

氏名	鹿児島 陽平
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	博甲第 8952 号
学位授与年月日	平成 31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	数理物質科学研究科
学位論文題目	

電子スピン共鳴分光による C 面 4H-SiC/SiO₂ 界面欠陥の起源解明

主査	筑波大学教授	博士(工学)	末 益 崇
副査	筑波大学准教授	博士(工学)	梅 田 享 英
副査	筑波大学准教授	博士(工学)	矢 野 裕 司
副査	産業技術総合研究所	理学博士	山 崎 聡
副査	物質・材料研究開発機構	理学博士	大 野 隆 央

論 文 の 要 旨

審査対象論文は、次世代パワーエレクトロニクスデバイスとして期待されている炭化ケイ素 (4H-SiC) の MOS (金属-酸化膜-絶縁体) 型電界効果トランジスタ (4H-SiC MOSFET) について、その心臓部である MOS 界面の界面欠陥の正体を明らかにすべく、分光学的観点から検討を加えたものである。

第 1 章では 4H-SiC MOS 界面のこれまでの理解についてのまとめが述べられ、第 2 章では本論文で主に使用される電子スピン共鳴 (ESR) 分光法および電流検出 ESR (EDMR) 分光法が原理に至るまで説明されている。第 3 章以降では 4H-SiC MOS 界面欠陥の起源に対する分光学的な解析が行われている。この起源は長年にわたって研究されてきたが、いまだに解明には至っていないものである。その理由は界面欠陥に対する分光学的な情報が決定的に不足しているためである。そこで本論文は、EDMR 分光法という磁気共鳴法の 1 つを用いて界面欠陥の原子構造に関する分光学的な情報を収集することを着想し、最終的に欠陥起源の解明にまで至っている。

本論文が対象としているのは、4H-SiC 単結晶ウェハの裏面に相当する 4H-SiC(000-1)面 (C 面) を使って作製された MOS 界面である。C 面 MOS 界面は特異な性質を示し、高温ドライ酸化 (ドライ酸化) と高温ウェット酸化 (ウェット酸化) で正反対とも言える電気特性をもつ界面を簡単に作り分けることができる。例えばウェット酸化の場合、標準とされるウェハのオモテ面 (Si 面) で作製した 4H-SiC(0001) MOS 界面よりもトランジスタのチャネル移動度が 3 倍ほど大きくなる。一方で、ドライ酸化ではチャネル移動度がほぼゼロになる。その原因は発生している界面欠陥の違いにあると想像され、応用上だけでなく、学術的にも

興味深い対象となっている。本論文は C 面が示す両極端な 2 つの界面に対して EDMR 分光法を適用することで、その界面欠陥の起源が全く違うこと、そして起源の違いがもたらす電気特性の違いを見事に明らかにしている。

第 3 章では C 面ドライ酸化の界面欠陥の起源が EDMR 分光法によって解析され、結果として炭素原子が sp^2 結合で凝集した炭素クラスター欠陥が発生していることを結論している。この同定に至るまでに、炭素クラスター欠陥の磁気共鳴スペクトルの高度な分光学的解析 (2D dipolar broadening 解析や 2D 交換相互作用の解析) が述べられている。さらに、EDMR 分光法から導き出された結論を別の手法で検証するために、走査型断面電子顕微鏡観察による炭素クラスター欠陥の実空間観察も行われている。両方の結果から、信頼性の高い起源同定が行われたことが結論づけられている。

第 4 章では C 面ウェット酸化の界面欠陥 (C 面固有欠陥) の起源が同じく EDMR 分光法によって解析されている。C 面固有欠陥の EDMR 観察は 2013 年頃より研究報告があるが、その起源はずっと不明のままである。本研究は C 面固有欠陥の EDMR 信号を増強する手段を見出すことで、これまでは難しかった起源の同定に至る分光学的情報を引き出すことに成功している。その結果、C 面固有欠陥が炭素アンチサイト-炭素空孔ペアと呼ばれる欠陥であることを初めて明らかにしている。

審 査 の 要 旨

[批評]

審査対象論文は、これまで謎に包まれてきた SiC-MOS 界面欠陥の起源を分光学的手法に基づく解析から明らかにすることに成功している。本論文では、4H-SiC C 面ドライ酸化面、同ウェット酸化面に発生した 2 種類の界面欠陥に対して、どちらも EDMR 分光法を用いた起源同定が行われている。本論文は、C 面ドライ酸化面のような極端に高抵抗になった領域でも EDMR を計測する方法について提案し、その提案を実証することで、界面欠陥の EDMR 信号の検出に初めて成功した点が高く評価される。これが貴重な分光学的情報の抽出に結びつき、界面欠陥の起源同定へと至っている。もう 1 つの C 面ウェット酸化面では界面欠陥の EDMR 観察に対しては、EDMR 信号を大幅に増幅する方法について考察し、そのアイデアを実証することで、従来では抽出できなかった微弱な分光学的情報 (^{13}C 核スピン超微細分裂) を取り出すことに成功している点が独創的である。これらの知見の統合により、界面欠陥の起源の同定に初めて至っている。以上のように、本論文は、従来研究では達成できなかった点を克服するための着想が提案され、次いでその実証が行われており、適切な専門的な解析を経て、界面欠陥の起源同定を行ったという点で学術的に高い意義を有している。

[最終試験結果]

2019 年 2 月 19 日、数理解物質科学研究科学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。