

## 【助成 38 -16】

### 固体量子コンピュータモデル Si:P の実演に向けた $^{31}\text{P}$ 核のスピンダイナミクス解明

研究者 福井大学遠赤外領域開発研究センター 助教 石川 裕也

#### 〔研究の概要〕

固体量子コンピュータ (QC) デバイス候補である希薄ドープ半導体 (Si:P) の実用化に向けた重要な課題は、量子ビットとして扱う  $^{31}\text{P}$  核のスピンダイナミクスに関連する情報の取得である。初期化等の演算実施には、 $^{31}\text{P}$  核の磁気的な挙動を知る必要があるが、希薄さのため核磁気共鳴 (NMR) による直接観測例は無い。本研究では  $^{31}\text{P}$  核の希薄さを克服する手法として、電子スピン共鳴 (ESR) による動的核偏極効果を用いた NMR (DNP-NMR) により  $^{31}\text{P}$  の核磁化を熱平衡状態に比べ相対的に増幅させることで直接観測に挑戦した。高効率なミリ波照射及び高感度な NMR 測定が可能な平面型コイル (meanderline) を組み込んだ ESR/NMR 二重磁気共鳴用共振器を開発し、Si:P が QC として機能する超低温・高周波領域 ( $T \leq 300 \text{ mK} \cdot H > 3 \text{ T}$ ) において  $^{31}\text{P}$ -DNP-NMR 測定により  $^{31}\text{P}$  核スピンの直接観測に世界で初めて成功した。

#### 〔研究経過および成果〕

本研究の目的は、Kane により提案された Si:P モデルを用いた量子コンピューティング実演に向け量子ビットとなる  $^{31}\text{P}$  核スピン信号を DNP-NMR 効果による直接観測を世界に先駆けて行い、 $^{31}\text{P}$  核のスピンダイナミクスを明らかにすることである。目的達成に向け、本研究では、超低温・高周波領域 ( $T \leq 0.3 \text{ K} \cdot H > 3 \text{ T}$ ) において使用可能な二重磁気共鳴用共振器を開発し、DNP により  $^{31}\text{P}$  核の偏極度を上げる事により核磁気共鳴信号の直接観測を目指した。

本研究では、図 1 に示すような、Fabry-Pérot 型共振器(FPR)内に平面型コイルを組み込んだ二重磁気共鳴用共振器を開発した。FPR は球面-平面の 2 枚のミラーによって構成されており、平面側のミラー下部に矩形型の NMR コイル”meanderline”を設置したものである。測定対象である Si:P 試料は厚み  $260 \mu\text{m}$  ほどの平板形状をしているため、効率良く NMR 用 RF を入射するため meanderline の

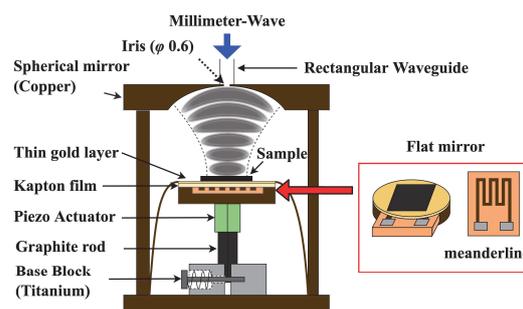


図 1. FPR 内に平面型コイル”meanderline”を組み込んだ二重磁気共鳴用共振器の概要。

開発を行った。ESR/NMR 双方の条件を満たす鍵となるのは、試料下部の平面ミラーとして用いているカプトンフィルム上にスパッタした Au の膜厚である。ミリ波及び RF による薄膜の Skin depth は抵抗値の逆数によって決まるため、ESR の側面からは 1 K 以下の超低温領域においてミリ波が完全反射、 $Q$  値(Quality Factor) の高い膜厚が必要である。一方 NMR 感度向上のためには高い RF の透過性が求められる。膜での電磁波エネルギーロス低減のため、膜厚が薄いことが要求され ESR の要求とトレードオフの関係となる。1 K 以下の超低温

領域において最適な膜厚を選定するため、膜厚の異なる Au 製薄膜を製作し、液体 He 温度領域における NMR エコー強度の温度依存性を調べた。その温度依存性から、最適な Au 製薄膜の膜厚は  $1.6 \times 10^2$  nm とわかった。meanderline コイルの製作は紙フェノール PCB を基板とし、CNC フライスによりコイル製作を行った。テフロン片を用いた  $^{19}\text{F}$ -NMR によりエコー信号が最大となる導線幅  $w$  と導線間隔  $c$  の比率は  $w:c = 1:2$  であり、本研究に最適なコイルの仕様が決定された。

開発した FPR 共振器を  $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$  希釈冷凍機に組み込み測定を行った。130.15 GHz 及び 220 mK での Si:P における  $^{31}\text{P}$  核による ESR スペクトルを図 2 に示す。ここでは超微細相互作用によって分割された 2 本の共鳴線を観測し、青線は高磁場の ESR スペクトル (H-Line) の全体を磁場変調により DNP 操作を行った直後のものである。このスペクトル強度の差から、熱平衡状態に比べ約 83% 核が偏極していることがわかった。DNP 状態の  $^{31}\text{P}$  核スピンの対し ENDOR 測定を行った結果を図 3 に示す。139.03 MHz 近傍で強度が上昇していることから、この周波数において  $^{31}\text{P}$  核磁化が緩和したことがわかった。ENDOR 測定により得られた NMR 周波数を用いて  $^{31}\text{P}$ -DNP-NMR を行った結果を図 4 に示す。NMR 測定は DNP 操作を行った直後に 5 回の NMR 測定を連続して行った。最初の測定(#1)のみがスピンエコー信号が得られると予想される時間(約 25  $\mu\text{s}$ )に変化が現れ、他の測定では変化がなかった。これは 1 度の NMR 測定により DNP 状態が破壊され、熱平衡状態に戻った事に対応する。 $^{31}\text{P}$  核による NMR 信号を明確にするため、#2-5 の平均をバックグラウンドとして #1 から差し引いたものを挿入図に示す。明確な変化が得られたことから  $^{31}\text{P}$  核の

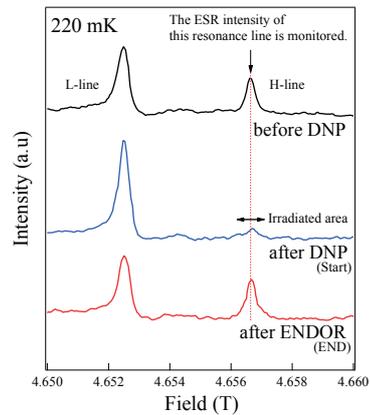


図 2. 130 GHz, 220 mK における ESR スペクトル。

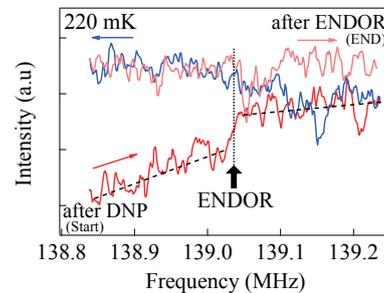


図 3. 220 mK における ENDOR 測定。

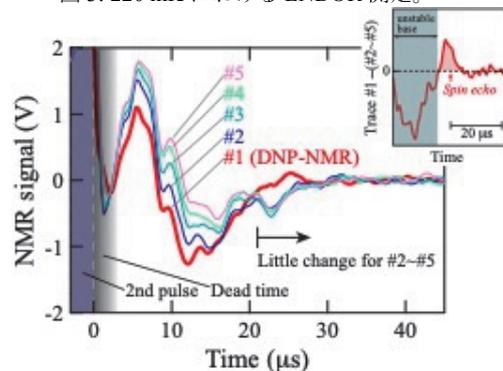


図 4. 139.03 MHz, 220 mK における  $^{31}\text{P}$ -DNP-NMR 測定。

NMR による直接観測に成功したと考えられる。

[発表論文]

1. [Yuya Ishikawa et al.](#), Applied Magnetic Resonance **52**, pp.305-315, (2021).
2. [Yuya Ishikawa et al.](#), Applied Magnetic Resonance **52**, pp.317-335, (2021).
3. 笈田 智輝, 藤井 裕, [石川 裕也 et al.](#), 日本赤外線学会誌 第 31 巻, No.1, (2021).