

シリコンスピン量子ビットのためのマイクロ波技術

Microwave Technology for Silicon Spin Qubits

中島 峻[†]Takashi NAKAJIMA[†][†] 理化学研究所 創発物性科学研究センター

概要

シリコンスピン量子ビットの制御には、目的に応じて数 GHz から 40 GHz 程度までのマイクロ波が用いられる。周波数の低い制御信号の方が取り扱いが容易だが、比較的高温（絶対温度 1K 程度）での量子ビット動作を狙う場合には高い周波数が必要になる。スピン量子ビットの潜在的なコヒーレンス時間は長く、マイクロ波制御信号の品質が量子ビットのエラーに重大な影響を与えるため、正確な制御信号の生成・増幅・伝送を実現するシグナル・インテグリティの管理が重要である。これに加えて量子ビットデバイスのマイクロ波応答に起因するエラーに対しても、制御信号側の工夫により対処する必要がある。たとえば共鳴周波数の異なる複数の量子ビットを周波数多重化した信号によって制御する際には、パルス波形のエンベロープを調整して帯域クロストークを抑える必要があり、量子ビットの制御時間・発熱などのトレードオフを考慮しなくてはならない（下図左）。

このような柔軟な制御を実現するための回路設計の基本方針は、「広い帯域でフラットな応答の信号伝送路を実装すること」と、「正確で自由度の高い制御波形を生成すること」の二点に集約される。前者については希釈冷凍機内の同軸配線、量子ビットチップを搭載するプリント基板、信号増幅回路の設計において配慮する必要がある。後者については従来の IQ 変調器や結合器を用いたアナログ回路からデジタル直接合成(DDS)方式の信号発生回路に移行することで、エラーが無く柔軟な波形生成が可能となった（下図右）。これらのマイクロ波制御技術に加え、量子ビットの読み出しや 2 ビットゲート操作に使われる DC-1 GHz 帯の信号制御についても紹介する。

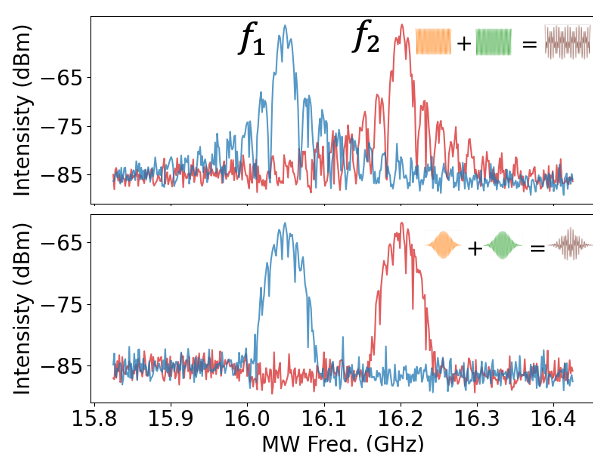


図 量子ビット制御パルスのスペクトル拡がり

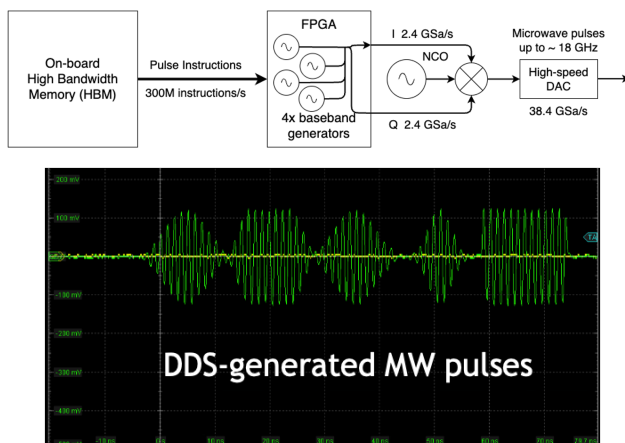


図 DDS 方式による正確かつ柔軟な波形生成

Abstract

Silicon spin qubits are typically controlled using microwave signals at frequencies ranging from a few GHz to 40 GHz. High-fidelity qubit operation requires the generation and transmission of microwave pulses with precisely controlled envelopes to fully exploit the long coherence times of spin qubits. We discuss a broadband signal chain for pulse transmission and microwave-generation circuitry based on direct digital synthesis (DDS) for silicon spin-qubit control.