

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

題目(和文)	高感度磁気センサに向けたダイヤモンドの結晶成長の研究
Title(English)	Study of diamond crystal growth for highly sensitive quantum sensors
著者(和文)	辻越行
Author(English)	Takeyuki Tsuji
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12571号, 授与年月日:2023年9月22日, 学位の種別:課程博士, 審査員:波多野 睦子,宮本 恭幸,若林 整,山田 明,岩崎 孝之,加藤 宙光
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第12571号, Conferred date:2023/9/22, 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	辻 起行	
論文審査 審査員		氏名	職名		
	主査	波多野 睦子	教授	山田 明	教授
	審査員	加藤 宙光	学外審査員	岩崎 孝之	准教授
		宮本 恭幸	教授		
	若林 整	教授			

## 論文審査の要旨 (2000 字程度)

本論文は” Study of diamond crystal growth for highly sensitive quantum sensors” (高感度量子センサに向けたダイヤモンドの結晶成長) と題し、英文 6 章から構成されている。

第 1 章”Introduction”では、研究の背景、ダイヤモンド中の NV センタの磁気計測の原理及び目的を述べている。既存の磁気センサと比較して、高いダイナミックレンジを持ち室温動作可能な小型磁気センサである NV センタの磁気感度向上の必要性について説明している。また、NV センタの磁気計測の原理と磁気感度、及びダイヤモンド材料面における課題を説明している。本研究の目的として、磁気感度向上(目標: $< 1 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ )に向けた NV センタを含むダイヤモンド膜の CVD (化学気相成長) 法による NV 軸配向制御と厚膜化の両立、NV センタの生成率の向上、膜ストレス分布の低減による電子スピンの位相緩和時間の伸長について述べている。

第 2 章” High growth rate synthesis of diamond film containing perfectly aligned nitrogen-vacancy centers by high-power density plasma CVD”では、配向した NV センタを含むダイヤモンド膜の厚膜化に向けた合成速度の増加について述べている。先行研究では、合成速度が  $0.5 \text{ }\mu\text{m/h}$  と低く、高感度化に求められる膜厚約  $100 \text{ }\mu\text{m}$  を得るのに長時間が必要であった。本研究では、球面型のチャンバによりマイクロ波プラズマをダイヤモンド直上に集中できる CVD 法を用いることで、高いプラズマパワー密度を実現した。その結果、ガスの分解効率が促進され、先行研究よりも 10 倍以上高いステップフロー成長の合成速度  $6.6 \text{ }\mu\text{m/h}$  を実現した。

第 3 章”Over  $100 \text{ }\mu\text{m}$  thickness CVD diamond film with perfectly aligned nitrogen-vacancy centers on highly misoriented substrates”では、高感度化に必要な膜厚が  $100 \text{ }\mu\text{m}$  を超える配向した NV センタを含むダイヤモンド膜の形成について述べている。ステップフロー成長に必要なステップの形成には、(111)ダイヤモンド基板を  $[\bar{1}\bar{1}2]$  方向に角度(オフ角)を付けて研磨する必要がある。幾何学的に、このオフ角が CVD ダイヤモンド膜の最大膜厚を決定する。本研究では、まず合成速度と NV センタの特性のオフ角依存性を調べた。その結果、オフ角を  $0.5^\circ$  から  $5^\circ$  まで増加させるほど合成速度は増加し、 $9.9^\circ$  以上になると合成速度は減少することがわかった。この結果を CVD ダイヤモンド膜の合成モードの観点から考察し、今後に必要な実験について述べた。また NV センタの生成率のオフ角依存性を明らかにした。得られた結果を適用し、オフ角  $9.9^\circ$  の基板を用いることで膜厚  $100 \text{ }\mu\text{m}$  を超える配向した NV センタを含むダイヤモンド膜を実現した。

第 4 章” Extending spin dephasing time of perfectly aligned Nitrogen-Vacancy centers by mitigating stress distribution on highly misoriented chemical-vapor-deposition diamond” では、ダイヤモンド膜中のストレス分布抑制による NV センタの電子スピンの位相緩和時間  $T_2^*$  の向上について述べている。 $T_2^*$  は主に NV センタの周辺の電子スピン、核スピン及びダイヤモンド膜中のストレス分布によって制限される。本研究では、ダイヤモンド基板上のオフ角を  $2^\circ$  から  $10^\circ$  まで増加させることでダイヤモンド膜中のストレス分布が約  $1/10$  低減し、 $T_2^*$  が電子スピンと核スピンのみに制限される値に近づくことを明らかにした。 $\text{H}_2$  と  $\text{O}_2$  プラズマによるエッチピット法より、高いオフ角上の CVD 膜では貫通転位密度が減少していることがわかった。さらに、ストレス分布低減の要因解明のために必要な実験について考察した。

第 5 章” Improvement the magnetic sensitivity by phosphors doping of diamond”では、ダイヤモンド膜中にリン(P)をドーピングすることにより、磁気感度に比例するパラメータである NV センタの密度と  $T_2^*$  の積が向上することを示した。現状の値は、目標の磁気感度の必要な値と比較して約 50 倍低い値ではあるものの、P をドーピングすることによって、さらなる磁気感度の向上が期待されることを示した。

第 6 章では”Conclusion and outlook”では本論文の結論、及び今後の課題と展望をまとめている。

以上を要するに、本論文では高いプラズマパワー密度 CVD の導入による合成速度の向上とダイヤモンド基板のオフ角によるステップ成長の制御により、高性能な NV センタを含むダイヤモンドセンサ膜を実現した。本研究は、脳などの生体計測に必要な高感度センサ実現の可能性を示し、ダイヤモンド量子センサの社会実装の展開と拡充につながり、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。