

平成 22 年 05 月 14 日現在

研究種目：基盤研究(G)

研究期間：2007～2009

課題番号：19540362

研究課題名（和文）

超高感度 NMR による局所磁場勾配の直接観察

研究課題名（英文）

Direct observation of local magnetic-field gradient based on ultra-high sensitive NMR

研究代表者

佐々木 進 (SASAKI SUSUMU)

新潟大学・自然科学系・准教授

研究者番号：80323955

研究成果の概要（和文）：医療技術として多くの病院で活用されている MRI。この根幹となる技術は、磁気共鳴と呼ばれる測定技術、そして磁石が作る空間の歪み（磁場）の値を空間的に変化させる（磁場の勾配を作る）技術です。我々は、近年の卓越したナノテクノロジーと独自の超高感度磁気共鳴手法を駆使することで、極めて微小な磁石の作る磁場が通常の MRI の 1,000 倍程度の大きな磁場の勾配を作っていることを、世界で初めて実験的に明らかにすることに成功しました。これは、1,000 倍以上高精度の MRI を実現する基礎技術となります。

研究成果の概要（英文）：MRI is a medical technique which is now widely used in many hospitals. The key techniques of MRI come with a measurement method called magnetic resonance and how to modulate the spatial distortion created by a magnet (to generate the gradient of a magnetic field). Based on the nanotechnology that has been highly established and the extremely high sensitivity of our measurement method, we have succeeded in clarifying that a nano-structured magnet can cause a field gradient as large as that of standard MRI. The present success has opened a portal to realize MRI with the resolution of 1,000 times greater.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2008 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2009 年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性 II

キーワード：磁気共鳴，量子計算，ナノ構造，磁場勾配

1. 研究開始当初の背景

2000 年頃から量子コンピュータの基本動作を様々な実験的手段により実現する研究が盛んに行われ始めた。このうち、最も進化し

ているのは溶液の分子を”CPU”とした NMR 量子コンピュータであるが、並列計算を実行する量子ビット (qubit) の個数の上限が 10 程度であり、現実的な計算を実行する 1000

qubitには遥かに及ばない。

これを打開する方法として我々は、溶液ではなく固体を用いてNMRスペクトルを分離させ、これにより人工的に多qubitを作ることを提唱し、研究を遂行してきた。

しかし、ごく少量の核スピンを検出するという検出感度の困難さに加え、各層の僅かな不均一性および外部磁場に対する僅かな角度誤差などが原因となり、分離したNMRスペクトルはもとより、局所磁場によって生じるはずのNMRシフトさえも明瞭には観測されていなかった。

これが如何に困難な試みであるかは、当時、世界の著名な研究機関（我々が把握しているだけでも、アメリカのハーバード大学、マサチューセッツ工科大学、スタンフォード大学、カナダのワータールー大学など）が試みていたが、どこからも成功の報告は無かった、ということから容易に推察される。

このような世界の最先端の研究状況において、我々は果敢にこの困難に取り組み、本研究計画を提案する直前に、その兆候となる現象を実験で観測していた。

2. 研究の目的

本研究計画の最終目的は、「2-qubit構造（観測する核スピンを2枚の超薄膜にし、適当な距離を隔てて設置した構造）中の核スピンの信号を、ナノ構造磁石の作る局所磁場の勾配によって異なるNMRシフトとして直接観察すること」である。それに向けて、次のように目標を細分化して達成することにした。

(1) まず、本計画の提案直前に我々が観測していた兆候が、真に局所磁場を感じた核スピンの信号であることを、実験的に明らかにする。

(2) 非常に高感度の測定が要求されるので、さらなる高感度を実現するために、100 mK以

下の極低温下でS/Nを増大させて測定を行う。

(3) 外部磁場に対して試料の角度を 0.1° 以内の精度で制御する。

(4) 上記(2)および(3)と平行して、1-qubit構造の試料において、フィティング・パラメータを用いることなく、局所磁場を感じたNMR信号のスペクトルをシミュレーションで再現する。

(5) 以上を足がかりとして、最終目的を実現する。

3. 研究の方法

「2. 研究の目的」の項目に沿って記述する。

(1) ① 検出する層をシリコンではなく、アルミニウムに代える。これは、超高感度のNMR測定に不可欠となる信号の積算回数を増やすこと、ひいては測定時間を2-3桁ほど短縮できることになる。また、アルミニウムは展性が高いため、ナノ構造の超薄膜をより確実に均一に作成することが可能となる。

② ピラー状のナノ構造シリコンを複数個作成し、この上にアルミニウムの超薄膜を適当な厚さで蒸着させる。アルミニウム超薄膜上に、ナノ構造磁場を発生するパーマロイを適当な厚さで蒸着させる。ここで、これらの厚みとシリコン基盤のピラーのサイズは、事前に有限要素法のシミュレーションによって最適と考えられた値を用いる。

③ NMR感度を向上させると同時に、作成した試料を比較的、容易に交換することも重要である。この両者を満たすため、測定温度を1.6Kとする。また、信号検出における超高感度を実現するために、理想的なインピーダンス整合を実現すると同時に入力パルスによる放電を避ける共鳴回路の作成、応答信号から非本質的な雑音を除くためのパルス列の工夫を施す。

(2) 既に別のプロジェクトで導入され稼働している、NMR 仕様の希釈冷凍機を用いる。

(3) 1.6Kにおいて試料を 0.1° の精度で角度制御できるプローブを作成し、角度制御と共に高感度NMR信号観測を実現する。成功すれば、同様のプローブを、上記(2)の希釈冷凍機にも設置する。

(4) フィットングには、有限要素法を用いる。シリコンのピラーのサイズ、その直上のアルミニウム層の厚さ、さらにその直上のパーマロイの厚さ、そしてパーマロイの磁化の大きさは実験によって与えられている。これらの値だけで、アルミニウム超薄膜における局所磁場そのものの大きさと超薄膜位置での磁場の勾配が自動的に評価できる。すなわち、フィットング・パラメータは皆無となる。

(5) 2-qubit構造を作成する際のサイズの最適化を行う。特に、2つのアルミニウム層の間隔をできるだけ近づけると同時に、スペクトルの線幅よりは大きくなるような磁場勾配を感じる程度には離して設置する条件を見出す。NMR測定の際には、さらに高い信号検出感度が要求されるので、1.6Kではなく、NMR仕様の希釈冷凍機を用いて、50 mKの低温下でS/Nを増大させて測定を行う。

4. 研究成果

上記「2. 研究の目的」の5項目のうち、4項目を実現した。

(1) まず、第1目的においては、世界的に権威ある学術雑誌 *Applied Physics Letters* に掲載される ([3]) と共に、国内の学会、研究会 ([9]) 等はもちろん、国際会議の口頭発表 ([10]) や北米の著名な研究室からの招待講演 ([11]) および研究室でのセミナー ([12]) を実施した。

(2) 次に、第4目的においては、当初の予定

通り、フィットング・パラメータを全く用いずに、NMR スペクトルを再現することに成功し、ナノスケール局所磁場が作る勾配を実験的に評価した。この結果は、東京大学の樽茶教授らが国際共同研究として展開している量子ドット中の電子スピンの実験を大変よく説明できることが明らかとなっており、我々の成果はその解説記事（「固体物理」44, (2009) 17 アグネ社）において紹介されている。

(3) また、本研究で培われた Al 核スピンの微小信号の超高感度検出技術は、AlGaAs/GaAs のヘテロ構造における界面格子不整合に起因する局所的な歪みを実験的に検出する手法へ展開するに到った。これらの成果は、本研究計画から付随して発生、発展したものである。

(4) さらに、第2目的においては、実験的に興味深い現象を見出し、特に実験技術の新たな展開に繋がる可能性が高い。また、第3目的においては、確立した測定装置と手法を、上記の半導体ヘテロ構造の歪みの検出にも援用できる展望が開けた。

(5) 最後に、第5目的は期間内に達成されなかったが、実現に向けた具体的な可能なパラメータの絞り込みまで明らかとなっている。

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3件)

[1] Magnetic-field gradient in nanostructures detected by nuclear spins; S. Watanabe, S. Sasaki, S. Sato, M. Nishimori, N. Isogai, Y. Matsumoto; *Physica E* **42**, 1004 (2010).

[2] Strains in heterostructures detected

by standard NMR; M. Nishimori, S. Sasaki, S. Watanabe, Y. Hirayama; Physica E **42**, 1007 (2010).

[3] Direct Observation of Local Magnetic Field Generated by Micromagnet; Shinji Watanabe, Susumu Sasaki, Shinya Sato, Naoki Isogai, Yoshinori Matsumoto; Appl. Phys. Lett. **92**, 253116-3 (2008).
〔学会発表〕(計12件)

[1] Al 核スピンによるナノ構造の直接観察 II; 西森将志, 長谷川広和, 川中子隆, 佐々木進, 渡辺信嗣, 平山祥郎; 国内, 口頭, 日本物理学会年会, 岡山大学; 2010.03.20.

[2] Interface-induced strains along vertical direction in heterostructure; M. Nishimori, H. Hasegawa, S. Sasaki, S. Watanabe, Y. Hirayama; 国際, ポスター, International Symposium on Quantum Nanostructures and Spin-related Phenomena; 東京大学駒場キャンパス; 2010.03.10

[3] ナノスケール磁場の観察; 渡辺信嗣, 佐藤真也, 佐々木進, 磯貝直樹, 松本佳宣; 国内, ポスター, 新学術領域「分子ナノシステムの創発化学」第1回公開シンポジウム, キャンパスプラザ京都; 2010.02.06.

[4] Nuclear-spin detection of magnetic-field gradient in nanostructures; S. Watanabe, S. Sasaki, S. Sato, M. Nishimori, N. Isogai, Y. Matsumoto; 国際, ポスター, EP2DS-18, 神戸国際会議場; 2009.07.23.

[5] Strains in heterostructures detected by standard NMR; M. Nishimori, S. Sasaki, S. Watanabe, Y. Hirayama; 国際, ポスター, EP2DS-18, 神戸国際会議場; 2009.07.20.

[6] Direct nuclear-spin detection of nanostructures - nanoscale field gradient,

and strains in AlGaAs/GaAs heterostructure; S. Watanabe, S. Sasaki, S. Sato, M. Nishimori, N. Isogai, Y. Matsumoto, Y. Hirayama; 国際, ポスター, Spintech V, ヤギロニアン大学 (クラクフ, ポーランド); 2009.07.10.

[7] ナノ磁石が作る局所磁場の核スピン検出と磁場勾配; 佐々木進, 渡辺信嗣, 松本佳宣; 国内, 口頭, 応用物理学会春期講演会, 筑波大学; 2009.04.01.

[8] Al 核スピンによるナノ構造の直接観察; 工藤将倫, 西森将志, 佐々木進, 渡辺信嗣, 平山祥郎; 国内, 口頭, 日本物理学会年会, 立教大学; 2009.03.27.

[9] Nuclear-spin detection of local magnetic field gradient; Shinji Watanabe, Susumu Sasaki, Naoki Isogai, Yoshinori Matsumoto; 国内, 口頭, PASPS13, 東北大学電気通信研究所; 2009.01.28.

[10] Nuclear-spin detection of hetero-structures and nano-structures Shinji Watanabe, Susumu Sasaki, Naoki Isogai, Yoshinori Matsumoto, Yoshiro Hirayama; 国際, 口頭, Advanced Heterostructure and Nanostructure Workshop (AHNW2009), ハブナビーチ・プリンスホテル (ハワイ島, アメリカ); 2008.12.11.

[11] Direct observation of local magnetic field generated by microscopic magnet; Susumu Sasaki; 招待講演, 国際, 口頭, IQC seminar of Waterloo University, ワータールー大学量子情報研究所 (オタワ州, カナダ); 2007.12.17.

[12] Direct observation of local magnetic field generated by microscopic magnet; Susumu Sasaki; 国際, 口頭, Solid-state physics seminar of Harvard University, ハーバード大学理学部物理学科 (マサチュー

セッツ州, アメリカ) ; 2007. 12. 13.

[その他]

研究室ホームページ

<http://fusion.eng.niigata-u.ac.jp/EN/Top.htm>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐々木 進 (SASAKI SUSUMU)
新潟大学・自然科学系・准教授
研究者番号 : 80323955

(2) 研究分担者

松本 佳宣 (MATSUMOTO YOSHINORI)
慶應義塾大学・理工学部・准教授
研究者番号 : 60252318
(H19→H20 : 連携研究者)