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_review.pdf, 審査の要旨

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称　博士 (工学)　氏名　嶋林 正晴

審査担当者　主　査　教　授　佐々木 浩一
副　査　特任教授　越崎 直人
副　査　教　授　富岡 智
副　査　教　授　朝倉 清高

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)

再生可能エネルギー源によって発電される分散型電力の割合が高まり, 自動車の電動化が急激に進んでいる現代社会にあって, 電力制御機器に用いられるパワー半導体デバイスの重要性が非常に高まっている。シリコンを用いたパワー半導体デバイスの普及が進んでいるが, 現在のシリコンパワーデバイスは, その高電圧に対する耐性, 高温に対する耐性, および, 導通時の電気抵抗値において材料物性値から予測される限界値に達している。

炭化ケイ素 (SiC) を用いたパワー半導体デバイスは, その材料物性値から期待できる高電圧に対する耐性および高温に対する耐性がシリコン製デバイスに比べて極めて高い。高電圧における導通時電気抵抗がシリコン製デバイスに比べて桁違いに低く,SiC パワー半導体デバイスが普及したスマートグリッド社会が実現されれば, 我が国だけでも原子力発電所 4 基分に相当する省エネルギー効果が得られるとの試算もある。しかしながら, 現在製造されている SiC パワーデバイスのキャリア移動度は材料の物性値から予測される値より桁違いに低く, 導通時電気抵抗は期待値より桁違いに高い。このことは,SiC を用いた電力制御機器の低効率化をまねき,SiC を用いたスマートグリッド社会構築を阻害する大きな原因になっている。キャリア移動度が低下する原因は, ゲート酸化膜形成プロセスにおいてチャネル領域に欠陥が生じることであり, 欠陥を生じないチャネル界面形成技術が重要な研究テーマになっている。

このような中にあって, 本論文は,SiC 表面を窒化することによって不動態化された界面を形成できるとのシミュレーションによる予測を背景に, 窒素プラズマを用いた SiC 表面の窒化技術について研究し, その成果を報告している。

第 1 章は序論であり, 本研究の背景について述べ, 本研究の目的および意義を明らかにしている。

第 2 章では, マイクロ波リモート窒素プラズマを用いた 4H-SiC 表面の窒化における重要活性種について報告している。従来の半導体および鉄鋼系材料の窒化においては, 原子状窒素が最も重要な窒化活性種であるとされてきたが, 本研究では, 準安定状態窒素分子が

重要な窒化活性種であることを実験的に示し, 原子状窒素によって作られる窒化層と準安定状態窒素分子が寄与して作られる窒化層との違いについて言及している。

第 3 章では, マイクロ波リモート窒素プラズマ源の基本的構造を改変することなく, 放電管部を数 100 ℃に加熱することによって, 原子状窒素の密度を変えることなく, 準安定状態窒素分子の密度を制御できることを示すとともに, そのメカニズムについて, プラズマ中の素過程にもとづき議論している。このような制御方法は反応性プラズマの分野においてユニークである。

第 4 章では, マイクロ波リモート窒素プラズマを用いた 4H-SiC の窒化において,SiC の温度をマイナス 100 ℃以下に冷却することにより, サンプル表面からの炭素の脱離およびサンプルの酸化を抑制できることを実証している。また, 冷却時および非冷却時における窒化特性の違いから, 原子状窒素による窒化と準安定状態窒素分子による窒化における活性化エネルギーの違いを示唆している。

第 5 章では, 大気圧窒素プラズマジェットを用いた 4H-SiC の窒化に関する試みを報告している。2 光子レーザー誘起蛍光法による原子状窒素密度の測定, 発光分光法による既存の研究結果に基づく準安定状態窒素分子密度の推定, および, 大気圧プラズマにおける活性粒子の輸送モデルに基づいて, 大気圧窒素プラズマジェットではマイクロ波リモート窒素プラズマと同等以上の窒化活性種フラックスが供給されることを示している。それにもかかわらず,4H-SiC 表面が窒化されなかったことから, 大気圧プラズマ処理における不純物の影響について推定している。

第 6 章では, 野心的な試みとして, 液体窒素中で 4H-SiC にパルスレーザー光を照射し, アブレーションプラズマを生成することによる窒化について報告している。レーザー照射痕領域およびその周辺の 1 mm 程度の領域において, 深さが数 100 nm の窒化層が形成され, 深い領域の窒化層には酸素不純物が少ないことを示している。また, 精度においてやや問題を残すものの, パルスレーザー照射によって生じるサンプル温度の時間変化を計算し,4H-SiC の直上に生じる気泡内に存在する窒化活性種が高温化した SiC 内に輸送されるとの窒化層形成メカニズムを提案している。

第 7 章では, 本研究の成果を総括し, 今後の展望を述べている。

以上述べたように, 本論文は, プラズマを用いた SiC の窒化に関して, 窒化活性種の同定, 活性種の制御, 活性種による窒化特性の違い, サンプル温度の制御の効果, および, 新しい窒化手法について述べたものである。得られた成果は学術的な重要性を有するだけでなく, プラズマ窒化装置の設計および動作条件の選定に関する指針を与えている。よって, 著者は北海道大学博士 (工学) の学位を授与される資格があるものと認める。