

平成 22 年 6 月 1 日現在

研究種目：若手研究 (B)
研究期間：2008 ~ 2009
課題番号：20760006
研究課題名 (和文) 量子情報通信・計算のための固体中における多量子ビット単一常磁性発光
中心の研究
研究課題名 (英文) Multi-qubit single paramagnetic center for quantum communication and
computing
研究代表者
水落 憲和 (MIZUOCHI NORIKAZU)
筑波大学・大学院図書館情報メディア研究科・講師
研究者番号：00323311

研究成果の概要 (和文)：量子暗号通信・計算のための量子ネットワークの構築には、光アクセスビリティを持つ数量子ビットの固体素子の開発が重要である。近年、ダイヤモンド中の単一 NV 中心の優れた特性が注目されている。本研究では核スピンを持つ同位体炭素 ^{13}C の量を制御した合成ダイヤモンドを用い、単一 NV 中心において 4 量子ビットまでの系を初めて見出し、また、固体中の電子スピンの室温における最長のコヒーレンス時間(T_2)を実現した。

研究成果の概要 (英文)：In construction of scalable quantum network for quantum communication and computing, development of a few optically accessible quantum bits in solid is important. Recently, single NV center in diamond has been interested. In our research, by using ^{13}C enriched and ^{12}C enriched diamond samples, 4 qubit system of single NV center was observed and the longest T_2 of electron spin in solid at room temperature was realized.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	2,700,000	810,000	3,510,000
2009 年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・光学基礎、応用物性・結晶光学

キーワード：量子通信、量子コンピューティング、スピントロニクス

1. 研究開始当初の背景

量子暗号通信・量子計算では、絶対に解読不可能な暗号通信や既存の計算を遥かに凌ぐ高速計算を実現する事が期待されている。この分野の近年の発展は目覚ましく、これまで様々な物理系における基盤技術に関する実

験成果や、それらを用いた集積化 (スケールビリティの実現) へ向けたアーキテクチャに関する理論提案が報告されている。中でも集積化や既存の高度な技術の援用が可能な点からは、固体素子による実証実験の展開が期待される。固体材料の中では近年、ダイヤモ

ンド中の単一窒素 - 空孔複合体中心(NV 中心)が注目されている (図 1)。スケーラビリティという観点からは、近年、数量子ビットを持った多くの量子レジスタを量子もつれ状態にして量子ネットワークを形成することにより、量子通信・量子計算を実現しようという理論提案があり、これを実現する固体材料として NV 中心は興味を持たれる。

近年、水落は核スピンを持つ ^{13}C をドープした高品質ダイヤモンド試料を用いれば、多量子ビット化への展開が出来るのではないかと思ひ至り、平成 18,19 年度に、産業技術総合研究所で合成した試料を用いてシュトゥットガルト大学と共同研究を行い、単一 NV 中心においてスピンによる 3 量子ビットでの量子もつれ状態の生成に成功した。これは固体では初めてで、量子ビット数も固体では最多であった。

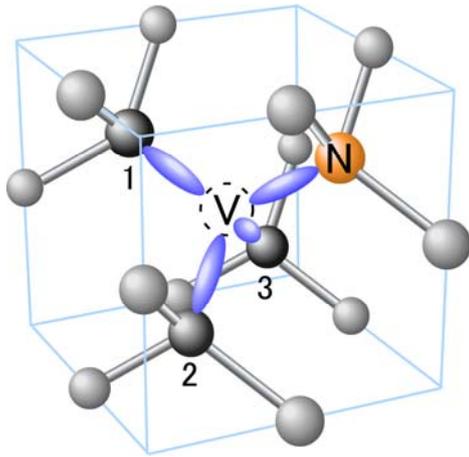


図 1、ダイヤモンド中の窒素 - 空孔複合体 (NV 中心)。N は窒素原子でダイヤモンド格子中の炭素原子の置換位置に入っている。V は炭素原子が抜けた空孔(V)である。1-3 でラベルされた炭素原子が空孔からの最近接炭素原子と呼ばれている。

2. 研究の目的

本研究ではこれまでの研究を進展させ、同位体炭素 ^{13}C の量を制御した合成ダイヤモンドを用い、量子情報素子として最適な、より多くの量子ビットを持った単一の発光中心を探索することを目的とした。また最適な系を見出すため、そのスピンの特性を調べることを目的とした。

3. 研究の方法

同位体 ^{13}C の量を制御したダイヤモンド試料は産業技術総合研究所及び東京ガスで合成したものを用いた。 ^{13}C 濃度は天然存在比は 1.1%であるが、これに対し、0.03%, 8.4%,

20%等の濃度のものを用いた。ドイツ・シュトゥットガルト大学に渡航し、共焦点レーザー顕微鏡にパルス磁気共鳴装置が組み合わされた装置で測定を行った。単一中心であることはハンブリートウイス干渉計によりアンチバンチングの観測とその解析により決定した。測定及びスペクトルの解析を自ら行った。

4. 研究成果

本研究では 3 つの ^{13}C の核スピンと電子スピンから成る 4 量子ビット系を見出すことに成功し、それらのスピン操作の実証を室温において行った。更にスピンの特性として一番重要であるコヒーレンスを壊す機構の解明と、コヒーレンスを保つ時間 (T_2) の長時間化を行うことができた。

(1) ^{13}C の核スピンによる 4 量子ビット系の発見とそれらの単一核スピンコヒーレンスの制御

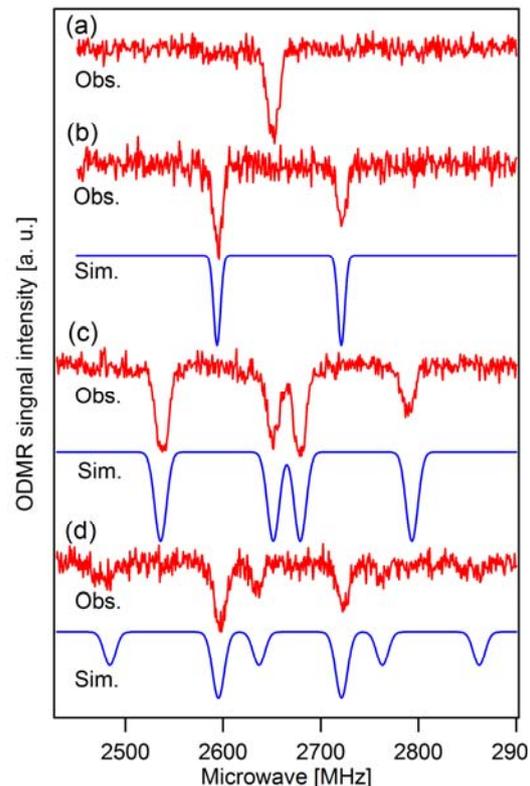


図 2、単一 NV 中心の光検出磁気共鳴 (ODMR)スペクトルとシミュレーションスペクトル 3 つの最近接炭素原子のうち(a)0 個、(b)1 個、(c)2 個、(d)3 個が ^{13}C と帰属される ODMR スペクトルとシミュレーションスペクトル

これまで、3 つの最近接炭素原子 (図 1) のうち、一つが核スピンを持つ ^{13}C の単一 NV 中心は観測されていたが、本研究では ^{13}C

の量を増やした高品質ダイヤモンドを用いることにより、3つの最近接炭素原子のうち、2つ、3つが ^{13}C である単一NV中心を初めて観測し、厳密にハミルトニアンを解くことによりそれらの光検出磁気共鳴スペクトルをシミュレートして同定した(図2)。またそれらの核スピンのラビ振動も観測し、それらの単一核スピンのコヒーレンスの制御を実証した。それを図3に示した。3つが ^{13}C である単一NV中心では電子スピンも合わせ4量子ビットの実現といえる。また第3近接位置にある遠くの ^{13}C 核スピンの同定とラビ振動の観測(単一核スピンのコヒーレンス制御)にも成功した。これらと最近接位置の3つの核スピン、電子スピンと組み合わせれば、原理的にはより多くの量子ビットの実現が可能であることを示した。これらの結果を次項の発表論文欄の雑誌論文①にて論文発表した。

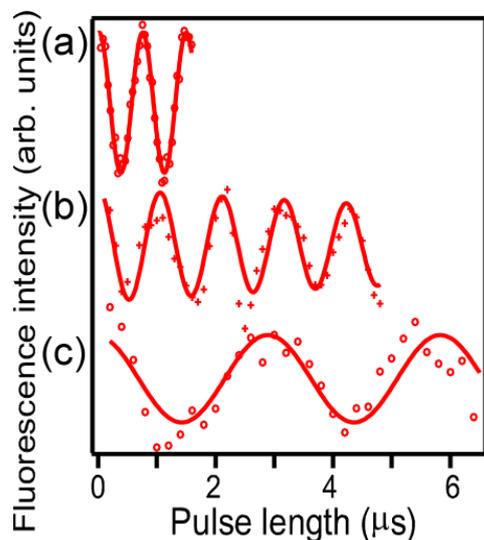


図3 単一 ^{13}C 核スピンのラビ振動. 3つの最近接炭素のうちそれぞれ(a)2つ、(b)3つが ^{13}C のNV中心におけるラビ振動と(c)第三近接炭素の ^{13}C のラビ振動. マイクロ波(MW)とラジオ波(RF)によるパルス系列は $\pi(\text{MW})\text{-Rabi}(\text{RF})\text{-}\pi(\text{MW})$. 実線は三角関数によるフィッティング曲線。

(2) コヒーレンス緩和機構解明、室温での電子スピンのコヒーレンス時間の1ミリ秒以上の長時間化

スピンの特性としてはコヒーレンス(重ね合わせ状態)を保つ時間(T_2)が重要である。実用化が期待される固体素子では量子ビットのコヒーレンスを長く保つことが難しく、緩和機構の解明と長時間化への技術開発が重要である。本研究では不純物の電子スピンの影響がない高品質ダイヤモンド試料に

おいて同位体 ^{13}C 濃度の異なった試料を作成し、 ^{13}C 濃度に対する電子スピンの T_2^* と T_2 を研究した。高品質試料においては T_2^* (不均一線幅)と T_2 (均一線幅)が共に ^{13}C 濃度に依存して変化することを初めて示し、超微細相互作用による詳細な機構を明らかにした。具体的には T_2^* は ^{13}C 濃度の高い領域ではフェルミ接触相互作用により支配され、低濃度側では著しく桁違いに不均一線幅が尖鋭化したのち、電子スピンと核スピン間の双極子相互作用で支配されることを定量的な数値計算を行い明らかにした。この著しい尖鋭化(ギャップの存在)はダイヤモンドにおける電子密度の著しい局在化によるものと解釈でき、本成果はSi中のPドナー等では見られない、ダイヤモンド特有の性質を見出したものとして重要である。

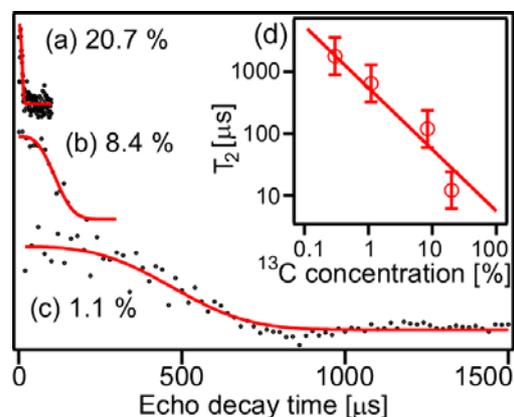


図4 電子スピンのエコー減衰と ^{13}C 濃度依存性プロット. それぞれ(a)20.7%、(b)8.4%、(c)1.1%(天然存在比)試料におけるエコー減衰. 実線は関数 $\exp\{-(t/T_2)^3\}$ によりフィッティングして得た曲線. (d) T_2 の ^{13}C 濃度依存性プロット. 実線は関数 $1/n$ でフィッティングして得た直線. ここでnは ^{13}C 濃度。

また、エコー法により見積もった T_2 に関しては、核スピンバス中の相互作用(単一電子スピンと核スピン間、核スピンバス中の核スピン間の双極子相互作用)を考慮した理論計算の報告値とほぼ一致する実験結果を得ることができた。この機構解明からは ^{13}C 濃度を減らすとコヒーレンス時間が長くなることが示されたが、 ^{13}C 濃度を減らした試料で1.8msというコヒーレンス時間(T_2)を実現した。これは他の材料に比べ桁違いに長く、室温での固体における電子スピンでは最長のコヒーレンス時間である。結果は図4に示した。本研究による電子スピンの T_2 の緩和機構解明からは、1.8msという T_2 もまだ ^{13}C による双極子相互作用に支配されていることを示しており、これはさらに ^{13}C 濃度の低減化、

パルス磁気共鳴手法の一つであるデカップリング操作、及び ^{13}C 核スピンの分極化等の技術によりさらに T_2 時間を延ばせることを示した結果といえる。これらの結果を次項の発表論文欄の雑誌論文①及び②にて論文発表した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① N. Mizuochi, P. Neumann, F. Rempp, J. Beck, V. Jacques, P. Siyushev, K. Nakamura, D. Twitchen, H. Watanabe, S. Yamasaki, F. Jelezko, J. Wrachtrup “Coherence of single spins coupled to a nuclear spin bath of varying density” *Physical Review B*, Vol. 80, 041201(R) (2009). (Editors' suggestion)、査読有
- ② G. Balasubramanian, P. Neumann, D. Twitchen, M. Markham, R. Kolesov, N. Mizuochi, J. Isoya, J. Achard, J. Beck, J. Tisler, V. Jacques, F. Jelezko, J. Wrachtrup, “Ultralong spin coherence time in isotopically engineered diamond” *Nature materials*, Vol. 8, pp. 383-387 (2009)、査読有
- ③ N. Tsubouchi, M. Ogura, N. Mizuochi, H. Watanabe, “Electrical properties of a B doped layer in diamond formed by hot B implantation and high-temperature annealing” *Diamond and Related Materials*, Vol. 18, pp. 128-131 (2009)、査読有
- ④ P. Neumann*, N. Mizuochi*, F. Rempp, P. Hemmer, H. Watanabe, S. Yamasaki, V. Jacques, T. Gaebel, F. Jelezko, J. Wrachtrup. “Multipartite Entanglement Among Single Spins in Diamond” *Science*, Vol. 320, no. 5881, pp. 1326-1329 (2008)、査読有

[学会発表] (計 19 件)

- ① [受賞記念講演] 日本物理学会第 65 回年次大会、岡山大学、2010/03/21 “同位体制御したダイヤモンドにおけるスピンコヒーレンスの研究” 水落憲和
- ② 第 57 回応用物理学関係連合講演会、東海大学、2010/03/18 “グラファイト及びダイヤモンド上強磁性金属薄膜成長の観察” 吉國翔太、関剛斎、新庄輝也、鈴木義茂、白石誠司、水落憲和、山崎 聡
- ③ International Conference on Quantum Information and Technology, Tokyo,

2009 年 12 月 2-5 日、“Coherence of single spins coupled to a nuclear spin bath in diamond” N. Mizuochi, P. Neumann, F. Rempp, K. Nakamura, D. Twitchen, H. Watanabe, S. Yamasaki, F. Jelezko, J. Wrachtrup

- ④ 第 23 回ダイヤモンドシンポジウム、2009 年 11 月 18 日、千葉工業大学、“単一 NV 中心における同位体炭素 (^{13}C , ^{12}C) を用いた量子情報研究” 水落憲和, P. Neumann, R. Florian, 中村和郎, 渡辺幸志, 山崎聡, F. Jelezko, J. Wrachtrup.
- ⑤ [受賞講演] 第 48 回電子スピンサイエンス学会年会、2009 年 11 月 11 日、神戸大学、“ダイヤモンド中の単一 NV 中心における多量子ビット化と単一スピンコヒーレンス制御” 水落憲和, P. Neumann, R. Florian, 中村和郎, 渡辺幸志, 山崎聡, F. Jelezko, J. Wrachtrup.
- ⑥ [Invited] 6th Japanese-German Frontiers of Science Symposium, 30 Oct.-1 Nov. 2009, Tokyo, Japan. “Quantum information processing and memory by single spins in Diamond” N. Mizuochi
- ⑦ [招待講演] 第 10 回エクストリーム・フォトニクス研究会、名古屋、2009 年 11 月 4-5 日 “ダイヤモンド中の単一 NV 中心～室温での光による単一スピン検出と操作～” 水落憲和
- ⑧ International Conference on Quantum Information Processing and Communication (QIPC 2009), Roma, Italy, 21-25, Sep, 2009. “Entanglement and coherence properties of single spins in diamond” N. Mizuochi, P. Neumann, F. Rempp, K. Nakamura, D. Twitchen, H. Watanabe, S. Yamasaki, F. Jelezko, J. Wrachtrup
- ⑨ 20th European Conference on Diamond, Diamond-Like Materials, Carbon Nanotubes, Nitrides & Silicon Carbide, 6-10 Sep., 2009, Athens, Greece. “Coherence control of single spins in Diamond” N. Mizuochi, P. Neumann, F. Rempp, J. Beck, V. Jacques, P. Siyushev, K. Nakamura, D. Twitchen, H. Watanabe, S. Yamasaki, F. Jelezko, J. Wrachtrup
- ⑩ [招待講演] 第 5 回量子ナノ材料セミナー、2009 年 7 月 29 日、埼玉大学 “ダイヤモンド中の単一 NV 中心～室温での単一光子発生と単一スピン操作” 水落憲和
- ⑪ The 18th International Conference on Electronic Properties of Two Dimensional Systems (EP2DS-18), July 19-24, 2009, Kobe, Japan. “Coherence of single electron and nuclear spins in

- Diamond” N. Mizuochi, P. Neumann, F. Rempp, K. Nakamura, H. Watanabe, S. Yamasaki, F. Jelezko, J. Wrachtrup
- ⑫ [招待講演] 第 20 回量子情報技術研究会、2009 年 5 月、広島大学、“ダイヤモンドを用いた量子情報処理” 水落憲和
- ⑬ [Invited] Joint JSPS-ESF International conference on Nanoscience and Engineering in Superconductivity, March 23-26, 2009, Tsukuba, Japan
“Coherence among single spins of NV center in Diamond” N. Mizuochi
- ⑭ 第 56 回応用物理学関係連合講演会、2009 年 4 月 1 日、筑波大学 “¹³C 核スピン濃度を制御したダイヤモンド中の NV 中心における単一スピニコヒーレンス制御” 水落憲和, P. Neumann, R. Florian, J. Beck, 中村和郎, 渡辺幸志, 磯谷順一, 山崎聡, F. Jelezko, J. Wrachtrup.
- ⑮ 第 64 回日本物理学会年次大会、2009 年 3 月 27 日、立教大学池袋キャンパス、“核スピンバス中における単一 NV 中心のスピニコヒーレンス” 水落憲和, P. Neumann, R. Florian, J. Beck, 中村和郎, D. Twitchen, 渡辺幸志, 山崎聡, F. Jelezko, J. Wrachtrup
- ⑯ [招待講演] 日本物理学会秋季大会、2008 年 9 月 22 日、シンポジウム「単一分子分光の最前線」、岩手大学上田キャンパス “ダイヤモンド中の単一 NV 中心における核スピンを用いた量子情報研究” 水落憲和
- ⑰ [招待講演] 第 4 回量子情報未来テーマ開拓研究会(JST 主催)、2008 年 9 月 5 日、沖縄県、“ダイヤモンドの単一 NV 中心でのエンタングルメント生成” 水落憲和
- ⑱ [招待講演] 応用物理学会スピントロニクス研究会「拡がるスピントロニクス ～核スピントロニクス、バイオ系スピントロニクス～」2008 年 7 月 3 日 (木) 東京大学本郷キャンパス、“ダイヤモンド N-V センターを用いた核スピン量子情報処理”、水落憲和
- ⑲ 第 18 回量子情報技術研究会、2008 年 5 月 22 日-23 日、東京大学本郷キャンパス “ダイヤモンド中の単一 NV 中心における核スピンによるエンタングルメントの生成”、水落憲和, P. Neumann, R. Florian, T. Gaebel, 渡辺幸志, 磯谷順一, 山崎聡, F. Jelezko, J. Wrachtrup.

[図書] (計 2 件)

- ① [解説記事] 水落憲和、「ダイヤモンド中の NV 中心の単一スピニコヒーレンス制御」
固体物理、2010 年 1 月号、vol. 45、p. 27-p. 35

- ② [解説記事] 水落憲和、「ダイヤモンド中の単一 NV 中心を用いた量子情報処理」
日本物理学会誌、2009 年 12 月号、vol. 64, no. 12, pp. 910-918, 2009

[その他]

ホームページ等

<http://www.bk.tsukuba.ac.jp/~mizuochi/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

水落憲和 (MIZUOCHI NORIKAZU)

筑波大学・大学院図書館情報メディア研究科・講師

研究者番号：00323311