

# Si量子ドット中の単一電子スピンを用いた量子コンピューターの実現へ向けて

川上恵里加<sup>†</sup> (沖縄科学技術大学院大学 erika.kawakami@oist.jp)

—Keywords—

1997年, DiVincenzo は量子コンピューターを実現するために, 量子ビットが満たすべき5つの条件を提示した. 1. 多量子ビットへの拡張性, 2. 状態の初期化, 3. 十分に長いコヒーレンス時間, 4. 任意の量子ゲートの実現, 5. 演算結果の読み出し, である.

以上の条件を満たす量子ビットを実現するために, 様々な物理系を用いて研究が進められている. その中でも, 1998年にLossとDiVincenzoが提案した半導体量子ドット中の単一電子スピンを量子ビットとして用いる方法は, 半導体集積技術を生かして多量子ビットへの拡張性に優位であろうと期待されている.

2000年代には, III-V族化合物半導体であるGaAsに作製された量子ドット中の電子スピンを制御できることが実験的に示された. しかし, Ga原子, As原子の持つ核スピンの作る局所磁場が時間的に揺動することによって電子スピんに起こるデコヒーレンスが問題視されている. デコヒーレンスとは, 量子コンピューターのために必要不可欠な量子重ね合わせ状態のコヒーレンスが失われてしまう現象で, 量子コンピューター実現のためにはコヒーレンス時間(コヒーレンスが失われてしまうまでの時間)が量子計算のために必要な時間よりも十分に長くなければならない.

量子ドット中の電子スピンと相互作用する核スピンの数が少なければ, より長いコヒーレンス時間が見込める. III-V族元素はすべての同位体が核スピンを持つが, IV族元素は核スピンを持つ同位元素の天然存在比が低い. そこで近年では, GaAsに代わり, IV族半導体であるSiやGeで作製される量子ドットを用いる研究が盛んに行われるようになってきた.

本稿では, 表面電極に与えられた電圧に

よりSi中に作製された量子ドット中の単一電子スピンを量子ビットとして用いるための最近の研究について報告する.

2010年代はじめには, 複数のグループが, 核スピンを持つ同位体の組成比が4.7%である天然Siに量子ドットを作製し, 量子ドット中の単一電子スピンの初期化, 制御, 読み出しに成功した. このときのコヒーレンス時間( $T_2^*$ )はおよそ1マイクロ秒で, これはGaAs量子ドット中の電子スピンのコヒーレンス時間よりも100倍程長い. さらに, 同位体制御により, 核スピンを持つ同位体の組成比を0.08%まで下げたSiに作製された量子ドット中の電子スピンは, 天然Siを用いた場合よりさらに長い, 120マイクロ秒の $T_2^*$ が報告されている.

任意の量子ゲートは, 1量子ビットに対する任意の量子ゲートと2量子ビットゲートのうちの1つ(例えばCNOTゲート)を組み合わせて実現することができる. Si量子ドット中の電子スピんに対し, 1量子ビットに対する任意の量子ゲート, CNOTゲートを作用させることができることは既の実験的に示されている.

量子計算のために必要な時間よりも, コヒーレンス時間が十分に長いためには, 量子誤り訂正を行うために必要な時間内に起こるデコヒーレンス, または量子ゲートを作用させることに起因する誤りが, 量子誤り訂正により訂正できる範囲内であることが必要条件である. Siに作製された量子ドット中の電子スピんに作用する1量子ビットに対する任意の量子ゲートは, この必要条件を満たすことが実験的に示された.

今後の課題は, 2量子ゲートについても上記の条件を満たすこと, 初期化, 読み出しにかかる時間を短くすること, 初期化, 読み出しの忠実度を上げる(誤りを下げる)こと, 多量子ビットへの拡張である.

## 量子ビット:

従来のコンピュータの情報の最小単位であるビットに対して, 量子情報の最小単位( $|0\rangle$ と $|1\rangle$ )の波としての重ね合わせ,  $C_0|0\rangle + C_1|1\rangle$ を量子ビットと呼ぶ.

## コヒーレンス時間:

量子コンピューターのために必要不可欠な量子重ね合わせ状態の位相が保たれている(コヒーレントである)時間. 通常, 量子重ね合わせ状態を準備した時と比べ, 位相が保たれている状態の確率が $1/e$ に落ちるまでの時間をコヒーレンス時間と呼ぶ. NMRの分野で横緩和時間(もしくはスピン-スピン緩和時間)と呼ばれるものと実質的に同じである. 5章で述べられるように, スピンエコー法によってコヒーレンス時間を延長することができる. このような方法によって延長されたコヒーレンス時間を $T_2$ , 延長されていない内在的なコヒーレンス時間を $T_2^*$ と呼ぶ.  $T_2$ と区別するために,  $T_2^*$ をデフェージング時間と呼ぶこともある.

## 核スピンの作る局所磁場:

量子ドット中の電子スピン $S$ と核スピン $I_j$  ( $j=1, 2, \dots, N$ )間の超微細相互作用(フェルミ接触相互作用)は $H = \sum_{j=1}^N A_j \mathbf{S} \cdot \mathbf{I}_j$ で表される. ここで, 電子の波動関数を $\psi_r$ , 核スピンの座標を $\mathbf{R}_j$ とすると, 結合定数は $A_j \propto |\psi(\mathbf{R}_j)|^2$ である. GaAs量子ドットの場合, 量子ドット中の電子は,  $N=10^6$ 程度の核スピンと無視できない大きさの相互作用をする. この結果, 電子スピンの上向き状態と電子スピンの下向き状態のエネルギー準位差が変化するため, 電子は核スピンの中心位置に局所的な磁場を引き起こしたかのように感じる. 核スピンの磁気双極子相互作用などにより, 核スピンの方向が時間的に揺動すると, 核スピンの引き起こす局所磁場も時間的に揺動し, これが電子スピンのデコヒーレンスの原因となる.

## CNOTゲート:

量子コンピューター中で行われる量子計算のために必要不可欠な量子ゲートの1つ, 2つの量子ビットのエンタングルメント状態を生成する量子ゲートである.

<sup>†</sup> 前所属: デルフト工科大学