

氏名	阿部 裕太
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	博甲第10210号
学位授与年月日	令和4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	

炭化ケイ素 MOS 界面におけるスピン欠陥に関する研究

主査	筑波大学准教授	博士(工学)	梅田 享英
副査	筑波大学教授	博士(理学)	櫻井 岳暁
副査	筑波大学准教授	博士(工学)	武内 修
副査	量子科学技術研究開発機構部長	博士(工学)	大島 武
副査	埼玉大学准教授	博士(工学)	土方 泰斗

論 文 の 要 旨

審査対象論文は、炭化ケイ素 Metal-Oxide-Semiconductor 界面 (MOS 界面) のスピン欠陥を対象として、ワイドバンドギャップ半導体デバイスと量子技術の融合を実現することを目的としている。第 1 章では、ワイドバンドギャップ半導体中のスピン欠陥の量子技術への応用、特に量子センシング技術への応用が論じられている。この分野で最も成功しているダイヤモンド中の「NV センター」を例として取り上げ、そのダイヤモンドを炭化ケイ素 (4H-SiC) に変えるとどのようなメリットがあるのかが定義されている。第 2 章では本論文で用いられた研究手法 (光学的、電気的実験技術) が詳細に説明されている。続く第 3 章では、4H-SiC 中の“新規”のスピン欠陥候補である「界面 SPS (Single Photon Source)」についての様々な研究結果、そして第 4 章では“既知”のスピン欠陥のうち最も有望視されている「シリコン空孔スピン」の電流検出電子スピン共鳴 (Electrically Detected Magnetic Resonance: EDMR) 検出と MOS ゲート電圧制御が述べられている。

“新規”のスピン欠陥の章 (第 3 章) では、対象となる「界面 SPS」がそもそもどのような点欠陥であるかが分かっていないため、発生プロセスから調べるという基礎研究が展開されている。その結果、単一光子源 (SPS) を 4H-SiC MOS 型電界効果トランジスタ (MOSFET) に埋め込むことに成功するという世界初の成果が得られている。さらに、発生した界面 SPS が「可視領域で室温で高輝度発光すること」「SiC 結晶側に発生した MOS 界面欠陥であること」「C 面ウェット酸化で発生しやすいこと」「Si-O、C-O、Si-H、C-H のようなウェット酸化界面構造と関係があること」「ガンマ線照射 (水素結合破壊) に反応すること」が明らかにされ、そして、様々な光学的性質が調べられている。界面 SPS の室温発光強度は非常に強く、ダイヤモンドの NV センターを 2~3 倍

も上回ることが示されている。その理由も実験結果を基に考察しており、光励起状態からの緩和が NV センターよりも速いためであることを第一の要因として挙げている。界面 SPS の具体的な起源は確定していないが、P8 センターと呼ばれる界面欠陥(界面型空孔欠陥)がもっともらしい候補として提案されている。さらに界面 SPS のスピンを検出するための光検出電子スピン共鳴(ODMR)測定にも取り組んでいる。ODMR 検出に必要な荷電状態制御と光検出とを両立するために、光学窓付 4H-SiC MOSFET の開発が行われている。残念ながら本研究中では ODMR 信号の特定には至っていないが、研究の一段階として十分に吟味され、次の研究につながるように結果がまとめられている。

後半の「既知のスピン欠陥」(第 5 章)については、シリコン空孔スピんに焦点を当てた研究が展開されている。4H-SiC のシリコン空孔スピンには k サイト型、h サイト型の 2 種類が存在するが、本論文では後者の k サイト型シリコン空孔(通称「Tv2a センター」)が対象となっている。2 種類のスピンのうち Tv2a スピンは、光学的な(正確に言えば光励起・光検出による)単一スピン検出が室温で実証されているスピンである。この Tv2a スピンを EDMR で検出する(正確に言えば電流励起・電流検出)という世界で初めての試みが行われ、それに成功している。ここでも炭化ケイ素の特徴を活かすべく 4H-SiC MOSFET を用いているところが大きな特徴となっている。検出の成功は、4H-SiC MOSFET への最適化されたプロトン照射と、MOSFET であることを活かした検出方法(Bipolar Amplification Effect 法)が貢献していると判断される。検出スピン数は 10^5 個と見積もられ、単一スピン検出には遠く及んでいないが、スピン欠陥の電流励起・電流検出はダイヤモンドの NV センターでも実証されておらず、4H-SiC でそれが実証されたのは大きな成果と認定できる。さらに、4H-SiC MOSFET というプラットフォームの利点を活かした「荷電状態制御」も合わせて実証されている。電流検出のさらなる発展のためには高感度化が欠かせないが、それに向けた数々のアイデアが提示されている。

審 査 の 要 旨

[批評]

審査対象論文は、近年、大きな注目を集めているワイドバンドギャップ半導体のスピン欠陥と、その量子技術応用に関する論文である。宿主材料として炭化ケイ素(4H-SiC)を選び、その中で有望視される 2 種類のスピン欠陥に対して詳しい調査と技術実証が行われている。この分野ではダイヤモンドが宿主材料として有名であるが、半導体デバイスとスピン欠陥との融合を図ることを目的として、デバイス化に長けた 4H-SiC を選んだところが本論文の特徴となっている。本論文では、“融合”に向けての具体的な成果として、4H-SiC MOSFET デバイスと「界面 SPS」、4H-SiC MOSFET デバイスと「シリコン空孔スピン」という 2 種類の系の創出に成功し、前者では SPS 室温発光の MOS ゲート電圧制御が実証され、後者ではシリコン空孔スピンの電流励起・電流検出に成功している。これらの成果は、ワイドバンドギャップ半導体デバイス中で 4H-SiC のスピン欠陥が有効に機能することを示す重要な成果で、炭化ケイ素研究コミュニティあるいは量子技術研究コミュニティから高く評価されるものである。

〔最終試験結果〕

令和4年2月7日、数理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。