

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	量子センサに向けた炭素材料中のスピン状態制御
Title(English)	Spin state control of carbon materials for quantum sensors
著者(和文)	田原康佐
Author(English)	Kosuke Tahara
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第10152号, 授与年月日:2016年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:波多野 睦子,小田 俊理,宮本 恭幸,河野 行雄,小寺 哲夫,都倉 康弘
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第10152号, Conferred date:2016/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	審査の要旨
Type(English)	Exam Summary

論文審査の要旨及び審査員

報告番号	甲第		号	学位申請者氏名		田原 康佐	
論文審査 審査員		氏 名		職 名		氏 名	職 名
	主査	波多野 睦子		教授	審査員	河野 行雄	准教授
	審査員	都倉 康弘		筑波大教授		小寺 哲夫	准教授
		小田 俊理		教授			
		宮本 恭幸		教授			

論文審査の要旨（2000 字程度）

本論文は、“Spin state control of carbon materials for quantum sensors”（量子センサに向けた炭素材料中のスピン状態制御）と題し、英文 8 章から構成されている。

第 1 章 “Introduction”（序論）では、炭素系材料におけるスピン状態制御や量子センサに関して、研究の背景と目的を述べている。炭素系材料は、スピン軌道相互作用も超微細相互作用も小さいため、スピン寿命が長く、電子スピン状態を制御して応用するために適している、と述べている。炭素系材料に常磁性不純物を導入することで、電子スピン状態制御を行うことが、本研究の目的であると述べている。本論文の具体的な研究対象として、常磁性不純物であるフッ素原子をグラフェンに導入したフッ化グラフェンの物性、および伝導電子のスピン状態制御・検出について説明している。次に、常磁性不純物である窒素（N）と空孔（V）のペアをダイヤモンドに導入したダイヤモンド NV センタの物性、および局在電子のスピン状態制御・検出について説明している。

第 2 章 “Fluorination of graphene”（グラフェンのフッ化処理）では、フッ化グラフェンの作製法、評価方法とその結果について述べている。ラマン分光分析によりフッ素密度を調べた結果、反応時間によりフッ素密度を制御できることを示している。

第 3 章 “Charge transport of fluorinated graphene”（フッ化グラフェンの電気伝導）では、第 2 章で実現したフッ化グラフェンを用いて電界効果トランジスタ（FET）を作製し、電気伝導特性の温度依存性について評価した結果について述べている。低フッ素密度のフッ化グラフェン FET では、低温で抵抗率が上昇する、絶縁体的な特性が得られ、キャリア密度の大きい領域で温度依存性が小さくなる結果が得られたことを述べている。可変領域ホッピングモデルを用いて得られた結果を説明できること、ゲート電圧による金属-絶縁体転移を示唆する結果を得たことを説明している。高フッ素密度のフッ化グラフェン FET では、イオン液体ゲートを用いることで、動作に必要なゲート電圧の低減（50 V → 2 V）、オンオフ比の向上（5.6→10）を実現したと述べている。

第 4 章 “Spin transport of fluorinated graphene”（フッ化グラフェンのスピン伝導）では、低フッ素密度 FET での磁気抵抗効果を測定した結果について述べている。温度やキャリア密度に対する位相コヒーレンス長の依存性を求めることにより、スピン緩和は電子-電子相互作用の効果によること、スピン緩和をゲート電圧で制御できることを示唆する結果を得たと述べている。また、非局所抵抗測定を行うことにより、スピンホール効果を示唆する結果を得たと述べている。

第 5 章 “Diamond micro-structure for photon collection efficiency improvement”（光取り出し効率向上のためのダイヤモンドマイクロ構造）では、ダイヤモンド NV センタの発光検出効率の向上のため、異方性成長を利用した傘型マイクロ構造を提案し、シミュレーション、作製、測定した結果について述べている。実測により、バルク比 3 倍の発光強度が得られたと述べている。

第 6 章 “Selective alignment of high density NV center ensemble”（高密度 NV センタアンサンブルの選択配向）では、ダイヤモンド NV センタの選択配向率を定量化する手法を提案し、評価結果について述べている。化学気相結晶成長（CVD）により作製した高密度（ $>10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ）の NV センタアンサンブルに対して、光検出磁気共鳴（ODMR）の信号強度比から配向率を求め、80%以上の高配向な NV センタを得たと述べている。

第 7 章 “AC field magnetometry using NV center ensemble”（NV センタアンサンブルを用いた AC 磁場計測）では、NV センタを用いた AC 磁場センサの性能を評価した結果について述べている。ダイナミカルデカップリング法により、周波数選択性のある AC 磁場センサ動作を実証したと述べている。CVD 法による高密度アンサンブル NV センタ試料、イオン注入による高密度アンサンブル NV センタ試料、単一 NV センタ試料について、最小検出可能磁場を比較することにより、CVD 法による高密度アンサンブル NV センタ試料は従来の約 30 nT/Hz^{1/2}の磁気感度を得たと述べている。

第 8 章 “Conclusion and outlook”（結論と展望）では、本論文の結論と今後の展望をまとめている。

以上を要するに、本論文では、常磁性不純物による炭素系材料中のスピン状態制御と量子センサ応用を実証する研究を行い、フッ化グラフェンにおける伝導機構の制御、FET 動作の改良、スピン緩和制御を実現したこと、ダイヤモンド NV センタにおける発光検出効率増強、NV センタアンサンブルにおける高配向率定量評価、NV センタアンサンブルによる AC 磁場センサを実証したこと、など将来的に生体分子、細胞、ニューロン、医用、食品、構造物などに幅広く応用が期待される量子磁気センサに新たな道を拓いたもので、工学上、貢献するところが大きい。よって、我々は本論文が博士（工学）の学位論文として十分な価値があると認める。

注意:「論文審査の要旨及び審査員」は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。