

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年9月3日現在

機関番号：12401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H03967

研究課題名(和文)炭化ケイ素半導体を用いた耐極限環境CCDの開発

研究課題名(英文)Development of an extreme environment resistive CCD using silicon carbide

研究代表者

土方 泰斗 (HIJIKATA, Yasuto)

埼玉大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：70322021

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では高い耐放射線性を有し、高温下でも動作が可能なSiC半導体を用い、CCDを作製することを試みた。まずはSiC MOSキャパシタの光応答、MOSキャパシタアレーにおける電荷輸送といったCCDの基本原理の検証から着手した。その結果、六方晶系SiC基板使用の場合は紫外光に対して、立方晶SiC基板では紫外-緑色域に対する光応答を確認した。フォトリソグラフィを用いてMOSキャパシタアレーを作製し、SiCによる電荷輸送に世界で初めて成功した。SiCおよびSi MOSキャパシタに対するガンマ線照射試験を行い、Siに比べSiCは3桁もの高いガンマ線耐性を有することを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

SiC半導体はパワーデバイスへの応用に極めて優れた物性値を有する上、自然酸化膜が良質な絶縁材料であるSiO₂であることから、30年来に亘り世界各地でパワー-MOSFETの開発が行われてきた。しかし、耐極限環境半導体のニーズが今よりも低かったためか、Siを置き換えてSiCでCCDを作ろうという発想は、筆者の知る限りこれまで全く無かった。従って、今回初めてSiC-CCDの試作に着手し、原理検証に成功したことになる。また、今回MOSキャパシタで得られた1MGyというガンマ線耐性は、撮像素子としては突出した値である。本研究を通じて、高い耐放射線性を有するイメージセンサ実現のための道筋を与えたと言える。

研究成果の概要(英文)：In this study, I attempt to fabricate a CCD using SiC semiconductors that have high radiation hardness and durability under high temperature circumstances. First of all, basic principles such as a photo-response in SiC MOS capacitor and charge transfer in a MOS capacitor array have been verified. As a result, photo-responses were confirmed from irradiation at UV-green region in cubic SiC substrates as well as at UV region for hexagonal SiC substrates. MOS capacitor arrays were fabricated using photo-lithography, and I for the first time succeeded in charge transfer in SiC semiconductors. Gamma irradiation tests were carried out for SiC and Si MOS capacitors, and it was found that SiC MOS capacitors had about three orders higher gamma-ray durability compared with that of Si.

研究分野：半導体結晶工学

キーワード：炭化ケイ素(SiC)半導体 CCD ガンマ線照射効果 MOSキャパシタ 界面準位密度

様式 C-19, F-19-1, Z-19, CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、強い放射線場がかつ高温等の過酷な環境下においても長寿命かつ高信頼性を維持できるエレクトロニクス素子のニーズが高まっている。例えば、2011年3月に起きた東電福島第一原発事故においては、核燃料のメルトダウンが発生し、格納容器内は今もなお数10シーベルトもの高い放射線場にさらされている上、冷却水温度上昇の危機に幾度となく見舞われている。今後、この溶け落ちた核燃料を回収することが事故終息のための最重要課題であるが、人間の被曝線量の抑制のためには耐放射線性が高く、高温動作が可能なエレクトロニクス素子、中でも撮像素子の開発が必要不可欠であると言える。また、国際宇宙ステーション(ISS)の運用や科学衛星/探査機の打ち上げ、民間による宇宙旅行の企画等、人類による宇宙開発の進展は留まるところを知らない。しかし、宇宙空間には高強度の放射線が飛来している上、発熱体の冷却が難しく、半導体デバイスには大変厳しい環境と言わざるを得ない。従って、高放射線耐性でかつ高温動作が可能な、いわゆる「極限環境半導体」が宇宙開発を推進する上での要となっている。他にも、高エネルギー粒子加速器やCT/NMR等の医療断層撮影装置の開発等、高放射線場・高温下の開発現場は多々あり、極限環境半導体の活躍できる場は数多く存在する。

炭化ケイ素(SiC)は、Siと比べバンドギャップ約3倍、絶縁破壊電界10倍等のパワーデバイス応用や高温動作に有利な半導体物性値を有する。そのため、超低損失のパワーエレクトロニクス機器への応用が期待されており、現在、世界的に研究開発競争が繰り広げられている。加えて、SiCはSiと同様に、熱酸化によって良質な絶縁材料であるSiO₂が表面に形成できる。このことは、Siで培われたMOSテクノロジーがそのままSiCにも転用できることを意味する。従って、現在パワーエレクトロニクスの分野でスイッチング素子として頻繁に応用されているSi絶縁ゲートバイポーラトランジスタ(IGBT)の更なる高性能化(低損失化や高速化等)を目的として、SiCによる金属-酸化膜-半導体(MOS)電界効果トランジスタ(FET)の開発にとりわけ注目が集まっている。しかし、電荷結合素子(CCD)もまたMOS接合デバイス的一种であるため、SiCも原理的にはSiと同様にCCD開発に応用できると考えられる。

SiCのもう一つの特徴は、地球上3番目の硬度を持つ物質であり、化学的安定性が高く、高い放射線耐性を有することである。報告者等は最近、他の研究プロジェクトにおいてMOSデバイスの1種であるMOSFETに対し幾多の改良を施し、ガンマ線照射試験の結果11MGyもの高い耐性を達成した。このことは、SiC-MOS構造の極めて高い耐放射線性を示し、また、MOS構造を基本構成要素とするCCDのMGy耐性を示唆するものである。

SiCには数百種類の多形種(ポリタイプ)が存在し、ポリタイプによってバンドギャップは異なる。現在最も量販されているのは、パワーデバイスに適した物性を有し、比較的安定した結晶成長相であることから4H-SiCである。そのバンドギャップは室温で3.23eVであるため、パワーデバイス応用に加え、pnもしくはpin接合の紫外域フォトダイオードへの応用が検討されている。一方、3C-SiC(立方晶閃亜鉛鉱型)は、SiCのポリタイプの中で最もバンドギャップが小さく(室温で2.36eV程度)、吸収波長端は525nm(緑色)に相当する。また、p型半導体のアクセプタ準位は価電子帯端から0.3eV程度と深いため、アクセプタから伝導帯への光吸収から600nm(朱色)にも光応答を示すことが考えられる。従って、ポリタイプとして3C-SiCを選ぶことにより、RGBフルカラー受光素子の実現が示唆される。

2. 研究の目的

本研究では、SiC半導体の材料特性に適したCCDの設計指針および作製プロセスを構築し、世界で初めての“SiC-CCD”の試作を行う。また、耐極限環境半導体であるSiCの特徴を活かし、従来のSi-CCDを凌駕する極限環境耐性を実現し、福島第一原発事故の廃止措置、宇宙開発等に貢献する撮像素子を開発する。

3. 研究の方法

「SiC半導体を用いたCCDを開発し、その耐放射線性・高温動作を検証する。」を主たる目的として、以下の研究課題を遂行する。

- 1) 4H-SiC基板上にMOS構造を形成し、UV光照射による容量-電圧特性曲線の反転によって内部光電効果を確認する
- 2) MOSキャパシタアレイを作製し、電圧印加キャパシタの切り替え、すなわちポテンシャル障壁の移動に伴う電荷輸送を検証する
- 3) 3C-SiC基板の採用によってCCDフルカラー化を実現する
- 4) “埋込チャンネル構造”の採用によって素子の高感度化を図る
- 5) 室温および高温下でのガンマ線照射試験を実施する

4. 研究成果

1. 実験方法

1.1 測定試料

CCDを構成するMOSキャパシタの光応答を確認することを目的として、以下に示す手順で試料を作製した(図1-1.参照)。なお、実験基板としてn型4H-SiC($N_A=2.5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, エピ膜厚10 μm)またはn型3C-SiC($N_A=3.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, エピ膜厚2 μm on Si)エピタキシャル成長膜を用いた。

n型4H-SiC基板をRCA洗浄後、乾燥酸素酸化(酸化膜厚:33.8nm)を行い、極薄金(膜厚4.4nm)を透明ゲート電極(電極面積:0.5 \times 0.5mm)として真空蒸着装置を用いて蒸着した。その後裏面酸化膜を除去し、裏面全体にAlオーミック電極を膜厚約90nm形成し、MOSキャパシタを作製した。さらに、3C-SiC基板を用いて4H-SiC試料とほぼ同様の方法でMOSキャパシタを作製した。なお、酸化膜厚は31.2nm, Auゲート電極の膜厚は4.1nmであった。

次に、電荷輸送を検証するために、図1-2.のようなレイアウトをもつフォトマスクを用いてSiC-MOSキャパシタが三つ隣接したMOSキャパシタアレイを作製した。なお、試料の作製にはフォトリソグラフィを

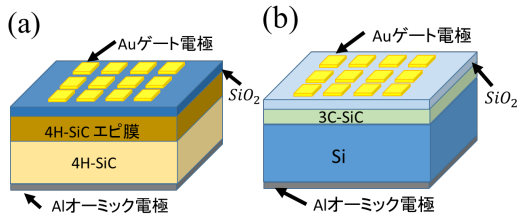


図 1-1. 作製した MOS キャパシタの概要図. 透明ゲート電極として Au 極薄膜を採用: (a) 4H-SiC 基板, (b) 3C-SiC 基板

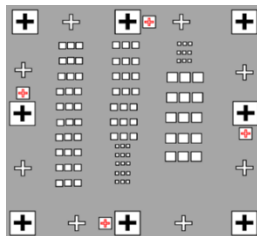


図 1-2. 設計したリソグラフィー用マスク

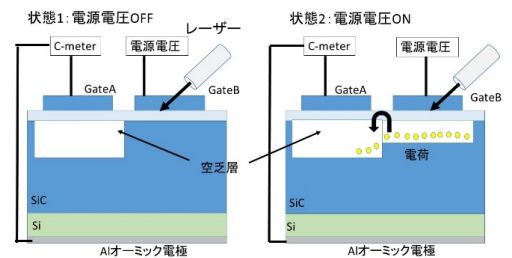


図 1-3. 電荷輸送の模式図

用いた. ゲート電極として面積 $120 \times 120 \mu\text{m}^2$, 膜厚約 90 nm の Al を蒸着し, 電極間ギャップを $1 \sim 5 \mu\text{m}$ の間で変化させた.

1.2 実験手順

まず, 作製した MOS キャパシタ試料に対し, 高周波 (1 MHz ; RF) および準静的 (Quasi-static; QS) 容量-電圧 ($C-V$) 測定を暗状態と光照射時においてそれぞれ行った. 光源として 4H-SiC には低圧 Hg ランプを, 3C-SiC には低圧 Hg ランプ及びハロゲンランプを用いた. さらに, 光照射した turn-on 時の過渡容量応答 ($C-t$) 測定と, 光をオフにした際 (turn-off 時) の $C-t$ 測定を行い, SiC-MOS キャパシタの電荷蓄積時定数 τ_{on} ならびに放電時定数 τ_{off} を求めた.

作製した 1×3 MOS キャパシタアレイに対する光応答を確認するため, 高周波 (周波数 1 MHz) $C-V$ 測定を光照射前後で行った. この試料のゲート電極は光が透過しないため, 電極端に UV レーザー (375 nm) およびグリーンレーザー (532 nm) を照射し, 電極の横からはみ出た空乏層から光に応答した電荷を供給した. 次に, $C-t$ 測定により, UV レーザー, グリーンレーザーを ON/OFF 切り替えた時の容量の応答性をそれぞれの光源で検証した.

試作した MOS キャパシタアレイに対し電荷輸送の検証を行なった. 方法は, 容量測定する電極の隣の電極に電源電圧を印加し, その電極の端に光を照射した. このとき, 電源電圧の ON/OFF によって電荷の輸送/蓄積が行われるはずである. 電源電圧 ON/OFF を切り替えた時の模式図を図 1-3. に示す. レーザー光は終始 ON 状態とし, 状態 1 においては電源電圧が OFF であるため GateB に電荷はたまり, 輸送もされない. 状態 2 においては, 電源電圧が ON であるため GateB の下にできた空乏層に電荷がたまり, GateA に輸送される.

量子科学技術研究開発機構・高崎量子応用研究所のコバルト 60 ガンマ線照射施設にて, 線量率 $1 \sim 10 \text{ kGy/h}(\text{SiO}_2)$, 室温, 窒素雰囲気中でガンマ線照射を実施した. 途中, 照射を中断し, 室温, 大気中, 暗状態でサンプルの電気的特性を測定し, その後, 追加照射を繰り返すことで積算線量効果を評価した.

2. 結果と考察

2.1 少数キャリア生成による反転層の形成

図 2-1. に 4H-SiC 基板上 MOS キャパシタに対する光照射前後の RF および QS $C-V$ 特性を示す. 同図より, RF および QS $C-V$ 特性がともに光照射によって反転領域での容量の増加が見られた. すなわち, 低圧 Hg ランプからの紫外光照射による反転層の形成を確認することが出来た. また, 高周波 (RF) よりも準静的 (QS) 特性の方が容量の増加が顕著にみられたが, これは QS の場合, 少数キャリアがバイアス電圧の変動に追従するため, より多くの電荷が生成されたと考えられる.

図 2-2. (a), (b) に, それぞれ 3C-SiC 基板上 MOS キャパシタに対する光照射前後の RF および QS $C-V$ 特性を示す. 測定結果から, 3C-SiC MOS キャパシタにおいても紫外光照射による反転層の形成を確認することが出来, さらにハロゲンランプの照射によっても形成が確認された. これは, 3C-SiC が 4H に比べバンドギャップの小さいことから生じる可視光域への応答であり, 当初の予想通りの特性が得られたと言える. 以上より, 4H-, 3C-SiC 基板のいずれにおいても少数キャリア励起による反転層形成が確認された. 4H と 3C-SiC 基板の $C-V$ 特性を比較すると, 4H の方が光照射による容量増加の割合が大きかった. 無照射の測定結果から界面準位密度を算出した結果を図 2-3. に示す. 同図から 4H-SiC 基板と比べて 3C-SiC 基板を用いた MOS キャパシタでは界面準位密度が一桁ほど低減していることが確認できる. 従って, 4H の方が光照射による容量増加の割合が大きい理由は, 少数キャリアが界面準位に捉えられ, より多くの蓄積が起こったことが示唆される.

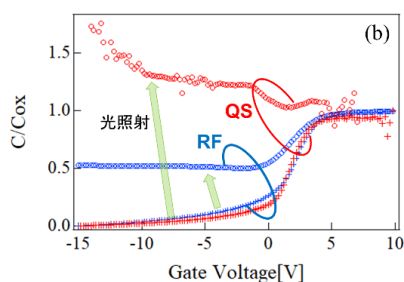


図 2-1. 4H-SiC 基板上 MOS キャパシタに対する光照射前後の RF および QS $C-V$ 特性

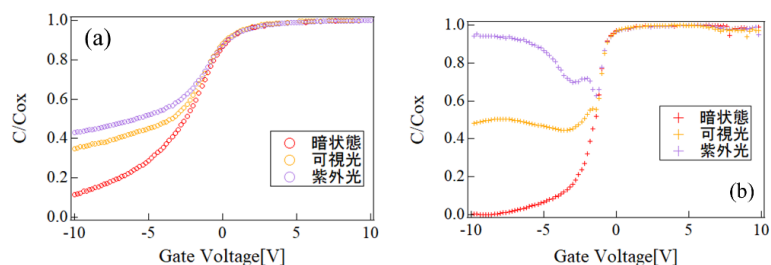


図 2-2. 3C-SiC 基板上 MOS キャパシタに対する光照射前後の $C-V$ 特性: (a) RF $C-V$ 特性, (b) QS $C-V$ 特性

2.2 光 CV法による評価

界面準位に捕らわれた多数キャリアは、光で励起した少数キャリアと打ち消し合ってしまう。これは少数キャリアを利用する CCD では望ましくない。そこで、光 CV法により多数キャリアが界面準位にどの程度トラップされるのかを調べた。まず、測定試料に1分間以上光照射し、 $-10V$ のバイアスで反転層を形成した。その後、照射をオフにしたのち、 $-10V \rightarrow 10V \rightarrow -10V$ の順でバイアスを掃引した。光源として低圧 Hg ランプを用いた。測定結果を図 2-4. に示す。同図より、4H-SiC および 3C-SiC 試料において、それぞれでキャパシタンスレッジ[1]の形状をしたヒステリシスが観測された。これは界面準位にトラップされた電荷量に相当し、界面準位密度は以下の式(1)により算出される[1].

$$N_{ds} = \frac{C_{ox} \Delta V_{ds}}{q} \quad (1)$$

ここで、 C_{ox} :ゲート酸化膜容量、 V_{ds} :電圧シフト(レッジ電圧幅)である。式(1)より、 $N_{ds,4H} = 1.09 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 、 $N_{ds,3C} = 8.43 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ と算出された。なお、本来であればキャパシタンスレッジがより顕著な 3C-SiC 試料の方が界面準位密度の多いことが推測されるが、これは作製した MOS キャパシタの電極面積が設計値より小さかったため、 C_{ox} が小さくなりキャパシタンスレッジの幅が見かけ上小さくなったと考えられる。

2.3 過渡容量応答(C-t)測定

4H-SiC, 3C-SiC 基板上 MOS キャパシタに対し、turn-on 時と turn-off 時のそれぞれで容量過渡応答を観測した結果を図 2-5. (a)と(b)に示す。この結果を指数関数でカーブフィッティングを行い、応答速度 τ_{on} 及び放電時定数 τ_{off} をそれぞれ求めた。応答速度 τ_{on} は 4H-SiC の場合 $\tau_{on,4H} = 93 \text{ ms}$ 、3C-SiC の場合で $\tau_{on,3C} = 186 \text{ ms}$ となり、十分な速さの応答速度を有することがわかった。また、放電時定数 τ_{off} は同じく 4H で $\tau_{off,4H} = 142 \text{ ms}$ 、3C で $\tau_{off,3C} = 319 \text{ ms}$ となり、放電時間も実用上問題のない長さであった。今回は試料として n 型基板を用いているため反転層のキャリアは正孔である。一般的な CCD の場合 p 型基板を用い、少数キャリアが電子である。電子とホール移動度の比から 3C-SiC p 型基板の時定数を見積もると、 $\tau_{on,p,3C} = 9 \text{ ms}$ 、 $\tau_{off,p,3C} = 16 \text{ ms}$ 程度まで短縮されることが見込まれるが、それでもなお実用上十分な長さを有しているといえる。

2.4 電荷輸送検証用試料の作製

CCD の電荷輸送(少数キャリア)は、転送先の MOS ダイオードに逆方向電圧を加え少数キャリアに対するポテンシャルを下げ、隣りの MOS キャパシタに転送する。この移動は、MOS キャパシタ間の空乏層(反転層)を介して行われるため、隣接する MOS キャパシタは互いの空乏層がつながる距離にしなくてはならない。そこで、以下の式(2)から、作製する MOS キャパシタの空乏層幅 x_d を見積った。

$$x_d = \sqrt{\frac{2\epsilon_0\epsilon_s\psi_s}{qN_A}} \quad (2)$$

なお、 ϵ_0 :真空誘電率[F/cm], ϵ_s :比誘電率、 ψ_s :内部電位[V]、 q :電荷量[C]、 N_A :不純物濃度[cm^{-3}]である。ゲート電極に印加する電圧を最大 20 V で試算すると、4H-SiC では $x_{d,4H} = 1.2 \mu\text{m}$ 、3C-SiC では $x_{d,3C} = 2.7 \mu\text{m}$ となった。これらを考慮し電極間の距離を 1~5 μm (1 μm 刻み)と決定し、リソグラフィ用マスクを設計した(図 1-2. 参照)。設計したマスクを用いて 3 × 1 MOS キャパシタアレーを電荷輸送の検証用試料として作製した。

図 2-6. に UV レーザー、グリーンレーザー照射時(gate A: $V = -15V$ 印加)の C-t 測定の結果を示す。レーザーの ON/OFF に同期して静電容量の増減が見られる。また、光 turn-on/off における時定数をそれぞれ測定し、電荷蓄積/保持時間がそれぞれ 0.2 s/0.5 s であることがわかった。図 2-7. に UV レーザー、グリーンレーザー照射時(gate A: $V_{bias} = -15V$ 印加時)、電源電圧(gate B: $-10V$ 印加) ON/OFF 切り替え時の C-t 測定

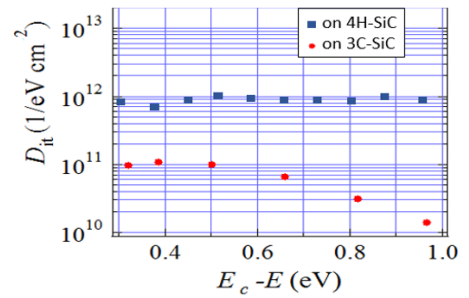


図 2-3. 4H-, 3C-SiC 基板上 MOS キャパシタの界面準位密度エネルギー分布

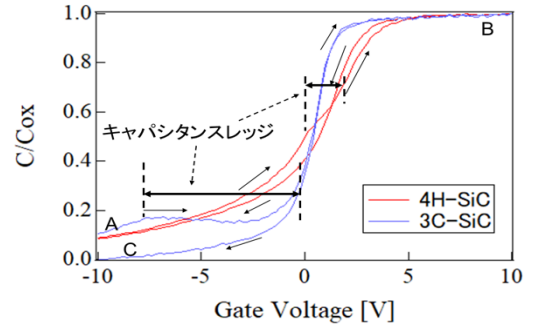


図 2-4. 光 CV法で観測された高周波 C-V 曲線のヒステリシス

図 2-5. 過渡容量応答特性: (a) turn-on 時, (b) turn-off 時

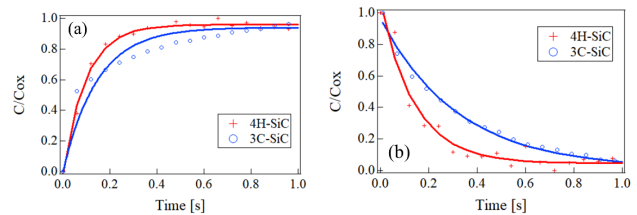


図 2-5. 過渡容量応答特性: (a) turn-on 時, (b) turn-off 時

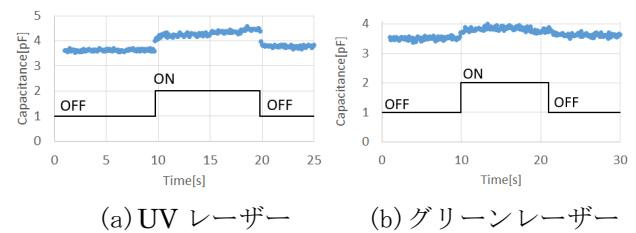


図 2-6. レーザー ON/OFF 時の C-t 測定

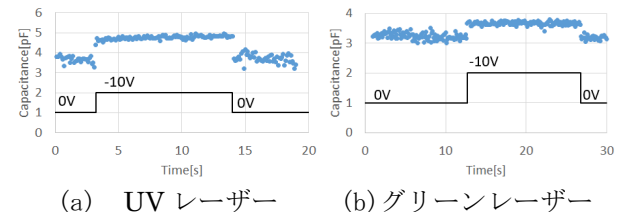


図 2-7. 電源電圧 ON/OFF 時の C-t 測定

結果を示す。それぞれ電源電圧 ON のタイミングに静電容量が増加した。従って、今回試作した 3×1 MOS キャパシタアレーは、期待通りの原理によって電荷輸送が行われていることが示唆される。

2.5 SiC MOS キャパシタのガンマ線照射試験

図 2-8. は、Si 及び SiC MOS キャパシタに対する容量-電圧特性のガンマ線照射量依存性である。同図より、照射量に対し反転領域（負電圧側）における容量増加が見られるが、これは界面準位密度増加に起因したガンマ線照射による劣化を意味する。すなわち、Si は 8.7 kGy (Gy (グレイ) \doteq Sv (シーベルト)) 照射の時点でかなり劣化が進んでいるのに対し、SiC は 8.5 MGy でもほとんど劣化が見られないことがわかった。従って、SiC MOS 構造の極めて高い耐放射線性が立証され、MOS 構造を基本構成要素とする CCD の MGy 耐性が示唆された。

2.6 埋込チャンネル構造の導入効果

埋込チャンネル構造を有する SiC MOSFET と有さないものとの S-factor とそのガンマ線照射効果を比較検討した。ここで、S-factor の算出にはドレイン-ゲート電圧 (I_d-V_g) 測定を行い、 I_d-V_g 曲線から $I_d=10^{-4} \sim 10^{-3}$ A 間の電圧変化 $dV_g/d\log I_d$ [V/dec] に求めた。なお、S-factor の増大は界面準位密度の増大によるキャリアの散乱を意味する。図 2-9. に、埋込チャンネルの有無で比較した S-factor の吸収線量依存性を示す。今回のサンプルでは、未照射における S-factor の差はあまり見られなかった。しかし、ガンマ線吸収線量依存性に関しては明白な差が見られた。すなわち、埋込チャンネル無しの場合未照射から 200 kGy までほとんど変化がないのに対し、有りの場合は僅か 0.45 kGy の照射で減少し、その後 200 kGy まで変わらなかった。これらの結果は、チャンネル構造によってはガンマ線照射に MOS 界面状態を改善する効果があることを意味し、非常に興味深い。今後、この改善メカニズムの詳細について明らかにしていくが、例えば、ガンマ線照射による基底面転位の縮小効果[2]に関するものが考えられる。

3. まとめ

耐熱・耐放射線性を有するイメージセンサ (CCD) を実現するため、その基礎基盤技術として SiC 半導体を用いた MOS キャパシタアレーを試作した。まず、ゲート電極を透明の金属材料で構成した SiC MOS キャパシタを作製し、RF および QS $C-V$ 特性の光応答を調べることで、光電変換及び電荷蓄積についての検証を行った。その結果、少数キャリア励起による反転層の形成により、4H-SiC 基板を用いた場合は紫外域での光応答を、3C-SiC では可視域および紫外域の両方で光応答を得られることを確認した。また、4H-SiC 基板と比べて 3C-SiC 基板を用いた MOS キャパシタでは界面準位密度が低減していることがわかった。続いて、容量過渡応答を観測することで、少数キャリアの応答速度及び放電時定数を求めた結果、応答速度は、3C-SiC の場合で $\tau_{on,3C} = 186$ ms, 4H-SiC で $\tau_{on,4H} = 93$ ms と十分な速さを有し、他方、放電時定数においては $\tau_{off,3C} = 142$ ms, $\tau_{off,4H} = 319$ ms と実用上十分な長さを有することがわかった。

フォトリソグラフィを用いて 1×3 3C-SiC MOS キャパシタアレーを作製し、まずは光容量応答特性を調べた。その結果、受光部が小さくなったため容量反転による変化は小さい値を示したが、UV レーザーおよびグリーンレーザーを光源としたいずれの場合においても光応答を確認することができた。また、MOS キャパシタ間の電荷輸送を、静電容量の過渡応答を観測することで検証した。その結果、UV レーザーおよびグリーンレーザーを光源としたいずれの場合においても静電容量の増加を示し、SiC MOS キャパシタアレーに対し世界で初めて電荷輸送を確認することができた。光 turn-on/off における時定数をそれぞれ測定し、電荷蓄積/保持時間がそれぞれ 0.2 s/319 s であることを把握した。さらに、電極間のギャップ長を変えた MOS キャパシタアレーをいくつか作製し、電荷輸送に必要な印加電圧のギャップ長依存性についても基礎データとして取得した。

Si 及び SiC MOS キャパシタに対するガンマ線照射効果を調べ、SiC MOS 構造は Si に比べ 3 桁以上もの高いガンマ線耐性を有することを示し、CCD の MGy 耐性が示唆された。

MOS キャパシタの反転層を埋込チャンネル構造にすることで、界面準位にトラップされる光電荷の抑制と光応答速度向上を試みた。SiC MOSFET の S-factor の測定から界面準位密度を評価し、そのガンマ線吸収線量依存性を測定したところ、未照射での S-factor には埋込チャンネル構造の有無で有意な差は見られなかったものの、埋込チャンネル構造を導入した場合、少量の照射線量により S-factor (界面準位密度) が減少し、その後高線量まで一定の値を取ることがわかった。

紙面の都合で詳細は省略するが、SiC DMOSFET の酸化膜および電極を溶液除去し、ガンマ線照射による結晶損傷をラマンイメージングにより観察した。その結果、n 型エピタキシャル層では損傷に起因する変化が見られなかったが、p 型 Al イオン注入層では余剰炭素に起因するラマン線が増加する傾向が見られた。

本研究を通じて、高い耐放射線性を有するイメージセンサ実現のための道筋を与えたと言える。

[1] H. Yano *et al.*, IEEE Trans Electron. 46 (1999) 3

[2] T. Miyazaki *et al.*, Superlattices and Microstruct. 99 (2016) 197-201

[3] Z. H. Ni *et al.*, Phys. Rev. B 77 (2008) 115416

[4] S. H. Choi *et al.*, Appl. Surf. Sci. 253 (2007) 5411

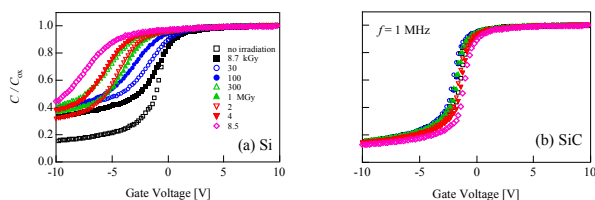


図 2-8. MOS キャパシタの高周波容量-電圧特性のガンマ線吸収線量依存性 : (a) on Si 基板と (b) on SiC 基板の比較

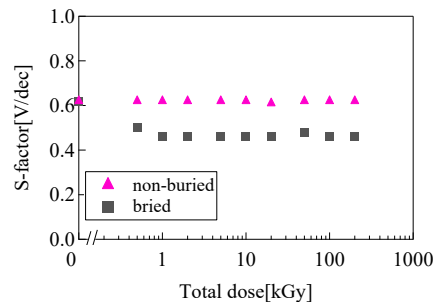


図 2-9. 埋込チャンネルの有無で比較したサンプルの S-factor のガンマ線吸収線量依存性

様式 C-19, F-19-1, Z-19, CK-19 (共通)

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計14件) (全て査読有り)

- 1) Yasuto Hijikata, "Macroscopic simulations of the SiC thermal oxidation process based on the Si and C emission model," *Diam. Relat. Mater.*, Vol. 92 pp. 253-258 (2019).
- 2) R. Asafuji and Y. Hijikata, "Generation of stacking faults in 4H-SiC epilayer induced by oxidation," *Mater. Res. Express*, vol. 5, a.n. 015903 (2018).
- 3) K. Murata, S. Mitomo, T. Matsuda, T. Yokoseki, T. Makino, S. Onoda, A. Takeyama, T. Ohshima, S. Okubo, Y. Tanaka, M. Kandori, T. Yoshie, Y. Hijikata, "Impacts of Gate Bias and its Variation on Gamma-ray Irradiation Re-sistance of SiC MOSFETs," *Phys. Status Solidi A*, vol. 214, a.n. 1600446 (2017).
- 4) S. Mitomo, T. Matsuda, K. Murata, T. Yokoseki, T. Makino, A. Takeyama, S. Onoda, T. Ohshima, S. Okubo, Y. Tanaka, M. Kandori, T. Yoshie, Y. Hijikata, "Optimum Structures for Gamma-ray Radiation Resistant SiC-MOSFETs," *Phys. Status Solidi A*, vol. 214, a.n. 1600425 (2017).
- 5) A. Takeyama, T. Matsuda, T. Yokoseki, S. Mitomo, K. Murata, T. Makino, S. Onoda, S. Okubo, Y. Tanaka, M. Kandori, T. Yoshie, Y. Hijikata, T. Ohshima "Improvement of radiation response of SiC MOSFETs under high temperature and humidity circumstance," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 55, a.n. 104101 (2016).
- 6) T. Miyazaki, T. Makino, A. Takeyama, S. Onoda, T. Ohshima, Y. Tanaka, M. Kandori, T. Yoshie, Y. Hijikata, "Effect of gamma-ray irradiation on the device process-induced defects in 4H-SiC epilayers," *Superlattices and Microstructures*, Vol. 99, pp.197-201 (2016).
- 7) D. Goto and Y. Hijikata, "Unified theory of silicon carbide oxidation based on the Si and C emission model," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol.49, a.n. 225103 (2016).
- 8) T. Matsuda, T. Yokoseki, S. Mitomo, K. Murata, T. Makino, H. Abe, A. Takeyama, S. Onoda, Y. Tanaka, M. Kandori, T. Yoshie, Y. Hijikata, T. Ohshima, "Change in Characteristics of SiC MOSFETs by Gamma-ray Irradiation at High Temperature," *Mater. Sci. Forum*, Vol.858, p.860 (2016).
- 9) T. Ohshima, T. Yokoseki, K. Murata, T. Matsuda, S. Mitomo, H. Abe, T. Makino, S. Onoda, Y. Hijikata, Y. Tanaka, M. Kandori, S. Okubo, and T. Yoshie, "Radiation Response of Silicon Carbide Metal-Oxide-Semiconductor Transistors in High Dose Region," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 55, a.n.01AD01 (2016).
- 10) Y. Miyano, R. Asafuji, S. Yagi, Y. Hijikata, and H. Yaguchi, "Photoluminescence study of oxidation-induced faults in 4H-SiC epilayers," *AIP Advances*, Vol. 5, a.n. 127116 (2015).
- 11) Y. Hijikata, R. Asafuji, R. Konno, Y. Akasaka, R. Shinoda, "Si and C emission into the oxide layer during the oxidation of silicon carbide and its influence on the oxidation rate," *AIP Advances*, Vol. 5, a.n. 067128 (2015).

[学会発表] (計48件)

- 1) ((Keynote talk)) Yasuto Hijikata, "Growth Rate Simulations of Oxide Films on Silicon Carbide based on the Si and C Emission Model," 2018 Conference on Intelligent Computing, Communication & Applied Technologies (CICCAT2018) (Zhuhai, China) 2018.12.25.
- 2) ((Invited)) Yasuto Hijikata, "A Macroscopic Simulation of the SiC Thermal Oxidation Process based on the Si and C Emission Model," The Asia-Pacific Conference on Silicon Carbide and Related Materials (APCSCRM) 2018 (Beijing, China) 2018.7.11.
- 3) ((Invited)) R. Asafuji and Y. Hijikata, "Generation of stacking faults in 4H-SiC epilayer during oxidation," Energy Materials Nanotechnology (EMN) on Epitaxy 2016 (A05) (Budapest, Hungary) 2016.9.5.
- 4) 【招待講演】 土方 泰斗, "SiC 酸化膜界面のパッシベーション技術," 応用物理学会先進パワー半導体分科会第2回個別討論会 (名古屋) 2016.8.1.
- 5) 【招待講演】 土方 泰斗, "SiC 熱酸化における界面からの Si, C 放出と界面欠陥," 応用物理学会先進パワー半導体分科会第1回個別討論会 (東京) 2015.8.4.

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

[その他] ホームページ等 <http://www.opt.ees.saitama-u.ac.jp/~yasuto/index-j.html>

6. 研究組織

(1) 研究分担者 なし

(2) 研究協力者 なし

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。