

半導体量子コンピュータのための量子古典インターフェースの開発 Development of the Quantum-classical Interface for Semiconductor Quantum Computers

H31助自66

代表研究者 中 島 峻 国立研究開発法人 理化学研究所 創発物性科学研究センター
研究員

Takashi Nakajima

Research Scientist, Center for Emergent Matter Science (CEMS), RIKEN

Quantum computing is among the most promising information processing technologies for future demanding applications. At the heart of quantum computing is a quantum bit, which represents data in the form of the superposition of 0 and 1. This allows quantum computers to utilize quantum entanglement and process information much faster than its classical counterpart. One of the drawbacks of a quantum bit is that it is easily disturbed by electric or magnetic noise and loses its information quickly.

In this work, we tackled this problem by developing a carefully designed quantum-classical interface where a quantum bit interacts with a classical control circuit in the feedback loop. We implemented feedback algorithms on an FPGA to suppress the noise effects on an electron spin qubit in a semiconductor quantum dot device. First, we rapidly probed the magnetic noise on the qubit and adjusted the microwave frequency used in the qubit control to compensate for the noise effect. This feedback control actively cancelled the noise-induced dephasing effect and significantly increased the qubit coherence time from less than 30ns to more than 760ns. As a result, the error rate in the qubit control was reduced to less than 1%. Secondly, we also developed a feedback control scheme to improve the error in the qubit initialization. We utilized fast quantum non-demolition measurement to detect the initialization error without losing the measured qubit. This allowed us to improve the detection error down to 5% by repeating the measurement. The initialization error is then expected to be reduced to 8% by using the feedback control based on the detected initialization errors.

We conclude that the feedback control is useful to improve essential qubit figures of merit and expect that it will pave the way for scalable semiconductor quantum computers.

研究目的

近年、日常生活に根ざしたビッグデータの解析、エネルギー・環境問題の解決、創薬や分子化学のシミュレーション、さらには金融に到るまで、情報処理の需要は増加の一途を辿っている。その一方で、これまでの情報処理能力の向上を支えてきた半導体デバイスの微

細化技術は限界を迎えつつあり、従来とは異なる新たな情報処理パラダイムの実現が求められている。その有力な候補の一つが量子力学の原理を活用する量子コンピュータであり、世界的な研究が加速し注目を集めている。

しかし、量子の情報を担う「量子ビット」はノイズに対して非常に敏感で脆く、このことが量子コンピュータの実用化を阻む大きな課題

である。ノイズによるエラーを補正して信頼性のある情報処理を達成するためには、量子誤り訂正などの特別なプロトコルを実行できる電子回路との深い融合が必要と考えられる。

そこで本研究では、半導体ナノ構造中の単一電子スピンを量子ビットとして用いる半導体量子コンピュータを実現すべく、このような融合を可能にする量子・古典インターフェースを開発する。特に量子ビットの主要なエラーである位相エラーと初期化エラーを、専用回路からのフィードバック制御によって改善することを目指す。最先端のマイクロ波回路と論理回路によるリアルタイム制御を実装し原理実証を行うことで、量子・古典融合デバイスによる情報処理の可能性を開拓する。

概 要

現在広く普及しているデジタルコンピュータ（量子コンピュータとの対比で「古典」コンピュータと呼ぶ）では、情報の単位として0か1の二値のみを取り得る「ビット」を扱い、多数のビットの組み合わせでデータを表現する。このシンプルさのおかげでデジタル回路はノイズの影響を受けにくく、比較的簡単に論理演算を実現できるため、現在の大規模集積化回路の隆盛につながった。これに対して量子コンピュータでは、情報の単位として0と1を任意の割合で重ね合わせた「量子ビット」を用いる。この重ね合わせと、複数量子ビットの相関である「量子もつれ」が量子コンピュータの膨大な計算能力の源であると考えられている。しかしながら重ね合わせの状態にある量子ビットはアナログ的な側面を持つこととなり、様々なノイズの影響を受けやすい。このノイズの影響を如何にして克服するかが、量子コンピュータ実用化の鍵を握っている。そこでこれまでに、ノイズを減らすための様々な物理系・材料の研究や、ノイズ

の影響を受けにくい量子ビット操作方法の研究が数多く行われてきた。特に本研究が対象とする半導体電子スピン量子ビットに関しては、従来最も一般的だったGaAsベースの基板から、近年Siベースの基板、さらには同位体制御をした ^{28}Si ベースの基板へと材料の移行が進んだことにより、ノイズが劇的に低減されている。

本研究では、これら伝統的な手法とは異なる相補的なアプローチによって量子ビットにおけるノイズの影響の低減を試みた。すなわち、アナログ電子回路でノイズ抑制の手法として広く使われているフィードバック制御を応用することにより、量子ビットに生じる様々なエラーの抑制が可能であることを実証した。具体的には、量子ビットのメモリとしてのエラーと、量子ビットの初期化時のエラーについて、フィードバック制御による抑制実験を実施し、その効果を検証した。

量子ビットのメモリ時間はコヒーレンス時間とも呼ばれ、量子ビットの量子的な性質が保たれる時間のことを指す。量子コンピュータの計算操作は基本的にこの時間内に終える必要があるので、コヒーレンス時間は長ければ長いほど良い。電子スピン量子ビットのコヒーレンス時間は磁気雑音（磁場の時間変動）の大きさによって決まっており、磁気雑音を減らすことができればコヒーレンス時間を伸ばせることになる。そこで本研究では量子ビットの感じる磁気雑音を測定し、その影響をリアルタイムで補正するように量子ビットを制御することで、コヒーレンス時間の改善効果を検証した。この仕組みは、アクティブノイズキャンセリングヘッドフォンを想像してもらうとわかりやすい。つまり、環境の雑音をマイクで計測し、その雑音が耳に届くよりも早く逆位相の音をスピーカーから出して雑音を打ち消すことができれば、雑音のない静寂な環境を再現することができる。我々は

GaAs電子スピン量子ビットにこの方法を適用することにより、磁気雑音を1/30程度に低減し、コヒーレンス時間を30ナノ秒から760ナノ秒へと大幅に向上させられることを実証した。その結果、量子ビットの操作エラーを1%以下に抑制し、通常は検出が難しいわずかな電気ノイズの影響を捉えることができるようになった。

一方量子ビットの初期化に関しても、フィードバック制御によるエラーの抑制を検討した。量子ビットを0に初期化する操作の後、再度量子ビットの状態を測定して、もしエラーによって量子ビットが1になっていれば量子ビットを反転する操作をすれば良い。これ自体はシンプルなことだが、量子ビットの測定に特有の困難として、測定後には量子ビットの状態が失われてしまうこと、測定自体にもエラーがあることが挙げられる。そこでこの2つの困難を解決する手法として、我々は量子非破壊測定を用いることを検討した。量子非破壊測定を利用すると、量子ビットを失うことなく測定を繰り返すことができ、測定および初期化の精度を向上させることができる。この手法により、量子ビットの測定精度95%、初期化精度92%を達成することがわかった。

以上の結果から、量子ビットと古典制御回路とを密接に連携させ一体として扱うことが、量子ビットの実効的な性能向上に大いに役立つことが示された。この手法を大規模な量子ビット素子に組み込むことにより、スケーラブルな量子コンピュータの実現に一步近づくことができるだろう。

－以下割愛－