

令和 3 年 6 月 24 日現在

機関番号：13401

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2018～2020

課題番号：18H05847・19K21036

研究課題名（和文）二重磁気共鳴法を用いた超低温高周波領域におけるSi:Pのスピンダイナミクス解明

研究課題名（英文）Elucidation of Si:P spin dynamics in the ultra-low temperature and high-frequency region using the double magnetic resonance

研究代表者

石川 裕也 (Ishikawa, Yuya)

福井大学・遠赤外領域開発研究センター・助教

研究者番号：80825282

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,300,000円

研究成果の概要（和文）：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の情報取得である。初期化等の演算には $^{31}\text{P}$ 核の磁気的な挙動を知る必要があるが、 $^{31}\text{P}$ 核が希薄なため核磁気共鳴（NMR）による直接観測例はなく未解明であり、本研究では $^{31}\text{P}$ 核のNMRによる直接観測による磁気特性の解明を目指し、超低温ESR/NMR二重磁気共鳴用共振器の開発を行った。開発した二重磁気共鳴用共振器を用いSi:PがQCとして機能する超低温（ $T < 0.3\text{K}$ ）高磁場（ $B > 3\text{T}$ ）領域下において $^{31}\text{P}$ 核のNMRによる直接観測に世界で初めて成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

Kaneが提唱したQCモデルSi:Pは、量子ビットの長いコヒーレンス時間と量子ビット数の拡張性を共に備えていることから有望視されている。Si:PはSi中に希薄にドープした $^{31}\text{P}$ 核スピンを量子ビットとしドープ量によりビット数の制御が可能である。初期化等の演算には超低温（ $T < 0.3\text{K}$ ）・高磁場（ $B > 3\text{T}$ ）領域下において $^{31}\text{P}$ 核スピンをESR及びNMRにより制御する。本研究では上記領域下にてESR/NMR二重磁気共鳴により $^{31}\text{P}$ 核スピンを約83%偏極させることに成功し、 $^{31}\text{P}$ 核スピンの直接観測に世界で初めて成功した。本研究は固体QCの基礎研究としてSi:Pのスピン制御の実現性について明らかにした。

研究成果の概要（英文）：An important issue for the practical application of diluted-doped semiconductors (Si:P), which is a candidate for solid-state quantum computer (QC) devices, is the acquisition of information on the spin dynamics of  $^{31}\text{P}$  nuclei, which are treated as qubits. It is necessary to know the magnetic behavior of the  $^{31}\text{P}$  nucleus for operations such as initialization, but since the  $^{31}\text{P}$  nucleus is thin, there is no direct observation example by nuclear magnetic resonance (NMR) and it is unclear. Aiming at elucidation of magnetic characteristics by direct observation by NMR, we have developed an ultra-low temperature ESR / NMR dual magnetic resonance resonator. Using the developed resonator for dual magnetic resonance, we succeeded for the first time in the world in direct observation of  $^{31}\text{P}$  nuclei by NMR in the region of 220 mK / 130 GHz where Si:P functions as QC.

研究分野：超低温物性物理学

キーワード：二重磁気共鳴 ESR NMR DNP 超低温 高周波 meanderline

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

近年、固体量子コンピュータに関する研究が世界的に盛んに行われている。数ある量子コンピュータモデルの中で Kane が提唱したモデル (Si:P) は、量子ビットの長いコヒーレンス時間と量子ビット数の拡張性を共に備えていることから世界的に注目を集めている[1]。本モデルはリン原子を希薄にドーブした試料中の  $^{31}\text{P}$  核スピンを量子ビットとしており、ドーブする量によりビット数の制御が可能である。しかしながら、量子ビットとして制御を行うには  $^{31}\text{P}$  のドーブ量には上限があり、その希薄さから  $^{31}\text{P}$  核スピンドイナミクスが不明瞭であるため Si:P の磁性研究において次のような課題が指摘されている。Kane が提案するモデルでは核スピスが希薄な上、超低温では縦緩和時間  $T_{1N}$  が長く核磁化が非常に小さい。そのため  $^{31}\text{P}$  核スピンの NMR 信号の直接観測例は皆無である。量子コンピュータデバイスとして機能する条件である、Kane モデルの要求する超低温 ( $T \leq 0.3 \text{ K}$ )・高磁場 ( $B > 3 \text{ T}$ ) 領域下での DNP を含むスピンドイナミクスについては予測に留まっており未解明な点が多く存在する。Kane モデルを用いた実用的な固体量子コンピュータ実現には基礎研究として  $^{31}\text{P}$  核スピン信号の NMR による直接観測及びダイナミクス解明が課題である。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は Kane によって提案された 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た、量子ビットである  $^{31}\text{P}$  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、 $^{31}\text{P}$  の核スピンドイナミクスを明らかにすることである。

### 3. 研究の方法

超低温・高周波領域 ( $T \leq 0.3 \text{ K}$ ・ $B > 3 \text{ T}$ ) において使用可能な二重磁気共鳴用共振器を開発し、DNP により核偏極度を上げることにより Si:P 中の  $^{31}\text{P}$  の核磁気共鳴測定を行った。

本研究では、Fabry-Pérot 型共振器内に平面型コイルを組み込んだタイプ (図 1) と円筒型形状をした 2 種類の二重磁気共鳴用共振器 (図 2) を開発した。

前者は球面-平面の 2 枚のミラーによって構成される ESR 用共振器内に矩形型の NMR コイル”meanderline”を設置したものである。測定対象である Si:P 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。ミリ波及びラジオ波による薄膜の 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、 $1 \text{ K}$  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透過性が求められる。膜での電磁波エネルギーロスの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[2]。 $1 \text{ K}$  以下の超低温領域において最適な膜厚が選定できるよう、Au 薄膜の電気抵抗値の温度依存性から L-He 温度領域において最適な膜厚条件を選定し、評価を行った。また、meanderline のコイル特性を調べるためにコイル幅 (Width) 及びコイル間隔 (Clearance) の異なるパターンを数種類作成し、常温にて  $^{19}\text{F}$ -NMR 測定を行い評価した。

後者の円筒型共振器では、meanderline コイルによる DNP-NMR 測定が困難な場合に備え同時に開発を行った。この共振器は円筒の直径及び円筒の長さ方向によって共振周波数を調整することが可能である[3]。母材に絶縁性の高い PEEK 材を用い、導波管との Coupling 部分には無酸素銅を用い製作を行った。共振器内には前者と同様に Au 製薄膜を施し、ESR における共振特性及び 3 種類の試料を用いて ESR 測定及び  $^1\text{H}$ -NMR 測定による評価を行った。

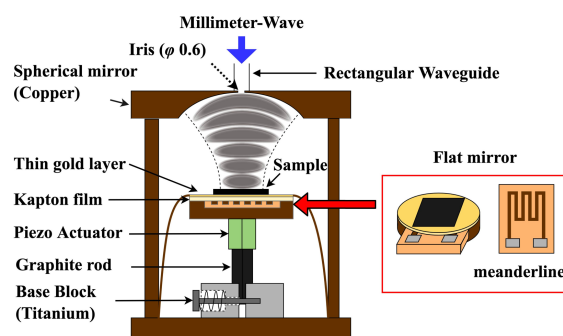


図 1. FPR 内に平面型コイル”meanderline”を組み込んだ二重磁気共鳴用共振器。

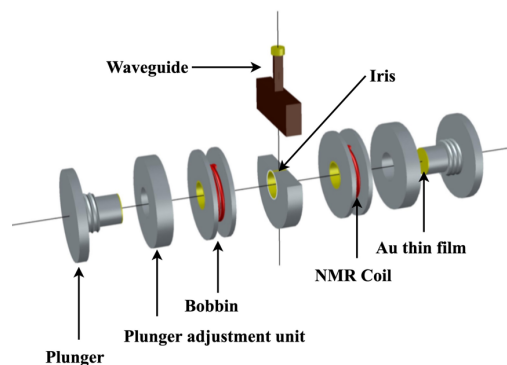


図 2. 円筒型二重磁気共鳴用共振器。

超低温・高磁場において核偏極が最大となる DNP の条件に合わせ、 $^{31}\text{P}$ -NMR 測定を実施し、直接観測による信号検出を目指した。

#### 4. 研究成果

##### (1) meanderline の最適化

meanderline のコイル形状を NMR 感度が高い仕様に最適化するため、図 3 に示すように導線の太さ ( $W$ ) と導線の間隔 ( $C$ ) を変化させたものを製作し、評価を行った。meanderline のサイズは、図 1 及び図 4 に示す金製薄膜平面ミラー下部のハウジング内に設置可能なコイルサイズを考慮し、全幅を 13 mm とし、条件を統一した。

コイルの製作は、紙フェノール PCB (NZ-P12K, Sunhayato Corp.) を基板とし、デスクトップタイプの CNC フライス (KitMill CIP100, ORIGINAL MIND INC.) によりコイル形状の加工を行った。

$W$  と  $C$  の関係を調べるため、コイルのターン数を 3 と固定し、図 5 に示すようなセットアップにて  $^{19}\text{F}$ -NMR を行った結果を図 6 に示す。 $W$  と  $C$  の比率が NMR エコー信号の最大強度に対しほぼ影響を与えないが、 $W:C$  が 1:2 の場合において最大値となった。これはコイル幅が大きくなるにつれ、エコー強度を最大化するためにより大きな RF 出力が必要になる事を示している。この理由はコイル幅の増大によりコイル中の導体を流れる電流密度が小さくなるためであると考えられる。1 K 以下の超低温領域において NMR 測定を実施する事を考慮すると、コイルに発生するジュール熱を減らすために、コイルに流す電流を可能な限り小さくする必要がある。また、RF 共振回路での放電の可能性を減らすため、小電力で NMR 信号強度が最大を取る  $W=0.2$  mm の meanderline が適していると考えた。 $W=0.2$  に固定した場合の turn 数による NMR エコー強度の変化を図 7 に示す。Turn 数の増加によりエコー強度は線形的に増加するが、turn 数が 5 と 6 ではほぼ同等であることがわかった。これはクリアランス  $C$  の減少により、隣接する導体線からの影響を打ち消すことによって、振動電解強度が減少した事を示唆している。

##### (2) Au 製薄膜による RF の透過特性評価

図 1 に示すように、meanderline が設置される FPR 共振器では ESR と NMR の双方を実現するため、試料と meanderline の間に Au 製薄膜を挿入する必要がある。ミリ波の良好な反射を得るため、ESR の観点からは膜の厚い Au の層が求められるが、NMR の観点からは RF 伝送の量は金属層によって減衰されるため、可能な限り薄くする必要がある。そのため、3 種類の厚みの金製薄膜を 5  $\mu\text{m}$  のカプトンフィルム上にスパッタにより製作し、コイル評価と同様に PTFE (テフロン) シートを試料として NMR 測定を行った。その結果を図 8 に示す。 $^{31}\text{P}$  の NMR 周波数近傍である 135 MHz において、5-300 K の温度範囲で測定を行った。その結果、NMR エコー強度は温度の低下とともに単調に増加し、核磁化のキュリー則のような依存性を示した。一般的に、金属の skin depth による透過する RF 波は減衰することが知られており、低温化による信号強度の増大はこのためと考えられる。膜厚が 16 nm および  $1.6 \times 10^2$  nm の Au 製薄膜を透過する RF 波の比率は、5 K

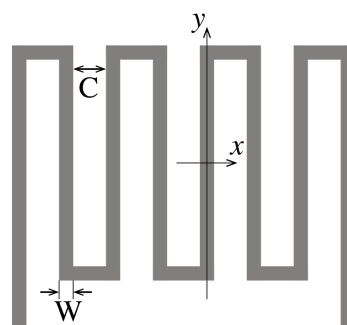


図 3. meanderline の概要図。

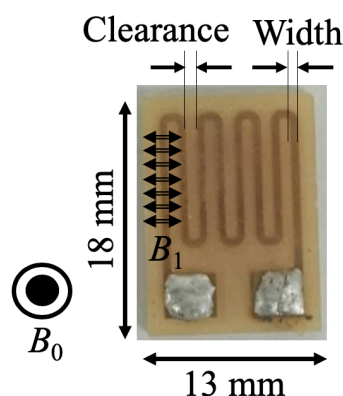


図 4. 製作した meanderline。

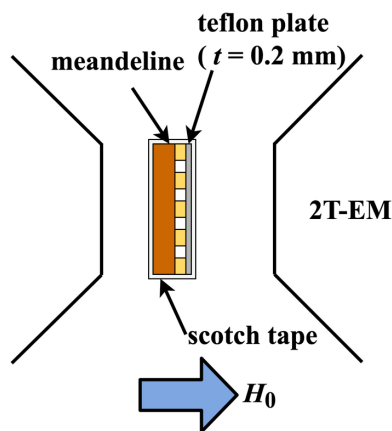


図 5.  $^{19}\text{F}$ -NMR 測定のセットアップ。

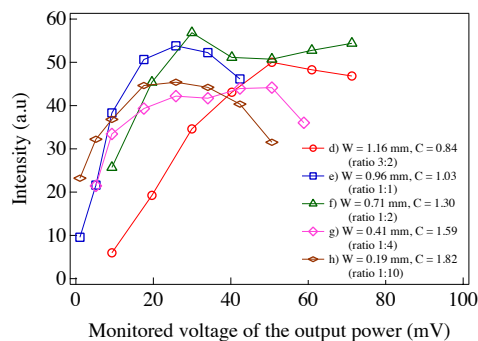


図 6. ターン数を 3 に固定した 5 種類の meanderline の NMR エコー強度。

までほぼ同じであることに対し、 $7.0 \times 10^2 \text{ nm}$  では著しく透過率が減少していることがわかった。上述の ESR の観点からは膜の厚い Au 層が求められることから、ここでは  $1.6 \times 10^2 \text{ nm}$  の Au 製薄膜が  $^{31}\text{P}$  の NMR 信号検出に有望であることが示唆された。

### (3) $^{31}\text{P}$ -DNP-NMR 測定

本実験で使用した Si:P の試料サイズは  $10 \times 17 \times 0.26 \text{ mm}^3$  であり、 $^{31}\text{P}$  のドーピング濃度は  $7.1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  である。この濃度は Si:P が金属的に振る舞う臨界濃度  $n_c = 3.7 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  [1] よりも 2 桁少ない値である。使用した試料に対し、ESR によるミリ波で照射される面積から計算された  $^{31}\text{P}$  の数は  $7.1 \times 10^{16} \text{ spins}$  である事に留意されたい。

130.15 GHz および 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 9 に示す。黒線は DNP 操作を行う前の ESR スペクトルである。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た。さらに、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ミリ波を約 20 分間照射し、DNP 操作を行った直後の ESR スペクトルを示している。図 10 に示す 1 対のドナー電子と  $^{31}\text{P}$  核スピンのエネルギー図に基づき、核偏極はフリップフロッププロセスによって発生する。 $I_L$  と  $I_H$  はそれぞれ L-Line (低磁場の ESR スペクトル) と H-Line の強度であることから、核偏極度  $P$  を  $P = (I_L - I_H) / (I_L + I_H)$  で推定することが可能である。得られた  $^{31}\text{P}$  核の偏極度は約 83% であることがわかった。また、この偏極状態は 220 mK で約 100 分間程度維持が可能である。この緩和時間は既知の結果よりも短い。これは ESR 測定に使用するミリ波強度が高く、 $^{31}\text{P}$  核の核スピンフリップを避けられなかったためと考えられる。

図 11 は DNP 状態の  $^{31}\text{P}$  核スピンに対し行った ENDOR 測定の結果を示している。この測定では、RF 波の周波数を掃引しながら、H-Line の ESR 強度を共鳴磁場に固定 (図 9 中の赤点線) し、測定を行った。観測された ENDOR スペクトルは、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  $^{31}\text{P}$  核磁化が緩和した事を示している。これは図 10 に示す  $^{31}\text{P}$  核スピンの up 状態 ( $m_1 = +1/2$ ) から down 状態 ( $m_1 = -1/2$ ) への遷移がこの周波数近傍で起こっている事に対応する。この ENDOR 測定の直後に得られた ESR スペクトル (赤線) では、DNP 操作を行う前の黒線と同一であり、 $^{31}\text{P}$  核スピンの偏極状態が熱平衡値まで緩和した事を示していることから、この ENDOR 測定の結果は妥当と判断できる。

ENDOR 測定により得られた  $^{31}\text{P}$  核の NMR 周波数を用い  $^{31}\text{P}$ -DNP-NMR 測定を行った結果を図 12 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。図 12 に示すように最初の測定 (#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 (#2-5) では変化が無いことがわかった。これは、1 度の NMR 測定により DNP

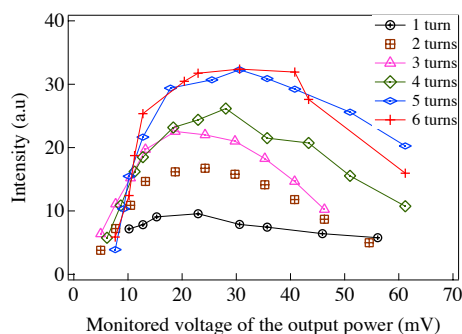


図 7.  $W=0.2$  と固定した場合の NMR エコー強度と turn 数の比較。

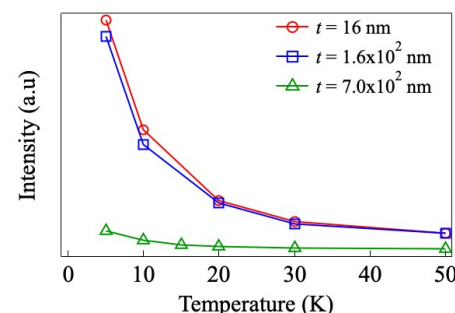


図 8. Au 製薄膜の NMR エコー強度の膜厚及び温度依存性。

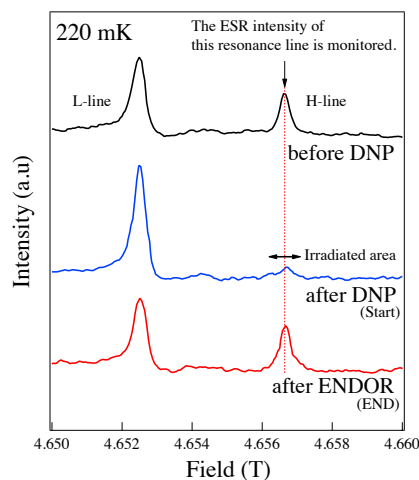


図 9. 130.15 GHz、220 mK における  $^{31}\text{P}$  の ESR スペクトルと DNP 操作を行った際のスペクトルの変化。

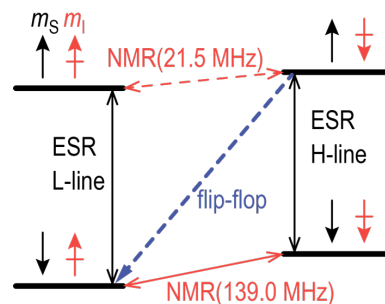


図 10. Si:P のエネルギー図。

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図 12 の挿入図に示す。ここでは明確な変化が得られたことから、 $^{31}\text{P}$ 核スピンの NMR による直接観測に成功したと考えられる。この結果は世界初であり、Kane が要求する超低温・高磁場領域でのスピン操作であることから、Si:P モデルの固体量子コンピュータ実装を実現可能であることを示唆している。

#### (4) 円筒型共振器による ESR/NMR 二重磁気共鳴

本研究では meanderline による二重磁気共鳴が困難な場合に備え、円筒型共振器による ESR/NMR 二重磁気共鳴用共振器の開発にも取り組んだ。この円筒型共振器は  $\text{TE}_{015}$  モードを使用しており、共振周波数 128 GHz、円筒の直径が  $\phi 6.5$  mm で設計を行った。共振モードの混在を抑制するため図 2 に示すように共振部を輪切りにし、Plunger の直径を  $\phi 6.2$  mm で製作した。

開発した共振器の評価を行うため、ポリスチレン中に 100 mM の濃度で希釈した BDPA ラジカル ( $\alpha,\gamma$ -Bisdiphenylene- $\beta$ -phenylallyl) の ESR 測定を行った。BDPA ラジカルは、安定的な有機ラジカル分子であり、鋭い共鳴信号を持つことが知られている[4,5]。DNP-NMR 測定においても ESR を引き起こすためのドナー電子スピンとしても活用されており、本研究の評価として最適である[6]。この試料は 1 分子あたりに 1 つのラジカルを持ち、希釈濃度によってスピン数を調整することができるため、感度評価用試料として用いた。ESR 測定によって得られた結果を図 13 に示す。130.85 GHz 近傍において、5-70 K までの全温度領域において 1 本の ESR スペクトルを観測した。各温度における ESR スペクトルは、5 回の磁場掃引したものを平均化している。共振周波数の温度依存性では、温度の低下に伴う共振器の収縮により共振周波数上がるのがわかった。この実験で得られた ESR の測定感度は、約  $1.8 \times 10^{16}$  Spins/G である。

次に、 $^1\text{H}$ -NMR 測定を行った結果について示す。 $^1\text{H}$ -NMR 測定は ESR 測定の際に試料を設置するテフロン製チューブに含有される  $^{19}\text{F}$  を対象として 117.55 MHz 及び 7 K において測定を行った。その結果を図 14 に示す。共鳴磁場は 2.79 T であり、 $^{19}\text{F}$ -NMR が観測されたことから、円筒型共振器の極低温領域における NMR 測定面の実用性が示された。

<引用文献>

- [1] B.E. Kane, *Nature* **393**, 133 (1998).
- [2] Y. Ishikawa *et al.*, *J. Infrar. Milli. Terahertz Waves.* **39**, 387 (2018).
- [3] C. P. Poole, Jr. : *Electron Spin Resonance*, 2nd ed., Chap. 5, Dover Publications Inc., New York, 1983.
- [4] L. R. Becerra *et al.* : *J. Magn. Reson. Ser. A*, **117**, pp.28-40, (1995).
- [5] C. Caspers *et al.* : *APL. Photonics.*, **1**, 026101 (2015).
- [6] V. Weiss and R. G. Griffin. : *Solid State Nuclear Magn. Reson.* **29** (2006).

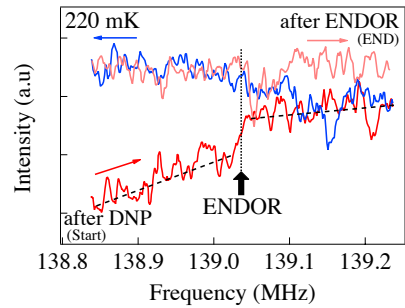


図 11. 220 mK における ENDOR 測定。

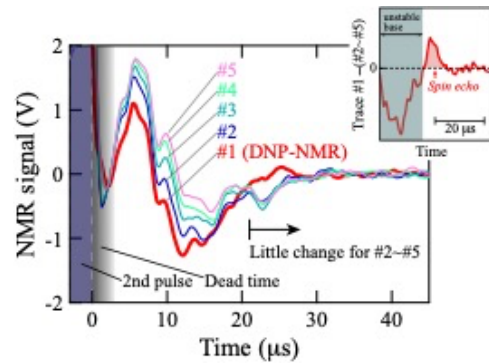


図 12. 139.03 MHz、220 mK における  $^{31}\text{P}$ -DNP-NMR 測定。

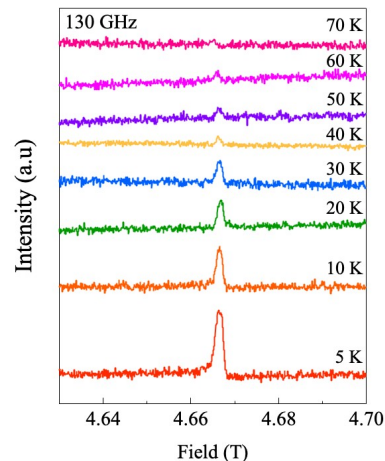


図 13. 130 GHz における BDPA (100 mM) の ESR スペクトル

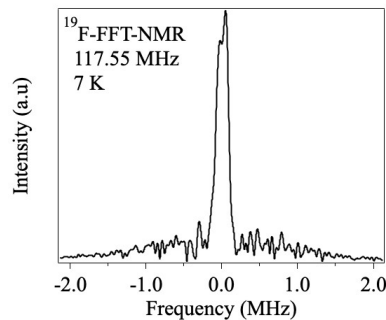


図 14. 117.55 MHz、7 K における  $^{19}\text{F}$ -FFT-NMR スペクトル。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 J?rvinen J., Zvezdov D., Ahokas J., Sheludiakov S., Lehtonen L., Vasiliev S., Vlasenko L., Ishikawa Y., Fujii Y.	4. 巻 22
2. 論文標題 Dynamic nuclear polarization and ESR hole burning in As doped silicon	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Chemistry Chemical Physics	6. 最初と最後の頁 10227 ~ 10237
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C9CP06859G	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Ishikawa Yuya, Fujii Yutaka, Fukuda Akira, Koizumi Yuta, Omija Tsunehiro, Oida Tomoki, Yamamori Hidetomo, Matsubara Akira, Mitsudo Seitaro, Lee Soonchil, J?rvinen Jarno, Vasiliev Sergey	4. 巻 52
2. 論文標題 Development of an ESR/NMR Double-Magnetic-Resonance System for Use at Ultra-low Temperatures and in High Magnetic Fields and Its Use for Measurements of a Si Wafer Lightly Doped with 31P	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Magnetic Resonance	6. 最初と最後の頁 305 ~ 315
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00723-021-01309-2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Ishikawa Yuya, Koizumi Yuta, Fujii Yutaka, Oida Tomoki, Fukuda Akira, Lee Soonchil, Kobayashi Eiichi, Kikuchi Hikomitsu, J?rvinen Jarno, Vasiliev Sergey, Mitsudo Seitaro	4. 巻 52
2. 論文標題 Millimeter-Wave Band Resonator with Surface Coil for DNP?NMR Measurements	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Magnetic Resonance	6. 最初と最後の頁 317 ~ 335
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00723-021-01328-z	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 笈田智輝、藤井裕、石川裕也、光藤誠太郎、泉小波、小林英一、菊池彦光	4. 巻 未定
2. 論文標題 遠赤外ESR/NMR二重磁気共鳴測定のための平面型NMRコイルの作製と評価及びその展開	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本赤外線学会誌	6. 最初と最後の頁 未定
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計19件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 石川裕也, 藤井裕, 大矢健太, 三浦俊亮, 福田昭, 浅野貴行, 小泉優太, 光藤誠太郎, 水崎隆雄, 松原明, 菊池彦光, Soonchil Lee, Sergey Vasiliev, 山森英智
2. 発表標題 3He-4He希釈冷凍機を用いたミリ波帯超低温ESR/NMR測定装置の開発
3. 学会等名 日本赤外線学会第83回定例研究会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石川裕也, 藤井裕, 小泉優太, 大見謝恒宙, 福田昭, 松原明, 水崎隆雄, Soonchil Lee, 小林英一, 菊池彦光, 光藤誠太郎
2. 発表標題 Development of Meanderline Coils for Millimeter-Wave ESR/NMR Double Magnetic Resonance Measurements of Thin Samples
3. 学会等名 2019ISMAR EUROMAR Joint Conference GDCh FGMR Discussion Meeting（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石川裕也, 藤井裕, 光藤誠太郎, 浅野貴行, 大見謝恒宙, 堂野孝暉, 福田昭, 水崎隆雄, 松原明, 山森英智, Soonchil Lee, Sergey Vasiliev, 菊池彦光
2. 発表標題 福井大学におけるミリ波帯磁気共鳴装置開発の取り組みII
3. 学会等名 第六回西日本強磁場科学研究会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石川裕也, 藤井裕, 小泉優太, 大見謝恒宙, 笈田智輝, 福田昭, 光藤誠太郎, 菊池彦光
2. 発表標題 超低温における希薄リンドープシリコンの31P動的核偏極核磁気共鳴信号の観測II
3. 学会等名 日本物理学会 2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 笈田智輝, 大見謝恒宙, 大浦拓実, 石川裕也, 藤井裕, 光藤誠太郎, 小林英一, 菊池彦光
2. 発表標題 ミリ波二重磁気共鳴測定のための平面型NMRコイルの最適化
3. 学会等名 第58回電子スピンサイエンス学会年会 (SEST2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 笈田智輝, 大見謝恒宙, 大浦拓実, 石川裕也, 藤井裕, 光藤誠太郎, 小林英一, 菊池彦光
2. 発表標題 ESR/NMR二重磁気共鳴測定のための平面型NMRコイルの開発
3. 学会等名 日本赤外線学会第28回研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石川裕也, 藤井裕, 小泉優太, 大見謝恒宙, 笈田智輝, 福田昭, 小林英一, 光藤誠太郎, 菊池彦光
2. 発表標題 超低温・高周波領域におけるmeander lineコイルを用いたSi:Pの31P-DNP-NMR測定
3. 学会等名 物性研短期研究会 強磁場コラボラトリーによる強磁場科学の新展開-光科学との融合も視野にいれて-
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 橋本樹, 笈田智輝, 大見謝恒宙, 大浦拓実, 石川裕也, 藤井裕, 光藤誠太郎, 小林英一, 菊池彦光
2. 発表標題 ESR/NMR二重磁気共鳴測定のための平面型コイルの最適化
3. 学会等名 2019年度日本物理学会北陸支部定例学術講演会
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 笈田智輝, 大見謝恒宙, 橋本樹, 藤井裕, 石川裕也, 光藤誠太郎, 小林英一, 菊池彦光
2. 発表標題 ミリ波二重磁気共鳴測定に向けた平面型NMRコイルの最適化
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会(2020)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤井裕, 小泉優太, 石川裕也, 大見謝恒宙, 笈田智輝, 福田昭, 水崎隆雄, 光藤誠太郎, 菊池彦光
2. 発表標題 超低温における希薄リンドープシリコンの31P動的核偏極核磁気共鳴信号の観測
3. 学会等名 日本物理学会 第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石川裕也, 小泉優太, 藤井裕, 福田昭, 水崎隆雄, 小林英一, 菊池彦光, 光藤誠太郎
2. 発表標題 Development of a meanderline on Fabry-Perot resonator for ESR/NMR double magnetic resonance measurements
3. 学会等名 IW-FIRT2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小泉優太, 石川裕也, 大矢健太, 三浦俊亮, 藤井裕, 福田昭, 松原明, 水崎隆雄, Soonchil Lee, 小林英一, 菊池彦光, 光藤誠太郎
2. 発表標題 平面コイルを用いた希薄リンドープシリコンの超低温ESR/NMR二重磁気共鳴測定
3. 学会等名 2018年度日本物理学会北陸支部定例学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 石川裕也, 藤井裕, 大矢健太, 三浦俊亮, 福田昭, 浅野貴行, 小泉優太, 光藤誠太郎, 水崎隆雄, 松原明, 菊池彦光, Soonchil Lee, Sergey Vasiliev, 山森英智
2. 発表標題 3He-4He希釈冷凍機を用いたミリ波帯超低温ESR/NMR測定装置の開発
3. 学会等名 第57回電子スピンサイエンス学会年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小泉優太, 石川裕也, 大矢健太, 三浦俊亮, 藤井裕, 福田昭, 松原明, 水崎隆雄, Soonchil Lee, 小林英一, 菊池彦光, 光藤誠太郎
2. 発表標題 平面型コイルを用いたSi:Pのミリ波帯ESR/NMR二重磁気共鳴測定
3. 学会等名 第57回電子スピンサイエンス学会年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuta Koizumi, Yuya Ishikawa, Kenta Ohya, Shunsuke Miura, Yutaka Fujii, Akira Fukuda, Akira Matsubara, Takao Mizusaki, Soonchil Lee, Eiichi Kobayashi, Hikomitsu Kikuchi, Seitaro Mitsudo
2. 発表標題 Development of Resonators for Millimeter-wave Band ESR/NMR Double Magnetic Resonance Measurements of Thin Samples
3. 学会等名 The third joint conference of the Asia-Pacific EPR/ESR Society and The International EPR (ESR) Society (IES) Symposium (APES-IES2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Fujii, Y. Ishikawa, Y. Koizumi, T. Omija, K. Ohya, S. Miura, A. Fukuda, S. Mitsudo, H. Yamamori, H. Kikuchi
2. 発表標題 Development of Millimeter-Wave Fabry-Perot Resonator for Simultaneous Electron-Spin and Nuclear-Magnetic Resonance Measurement at Low Temperatures
3. 学会等名 2018 43rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小泉優太, 石川裕也, 大矢健太, 三浦俊亮, 藤井裕, 福田昭, 松原明, 水崎隆雄, S. Lee, 小林英一, 菊池彦光, 光藤誠太郎
2. 発表標題 ENDOR測定に向けた平面型コイルを用いたミリ波帯共振器の開発II
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小泉優太, 石川裕也, 大矢健太, 三浦俊亮, 藤井裕, 福田昭, 光藤誠太郎, 菊池彦光
2. 発表標題 二重磁気共鳴測定のための平面型コイルを用いたミリ波帯共振器の開発
3. 学会等名 第五回西日本強磁場科学研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 石川裕也, 藤井裕, 光藤誠太郎, 浅野貴行, 小泉優太, 河野海志, 大見謝恒宙, 堂野壱暉, 福田昭, 水崎隆雄, 松原明, 山森英智, Soonchil Lee, Sergey Vasiliev, 菊池彦光
2. 発表標題 福井大学におけるミリ波帯磁気共鳴装置開発の取り組み
3. 学会等名 第五回西日本強磁場科学研究会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
フィンランド	University of Turku			
韓国	KAIST			