


IV族半導体量子構造におけるスピノヒーレンス工学の開拓

	研究代表者	東京工業大学・工学院・准教授 小寺 哲夫（こでら てつお）	研究者番号:00466856
	研究課題情報	課題番号：23H05455 キーワード：スピノ量子ビット、半導体量子ドット、シリコン、ゲルマニウム	研究期間：2023年度～2027年度

なぜこの研究を行おうと思ったのか（研究の背景・目的）

●研究の全体像

量子コンピュータは、量子的な効果を計算に応用することで、現在のコンピュータとは比較にならないほどの高速処理能力を持つようになることが期待されるコンピュータで、近年盛んに研究が行われている。現在の情報化社会を支える半導体材料である、シリコンやゲルマニウム等を利用して量子コンピュータを実現するには、電荷の持つスピンという量子的な自由度の性質に関する統一的な理解が重要となる。シリコンやゲルマニウムだけでなく、それらを混ぜ合わせた混晶にも着目し、スピノが量子情報を保っているスピノヒーレンス時間を大幅に伸ばす可能性を探り、その制御原理を確立して、スピノヒーレンス工学として学理構築を目指す。

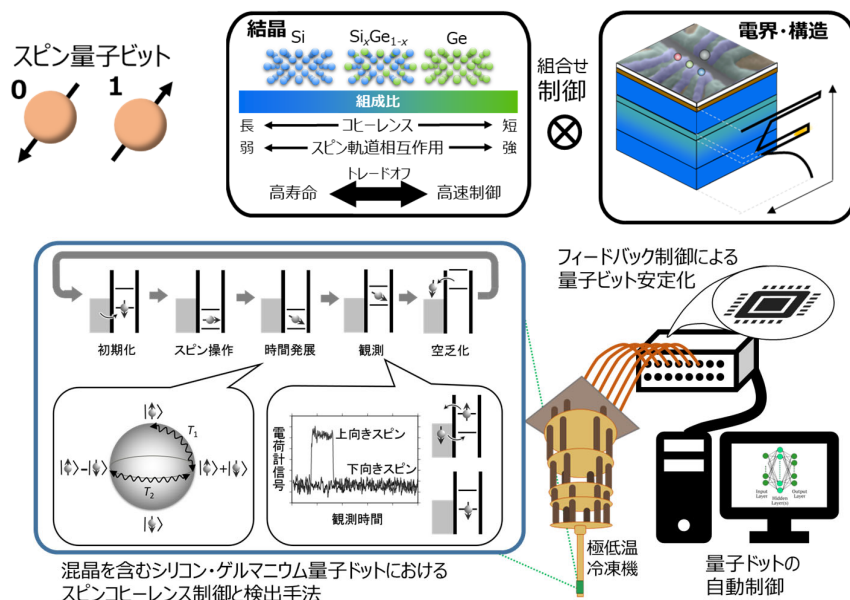


図1 研究全体のイメージ図

●研究背景と目的

半導体量子ドットと呼ばれるナノスケールの量子構造（その直径は約100ナノメートルで、髪の毛の太さの1000分の1程度）中の電子の持つスピン（電荷の持つ磁気的な性質）は、比較的良質なコヒーレンスを持つ。さらに、現在のコンピュータの心臓部で利用されるような成熟した半導体集積技術に応用することができるため、量子ビット（量子コンピュータにおける情報の単位）の大規模集積が期待されている。特に、シリコン量子ドット中のスピノを量子ビットとして用いた量子コンピュータの研究開発は世界中で推進され、開発競争が熾烈になっている。IntelやIBM、IMEC、Letiなども加わり、集積化、工業化を目指した開発が進められている。我々も誤り率が0.1%以下の高精度スピノ操作や、量子誤り訂正の実現など、シリコン量子ドットの量子ビット応用に関して、世界に先駆けた原理検証を行ってきた。

一方、ゲルマニウムの量子ドット系では、スピノと電界の結合に相当するスピノ軌道相互作用がより強く、交流磁場に比べて扱いやすい交流電界による高速なスピノ操作が期待されている。実際にシリコン系のスピノ量子ビットに比べて高速なスピノ操作が実現され始めているが、強いスピノ軌道相互作用に起因するコヒーレンスの劣化が生じていることがわかってきた。このようなトレードオフ（図1上）を解消するために、スピノヒーレンスの根本の物理を解明したうえで、半導体材料・構造を最適化することが重要であると考えられる。

本研究の目的は、量子構造中のスピノヒーレンスに関わる根本の物理を解明して、その制御原理を示すことにある。我々はこれまでの研究で得た知見から示唆された、量子構造に特有の物理現象が存在する可能性に着目し、以下のような独自のアプローチを取る。まず、シリコン、ゲルマニウム、及びその混晶の量子ドット系に対して、構築してきたダイナミクス測定技術を適用する。これにより、スピノ軌道相互作用の制御、スピノ緩和への影響解明、スピノヒーレンスの定量評価を実施する。また、フィードバック制御によるスピノ量子ビット安定化法や、情報科学アプローチを用いた電圧調整の自動化、高速化技術を新たに開発し、半導体量子構造に普遍的スピノヒーレンスの物理を導き出すことを目指す。

この研究によって何をどこまで明らかにしようとしているのか

ナノ構造のスピノヒーレンスに影響するスピノ軌道相互作用と電気的ノイズに注目して、IV族半導体量子構造におけるスピノヒーレンス工学を開拓する。IV族半導体であるシリコン、ゲルマニウムとその混晶系を用いて量子ドットを作製し、電界による電荷の形状制御と組み合わせる。これにより、材料に依存する物性パラメータや量子構造の非対称性の制御を行い、半導体量子コンピュータの開発に資する高寿命（コヒーレンス）と高速制御を両立するスピノ量子ビット実現のための指針を得る。

●具体的な研究項目

- ① IV族半導体量子構造中の特異なスピノ軌道相互作用の解明と制御  
スピノの高精度測定技術を用いた電界制御によるスピノ軌道相互作用への影響の定量的評価
- ② シリコンゲルマニウム混晶系量子ドットの開発とスピノヒーレンス測定  
世界初となるシリコンゲルマニウム混晶系量子ドットの開発の試みとそのスピノヒーレンスの定量比較
- ③ スピノ量子ビットの電圧調整自動化・高速化技術の開発  
情報科学アプローチを用いた量子ビット列の調整プロセスの自動化や高速化
- ④ フィードバック制御によるスピノ量子ビット安定化法の開発  
電気的ノイズが電子状態およびスピノ状態に与える影響を評価するための安定化制御

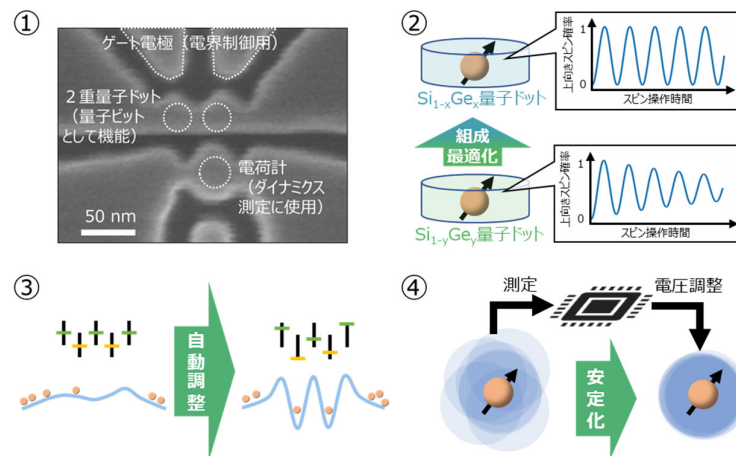


図2 具体的な研究項目を示す図