

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	生体磁気計測に向けたダイヤモンド量子センサ
Title(English)	Diamond quantum sensors for biomagnetic field sensing
著者(和文)	西谷大祐
Author(English)	Daisuke Nishitani
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12369号, 授与年月日:2023年3月26日, 学位の種類:課程博士, 審査員:波多野 睦子,中川 茂樹,宮本 恭幸,小寺 哲夫,岩崎 孝之
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第12369号, Conferred date:2023/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	論文要旨
Type(English)	Summary

論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of, Graduate major in	電気電子 電気電子	系 コース	申請学位 (専攻分野)： 博士 (工学) Academic Degree Requested Doctor of	
学生氏名： Student's Name	西谷 大祐		指導教員 (主)： Academic Supervisor(main)	波多野 睦子
			指導教員 (副)： Academic Supervisor(sub)	岩崎 孝之

要旨 (和文 2000 字程度)

Thesis Summary (approx.2000 Japanese Characters)

本論文は”Diamond quantum sensors for biomagnetic field sensing” (ダイヤモンド量子センサによる生体磁気計測) と題し、英文 5 章から構成されている。

第 1 章”Introduction” (序論) では、研究の背景と目的を述べている。現状の自動車産業の問題である交通事故抑制に対して、ドライバの監視、特に脳活動のモニタの重要性について説明している。現在用いられている脳波計測や光トポグラフィ技術に対し、非接触・非拘束で脳活動がモニタできる脳磁計測の必要性を述べている。脳磁の大きさはサブ pT と非常に小さく、雑音が多い車載環境下で検出することが課題であるが、ダイヤモンド中の窒素-空孔 (NV) センサを用いた量子センサの可能性について説明し、本研究の目的とすることを述べている。

第 2 章”Principles” (原理) では、ダイヤモンド中の NV センサの理論について、さらに DC~数 100 kHz の周波数範囲の磁気計測の原理と課題について示している。2 つの計測方法である連続-光検出磁気共鳴 (CW-ODMR) 計測と Ramsey 計測に関して、動作原理とショットノイズ感度を導出し、理論的な限界感度の達成を阻害するノイズ源を考察し、それらの対策をまとめている。

第 3 章” Demonstration of magnetocardiographic imaging of living rats” (ラットの心磁イメージング) では、生体磁気計測システムについて述べている。ラットの心磁を長時間にわたって安定して計測可能なシステムを提案し、構築した。エネルギー準位差を用いた量子プロトコルである CW-ODMR 計測にロックイン検出と差動検出を組み合わせることで、ノイズの低減を図る技術を提案した。また、生体維持のための生体温度調整システムによる温度変化に対し、温度フィードバックを組み合わせることを提案した。それらを含めたシステムを構築することによって磁気感度 $140 \text{ pT/Hz}^{1/2}$ を実現し、心磁の計測とイメージング、さらには心臓のダイナミックな電流の再構成を実証した。さらに CW-ODMR 計測における光とマイクロ波が与える影響について解析し、センサ体積によるセンサ感度の向上を説明し、 1 mm^3 のセンサ体積に均一なマイクロ波磁気が照射可能なアンテナを試作してその有効性を示した。

第 4 章” Development of advanced quantum protocols based on Ramsey method toward brain monitoring” (脳のモニタリングに向けた Ramsey 計測をベースとした高度量子プロトコルの開発) では、脳磁の検出に向けて、CW-ODMR 計測よりも高感度化が期待できる Ramsey 計測に、2 つのスピン状態の共鳴周波数を同時に励起する Double Quantum 法を搭載した量子プロトコルについて説明し、磁気計測に有利な $\langle 111 \rangle$ 軸のダイヤモンドに対してマイクロ波アンテナが必要なことを述べている。センサ体積に均一で広帯域な強いマイクロ波磁気を生成することができる穴を備えた T 型アンテナを提案し、電磁界解析と Rabi 計測によりそのアンテナの効果を検証している。また従来の Ramsey 計測は高速のデジタイザを用いて NV センサの蛍光信号の時間変化を取得しているため、長時間かつリアルタイム測定には不向きであることを指摘している。また、NV センサのスピン状態に依存した蛍光量はオフセットを有しているため、実際のデジタイザの分解能に対してスピン状態に依存した蛍光量の分解能が低下することを指摘している。これらの課題を解決するため、Double Quantum 法を適用した Ramsey 計測にロックイン検出を組み合わせた計測システムを構築し、磁気信号のリアルタイム検出を実現したことを示している。またショットノイズ感度と実測の磁気感度の乖離の要因を分析し、アンプ・検出系の電気ノイズが支配的であることを示している。さらにノイズ低減の方法とその効果を解析し、脳磁検出が可能なサブ $\text{pT/Hz}^{1/2}$ の感度を実現するために必要な要素技術について述べている。

第 5 章”Conclusion and outlook”では本論文の結論と今後の展望をまとめている。

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note：Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、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。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).

(博士課程)
Doctoral Program

論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of, Graduate major in	電気電子 電気電子	系 コース	申請学位 (専攻分野) : Academic Degree Requested	博士 Doctor of	(工学)
学生氏名 : Student's Name	西谷 大祐		指導教員 (主) : Academic Supervisor(main)	波多野 睦子	
			指導教員 (副) : Academic Supervisor(sub)	岩崎 孝之	

要旨 (英文 300 語程度)

Thesis Summary (approx.300 English Words)

This thesis is entitled "Diamond quantum sensors for biomagnetic field sensing" and consists of five chapters. Chapter 1, "Introduction", describes the background and objectives of the research. It explains the importance of driver monitoring, particularly monitoring of brain activity, for reducing traffic accidents, which is a current problem in the automotive industry. The possibility of non-contact, unrestrained brain activity with quantum sensors based on nitrogen-vacancy (NV) centres in diamond is described and the aims of this research are stated. Chapter 3, "Demonstration of magnetocardiographic imaging of living rats", proposes and constructs a system capable of stable measurement over a long period of time. Constructed system's magnetic sensitivity of 140 pT/Hz^{1/2} was achieved. Using this measurement system, the spatiotemporal dynamics of magnetocardiography in rats was demonstrated. A prototype antenna for increasing sensor sensitivity by increasing sensor volume was developed and its effectiveness was demonstrated. In Chapter 4, "Development of advanced quantum protocols based on the Ramsey method towards brain monitoring", using two quantum state for Ramsey measurement, which are expected to increase sensitivity, were developed for the detection of magnetoencephalography. We proposed a measurement system that combines a quantum protocol with lock-in detection, which incorporates the Double Quantum method that simultaneously excites the resonance frequencies of two spin states, with the Ramsey measurement that is expected to have higher sensitivity. A Double Quantum-applicable antenna was proposed for diamond with <111> axis, which is advantageous for biomagnetic field measurements, and the effectiveness of the antenna was demonstrated. The factors causing the discrepancy between the shot noise sensitivity and the measured magnetic sensitivity in the constructed system are analysed, the noise reduction methods and their effects are analysed, and the elemental technologies required to improve sensitivity of sub pT/Hz^{1/2} that enables magnetoencephalography to be detected are described. Chapter 5, "Conclusion and outlook", summarises the conclusions and prospects of this thesis.

備考 : 論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note : Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意 : 論文要旨は、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。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).