【助成 38-20】

人工分子の軌道を利用した桁違いに速い単一電子スピン量子操作の実証とその物理の研究

研究者 大阪大学産業科学研究所 助教 藤田 高史

[研究の概要]

情報素子の大規模集積化の観点で、次世代の情報技術である量子コンピュータの基盤として半導体中の電子スピンが注目されている。単一電子スピンは、状態として2つの準位(↑スピン、↓スピン)をとり、極低温の条件では情報源として良く定義されている。この単一の物理量を量子力学的に扱うことで、情報を並列に処理でき、指数関数的な計算量の増大が期待される重ね合わせ状態を作ることができるが、現状では量子状態の破壊を防ぐために、材料の開発から考え直されている。本研究では、これまで単一スピンに関しては着目されていなかった分子軌道を独自に利用し、重ね合わせ状態の準備時間を高速化することを目的としこれに成功した。これは、既存の材料系においても広く量子的な機能を活かせる新たな物理的手法の提供を意味する。

〔研究経過および成果〕

電子スピンの2状態を量子力学的に扱う場合、エネルギーを失う縦緩和時間 (T_1) と、量子力学的な位相の整合性が取れなくなる横緩和時間 (T_2) が良く現れ、通常 T_1 の方が圧倒的に長い。量子コンピュータへの応用の観点では T_2 、とりわけ答えを得るために必要とする繰り返し測定毎に発生する揺らぎも取り込んだ位相緩和時間 (T_2^*) が議論の対象となる。本研究で用いる GaAs を材料とした場合は $T_2^*=20$ ns、最近開発が進められている Si の場合は $T_2^*=2$ μs が報告されている。この開発により万能型量子コンピュータとして量子誤り耐性を持たせるために必要な 99% のスピン操作精確性が得られている。

一方で、精確性の議論でもう一つ大事な性質がスピン操作速度である。例えば、重ね合わせ状態を作る最も単純な量子演算を実現する時間 ($T_{\pi/2}$) は、微小金属コイルを隣接させることで発生する振動磁場を利用して $T_{\pi/2}=100$ ns 程度、特殊な形状をした微小磁石を用いて $T_{\pi/2}=2.5$ ns が報告されている。このよう

な追加の物質を使わない場合のスピン操作、つまり 半導体材料内部の物理的な相互作用のみ用いる手 法($T_{\pi/2} = 200$ ns 程度と遅い)も存在しており、その将 来的な利便性から本研究ではこの相互作用(固体特 有のスピン軌道相互作用)を高めて利用することに注 力した。

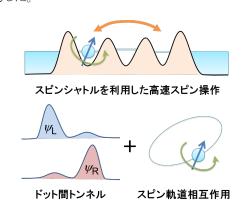


図1.分子様軌道と内部スピン軌道相互作用を 組み合わせたスピン操作の概念図

半導体中の電子スピンを単一レベルで閉じ込め、 測定し、スピン操作するためには、適切に設計され、 微細加工されたナノスケールの半導体―金属電極の 構造、いわゆる「量子ドット」が必要である。20 年以上 前から近年まで、量子演算用に開発されてきた量子ドットは、単一量子ドットや2重量子ドットで完結する量子操作を研究の対象としてきた。私の先行研究ではこの範囲を拡張し、3重や4重量子ドットで空間的に電子スピンを移動させる電気的な手法を研究し、最近ではスピンを移動させながら位相情報を98-99%保つ「スピンシャトル」法を見出した。この独自技術を活用して、先述のスピン操作速度の向上を目指した(図1)。

スピンシャトル法を、スピン軌道相互作用を介してスピン操作に用いるために、先行研究と比較して特に次の点を考慮した。1. スピン軌道相互作用を効果的に利用するため半導体結晶方位に対して適切に配置した1次元量子ドット、2. 電子スピン操作を可能にする共鳴周波数(NMRと似た原理)よりも十分に速い量子ドットの間のトンネル効果図。これらの新要素を取り入れるために、試料の再設計と、広範精密な電圧制御が必要であったため、本助成を活用させて頂いた、厚く御礼申し上げる。

実験は、量子測定用の極低温を長時間実現する 無冷媒希釈冷凍機システムの上に、量子ドットの制 御やスピンの操作・測定を可能にする、定電圧から 20GHz 帯までの多端子合波システムを中心とした環 境を構築しながら利用させていただいた。

本実験は当初、2重ドット(例えるなら1電子水素分子軌道)での高速化されたスピン操作の兆しが得られていたものの、桁違いの高速化を得る段階になってスピン信号の消失や、理論的に想定していた相互作用の強さが実際には得られない振る舞いを見せていた。

継続して量子ドットの条件や印加電圧の環境など を調べ、数値シミュレーションとも照らし合わせていっ た結果、予想に反して3重量子ドットになって初めて信号の消失なく40倍のスピン操作速度(Accelerated spin resonance)を達成することが明らかになった(図2)。

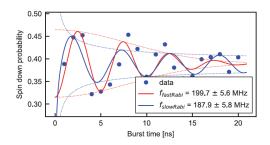


図2. 達成された桁違いに速いスピン操作

物理的には、電子スピンを移動させる距離に比例 してスピン操作速度が向上するものと予測されていた が、今回得られた実験結果から初めてそれ以外の要 因、例えば、印加高周波の熱が信号強度を減らす効 果、反対に極端に強いトンネル効果によってその悪 影響が緩和される効果(Noise robustness)、2重では なく3重量子ドットの分子様の軌道にしか存在しない 安定な領域による効果などを定量評価できた。

これらの性質は、様々な半導体材料やナノ構造に おける電子スピン制御の新たな指標となる可能性を 秘めており、将来的な新奇物性研究や多体量子状 態発現に寄与するものと考える。

[発表論文]

- T. Fujita, Y. Matsumoto, A. Ludwig, A.D. Wieck,
 A. Oiwa, "Accelerated electric-dipole spin
 resonance in a quantum dot array" (2021). Recent
 Advances in Semiconductor Qubits 招待講演等
- Y. Matsumoto, <u>T. Fujita</u> et al., "Noise-robust classification of single-shot electron spin readouts using a deep neural network" npj Quantum Information 7, 136 (2021).