₂)まで照射した。吸収線量率は8.8 kGy(SiO₂)/hである。照射中はMOSキャパシタのゲート及びオーミック電極を短絡したが、バイアス効果を調べるときは、バイアス電圧を照射中試料に印加した。また照射を行うときは、MOSキャパシタを厚さ2mmのAl板で挟んだまま照射し、MOS構造酸化膜内部で照射中に発生する2次電子の電子平衡状態が保たれるよう配慮した¹⁴⁾。

6H-SiC MOS構造のC-V特性は、C-Vプロッターhp4280A(横河ヒューレットパッカード社製)、及び、高速過渡応答容量計DA-1500(堀場製作所製)を用いて周波数1MHz、室温、暗状態で測定した。またSiO₂/6H-SiC界面近傍の結晶中の不純物濃度を決定するため、未照射試料のキャパシタンスーパルス電圧特性(Pulse C-V特性)も合わせて測定した。

§ 3 照射実験の結果

3.1 6H-SiCシリコン面に作製した線照射MOS構造のC-V特性

Fig.1に、シリコン面に作製した酸化膜を持つMOS構造に正バイアスを印加しながら線照射を行ったときの高周波C-V特性の代表例を示す。図中の破線は理論C-V曲線であり、記号、 C_{fb}/C_{ox} 、及び C_{mg}/C_{ox} は、フラットバンド及びミッドギャップ条件に対応する容量を酸化膜容量(C_{ox})で正規化した値を示す。これらの値は、基板の不純物濃度が $5.5 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ の均一な不純物濃度を持つと仮定して計算されたが、この基板濃度はPulse C-V測定から導かれたC²-Vプロットの傾きから求めた。6H-SiC MOS構造のC-V特

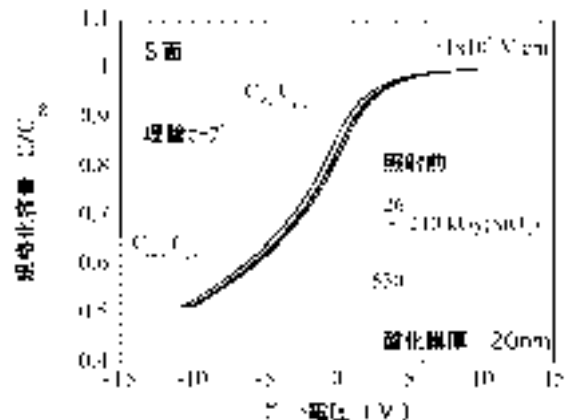


Fig.1 C-V characteristics of MOS structures on the silicon face of a 6H-SiC substrate irradiated with gamma-rays under the electric field of $+1 \times 10^6$ V/cm.

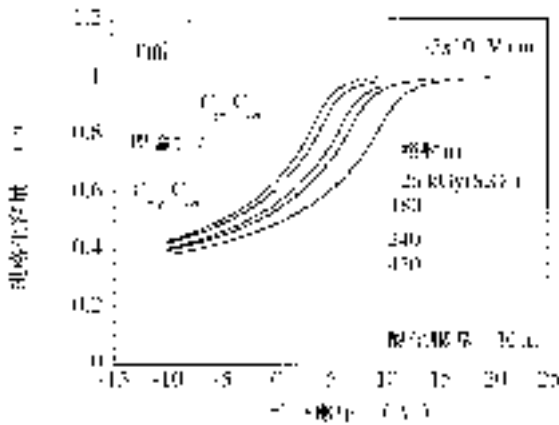


Fig.2 C-V characteristics of MOS structures on the carbon face of a 6H-SiC substrate irradiated with gamma-rays under the electric field of $+5 \times 10^5$ V/cm.

性は反転特性を示さない。これは多くの著者によって報告されているように、6H-SiCのバンドギャップが2.86eVと広いため、価電子帯から伝導帯まで室温で熱励起される電子の数が極めて少ないためである¹⁵⁾。またC-V曲線が、理論C-V曲線の右側に位置しており、照射前の酸化膜中に負の固定電荷が蓄積している。

線照射を行うと、C-V曲線はゲート電圧軸に沿って負電圧方向にわずかにシフトした。しかしながら、 C_{fb}/C_{ox} 及び C_{mg}/C_{ox} に対応するそれぞれのゲート電圧の差、すなわちフラットバンド電圧(V_{fb})、及び、ミッドギャップ電圧(V_{mg})の差 $V_{fb} - V_{mg}$ 、(ストレッチアウト)の増大は見られなかった。Fig.1では、未照射の時に比べて、530kGy(SiO_2)の線照射により、 V_{mg} が約-0.75Vシフトした。

一方、負バイアスを印加して照射した場合には、このような変化はあまり見られず、260kGy(SiO_2)未満の照射では照射前のC-V曲線と照射後のそれが一致する場合も見られた¹²⁾。

3.2 6H-SiCカーボン面に作製した線照射MOS構造のC-V特性

Fig.2に、カーボン面に作製した酸化膜を持つMOSキャパシタに正バイアスを印加しながら線照射したときの高周波C-V特性の代表例を示す。図中の破線や記号はFig.1と同様である。これらの値は、 $6 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ の均一な不純物濃度を持つと仮定して計算され、また基板濃度はPulse C-V測定から導かれた。カーボン面に作製したMOS構造の照射前のC-V特性も、シリコン面のそれと同様に反転特性を示さない。またC-V曲線が、理論C-V曲線の右側に位置することも同じである。しかしながら線照射を行うと違いが現れ、C-V曲線がゲート電圧軸に沿って正電圧方向に大きくシフトした。ストレッチアウトは240kGy

(SiO_2)までは増大しなかったが、450kGy(SiO_2)まで照射すると、緩やかな増大が見られた。 V_{mg} は、450kGy(SiO_2)の照射で+23.8Vシフトした。

一方、負バイアスを印加しながら線照射を行ったときの結果をFig.3に示す。線照射により、C-V曲線がゲート電圧軸に沿って正電圧方向にシフトした。正バイアスを加えながら照射した場合は異なり、ストレッチアウトの増大は見られなかった。印加電圧の極性に対するC-V曲線のシフトは、シリコン面に作製したMOS構造のC-V曲線のそれとは異なっている。450kGy(SiO_2)の照射で、 V_{mg} が未照射の時に比べて約+5.8Vシフトした。

§ 4 累積線量効果の解析

線は、界面準位や固定電荷ばかりでなくバルク欠陥も発生させる。今回の実験では、6H-SiC MOSキャパシタに最大530 kGy(SiO_2)の照射を行ったが、6H-SiCバルク中の照射によって発生する欠陥(照射欠陥)については無視できると考えられた。我々は3C-SiCについて電子線を照射しその欠陥量を調べているが、Siと異なり3C-SiCは10 MGy(SiO_2)以上の照射を行わないかぎり、顕著な照射欠陥の発生がない事が我々のESRの研究から解っている¹⁶⁾。6H-SiCは3C-SiCとは結晶形態が異なるが、原子間の結合エネルギーが3C-SiC同様極めて高い。当然の事ながらその物理・化学特性は極めて類似しており、電子線や線を6H-SiCに照射したときに発生する欠陥の発生に必要な吸収線量は、3C-SiCに匹敵する。したがって今回の線照射実験で発生しているC-V特性の電圧軸に平行なシフトやストレッチアウト(傾きの変化)は、放射線照射によって $SiO_2/6H-SiC$ 界面付近に発生した固定電荷や界面準位の

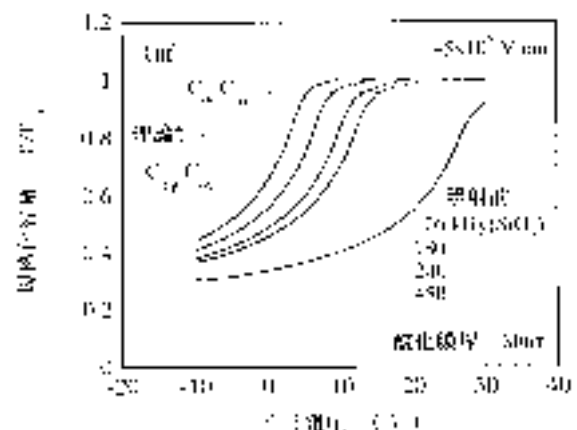


Fig.3 C-V characteristics of MOS structures on the carbon face of a 6H-SiC substrate irradiated with gamma-rays under the electric field of -5×10^5 V/cm.

影響によるものであると考えられる。

4.1 固定電荷の蓄積

実験結果が示すように、線照射を行った時のC-V特性の変化は、そのほとんどが電圧軸に沿った横方向シフトである。そこで、これらの変化がSiO₂/6H-SiC界面近傍に固定電荷が蓄積して生じたと仮定し、線照射によって蓄積した固定電荷量(Q_{tc})を下式で計算した。

$$\Delta Q_{tc} = -\frac{C_{ox}}{A} \left\{ (V_{mg})^{post} \right\} - \left\{ (V_{mg})^{pre} \right\} \dots \dots (1)$$

ここで、C_{ox}は酸化膜容量、Aは電極面積、(V_{mg})^{post}、及び、(V_{mg})^{pre}は、照射後、及び、照射前のミッドギャップ電圧である。この式は、Si MOS構造の照射効果を調べる場合に用いられている、固定電荷蓄積量の評価式と基本的に同じである。

式1を用いて6H-SiCシリコン面上に作製したMOS構造のC-V特性から計算した固定電荷量の吸収線量依存性をFig.4に、カーボン面上に作製したMOS構造酸化膜中の固定電荷量のそれをFig.5に示す。シリコン面上に作製した酸化膜に正バイアスを印加すると、正の固定電荷が10 kGy(SiO₂)を越えるところから徐々に増大する事がわかる。一方、負バイアスを印加した場合には、正バイアスを印加した場合に比べ、正の固定電荷量の発生が極めて少ない。負バイアスを印加しながら照射した試料の中には、まったく固定電荷の発生が認められないものも見受けられた[12]。

一方、Fig.4に示す6H-SiCカーボン面上に作製した酸化膜中の固定電荷の吸収線量依存性は、シリコン面のそれとは全く異っており、印加されるバイアス極性にかかわらず、負の固定電荷が界面に蓄積しているのが解る。

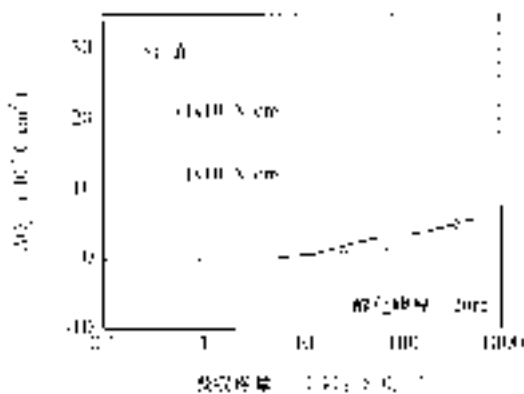


Fig. 4 Dependence of absorbed dose on the generation of trapped charges in oxide layers of MOS structures on the silicon face.

Si MOS構造では、固定電荷の発生がバイアス極性に依存し、正バイアス印加により正の固定電荷が増大し、負バイアスの印加ではその発生が抑止されてしまうことが知られている。これは、照射によって発生した正電荷(正孔あるいはH⁺イオン)が、照射中に印加される正バイアスによってSiO₂/Si界面へ移動し前駆体と相互作用して正の固定電荷を発生させるとするメカニズムで説明される¹⁷⁾。6H-SiCシリコン面上の酸化膜中に発生する固定電荷量のバイアス極性依存性は、Si MOS構造のそれと類似しているが^{12, 17)}、カーボン面上のそれは、Si MOS構造の固定電荷のバイアス極性依存性とは異っており、Si MOS構造の固定電荷の発生メカニズムでは説明がつかない事がわかる。この点については4.3節以降で考察を加える。

4.2 界面準位の発生

バンドギャップ中のSiO₂/6H-SiC界面近傍に界面準位が存在すると、その界面準位と6H-SiC基板の間では、多数キャリアの交換が行われ、C-V曲線のストレッチアウトを変化させるが、このときの時定数(τ)は下式で計算される[18]、

$$\frac{1}{\tau} = \sigma_t \cdot v \cdot n_i \exp\left(-\frac{E_g/2 - \Delta E_t}{kT}\right) \dots \dots (2)$$

ここで、σ_tは界面準位の捕獲断面積、vは多数キャリアの熱速度、n_iは、真性半導体のキャリア密度、E_gはバンドギャップ幅、E_tは、バンドギャップ中に存在する界面準位のエネルギー、κはボルツマン常数、Tは絶対温度である。6H-SiC基板のv及びn_iは、室温でそれぞれ約10⁷ cm/s、10⁻⁶ cm⁻³程度である¹⁸⁾。σ_tの値は、文献により異なっているが、未照射の6H-SiCに対してはおよそ10⁻¹³cm⁻²から10⁻¹⁸cm⁻²の範囲であると考えられる^{18, 19)}。したがって

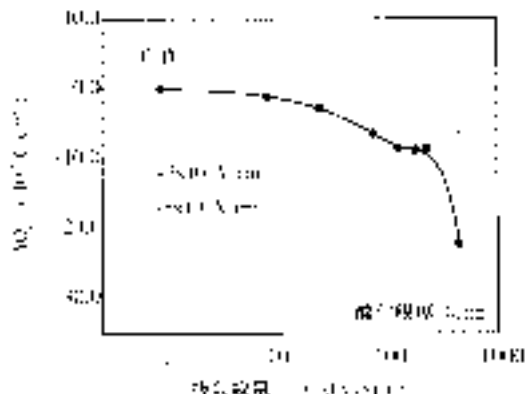


Fig.5 Dependence of absorbed dose on the generation of trapped charges in oxide layers of MOS structures on the carbon face.

バンドギャップ中央付近では、界面準位と6H-SiC基板間の多数キャリア交換の時定数は 10^{12} sから 10^{17} sの範囲と計算される。この値は、バンドギャップ中央付近の界面準位が室温ではキャリアのやり取りをほとんど行わないことを示している。Si MOS構造のC-V特性を極低温で測定すると、C-V特性は反転特性を示さず、また界面準位が存在するときは、Gray-Brownシフトを生じて室温の時よりもC-V特性が正のゲート電圧軸方向へ真横にシフトする事が知られている²⁰⁾。これは、界面準位に捕獲されたキャリアが凍結され時定数が長くなり、界面準位があたかも負の固定電荷のように振る舞うためである。Fig.1からFig.3に示されている未照射の6H-SiC MOS構造のC-V曲線は、理論カーブに比べて全て右側にシフトしており、界面準位が存在するSi MOS構造を極低温で測定している状況と酷似している。従って、式1の前提となる電荷の蓄積が界面近傍で生じているという仮定が正しいとすれば、室温における未照射の6H-SiC MOS構造の界面には、負の固定電荷ばかりでなく、バンドギャップ中央付近の深いエネルギーレベルで負に帯電した電荷のやり取りを行わない界面準位の存在が示唆される。この界面準位がアクセプター型かドナー型かは現在の所ははっきりしないが、6H-SiC MOS構造の基板キャリア濃度が、 10^{17}cm^{-3} を越えており、フェルミレベルの位置が伝導帯に極めて近い所にあることから、バンドギャップ中央の深いエネルギーレベルで負に帯電する界面準位は、アクセプター型である可能性が高い。

一方、照射した試料に発生する界面準位に関する捕獲断面積を測定した例はなく、式2を用いた時定数の評価がすぐにはできない。しかしながら、Fig.3に示すように、カーボン面上に作製したMOS構造に対して450kGy(SiO_2)照射した場合には、C-V特性の正電圧方向へのシフトとスト

レッチアウトが観測されており、室温でも基板との間でキャリアのやり取りができる界面準位が発生していることが示唆される。このような時定数の異なる界面準位の量やエネルギーレベルを正確に評価するためには、試料温度を上昇させてC-V測定を行う必要があるが、試料の温度上昇は界面準位や固定電荷のアニーリングを引き起こすことがあり²¹⁾、その評価は難しくなる。

4.3 固定電荷の蓄積メカニズムの解析

近年、6H-SiC MOS構造の $\text{SiO}_2/6\text{H-SiC}$ 界面近傍の酸化膜中に残留炭素を含むかなり厚い遷移層が存在することが論文等で指摘されている²²⁾。この残留炭素を含む層には歪みや結合の不完全な原子があり、線照射を行うと界面準位や固定電荷に変化する前駆体とその内部に分布していると考えられる。一方、これまでの考察から、式(1)によって評価された6H-SiC MOS構造の酸化膜内部に発生する固定電荷の中には、長い時定数を持つ界面準位も含まれている可能性のあることが分かった。従って式(1)の成立の前提となる界面近傍に固定電荷が蓄積するという仮定の妥当性を検証し、かつ界面準位や固定電荷の照射による発生メカニズムを解明するためには、酸化膜内部の固定電荷の深さ方向分布の照射による変化を調べる事が極めて重要になる。

そこで、本報告では4.1節で述べた累積線量効果の中でも、特異な挙動を示した6H-SiCカーボン面上の酸化膜について、酸化膜を斜めにフッ酸でエッチングする新手法(傾斜エッチング法)を用いて固定電荷の深さ方向分布を調べ、その照射による蓄積メカニズムを追求した。

深さ方向分布を調べる試料の酸化膜は、6H-SiCカーボン面の表面を1100℃で30分間水素燃焼酸化して作製し

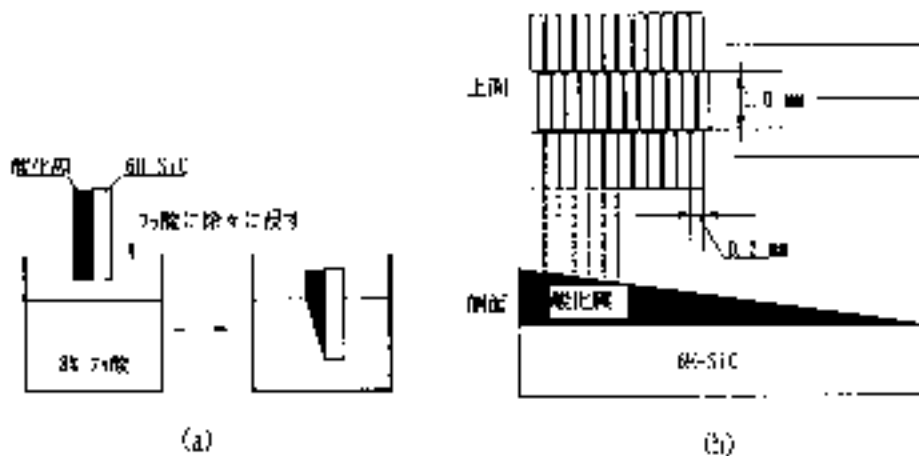


Fig.6 (a) Method of etching at an angle. Samples are immersed into diluted hydrofluoric acid of 8% at a constant speed to make an oxide layer at an angle.

Fig.6 (b) Top and side view of MOS capacitors with the slant oxide on a 6H-SiC substrate. The MOS capacitors in which the oxide thickness changes gradually are fabricated by making an array of gate electrodes on the surface of a slant oxide layer.

た。膜厚は 100nm である。次にその酸化膜の表面全体を覆う Al 電極を蒸着し、 $+1 \times 10^6 \text{ V/cm}$ 、及び、 $-1 \times 10^6 \text{ V/cm}$ の電界を印加しながら 190kGy(SiO₂)まで 線を照射した。照射後、蒸着した電極をリン酸で除去してから、Fig.6 (a) に示すエッチング技術を用いて斜めの酸化膜を作製した。エッチングした後、その酸化膜の表面に Fig.6 (b) に示すようなストライプ状の電極を多数蒸着し、膜厚だけが次第に変化してゆく MOS キャパシタを形成した。この試料を用いた酸化膜内部の電荷分布の解析法については、別に詳細な報告がなされているのでここでは述べないが[23][24]、斜めの酸化膜を用いて形成された MOS 構造の C-V 特性から求められる V_{mg} 、及び、エッチング後の酸化膜厚 x_0 の関係が、酸化膜内の電荷分布 $\rho(x)$ の関数として下式で表される事を利用して解析する^{23, 24)}。

$$V_{mg}(x_0) = -x_0 \frac{Q_B}{\epsilon_0 \epsilon_{ax}} \int_0^{x_0} (x_0 - t) \rho(t) dt + \phi_B + \phi_{ms} \dots (3)$$

ここで、 $\rho(t)$ は、SiO₂/6H-SiC 界面から t の距離にある酸化膜中の電荷量、 Q_B 、 ϕ_B 、及び、 ϕ_{ms} は、それぞれ、ミッドギャップ条件での 6H-SiC 基板表面電荷、ミッドギャップ条件での 6H-SiC 基板表面電位、及び、ゲート電極と 6H-SiC 基板の仕事関数差を表す電位差である。

Fig.7 及び Fig.8 に、正及び負バイアスを印加しながら 190kGy(SiO₂)まで 線を照射したときのカーボン面上に作製した酸化膜中の固定電荷の深さ方向分布の変化を示す。比較のため、未照射の酸化膜の実験結果についても合わせて示した。

照射前には、SiO₂/6H-SiC 界面には負の、界面から 40nm 離れた酸化膜中には正の電荷が蓄積していることが解る²⁴⁾。Si MOS 構造酸化膜では、SiO₂/Si 界面に照射によって正の

固定電荷のみが蓄積することを考えると、酸化膜内での電荷の蓄積状態が大きく異なっている。6H-SiC シリコン面上の未照射の酸化膜についても深さ方向分布を調べたが、その電荷分布はほぼ同じであった²⁴⁾。

Fig.7 に示すように、正バイアスを印加しながら 線を照射を行うと、10kGy(SiO₂)では負の電荷が増大し、正の電荷が界面に近づくが、190kGy(SiO₂)まで照射すると、一旦増大した負の電荷が再び減少して正の電荷が消失している。

一方、負バイアスを印加しながら照射すると、負の電荷は吸収線量が増えるとともに増大するが、正の電荷は SiO₂/6H-SiC 界面から 40nm の位置で次第に減少し、190kGy(SiO₂)の吸収線量では消失する。このように、6H-SiC MOS 構造の酸化膜内部には、極性の異なる電荷が異なった場所に蓄積しており、その深さ方向分布が照射中のバイアス極性により大きく変動する事が解る。

そこでこれらの電荷分布の変化が、SiO₂/6H-SiC 界面近傍に蓄積すると仮定して計算される固定電荷の蓄積量 (Q_{fc}) に与える影響を調べるため、6H-SiC カーボン面上に作製した 100nm の酸化膜を用いて MOS 構造を形成し、 線を照射して固定電荷の吸収線量依存性を調べた。固定電荷の計算には、式 1 を用いたが、求めた値に理論 C-V 曲線からのミッドギャップのシフト量を加え、蓄積電荷の絶対量 (Q_{fc}) で示し、Fig.7 及び Fig.8 の結果と対比させた。結果を Fig.9 に示す。正バイアスでは固定電荷が負から正に変化し、負バイアスでは負電荷が増大するなど、実験誤差の範囲内で、固定電荷の照射による変化が、酸化膜中における電荷の深さ方向分布の結果から説明できることが解る。

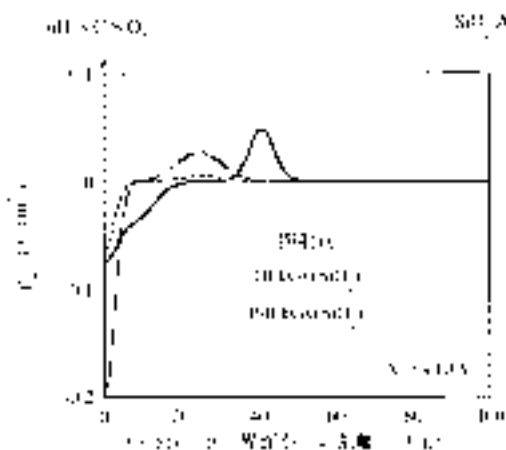


Fig.7 Depth profile of trapped charges in oxide layer irradiated under the positive electric field of $+1 \times 10^6 \text{ V/cm}$.

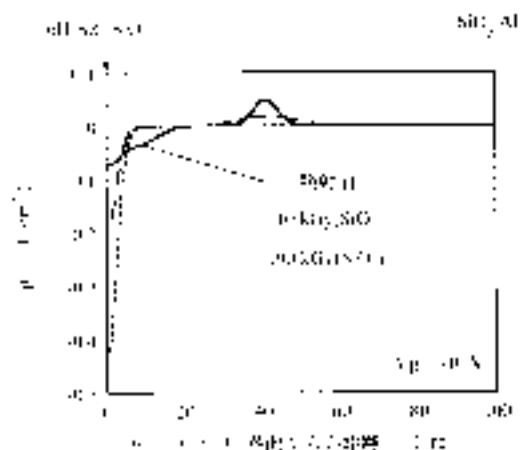


Fig.8 Depth profile of trapped charges in oxide layer irradiated under the positive electric field of $-1 \times 10^6 \text{ V/cm}$.

§ 5 考 察

式1で固定電荷を計算する場合、界面に電荷が局在するようなSi MOS構造の場合には、極めて良い近似値を与えるが、Fig.7或いはFig.8に見られるような深さ方向分布を持つ場合には、式3が示すように界面に誘導される電位は距離の関数となる。式1で計算された電荷量(C-V特性の横方向シフトが現すもの)は、深さ方向に分布する電荷と等価な電気的効果を与える実効的な界面電荷量としての意味合いしかない。酸化膜中に正及び負の電荷が混在し、かつ、深さ方向に分布する6H-SiC MOS構造酸化膜の場合には、Fig.9の結果からFig.7或いはFig.8の電荷分布の変化を知ることはできず、6H-SiC MOS構造の照射効果のメカニズムを調べるためには、式1の解析では不十分である事がわかる。

5.1 6H-SiC MOS構造の照射効果に及ぼす酸化膜厚の影響

Fig.7において、正バイアスを印加しながら10kGy(SiO_2)の照射を行うと、負電荷がわずかに増大することから、正バイアスを印加しながら照射しても負電荷が界面近傍に発生することが分かる。また、一旦発生した負電荷が減少するのは、正バイアスによって界面近傍まで移動してきた正電荷が、負電荷の照射による増大を上回って蓄積するためであると考えられる。Fig.9の結果でも、100kGy(SiO_2)前後の照射では固定電荷が無くなっており、Fig.7の結果を裏づけている。

一方、Fig.5に示すような40nm未満の薄い酸化膜に線が照射される場合には、Fig.7、及び、Fig.8に見られるような SiO_2 /6H-SiC界面から40nm離れた所にある正電荷が存在しない。したがって、界面へ移動する正電荷の量が減少して、正バイアス下の照射で発生する負電荷の増大だ

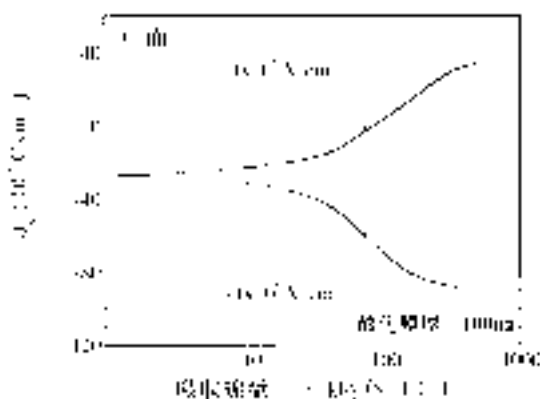


Fig.9 Dependence of absorbed dose on the generation of trapped charges in oxide layers on the carbon face of MOS structures irradiated.

けが観測されたものと考えられる。

この負電荷の正体は、現在の所明確ではない。Si MOS構造の照射効果では、正バイアスを照射中に印加すると界面準位の発生が促進される事はよく知られている¹⁷⁾。このメカニズムは、照射によって酸化膜中で発生した正電荷(正孔又は水素原子)が正バイアスによって界面まで泳動し、前駆体と相互作用して界面準位を造ると説明されている。6H-SiCはバンドギャップが極めて大きいため、前述したように、バンドギャップ中央の界面準位が、室温では基板との間で電荷のやり取りを行わず、界面の固定電荷のように振る舞う。従って、この正バイアス下の照射で発生する負電荷は、照射によって酸化膜中に発生した正電荷(正孔又は水素原子)、或いは、Fig.7で示した界面から40nmの位置に蓄積する正電荷が、正バイアスによって界面に移動し、前駆体と相互作用して発生したアクセプタータイプの界面準位である可能性がある。

Fig.8において、負バイアスを印加しながら照射を行うと負電荷が増大し、正電荷が次第に減少して消失する。またFig.5に示すように、40nm以下の薄い酸化膜中でも顕著に負電荷が増大する。これは、照射によって酸化膜中に発生した負電荷(おそらくは電子)が界面に移動し、界面のトラップサイトに捕らえられたものである可能性がある。電子は移動速度が極めて速いため、Si MOS構造では界面の劣化にはほとんど寄与しないが、SiC MOS構造では、 SiO_2 /SiC界面にかなり厚い残留カーボンを含む構造の乱れた遷移層があると考えられており²²⁾、これらが電子のトラップサイトになっている可能性がある。またFig.8において、正電荷が40nmの所で減少し、 SiO_2 /Al電極側へ移動しないのは、正電荷を捕獲するトラップサイトが40nmよりも離れたところには存在しないため、酸化によって発生した正電荷がトラップサイトから熱放出され、負バイアスによって SiO_2 /Al電極側へ移動することにより消失しているとも考えられる。

5.2 6H-SiCシリコン面の照射効果

Fig.4に示すように、正バイアスを印加しながら線照射を行うと、正電荷が次第に増大する。6H-SiCシリコン面に作製した酸化膜中にも、 SiO_2 /6H-SiC界面近傍に負の、界面から40nm程度離れた酸化膜中には正の電荷が存在する事が分かっている²⁴⁾。したがって、印加された正バイアスにより酸化膜中に発生した正電荷(正孔或いは水素原子)が、界面に移動して蓄積しているものと考えられる。またカーボン面の実験結果からも分かるように、照射によって界面に蓄積するのは、正電荷ばかりではないと考えられるが、試料の酸化膜厚が薄いため界面へ供給される、正電荷量が少ないため、界面で発生する負電荷の量

が、カーボン面に作製した酸化膜に比べて極めて少ないとも推定できる。

一方、負バイアスを印加しながら照射を行うと、Fig. 4に示すように正や負の電荷の発生がほとんど認められない。カーボン面の酸化膜では、負バイアスの印加により負電荷が多量に発生したが、この効果がSiO₂/6H-SiC界面の遷移領域の影響によって説明できることを考えると、6H-SiCシリコン面に作製した酸化膜のSiO₂/6H-SiC界面の遷移領域が、カーボン面に作製した酸化膜中のそれに比べて極めて薄い可能性もある。

Fig.4とFig.5を比較するかぎり、固定電荷の吸収線量依存性からは、6H-SiCシリコン面上に形成したMOS構造の方が、カーボン面上に作製したそれに比べて、C-V特性の横方向シフトが少なく、耐放射線性が高いように見える。しかしながら、C-V特性の横方向シフトは、式3に示すように、正と負の電荷の発生量と発生位置の関数である。また、線照射したときの正及び負電荷の発生量は、酸化膜の作製方法に強く依存すると思われる。従って、シリコン面上に作製した6H-SiC MOS構造の耐放射線性も、酸化膜の作製手法によっては、なお変化する可能性が残されている。この事は、酸化膜の作製によってその内部に発生する正及び負電荷の低減の研究こそが、耐放射線性の研究という観点からも極めて重要である事を示している。

§ 6 結 言

6H-SiC シリコン面及びカーボン面を熱酸化すると、SiO₂/6H-SiC 界面には負の電荷が発生し、その界面から40nm離れた酸化膜中には正の電荷が蓄積する。これら電荷の発生位置や量は、酸化膜の作製方法に強く依存すると考えられる。MOS構造におけるC-V特性のフラットバンド電圧や、MOSトランジスタのしきい値電圧は、これら正及び負の電荷の位置や量に大きく依存する。線照射は、これら電荷の位置や量を大きく変化させるため、これら電荷の存在が、6H-SiC MOS構造の照射効果を、Si MOS構造のそれに比べて複雑で不安定なものにさせている。また、熱酸化膜を用いて作製したSiC MOSトランジスタを、長時間高温で動作させた場合にも、これらの電荷の量や位置が大きく変化する可能性がある。線照射効果の追求から、これら電荷の存在や性質がある程度明らかになったが、酸化膜を作製する時にその内部に発生する正及び負電荷を低減させる研究こそが、耐熱・耐放射線性SiC MOSトランジスタの開発という観点においても極めて重要であると言える。

謝 辞

本報告をまとめるにあたり、実験を精力的に実行してくれた日本大学電子工学科の根本規生君(現在宇宙開発事業団勤務)、並びに、斎藤一成君(現在日立製作所勤務)に深く感謝します。

なお、この論文は電子情報通信学会 C-II論文誌、VOL.J81-C-II NO.1 JANUARY 1998 p140-150に掲載されたものを再録したものです。

参 考 文 献

- 1) BULLTIN of THE ELECTRO TECHNICAL LABORATORY, "Special Issue : Basic Research on Radiation-Resistant Semiconductors", Vol.58, No.2, Feb. 1994.
- 2) J.M.McGarrity, F.B.McLean, and W.M.DeLancey J.Palmour, C.Cater, J.Edmond, "Silicon Carbide JFET Radiation Response", IEEE.Trans.Nucl.Sci., Vol.39, No.6, pp1974-1981, Dec. 1992.
- 3) GARY L HARRIS, PROPERTIES OF Silicon Carbide, INSPEC, the Institute of Electrical Engineers, London, 1995.
- 4) A.L.Barry, B.Lehmann, D.Fritsch, D.Braunig, "ENERGY DEPENDENCE OF ELECTRON DAMAGE AND DISPLACEMENT THRESHOLD ENERGY IN &H SILICON CARBIDE", IEEE Trans.Nucl.Sci., Vol.38, No.6, Dec. 1991.
- 5) S.Nishino, J.A.Powell, and H.A.Will, "Production of large area single-crystal wafers of cubic SiC for semiconductor devices", Appl.Phys.Lett. 42, No.5, pp460-463, Mar. 1983.
- 6) S.Yoshida, K.Sasaki, E.Sakuma, S.Misawa, and S.Gonda, "Schottky barrier diodes on 3C-SiC", Appl.Phys.Lett., 46, No.8, pp766-768, April 1985.
- 7) H.Daimon, M.Yamanaka, M.Shinohara, E.Sakuma, S.Misawa, K.Endo, and S.Yoshida, "Operation of Schottky-barrier field-effect transistors of 3C-SiC up to 400(C", Appl.Phys.Lett. 51, No.25, pp-2106-2108, Dec. 1987.
- 8) Jayarama N. Shenoy, James A.Cooper, Jr., and Michael R.Melloch, "Comparison of thermal oxidized metal-oxide-semiconductor interfaces on 4H and 6H polytypes of silicon carbide, Appl.Phys.Lett. 68, No.6, Feb. 1996.
- 9) T.Ouisse, N.Becourt, C.Jaussaud, F.Templier, "Low-

- frequency, high-temperature conductance and capacitance measurements on metal-oxide-silicon carbide capacitors, *J.Appl.Phys.* 75, No.1, pp604-607, Jan. 1994.
- 10) M.Yoshikawa, H.Itoh, Y.Morita, I.Nashiyama, S.Misawa, H.Okumura, and S.Yoshida,, "Effects of gamma-ray irradiation on cubic silicon carbide meta-oxide-semiconductor, *J.Appl.Phys.* 70, No.3, pp1309-1312, August 1991.
- 11) Y.Yoshikawa, Y.Morita, H.Itoh, I.Nashiyama, S.Misawa, H.Okumura, and S.Yoshida, "Gamma-Ray Irradiation Effects on Cubic Silicon Carbide Metal-Oxide-Semiconductor Structure", *Amorphous and Crystalline Silicon Carbide IV*, Springer Proceedings in Physics, Vol.71, Springer-Verlag, Berlin, pp393-398, 1992.
- 12) M.Yoshikawa, H.Itoh, T.Ohshima, I.Nashiyama, H.Okumura, S.Yoshida, "Effects of gamma-ray irradiation on formation of oxide-trapped charges in SiC MOS capacitor", *Inst.Phys.Conf.Ser. Vol.142 Chap.4*, pp741-744, 1996.
- 13) E.Stein von Kamienski, A.Golz, J.Stein and H.Kurt, "Characterization of Annealed Oxides on N-type 6H-SiC by High- and Low- frequency CV measurements", *Microelectronic Engineering* 28, pp201-204, 1995.
- 14) F.H.Attix, "Introduction to Radiological Physics AND Radiation Dosimetry", Wiley-Interscience, New York, Vol.11, Chap.4, 1984.
- 15) A.Suzuki, K.Maeno, N.Furui, and H.Matsunami, "C-V characteristics of SiC metal-oxide-semiconductor diode with a thermally grown SiO₂ layer", *Appl.Phys.Lett.* 39, No.1, pp89-90, July, 1981.
- 16) H.Itoh, M.Yoshikawa, I.Nashiyama, S.Misawa, H.Okumura, S.Yoshida, "Radiation Induced Defects in CVD-Grown 3C-SiC", *IEEE.Trans.Nucl.Sci.* 37, No.6, pp1732-1738, Dec. 1990.
- 17) P.S.Winokur, H.E.Boesch, Jr., J.M.McGarrity and F.B.McLean, "FIELD- AND TIME-DEPENDENT RADIATION EFFECTS AT THE SiO₂/Si INTERFACE OF HARDEND MOS CAPACITORS", *IEEE.Trans.Nucl.Sci.* NS-24, No.6, pp2113-2118, Dec. 1977.
- 18) P.A.Ivanov, A.O.Konstatinov, V.N.Panteleev, T.P.Samsonova, and V.E.Chelnokov, "Charge properties of an Al-SiO₂-n-6H-SiC{0001}Si} MOS structure", *Sov.Phys.Semicond.* 28, No.7, pp668-672, July, 1994.
- 19) E.Bano, T.Ouisse, L.Di Cioccio, and S.Karmann, "Surface potential fluctuations in metal-oxide-semiconductor capacitors fabricateed on different silicon carbide polytypes", *Appl.Phys.Lett.*, 65, No.21, pp2723-2724, Nov. 1994.
- 20) P.V.Gray and D.M.Brown, "Density of SiO₂-Si interface states", *Appl.Phys.Lett.* 8, No.2, pp31-33, 1966.
- 21) M.Yoshikawa, N.Nemoto, H.Itoh, I.Nashiyama, H.Okumura, and S.Yoshida, "Thermal annealing of interface traps and trapped charges induced by irradiation in oxides of 3C-SiC metal-oxide-semiconductor structures", *Mater.Sci.Eng. Section B*, 47, issue 3, pp218-223, 1997.
- 22) B.Hornetz, H-J.Michel, and J.Halbritter, "AR-XPS studies of SiO₂-SiC interfaces and oxidation of 6H-SiC single crystal Si-(001) and C-(00-1) surfaces", *J.Mater.Res.*, Vol.9, No.12, pp3088-3094, Dec. 1994.
- 23) K.Ohnishi, Y.Takahashi, S.Imaki, K.Okada, and M.Yoshikawa, "A Slant Etching Method to Analyze the Trapped Charge Distribution in the Insulators of MIS Structures", *The 21st International Symposium for Testing and Failure Analysis*, Santa Clara, USA, pp269-274, Nov. 1995.
- 24) M.Yoshikawa, K.Saitoh, T.Ohshima, H.Itoh, I.Nashiyama, S.Yoshida, H.Okumura, Y.Takahashi, and K.Ohnishi, "Depth profile of trapped charges in oxide layer of 6H-SiC metal-oxide-semiconductor structures", *J.Appl.Phys.* 80, No.1, July 1996.

(1999.2.12 受付)