

氏名(本籍地)	松島 宏行
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博甲第 10001 号
学位授与年月日	令和 3 年 3 月 25 日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
審査研究科	理工情報生命学術院
学位論文題目	

炭化珪素(SiC)パワーデバイスの終端領域に蓄積した電荷量を測定可能な容量測定法の開発とそれをを用いた耐圧長期信頼性に関する研究

主査	筑波大学教授	博士(工学)	岩室 憲幸
副査	筑波大学准教授	博士(工学)	矢野 裕司
副査	筑波大学准教授	博士(工学)	蓮沼 隆
副査	産業技術総合研究所	副センター長 博士(工学)	田中 保宣

論 文 の 要 旨

審査対象論文は、次世代パワーデバイスとして期待されているシリコンカーバイド(SiC)デバイスの、高印加電圧を保持する周辺耐圧構造長期信頼性に関する研究である。SiC パワーデバイスの課題として、i)ゲート絶縁膜の信頼性、ii)ボディダイオードの通電劣化、iii)周辺耐圧構造の信頼性の3つがあることが知られているが、本論文では iii)の周辺耐圧構造領域に蓄積される電荷に注目、その電荷量の評価法の開発を通して長期信頼性を確保するための素子設計指針確立の方向性を示すことを目的としている。

第1章では脱炭素社会の実現に向けて、高性能パワーデバイスの普及がいかに重要であるかを中心に、本研究の背景ならびに目的について述べている。第2章では SiC の材料物性や SiC パワーデバイスの特徴を述べ、さらに SiC パワーデバイスの周辺耐圧構造技術について解説し、周辺耐圧領域における信頼性の課題について言及している。これまで SiC 周辺耐圧構造は、不純物注入を用いた電界・電荷制御技術である JTE(Junction Termination Extension)や FLR(Field Limited Ring)構造を基本として、さまざまな構造が検討されてきた。SiC パワーデバイスでこれらの構造を高温・高電圧下で信頼性試験を実施すると、その前後で素子耐圧の変動が生じることが報告されているがその原因は解明されておらず、このメカニズム解明は長期信頼性特性実現に向けて極めて重要であるとしている。

第3章では、「容量測定による耐圧劣化メカニズムの解明」と題し、長期信頼性試験前後の静電容量を比較し、その変化からその素子耐圧劣化メカニズムを議論している。先行研究調査の結果から、耐圧劣化のメカニズムを i)周辺耐圧領域の SiC/SiO₂ 膜界面近傍の正電荷の蓄積が空乏層の拡がりが増加して耐圧が劣化するモデル、ii)SiC n-層にトラップされた電子の放出による n-層濃度変化により pn 接合の耐圧が劣化するモデル、の 2 つの仮説を立てた。その結果、周辺耐圧構造領域の空乏層容量が変化していることが明白となったことから、上記 i)のモデルが正しいと解説している。また静電容量の印加電圧依存性の結果から、高温・高電圧印加によって、周辺耐圧領域の SiC/SiO₂ 界面近傍に正電荷が蓄積する

ことで空乏層拡がり挙動が変化し、その結果周辺耐圧領域の電界分布が設計値からずれることで素子耐圧が低下するという耐圧劣化メカニズムが明らかになった、としている。

第4章では、第3章での議論を受け、長期信頼性試験前後での静電容量の変化を、実測結果とシミュレーション結果を比較することで周辺耐圧構造上の電荷量とその分布を推定するという、本研究で初めて開発した容量測定法(CV法)について述べている。周辺耐圧領域の幅の異なる3種類の2段JTE素子を作成し、その容量・電圧特性の実測結果とシミュレーション結果から、SiC/SiO₂界面付近に蓄積した電荷量を導出できるだけでなく、その横方向の電荷分布の評価も可能であることを示している。このことから上記CV法は、高温・高電圧印加試験後の評価方法として有効であるとしている。そして第5章では、この手法を用いて周辺耐圧構造領域上のパッシベーション膜(保護膜)を変えたサンプルを用意し、長期信頼性試験を実施、その電荷量を評価解析し素子耐圧低下を引き起こす電荷蓄積が抑制可能な構造の探索を行っている。その際CV法をさらに改良した微分法を開発し、より簡便な解析が可能になったとしている。パッシベーション膜として、熱酸化膜、NO(酸化窒素)膜、ならびにポリイミドサンプルの3種類を作成し評価解析した結果、ポリイミドサンプルが電荷変動を最も抑制するサンプルであることを見出し、周辺耐圧構造として長期信頼性が保証される構造であるとしている。またこの結果から、電荷蓄積は酸化膜が関与していることが明らかとなった、としている。

第6章では、「湿度ストレスが耐圧長期信頼へ与える影響」と題し、高温・高湿長期信頼性試験による電荷変動量や電極の劣化モデルについてについて言及している。パワーデバイスのアプリケーションを考えると、例えば自動車や鉄道車両は室外で稼働するため、湿度の影響を無視できない。そのため、信頼性試験においても、高温・高電圧ストレスのみならず、湿度ストレスの影響を解析する必要があると述べている。評価に用いたサンプルは、熱酸化膜サンプル、ポリイミドサンプルに加え、水分の保護のために熱酸化膜上にSiN膜(シリコン窒化膜)を設けたもので評価した。その結果、まず熱酸化膜サンプルでは、高温・高電圧印加時の条件下とは異なり、高湿度を加えた条件では1000時間に達するまで電荷量が増減を繰り返しており、またポリイミドサンプルでは、高温高電圧印加条件下では電荷変動が確認されなかったにもかかわらず、高湿度条件が加わると、素子内側の電荷が1時間後まで増加し、その後1000時間まで変化しなかったとしている。一方SiN膜サンプルは、時間の経過とともに電荷量は増加するものの、高温・高電圧印加分の影響を差し引くとその変化量は小さく、この結果からSiN膜は、湿度の影響を抑制し、なおかつ高温・高電圧印加条件において正電荷の蓄積を一部抑制する効果があると結論付けている。また先行研究であるシリコンIGBTの湿度ストレス解析結果を踏まえ、熱酸化膜ならびにポリイミドサンプルの蓄積電荷の極性の違いについて言及し、熱酸化膜サンプルは負電荷が、ポリイミドサンプルは正電荷が蓄積するとした。これら蓄積電荷の極性の違いは、表面に配置されたアルミ電極の腐食を起因とし、熱酸化膜サンプルはアルカリ性雰囲気で活性領域側の電極からの負電荷が、またポリイミドサンプルは酸性雰囲気、最外周電極側から正電荷が蓄積することを、腐食した電極の光学顕微鏡とイオン発生モデル図を使って解説している。

最終第7章では、上記解析してきた蓄積電荷の起源解明に取り組んでいる。その結果、電荷蓄積速度ならびに、ストレス印加中のもれ電流の活性化エネルギー比較から、電荷の起源はストレス印加中のもれ電流の可能性が高いと結論づけている。

審 査 の 要 旨

〔批評〕

SiC パワーデバイス実用化に非常に重要である素子耐圧特性の長期信頼性実現に関し、高温・高電圧印加、ならびに高湿度条件を追加した条件下での周辺耐圧構造における SiC/SiO₂ 界面の電荷の挙動に注目し、その挙動を詳細に解析することで、その耐圧劣化メカニズムを理論的に説明した。また、周辺耐圧構造上に設けるパッシベーション膜を変える実験を通して、上記電荷蓄積が酸化膜(SiO₂)に関係していることを導き出した。本研究では、新たに開発した容量測定法とデバイスシミュレーションを比較するという手法で、電荷蓄積に酸化膜が関与していること、さらにはその電荷密度を詳細に見積った結果を示した意義は大きい。さらにシリコン窒化膜(SiN)を酸化膜上に配置することで電荷蓄積の一部を防ぐことができることも明らかにした。高湿条件下での信頼性評価結果から、表面電極の腐食が起因となる電荷変動について、SiC と保護膜の界面の状態によって電荷の極性が異なることも明らかにした。電極の腐食と電荷の極性を関連付けた世界で初めての解析結果であるといえる。これら解析結果は、高信頼性特性を実現できる周辺耐圧構造設計指針確立には必要不可欠なものであり、今後の SiC パワーデバイス普及に向けて新しくかつ有効な知見と指針を示しており、学術的な貢献が認められる。

〔最終試験結果〕

令和 3 年 2 月 19 日、理工情報生命学術院学位論文審査委員会において審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、審査委員全員によって、合格と判定された。

〔結論〕

上記の論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士(工学)の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。