HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	窒素プラズマを用いた4H-SiC表面の窒化に関する研究［論文内容及び審査の要旨］
Author(s)	嶋林, 正晴
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第13650号
Issue Date	2019-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/74172
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Masaharu_Shimabayashi_abstract.pdf, 論文内容の要旨

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称　博士（工学）　氏名　嶋林 正晴

学 位 論 文 題 名

窒素プラズマを用いた 4H-SiC 表面の窒化に関する研究
(Studies on surface nitriding of 4H-SiC using nitrogen plasmas)

近年, 世界のエネルギー需要は急激に増加しており, それに起因する地球温暖化および資源枯渇が深刻な問題として議論されている。その解決方法として, 既存のエネルギー源を再生可能エネルギーに置き換えることが考えられるが, エネルギー密度の低さおよび発電の不安定性などが原因で, 未だ本格的な普及には至っていない。そのため, 限りある天然資源を上手く利用するためのスマートグリッドが普及した省エネ社会の実現は必要不可欠である。スマートグリッドとは, 電力の流れを適切に制御することで送配電における損失を低減する技術であり, 電力の輸送や変換に多数のパワー半導体デバイスが利用される。したがって, パワーデバイスにおける導通損失やスイッチング損失などを低減し, 高効率な電力変換および制御を行うことは, 電力損失の低減のために非常に重要である。しかし, 現状広く用いられている Si を材料としたパワーデバイスにおけるオン抵抗やスイッチング速度は,Si の材料物性に起因した理論限界に到達しつつあり, 今後の飛躍的発展は難しいとされている。このことを踏まえて, 物性に優れた SiC を用いたパワーデバイスに注目が集まっている。SiC は,Si と比較して, 絶縁破壊電界, 飽和ドリフト速度, およびキャリア移動度が高いことから, 既存の Si パワーデバイスを SiC パワーデバイスに換装することで, 電力損失を約 1/300 に抑制できる。中でも, 結晶構造が 4H の SiC は 200 種類以上の SiC の結晶構造の中で特に優れた物性を持ち, そのパワーデバイスへの応用が世界中で研究されている。しかし, 現状の SiC-MOS パワーデバイスではそのオン抵抗が理論に基づく期待値を大きく上回っているために本来の性能を発揮しきれていない。このことは, ゲート絶縁膜-キャリア領域界面における電圧降下や発熱を引き起こし, 電力システムの低効率化を招く。SiC-MOS パワーデバイスの高オン抵抗の原因は, チャネル領域でのキャリアの移動度が理論値を下回っていることにあり, 低キャリア移動度の原因は, チャネル領域における欠陥であると考えられている。欠陥としては, ダングリングボンドおよび C クラスタなどが考えられるが, 結論には至っていない。しかし,SiC 表面に窒素を導入することで界面準位密度が低減することが報告されており, これは SiO_2-SiC 界面に生じた Si ダングリングボンドを窒素原子で終端することにより, 界面準位密度が低減された界面を形成できるためであると予測されている。このことを踏まえて, このような 4H-SiC 表面を窒化する方法として, アンモニアなどを用いた熱窒化が検討されているが, 界面準位密度および界面における実効固定電荷が低減されず, 期待する効果が得られていない。別の方法として, 窒素プラズマを用いた窒化がある。この方法では, 無公害処理である点および熱窒化と比較してプロセス温度を低温下できる点などにおいて優れている。しかし, 窒化に寄与する活性種が同定されておらず, 窒化に有効なプラズマ制御のための指針が得られていないという問題がある。

そこで本研究では, 窒素プラズマによる窒化処理を用いた 4H-SiC 表面の欠陥の低減を目標として, マイクロ波プラズマのアフターグローガス, 大気圧プラズマジェット, および液体窒素中でのパルスレーザー照射を用いた窒化処理を行い, 窒素プラズマ中の活性種の 4H-SiC 窒化への寄与を調べるとともに, 活性種制御, プロセス温度制御, および特殊な高温・高圧反応場での窒化処理を通して, 窒素プラズマを用いた窒化処理に関する理解を深めることを目的とした。これらの基礎的研究により,4H-SiC 窒化処理のメカニズムを理解することは, 窒素プラズマを用いた窒化処理の技術を進歩させるために重要である。また, このメカニズムへの理解が十分になれば, 最適な窒化層を形成

するための窒化処理装置の設計・開発に応用できる。具体的な研究項目は以下の通りである。
・各窒化プロセスにおける $N_2(A^3\Sigma_u^+)$, および $N(^4S)$ の絶対密度を測定する。
・$N_2(A^3\Sigma_u^+)$ および $N(^4S)$ の絶対密度の測定結果に基づき,4H-SiC 窒化処理における窒化特性との比較から, 窒化プロセスに寄与する活性種を明らかにする。
・$N_2(A^3\Sigma_u^+)$ および $N(^4S)$ の放電管表面との相互作用に着目し, 放電管加熱による活性種組成の制御を行う。
・窒素プラズマ照射による 4H-SiC からの C 原子脱離を抑制するために, 液体窒素を用いた基板冷却窒化処理を行う。
・液相レーザーアブレーションによって生成される高密度プラズマを用いた窒化処理を行い, 窒化のメカニズムを明らかにする。

まず, 第 1 章では, 本研究における背景を示し, 本研究の目的および意義を述べた。

第 2 章では, プラズマ診断によって計測した窒素プラズマ中の $N(^4S)$,N_2^+ および $N_2(A^3\Sigma_u^+)$ のフラックスと窒化処理を施したサンプルを比較することで, プラズマ中のどの活性種が 4H-SiC 窒化に寄与するかを明らかにした。また, 窒素プラズマを用いた 4H-SiC 表面の窒化処理において,$N_2(A^3\Sigma_u^+)$/ $N(^4S)$ 組成比が窒化特性を決定する上で重要なパラメータであることを示した。

第 3 章では,$N(^4S)$ および $N_2(A^3\Sigma_u^+)$ の放電管表面との相互作用に着目し, 放電管加熱による活性種組成を制御した。$N_2(A^3\Sigma_u^+)$ 密度の計測にはレーザー誘起蛍光法 (LIF) を用い,$N(^4S)$ の計測には真空紫外吸収分光法 (VUVAS) を用いた。これらの計測結果から, 放電管加熱による $N_2(A^3\Sigma_u^+)$/ $N(^4S)$ 組成比が変化するメカニズムに関して, 活性種の消滅過程に着目して明らかにした。

第 4 章では,4H- SiC 表面の酸化および炭素の脱離を抑制するために, 液体窒素を用いてサンプルを冷却する事で, 欠陥形成および酸化の抑制を試みた。また, 第 2 章で述べたマイクロ波プラズマのアフターグローガスにおける活性種の測定結果と形成される窒化層の深さの比較から, 活性種によって窒化の活性化エネルギーが異なることを示した。

第 5 章では, 大気圧窒素プラズマジェットを用いた 4H-SiC 表面の窒化処理を試みると共に,$N(^4S)$ 密度を測定した。$N(^4S)$ の計測には二光子吸収レーザー誘起蛍光法 (TALIF) を用いた。また, 他の研究報告に基づいて $N_2(A^3\Sigma_u^+)$ 密度を推定した。大気圧窒素プラズマジェットを用いた時には 4H-SiC がほとんど窒化されないとの実験結果から,2 章の結果と同様に,$N(^4S)$ の窒化への寄与が小さいことを確認した。

第 6 章では, 液体窒素中でのパルスレーザー照射を用いた 4H-SiC 表面の窒化処理を行い, 窒化特性を調べた。レーザーフルエンスに対する窒化表面の元素組成の空間分布の変化を調べた。液体窒素中でのパルスレーザー照射による 4H-SiC 窒化メカニズムは高温・高圧反応場によって 4H-SiC が相変化を起こすことによる, 液体窒素由来の窒素の拡散および対流であることを示した。

最後に第 7 章では, 本研究で得られた結果をまとめ, 今後の課題および展望について述べた。

以上のように, 本研究により, 窒素プラズマを用いた 4H-SiC 表面の窒化プロセスにおける活性種の寄与, および, その制御に関する基礎的な知見が得られた。それに加えて, 特殊な高温・高圧反応場における窒化処理のメカニズムを明らかにした。これらの知見は, 窒化処理装置の設計・開発, および, 窒素プラズマを用いた 4H-SiC の窒化処理に関する研究の発展に貢献するものである。