

平成 26 年 5 月 30 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24740273

研究課題名(和文) 高利得スピン増幅の研究

研究課題名(英文) Spin amplification with a high gain

研究代表者

根来 誠 (Negoro, Makoto)

大阪大学・基礎工学研究科・助教

研究者番号：70611549

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円、(間接経費) 1,020,000円

研究成果の概要(和文)：室温下で分光信号を10倍以上増幅することに成功した。光励起三重項電子を用いた動的核偏極によって、室温で34%の高偏極率を得ることに成功した。よって、サンプルを室温に保ったままでも、高偏極化とスピン増幅によって10万倍以上の高感度化が可能となることを示した。合成した1-<sup>13</sup>C-1-フルオロ-p-ターフェニルを用いて、利得14倍の非破壊スピン増幅器の実装に成功した。平均ハミルトニアン理論と最適制御理論に基づいて、高精度な量子ゲートを実現するパルスを数値的に導出する方法を考案した。量子ゲートの忠実度や初期状態の偏極率がある閾値を超えたときに、スケラブルに高利得化が可能になる再生増幅回路を考案した。

研究成果の概要(英文)：We have demonstrated amplification of Ramsey spectroscopy signals with the gain of more than 10 at room temperature. Using dynamic nuclear polarization with photo-excited triplet electrons, we have achieved polarization of 34% at room temperature. These mean that the sensitivity enhancement of more than 100,000 will be capable with the combination of spin amplification and dynamic nuclear polarization. Using 1-<sup>13</sup>C-1-fluoro-p-terphenyl, we have implemented non-destructive spin amplification with the gain of 14. We have proposed a method to make a pulse for quantum gate with a high fidelity based on average Hamiltonian theory and optimal control theory. We have proposed a quantum circuit of regenerative spin amplification, which is scalable to a higher gain if the gate fidelity and the initial polarization are beyond thresholds.

研究分野：原子・分子・量子エレクトロニクス

科研費の分科・細目：若手研究(B)

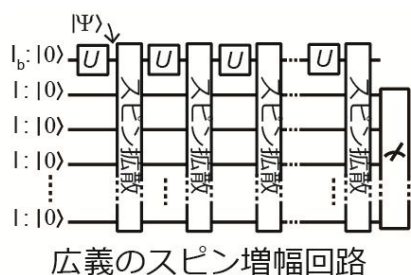
キーワード：スピン増幅(スピンプ) 核磁気共鳴(NMR) 動的核偏極(DNP) 光励起三重項 ペンタセン(pentacene) p-ターフェニル(p-terphenyl) ハミルトニアンエンジニアリング スピン格子緩和(T1)

1. 研究開始当初の背景

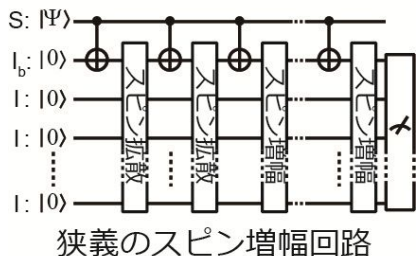
興味ある一つの核スピンの情報をまわりの核スピンのコピーすることで、その一つのスピンの成分を増幅することをスピン増幅と呼ぶ。スピン増幅を用いれば、感度が悪い検出器でも、ある一つのスピンの成分を非破壊に測定でき、量子計算結果の読み出しも行える。しかし、従来から考えられていた実装方法は、まわりのスピンを選択的に操作してコピーする必要があり難しく、これまで4倍程度の低利得しか実現されていなかった。申請者はスピン拡散と磁場循環を用いるスピン増幅の新しい実装方法を考案し(図1)、利得140倍の広義のスピン増幅器の実装に成功した。

広義スピン増幅では、状態を破壊してしまうが、量子状態・量子プロセスのトモグラフィや分光、量子メトロロジーの感度の飛躍的向上への応用が期待される。提案された方法は拡張可能性が高く、さらなる高利得が望める。高利得のスピン増幅は、これまで雑音に埋もれて観測できなかった極微量サンプルのNMR分光を可能にする。

また、実装された広義スピン増幅と制御NOTゲート操作を組み合わせることで(図1)スピン状態を破壊せずにスピン増幅(狭義のスピン増幅)が可能になり、量子計算結果の読み出しにも使える。



広義のスピン増幅回路



狭義のスピン増幅回路

図1: スピン増幅の量子回路。

2. 研究の目的

本研究の目標は、高利得な狭義のスピン増幅の実装を行うことである。これが実現可能な分子の合成を行う。また、もう一つの目標は核スピン高偏極化と高利得での広義スピン増幅組み合わせ、NMR分光感度の飛躍的向上を達成することである。高利得の達成を目指して、高精度量子ゲート操作を実現する方法を研究する。

3. 研究の方法

(1) より高利得の広義スピン増幅を目指して、以前に行われた実験結果を解析し、利得向上において何がボトルネックとなっているかを研究する。

(2) 広義スピン増幅によるNMR分光の高感度化のために、室温下での実現を目指す。そのためにまず室温下での核スピン系の高偏極化を実現する。そして、高偏極化された核スピン系で、ニューテーション分光信号やラムゼイ分光信号の増幅を室温下で行う。

(3) 非破壊スピン増幅を実現できる分子を合成し、低利得での狭義のスピン増幅を実現する。

(4) さらなる高利得の達成を目指して、高精度量子ゲート操作を実現する方法を研究する。具体的には、狙った量子ゲートを実現するパルスの数値最適化手法を開発する。

(5) より高利得のスピン増幅を目指し理論的、実験的に研究する。

4. 研究成果

(1) スピン格子緩和を考慮した場合のスピン増幅の利得の理論式を導出した。これに以前行われた広義スピン増幅実験におけるスピン格子緩和時間を入力すると、このままでは利得が1000倍を超えないことがわかった。

そこで、研究の方法(5)において、1000以上の利得が可能となる新しい量子回路を理論的に考案することにした。

(2) 室温での広義スピン増幅に先駆けて、室温での高偏極化の研究を行った。光励起三重項状態の電子スピンを用いた動的核偏極を用いて、室温で34%の高偏極率を得ることに成功した。これは、従来のNMR分光が行われている環境での熱平衡偏極率よりも1万倍以

上も高いもので、飛躍的な高感度化が可能となる。

また、室温下でも、高偏極化された核スピン系で広義のスピン増幅回路を実装することに成功した。そして、スピンニューテーション分光とラムゼイ分光のそれぞれの信号を10倍以上増幅することに成功した。これによって、サンプルを室温に保ったままでも、高偏極化とスピン増幅を組み合わせることで10万倍以上の高感度化が可能となることを示した。

(3) 大阪大学理学研究科森田グループとの共同研究で、 $1\text{-}^{13}\text{C}\text{-}1\text{-フルオロ-}p\text{-ターフェニル}$ を合成した。この系では、 $^{13}\text{C}$ がSスピン、 $^{19}\text{F}$ が $I_0$ スピン、 $^1\text{H}$ がIスピンとして図1の狭義のスピン増幅回路を実装できる。実際にこのサンプルを用いて、狭義のスピン増幅回路を実装し、利得14倍の増幅に成功した。

(4) より高精度な量子ゲートを実現するパルスを開発するために、従来から用いられている方法には、平均ハミルトニアン理論に基づいて解析的に導出するアプローチと、最適制御理論に基づいて数値的に導出するアプローチがある。前者は実験上の制約を取り入れにくいこと、後者は系の詳細を知る必要があることが短所であった。

そこで、両方のアプローチを統合した方法を提案した。これによって導出されたパルスによる量子ゲートは、従来パルスよりも高忠実度であることをシミュレーションで示した。

(5) より高利得なスピン増幅を実現するためには、スピン格子緩和よりも速く実装する必要がある。二次元スピン系を用意し、状態を一度に数個コピーし、そのコピーされた状態からさらに数個ずつコピーするという再生増幅を行えば、高速に高利得が得られる。しかし、これまで考えられてきた再生増幅の実装法では、量子ゲート操作に誤差を含む場合や初期状態が混合状態の場合には上手く動作しないものであった。

京都大学の藤井特定助教とともに、量子ゲートの忠実度や初期状態の偏極率がある閾値を超えたときに、スケラブルに高利得化が可能になる再生増幅回路を考案した。この実装法は並進対称的な操作と冷却だけを用いて、誤差が蓄積しないようにしている。

## 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5件)

K. Tateishi, M. Negoro, S. Nishida, A. Kagawa, Y. Morita, M. Kitagawa: "Room-temperature hyperpolarization of nuclear spins in bulk", Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A. (2014), 査読有. 北川勝浩, 香川晃徳, 根来誠: "核スピン・電子スピン量子情報処理実験", 固体物理, 48, 95-105 (2013), 査読有.

K. Tateishi, M. Negoro, A. Kagawa, M. Kitagawa: "Dynamic Nuclear Polarization with Photoexcited Triplet Electrons in a Glass Matrix", Angewandte Chemie Int. Ed., 52, 13307-13310 (2013), 査読有.

K. Tateishi, M. Negoro, A. Kagawa, T. Uesaka, M. Kitagawa: "Hyperpolarization of Thin Films with Dynamic Nuclear Polarization Using Photoexcited Triplet Electrons", J. Phys. Soc. Jpn., 82, 084005-1-5 (2013), 査読有.

Y. S. Yap, H. Yamamoto, Y. Tabuchi, M. Negoro, A. Kagawa, M. Kitagawa: "Strongly driven electron spins using a Ku band stripline electron paramagnetic resonance resonator", J. Magn. Reson., 232, 62-27 (2013), 査読有.

[学会発表](計33件)

根来誠, 田淵豊, 陶山雷, 北川勝浩: "平均ハミルトニアン理論と最適制御理論に基づくハミルトニアンエンジニアリング" 第30回量子情報技術研究会 (20140513). 名古屋大学(口頭発表)

根来誠: "大規模分子スピン量子情報処理デバイスの実現に向けて" 基礎物理学研究所研究会量子情報の新展開. (20140324). 京都大学(招待講演)

M. Kitagawa, K. Fujii, M. Negoro, N. Imoto, and Y. Morita: "Topological Protection of Quantum Information without Measurement" FIRST International Symposium on Topological Quantum Technology. (20140129). Tokyo, Japan (Invited)

M. Negoro: "Room-temperature hyperpolarization using photo-excited triplet electrons" 4th international DNP Symposium. (20130829). Copenhagen, Denmark (oral)

根来誠, 立石健一郎, 香川晃徳: "スピン増幅を用いた量子非破壊測定" 第28回量子情報技術研究会 (20130527). 北海道大学(口頭発表)

M. Negoro: “Spin amplification with hyperpolarized nuclei” The 11th US-Japan Joint Seminar on Quantum Electronics and Laser Spectroscopy. (20130411). Nara, Japan (Invited)  
根来誠、立石健一郎、香川晃徳、北川勝浩: “高速なスピン増幅の実装” 日本物理学会秋季大会 (20120918). 横浜国立大学 (口頭発表)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕  
取得状況 (計 1 件)

名称: 量子誤り訂正方法、量子誤り訂正装置、および、量子情報格納装置  
発明者: 根来誠、北川勝浩、森田靖、西田辰介、藤井啓裕  
権利者: 国立大学法人大阪大学  
種類: 特許  
番号: 5376482  
取得年月日: 2013 年 10 月 4 日  
国内外の別: 国内

〔その他〕  
ホームページ等

## 6 . 研究組織

- (1) 研究代表者  
根来誠 (Negoro, Makoto)  
大阪大学・大学院基礎工学研究科・助教  
研究者番号: 70611549