HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Microscopy study of correlation between residual elastic strain and defects in He+ ion irradiated 4H-SiC [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	Yang, Subing
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第14233号
Issue Date	2020-09-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/79949
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Yang_Subing_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　Yang Subing

審査担当者　主　査　教　授　柴山 環樹
副　査　教　授　大沼 正人
副　査　教　授　渡辺 精一

学位論文題名

Microscopy study of correlation between residual elastic strain and defects in He^+ ion irradiated 4H-SiC
(He^+ イオン照射した 4H-SiC の残留弾性歪と欠陥の相互関係に関する顕微学的研究)

SiC は、優れた高温強度や耐食性から航空宇宙や先進原子力などの過酷な環境で使用することが検討されている電子デバイスや光学素子の半導体基板や、過酷な状況において事故耐性を有する燃料被覆材料としても期待されている。しかしながら、半導体プロセスで重要なドーパントのイオン注入や航空宇宙や原子力環境における放射線照射により SiC 基板に照射欠陥が形成し照射領域と非照射領域界面に誘起する残留弾性歪が、基板表面に積層した配線の剥離や機械的特性の低下により構造材料としての健全性が損なわれることが懸念されている。そこで、本研究では、n-type の 4H-SiC(0001) 単結晶基板に 100keV の He^+ イオンを室温において照射し、電界放出型走査型電子顕微鏡 (FE-SEM) に附属する電子後方散乱解析装置 (EBSD) と顕微ラマン分光を用いて照射領域と非照射領域界面に誘起される残留弾性歪について非破壊で評価する方法を確立すると共に照射欠陥の種類や数密度等が残留弾性歪に及ぼす影響について球面収差補正走査透過型電子顕微鏡によるナノスケール領域の電子エネルギー損失分光 (EELS) や格子振動による熱散漫散乱によって高角度に非弾性散乱した電子を高角度に配置した円環状の検出器を用いて結像する高角度散乱暗視野法 (HAADF-STEM) などの先進電子顕微鏡法を適用して残留弾性歪に起因するナノスケールの結晶構造の変化を詳細に解析することを目的とした。

第 1 章では、本研究の背景と目的について詳述し、本研究の先進性や初めての取り組みについてこれまでに公表された論文等を引用し議論した。

第 2 章では、イオン照射 4H-SiC の詳細な歪分布について、電子後方散乱回折 (EBSD) と共焦点ラマン顕微鏡 (CRM) の非破壊技術を使用して評価した結果について詳述した。具体的には、He^+ イオン照射した単結晶基板の照射領域と非照射領域界面に誘起された残留弾性歪の非破壊評価を世界で初めて実現し、界面近傍での残留弾性歪の分布結果は両者でよく一致することを明らかにした。この結果は、EBSD と CRM のアプリケーションの精度の検証と、半導体プロセスにおける選択領域のイオン注入した 4H-SiC 単結晶内の詳細な残留弾性歪分布を 3 次元的に評価することに成功した。具体的には、イオン照射した領域に導入された照射欠陥による弾性歪みに加えて、照射によって引き起こされたアモルファス化によるスウェリングのために、非照射領域の周囲の基板にも広がっていることを明らかにした。また、照射領域と非照射領域の界面の周りに、より高い圧縮成分の残留弾性歪が集中していることも明らかにした。照射領域の残留弾性歪の異方性を持った分布も EBSD によって初めて明らかにした。これは、4H-SiC の六方晶構造による結晶の異方性と強い

相関があると考えられた。

第 3 章では、4H-SiC の照射欠陥の種類や分布、数密度等について、さまざまな先進電子顕微鏡法を駆使して解析した。欠陥分布の大きな異方性は、本研究で実施した 4H-SiC 単結晶に He^+ イオンを選択照射することによって初めて明らかにした。その照射欠陥は、格子間型で、イオン照射方向である表面と垂直な [0001] 方向に優先的に分布していることを初めて明らかにした。一方、横方向 ([$10\bar{1}0$] および [$11\bar{2}0$] 方向) の数密度は [0001] 方向より少ないこと明らかにした。これらの結果は、EBSD により明らかになった残留弾性歪の異方性を説明することが出来る。この異方性は、873 K でアニーリングすると減少し、非選択領域の He^+ イオンを照射した 4H-SiC ではかなり低くなることを HVEM の in-situ TEM 観察から明らかにした。選択領域の He^+ イオンを照射した 4H-SiC では、横方向の格子間原子型欠陥の形成によるスウェリングに対する制約により、横方向に大きな圧縮応力が導入され、これらの圧縮応力はイオン照射初期に導入されたことが実験結果から推測された。これらの発見は、圧縮応力が格子間型の照射欠陥形成を阻害し、異方性を有する照射欠陥の分布の原因であるという直接的な証拠を初めて提供した。

第 4 章では、STEM-EELS を駆使して、イオン照射したヘリウム原子を含む様々な欠陥とスウェリングとの相関関係を初めて明らかにした。これは、実際のアプリケーションでの 4H-SiC の寿命や半導体プロセスにおける微細化の予測に役立つと考えられる。

第 5 章は、本論文の結言である。

これを要するに、著者は、電子後方散乱や顕微分光を用いてイオン照射した 4H-SiC の照射領域と非照射領域界面に分布する残留弾性歪を非破壊で評価する方法を確立した。更に、先進電子顕微鏡法を用いてナノスケールの微細構造解析からイオン照射欠陥形成の異方性が残留弾性歪の異方性分布と相関があることについて新知見を得た。これらの成果は、ワイドギャップ半導体の活用が期待されている航空宇宙や原子力工学に必要不可欠な照射欠陥により誘起される残留弾性歪の革新的評価法に貢献するところ大なるものがある。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あるものと認める。