



情報・システム研究機構
国立情報学研究所
National Institute of Informatics

平成20年11月13日

科学技術振興機構 (JST)
Tel: 03-5214-8404 (広報課)

情報・システム研究機構
国立情報学研究所 (NII)
Tel: 03-4212-2131 (企画推進本部広報普及チーム)

電子スピン状態を光パルスで完全制御することに成功 — 超高速量子コンピューターの実現への一里塚 —

JST基礎研究事業の一環として、情報・システム研究機構 国立情報学研究所の山本喜久 教授らは、半導体ナノ構造に閉じ込められた電子スピン^{注1)}の状態を、光パルスを用いて完全に制御することに成功しました。

量子コンピューター^{注2)}を実現するための第一歩は、量子情報を納めているスピン状態を完全に制御する技術を確認することです。このスピン制御技術には3つの要素があり、スピン状態の初期化 (古い情報の消去)、スピンの回転 (新しい情報の書き込み)、そしてスピン状態の検出 (情報の読み出し) です。従来、このスピンの制御には、2つのスピン準位間 (基底状態と励起状態) のエネルギー差に対応した1~10GHzのマイクロ波のパルスを用いた電子スピン共鳴法^{注3)}と呼ばれる手法が用いられてきました。この方法では、スピン制御に要する時間が数ナノ秒~数十ナノ秒 (1ナノ秒=10⁻⁹秒) 以上にもなります。このため、スピンに納められている量子情報が消失してしまう前に行える最大の演算回数が1,000回以下に制限されてしまいます。このことが量子コンピューターを実現する上での大きな障害になっていました。

本研究グループは、マイクロ波の代わりに周波数が5桁も高い光波のパルスを用いることにより、1ピコ秒~10ピコ秒 (1ピコ秒=10⁻¹²秒) という短い時間でスピンを制御することに成功しました。この方法を用いれば、超高速でスピン制御ができるだけでなく、個々のスピんに独立して光パルスを照射することで、同時に個別スピンを制御することが可能になり、大規模な量子コンピューターを構築していくうえで、有利な道が開けるものと期待されます。

本研究成果は、平成20年11月13日 (英国時間) 発行の英国科学雑誌「Nature」に掲載されるとともに、同年11月25日 (火) から28日 (金) まで奈良県新公会堂 (奈良市) で開催される「国際シンポジウム — 量子技術に関する物理 — (2008 International Symposium on Physics of Quantum Technology)」(実行委員長 山本喜久 教授) にて発表されます。国際シンポジウムの概要については、別紙を参照してください。

本成果は、以下の事業・研究分野・研究課題によって得られました。

戦略的創造研究推進事業 発展研究 (SORST) 物理・情報分野

研究課題名: 「光を用いた量子情報システムの研究」

研究者: 山本 喜久

(情報・システム研究機構 国立情報学研究所 教授/スタンフォード大学 教授)

研究期間: 平成15~20年度

本研究課題は、戦略的創造研究推進事業 国際共同研究事業 (ICORP) 「量子もつれプロジェクト」で得られた成果を発展させたものです。

<研究の背景>

量子コンピューターを実現するためには、量子情報を保存するスピンもしくは擬スピン（2準位原子など）を自由に制御する技術を開発しなければなりません。そのために、例えば、ジョセフソン素子^{注4}）や電子スピンを用いた量子コンピューターに対しては、2準位間のエネルギー差に共鳴するマイクロ波が用いられてきました。また、原子や分子、イオンを用いた量子コンピューターに対しては、狭帯域の2本のレーザー光が用いられてきました。いずれの方法でも、スピン制御には数ナノ秒～数十ナノ秒以上の時間を必要とします。スピンの保存された量子情報は、通常1マイクロ秒～10マイクロ秒（1マイクロ秒＝ 10^{-6} 秒）のデコヒーレンス時間^{注5}）で失われてしまいます。従ってこの場合、量子情報が消失してしまう前にできる演算の最大回数は1,000回以下に制限されます。これが量子コンピューターを実現する上での最大の障害でした。山本教授らのグループは昨年、この問題を解決する方法として、量子ドットと呼ばれる半導体ナノ構造（直径20ナノメートル、厚さ2ナノメートル程度の薄い半導体ディスク素子）に閉じ込められた電子スピンを1ピコ秒程度の光パルスで直接制御するアイデアと原理を提案しました [S. M. Clark, K. C. Fu, T. Ladd, and Y. Yamamoto, Phys. Rev. Lett. 99, 040501 (2007)]。

<研究の内容>

今回の実験は、このアイデアを実証したものです。まず、GaAs結晶中に埋め込まれたInGaAs量子ドットに、電子を1つだけトラップします。この素子を7テスラの直流磁場中に置くと、ゼーマン効果^{注6}）により、電子スピンのエネルギー状態（準位）はエネルギー差が26GHzとなる基底状態と励起状態に分裂します。この系には、電子スピンの基底状態からおおよそ300THz（1.5eV）だけ高いエネルギー側に第3のエネルギー状態（励起子状態：電子2個とホール1個からなる複合体）が存在します。実験では、まずこの電子スピンの励起状態と励起子状態に共鳴した3ナノ秒程度の光パルスを照射し、電子スピンを基底状態に初期化することに92%の確率で成功しました（図1）。次に、電子スピンの基底状態と励起子状態間のエネルギー差（300THz）よりも1THzほど小さいエネルギーの光子からなる1ピコ秒程度の時間幅を持った光パルスを照射して、電子スピンを回転させました（図2）。電子スピンを90°、もしくは180°回転させる $\pi/2$ パルス、 π パルスの実現にそれぞれ94%、91%の確率で成功しました。光パルスによるスピンの制御性を評価するために、2つの $\pi/2$ パルス光を時間 τ だけ離して照射し、電子スピンの状態を測定するラムゼー干渉^{注7}）と呼ばれる実験を行いました。電子スピンの測定は図1に示した初期化と同じ方法を用いて実現できます。結果は、図3に示すように理論的予測によく一致し、この超高速のスピン制御法が正しく動作していることが確認されました。

<今後の展開>

本研究成果により、電子スピンの状態は、極短光パルスを用いて1ピコ秒から10ピコ秒程度のゲート時間で自由に制御できることが実証できました。一方、電子スピンのデコヒーレンス時間の測定値は、これまで1～10マイクロ秒程度の値が報告されています。しかし、本研究グループは最近、電子スピンのデコヒーレンス時間（スピン緩和時間）は、理論的には10ミリ秒程度と非常に長いことを発見しました [K. C. Fu, W. Yao, S. Clark, C. Santori, C. Stanley, M. C. Holland, and Y. Yamamoto, Phys. Rev. B74, R121304 (2006)]。

今回、開発に成功した光パルスを用いたスピン制御技術を用いれば、このデコヒーレンス時間の理論限界値を達成できる可能性があります。これが実現されるとすれば、デコヒーレンス時間内に10億回もの演算を行うことができ、量子コンピューター実現の上での大きな障害が取り除かれることになります。

<参考図>

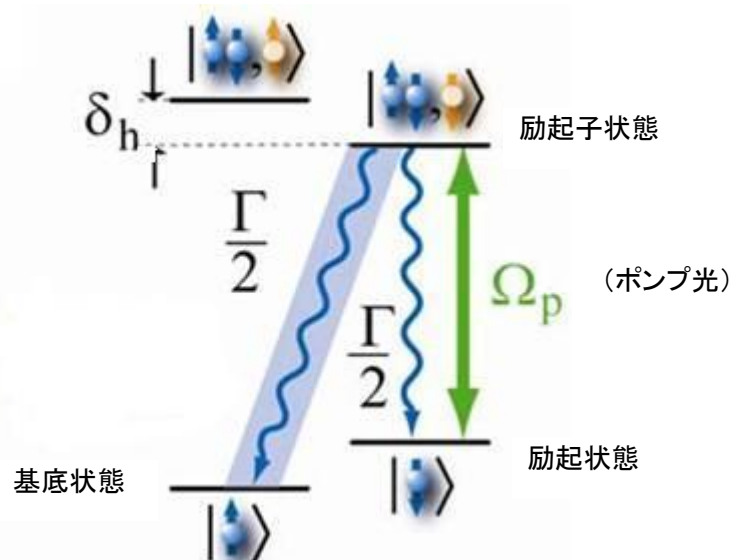


図1 光ポンピングによる電子スピンの初期化と測定

電子スピンの励起状態と励起子状態に共鳴した周波数 Ω_p のポンプ光を照射すると、量子ドットの電子スピンの励起状態にあった場合だけ、励起子状態に励起され、約100ピコ秒の寿命でフォトンを出し、基底状態もしくは励起状態に遷移します。このサイクルを約30回程度繰り返すと、ほぼ100%の確率で、量子ドットは電子スピンの基底状態に初期化されます。

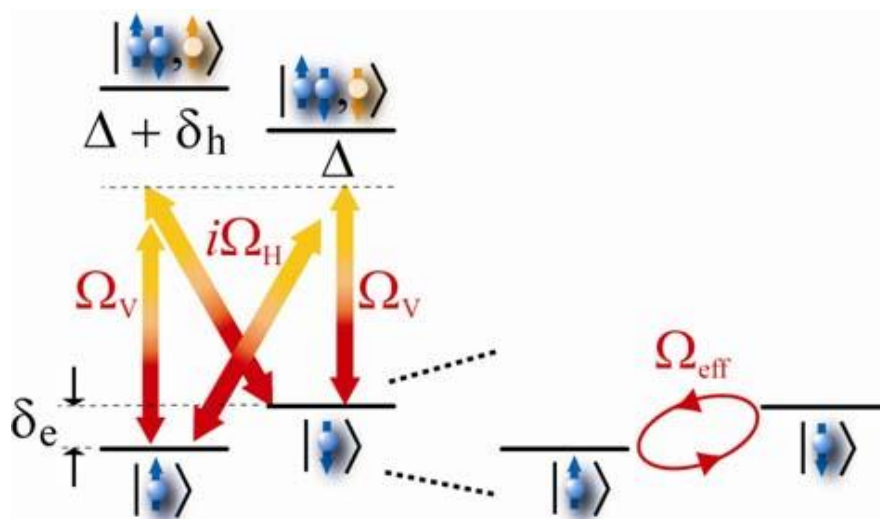


図2 光パルスによる電子スピンの回転

電子スピン状態と励起子状態のエネルギー差（300 THz）よりも1 THz ほど小さいエネルギーを持った光子からなる1 ピコ秒程度の光パルスを照射すると、非共鳴誘導ラマン散乱と呼ばれる過程が起こり、電子スピンは基底状態と励起状態の間を周期的に遷移します。光パルスのエネルギーを制御することにより、基底状態と励起状態の任意の線形重ね合わせ状態が生成できます。

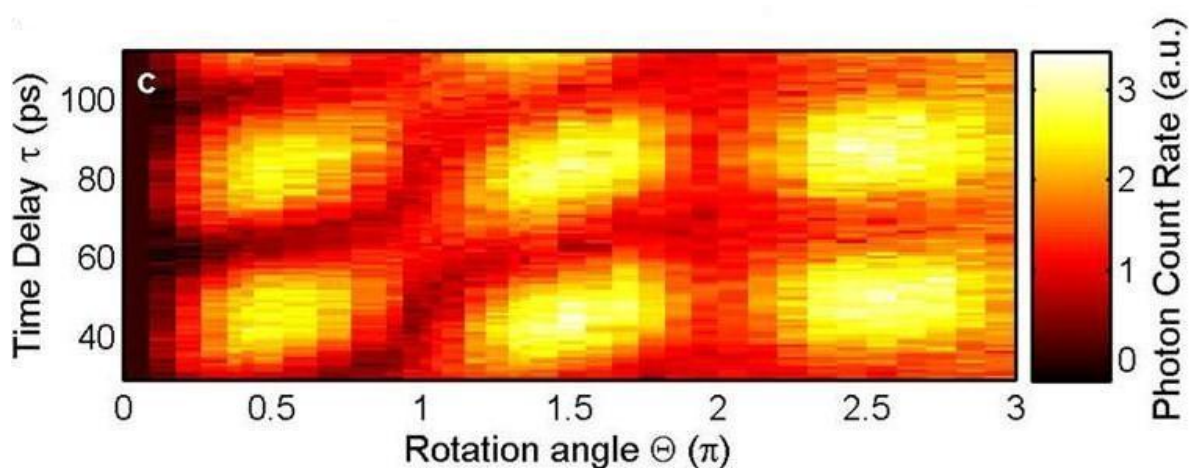


図3 電子スピンのラムゼー干渉パターン

2つの光パルスが基底状態と励起状態の50%ずつの線形重ね合わせ状態をつくる（ $\pi/2$ パルス）と、2つのパルス間の時間差 τ に対して電子スピンは基底状態（暗）と励起状態（明）の間を周期的に変動します。

<用語解説>

注1) 電子スピン

電子は右回りか左回りに自転しており、これにより上向きか下向きに磁場が発生します。前者をアップスピン、後者をダウンスピンといいます。

注2) 量子コンピューター

量子力学の線形重ね合わせ状態を用いれば、これまでは計算が困難であるとされてきた問題を解くことが可能であると数学的に証明されています。これをどのようにして実現するかについて世界各国で研究開発が行われています。

注3) 電子スピン共鳴法

電子のゼーマン分裂周波数（基底状態と励起状態のエネルギー差に相当する電磁波の周波数）に共鳴したマイクロ波を照射すると、電子スピンはマイクロ波の振動（磁場）の方向を回転軸として回転を始めます。この現象を利用して電子スピンの状態を制御する方法をいいます。

注4) ジョセフソン素子

超伝導体を薄い絶縁膜で挟んだトンネル接合をいいます。非線形なインダクタンス素子として振る舞い、様々な目的に応用されていますが、量子コンピューターを構成する素子としても研究開発が行われています。

注5) デコヒーレンス時間

スピンに保存された量子情報が消失してしまう時間のスケールです。基底状態と励起子状態の間の位相関係が外部からの擾乱により乱されることにより起こります。

注6) ゼーマン効果

電子を直流磁場中に置くと、アップスピンとダウンスピンは異なった磁気エネルギーを獲得し、エネルギー差が生じます。これをゼーマン効果といいます。

注7) ラムゼー干渉

2準位原子やゼーマン分裂した電子スピンを、第1の $\pi/2$ パルスで基底状態と励起状態の線形重ね合わせ状態に準備します。基底状態と励起状態は異なったエネルギーを持つため、2つの状態間の位相はその後時間の経過と共に周期的に回転します。そのため、第2の $\pi/2$ パルスを照射する時刻を変化させると、最終状態は基底状態と励起状態の間を周期的に変動します。この現象をラムゼー干渉といいます。

<論文名>

“Complete quantum control of a single quantum dot spin using ultrafast optical pulses”

(極短光パルスを用いた単一量子ドットスピンの完全な量子制御)

<お問い合わせ先>

<研究に関すること>

山本 喜久 (ヤモモト ヨシヒサ)、Timothy Byrnes (ティモシー・バーンズ)

情報・システム研究機構 国立情報学研究所 情報学プリンシプル研究系

〒101-8430 東京都千代田区一ツ橋 2-1-2

Tel : 03-4212-2506 Fax : 03-4212-2641

E-mail : yyamamoto@nii.ac.jp (山本)、tbyrnes@nii.ac.jp (Timothy)

<JSTの事業に関すること>

内田 信裕 (ウチダ ノブヒロ)

科学技術振興機構 戦略的創造事業本部 研究推進部

〒102-0075 東京都千代田区三番町 5 番地 三番町ビル

Tel:03-3512-3526 Fax:03-3222-2065

E-mail:sorst@jst.go.jp

<広報担当>

科学技術振興機構 広報・ポータル部 広報課

〒102-8666 東京都千代田区四番町 5 番地 3

Tel : 03-5214-8404 Fax : 03-5214-8432

E-mail : jstkoho@jst.go.jp

情報・システム研究機構 国立情報学研究所 企画推進本部 広報普及チーム

〒101-8430 東京都千代田区一ツ橋 2-1-2

Tel : 03-4212-2131 Fax : 03-4212-2150

E-mail : kouhou@nii.ac.jp

戦略的創造研究推進事業
「国際シンポジウム ー量子技術に関する物理ー」
(2008 International Symposium on Physics of Quantum Technology)について

このシンポジウムは、戦略的創造研究推進事業の各プログラム（CREST、ERATO、ICORP、SORST、さがけ）の枠組みを超えて量子技術に関する研究を推進する研究代表者およびそのライバルたる海外トップ級の研究者を一堂に集め、最新の研究成果を持ち寄り討論するとともに、これからの量子技術に関する研究・技術開発の方向を考えるために開催されるものです。シンポジウムでは、これら講演に加えポスターセッションにて約150件の研究発表も行われます。

開催日時：平成20年11月25日（火）～28日（金）

午前9時30分～午後8時（日によって終了時間は異なります）

会 場：奈良県新公会堂（奈良県奈良市春日野町101）

主 催：科学技術振興機構（JST）

共 催：情報・システム研究機構 国立情報学研究所（NII）

後 援：文部科学省、日本物理学会、電子情報通信学会

参 加 費：無料 ※ただし事前申込が必要です。

参加申込方法など詳細については、下記のCREST「量子情報処理システムの実現を目指した新技術の創出」研究領域ホームページを参照してください。

ホームページ URL：<http://www.qis.crest.jst.go.jp/5topics.html#nara2011>

<シンポジウムに関するお問い合わせ先>

科学技術振興機構

CREST「量子情報処理システムの実現を目指した新技術の創出」領域事務所

国際シンポジウム事務局

〒102-0075 東京都千代田区三番町5番地 三番町ビル

Tel：03-3512-3542 Fax：03-3222-2063

E-mail：ryosijim3@qis.jst.go.jp