

京都大学	博士（工学）	氏名	西川 哲理
論文題目	Development of Electrical Detection Techniques of Color Centers' Spins in Diamond and Silicon Carbide (ダイヤモンド及び炭化ケイ素中の色中心スピンの電氣的検出手法開発)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>ダイヤモンド及び炭化ケイ素(SiC)中の常磁性色中心は、量子コンピュータや量子暗号通信で用いられる量子情報素子や、高感度量子センサへの応用が期待される。ダイヤモンド中の窒素-空孔(NV)中心のスピンの状態は光学的初期化と観測が可能であるだけでなく、固体中のスピンとしては群を抜く長いスピンコヒーレンス時間を有する。これは量子情報の演算や記憶に重要で、量子センサの高感度化に直結する。特に、磁場、電場、温度、圧力、pHなどに鋭敏に応答する高感度センサとして幅広い分野での応用が期待される。また単一のNV中心を観測できることから、ナノメートルレベルでの空間分解能も実現できる。一方で空間分解能は落ちるが、集団(アンサンブル)のNV中心を用いれば、磁気センサに関する従来技術(超伝導量子干渉計磁気センサ、光ポンピング磁気センサ、磁気抵抗センサ等)の感度に匹敵、もしくはそれを凌ぐ可能性が見いだされ注目されている。固体材料の中で、単一色中心の観測のみならず、その単一スピンを室温で観測、及び制御できるのは、現在のところ、ダイヤモンド中のNV中心と、SiC中の常磁性色中心のみである。従来、NV中心の研究ではスピン状態の読み出しにレーザーを用いた光学的な手法が主に用いられてきた。この光学的な手法を電氣的な手法に置き換えることで、量子情報素子や量子センサの集積化・高性能化が可能となる。本論文は、これらダイヤモンド中のNV中心とSiC中の常磁性色中心を研究した結果をまとめたものであり、大きく四つの章で構成されている。</p> <p>第一章では、ダイヤモンドNV中心の量子センサ応用に向けたNV中心作製とダイナミクス研究について記述している。量子センサ応用において、表面近傍にナノレベルの深さで位置するNV中心は、高感度化と高空間分解能化に重要であるが、作製時に生じる欠陥からの磁場ノイズや表面付近の電場ノイズにより、スピンコヒーレンス時間短時間化や電荷状態不安定化等の特性悪化により、センサ感度が低下することが課題であった。本章では、リンドーブn型ダイヤモンドを用いることで特性悪化を抑制し、上記課題を克服した。また、NV中心を用いた量子センサデバイス応用に向け、素子の小型化や集積化において有利となる電気検出技術の開発に向けた研究も展開している。NV中心の光励起によるキャリア生成機構を解明するため、バンド内状態間のダイナミクスについて、速度式を解くことにより電気検出磁気共鳴信号の符号との関係を調べた。その結果、励起一重項状態から伝導帯へ光励起されるキャリア生成機構を明らかにした。更に、電気検出NV</p>			

京 都 大 学	博 士 (工 学)	氏 名	西 川 哲 理
------------	-------------	-----	---------

中心量子磁気センサの計測実証を行い、磁場感度を見積もった。

第二章では、SiC中の核スピンの電氣的検出について記述している。SiCはパワーデバイス用材料などとして以前より注目されており、単結晶成長技術や微細化プロセス技術が発達している。量子情報素子開発において、それらの技術の展開により、今後の量子情報素子開発研究の発展が期待される。一般に核スピンは電子スピンの比べ、3桁程度長い量子メモリ時間を有することが期待される。本章は、SiC中の常磁性色中心の中でもシリコン(Si)空孔に着目し、その電子スピンと核スピン間の相互作用である超微細結合の観測について議論している。核スピンは色中心の電子スピンと結合することで、量子情報の演算や記憶に利用すること、ひいては量子情報デバイスの高性能化が可能になる。本章では、周波数掃引型の光電流検出磁気共鳴装置を構築し、他の空孔関連欠陥からのノイズ電流や、マイクロ波ノイズの低減により、S/N比向上を達成したことが記述されている。また、非磁性電極による局所磁場の不均一性低減などにより、狭いスペクトル線幅を実現し、Si空孔の電子スピンと最近接Si核スピン間の相互作用である超微細結合の電氣的検出を達成した。更に、電子-核二重共鳴法により、SiC中のSi空孔電子スピンを介して、近接したシリコン核スピンの電氣的検出を実証した。これにより、電子スピンのに加え核スピンの利用も含めたSiC量子情報デバイスの高性能化への可能性を示した。

第三章では、SiC中の複空孔中心の電氣検出について記述している。複空孔中心は、光通信に有利な近赤外帯の蛍光を示すことから量子情報ネットワークデバイス開発の観点から注目されている。しかし、これまで行われている発光検出によるスピン読み出しには集積性やコストの観点で課題があった。本章では、開発した手法を用いて複空孔中心の電氣的検出磁気共鳴を実現し、更に電子スピンコヒーレンスを検出した。また、複数の複空孔類似欠陥スピンの電氣的な検出も実証した。これらにより、光検出より高効率なスピン信号読み出しの可能性を示した。

第四章では、SiC中の単一Si空孔の電氣的観測について記述している。量子コンピュータや高空間分解能を有する量子センサ、及び素子集積化の実現において、単一中心、及びそのスピンの電氣検出は、重要な技術である。本章では、Si空孔の高効率な電氣的観測を実証した。これまで室温において単一スピンを検出することがダイヤモンドにおいてなされていたが、SiCにおける単一レベルの高効率な信号強度検出の可能性を示した。

氏名	西川 哲理
----	-------

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、ダイヤモンド及び炭化ケイ素(SiC)中の常磁性色中心の持つ電子スピンを、電氣的に読み出す手法の開発と応用を目標に研究した成果についてまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

1. ダイヤモンド NV 中心の量子センサ応用において、リンドーブ n 型ダイヤモンドを用いることで特性が改善されることを見出し、センサ感度向上が可能となることを示した。また、1) NV 中心が有する電子スピンの電気検出における詳細な機構を明らかにし、更なる高感度化に資する結果を示したこと、2) 電気検出 NV 中心磁気センサの実証、は今後の量子センサ展開において極めて重要であることを確認した。

2. SiC 中のシリコン(Si)空孔電子スピンを介した核スピンの電氣的検出のため、周波数掃引型の光電流検出磁気共鳴装置を構築し、他の空孔関連欠陥からのノイズ電流や、マイクロ波ノイズの低減により、SN 比向上を達成した。この装置を用い、Si 空孔の電子スピんと最近接 Si 核スピン間の相互作用である超微細結合の電氣的検出を実現した。更に、電子-核二重共鳴法により、SiC 中の Si 空孔電子スピンを介して、近接した Si 核スピンの電氣的検出を実証した。電子スピに加え核スピンの利用も含めた SiC 量子情報デバイス新しい展開について指摘した。

3. 開発した手法を用いて電氣的に SiC 中の複空孔中心の電氣的磁気共鳴を実現し、更に電子スピンのラビ振動を観測した。また、複数の複空孔類似欠陥スピンの電氣的な検出も実証した。光検出に比肩・凌駕し得る高効率なスピン信号読み出しは、高感度集積型センサ展開にきわめて有用であることを指摘した。更に、開発した電氣的読み出し技術を用いて、Si 空孔の高効率な電氣的観測を実証した。

本論文は、ダイヤモンド及び SiC 中の常磁性色中心の持つ電子スピンを電氣的に読み出す手法を開発し、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、令和 5 年 2 月 14 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第 14 条第 2 項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。

要旨公開可能日：令和 5 年 6 月 23 日以降