

令和 5 年 6 月 27 日現在

機関番号：13401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04596

研究課題名（和文）高出力ミリ波光源ジャイロトロンによるミリ波帯パルスESR計測の実現

研究課題名（英文）Realization of millimeter-wave pulsed ESR measurement by using a high-power millimeter-wave light source gyrotron

研究代表者

光藤 誠太郎（MITSUDO, Seitaro）

福井大学・学術研究院工学系部門・教授

研究者番号：60261517

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：ミリ波帯で数百ワットの電磁波発生が可能なジャイロトロン光源を用いてパルスESR測定の実現を進めた。感度向上には信号の積算を行うことが通じよう行われるがジャイロトロンの性質上位相制御は容易ではなく、単純な積算は意味がない。本研究ではコンピューター信号の処理による位相補正を行い得られた信号を積算可能とすることで10倍以上の感度の向上を実現した。また高感度化をもちいた、応用研究を行い、高感度化により可能となる実例を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は日本の最先端技術である高周波ジャイロトロンというミリ波帯の高出力光源を用いた世界で最初の研究です。これまでミリ波帯は電磁波の谷間と呼ばれ高出力の電磁波の発生や制御が困難な領域であるといわれてきました。本研究では、光源であるジャイロトロン開発、また電磁波を伝送する準光学伝送システム、また電磁波を短パルス化する光駆動半導体スイッチ、そして光源の欠点である位相制御を補うデジタル信号処理など、これらの技術を独自に開発することで、世界最先端の高周波パルスESR測定に成功しました。また、高感度化を達成したことで、次世代の量子コンピューターの基礎技術計測やスピン制御への応用が期待されています。

研究成果の概要（英文）：A gyrotron light source capable of generating several hundred watts of electromagnetic waves in the millimeter wave band was used to realize pulsed ESR measurements. Accumulation of signals is commonly used to improve sensitivity, but phase control is not easy due to the nature of the gyrotron, and simple integration is meaningless. In this research, the sensitivity was improved more than 10 times by making it possible to integrate the signals obtained by performing phase correction by computer signal processing. In addition, we conducted applied research using high sensitivity, and showed examples that can be achieved by high sensitivity.

研究分野：電波物性

キーワード：Pulsed ESR EPR Millimeter wave 量子コンピューター 電子スピン 準光学伝送 光駆動半導体スイッチ 強磁場

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

本研究では、高出力遠赤外を用いることによりはじめて可能になる、高周波帯のパルス ESR 測定を実現すると共にその応用研究を展開する。高出力電磁波を用いることで励起パルスの幅を短くでき、これまでの高周波 ESR スピンエコー装置では測定できなかった、早い緩和のスピンダイナミクス (例えばより高温での振る舞い) の測定が可能になる。NMR では用いる周波数が低く、核スピンの緩和時間も電子スピンの比べて長かったため、ダイナミクスの測定を盛んに行うことが出来た。その結果、構造解析や MRI 等に広く展開し、多くのノーベル賞につながる発展をしてきている。ようやく電子スピン共鳴に於いても同様な実験が行える高出力高周波のテラヘルツ電磁波源が開発され、電子スピンのダイナミクスの測定とその制御が可能となる時期に来たと考えている。また電子スピンの量子性を用いた、固体量子コンピューターの開発のためにも、電子スピンの動的なふるまいを直接観測できる高周波のパルス ESR 測定法の開発は緊急の課題である。本研究は、このような高出力遠赤外技術の発展を受けて行う、先導的な研究開発であると考えている。

2. 研究の目的

本システムを実証レベルから実用レベルに最適化することで、量子計算で再び注目されている、希薄ドープ半導体の量子状態(エンタングルメント)の持続性(デコヒーレント)の直接測定を可能とする。将来は、タンパク質の機能構造計測等の実用的に有効な周波数帯である 395 GHz にアップグレードすることで、強磁場下の高分解能パルス ESR により、NMR では測定できない長距離スピン相関の測定を可能にし、大型タンパク質の構造解析に適應する。395 GHz の常磁性共鳴磁場は、600 MHz-NMR 共鳴磁場に対応させている。近年 NMR の高感度化のブレークスルーが期待されている、電子スピンによる核スピンの動的偏極 (Dynamic Nuclear Polarization)DNP-NMR に用いるラジカルスピンの動的特性を明らかにすることで、DNP 効果における電子スピン-核スピンの振る舞いを同時に明らかにできる。これにより、DNP-NMR を行うタンパク質に導入する効果的ラジカル開発に重要な情報が得られると期待されている。また、ヨーロッパや米国では、光源はジャイロトロンと異なるものの、高出力 THz 光源の開発の進展とともに、高周波電子スピンエコー測定装置の開発を進めている。しかし、日本でこれらの研究を行っているグループは我々のみであり、緊急にこれらの開発研究を進展し、国内において高周波の電子スピンエコーの計測が行える環境を提供する必要があると考えている。

3. 研究の方法

すでに開発を行ったジャイロトロン Gyrotron FU CW VIIB の TE02 モード (154 GHz) を用いた、パルス ESR 装置の高性能化と応用計測によりジャイロトロンを用いたパルス ESR 装置の有用性を明らかにするために以下の研究を行った。

現在の 154 GHz パルス ESR による FT-ESR スペクトルや信号のアベレージングによる SN の改善 (感度の向上) を行うために、Python によるソフトウェアを構築し、これらのソフトウェアを用いて、リアルタイムの解析が行え、フーリエ変換 (FT)-スペクトルが得られるシステムの構築を行った。図 1 に示すように、試料からの FID (Free Induction Decay)信号はハーモニックミキサードで 500 MHz 程度までダウンコンバートし、その後直行位相検出器(QPD: Quadrature Phase Detector) により検出される。そのため個々の FID 信号は振幅と位相の情報 (I, Q と呼ばれる) が同時に取り出せる。このベクトル信号を今回はオシロスコープで取り込んだのち USB 接続を用いて PC に取り込んだ。その後、上述の Python による自作プログラムで FFT や不要信号の除去及び

FID 信号の積算、バックグラウンド信号の除去とうのデジタル処理を行い、ESR スペクトルを得

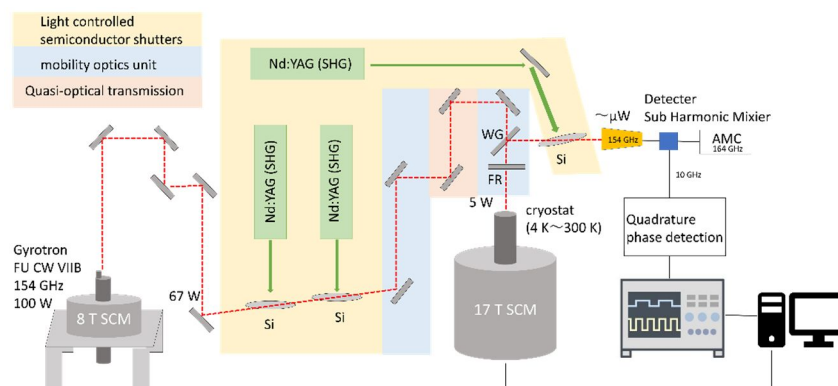


図 1 154 GHz パルス ESR 装置の概略図

ることができた。また外部静磁場についても、PCにより制御することで一連の計測を効率よく、進めることができるようになった。

つづいて、上記のパルス ESR のシステムを用いて、積算による平均化やデジタルフィルタリング処理の妥当性と感度の向上について検討した。測定試料としては典型的な安定ラジカルとして知られている、*p*-Bisdiphenylene-*p*-phenylallyl (BDPA, Sigma-Aldrich 社) を任意の濃度でポリスチレンに拡散したものをを用いて行った。図 2 に積算回数と S/N の関係について示す。青い点は積算回数毎の S/N、オレンジ色の線は信号の S/N 比を S/N 、積算回数を N_s として $S/N = A \times \sqrt{N_s}$ で曲線近似を行った結果である。曲線近似により S/N 比と積算回数は $S/N = 1.7 \times \sqrt{N_s}$ で表すことが出来るとわかった。これはランダムノイズが積算により減少していく理論的予測と良い一致を示すものであり、位相補正等の補正がうまくいっていることが分かる。

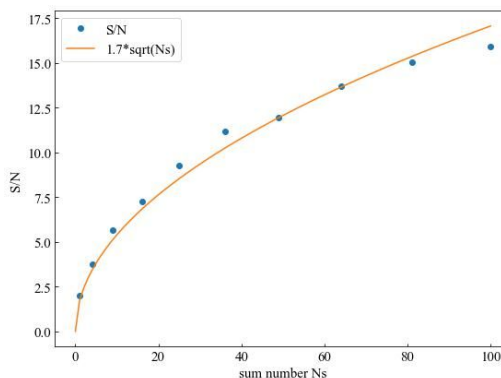


図 2 積算回数と S/N 比

さらに本システムでは残念ながら外部静磁場は以前 Gyrotron 開発用に使っていたものを流用しているために、ESR 分光実験としては磁場の均一度が不十分であった。しかし感度向上により試料サイズを小さくして、試料空間を小さくすることで試料内の磁場の不均一度を下げるができるようになった。そこでこの効果を確認する実験を行った。異なる大きさの BDPA(100 mM)を用いて測定を行いサンプルに対する磁場の不均一の影響を調べた。実験によって得たスペクトルに対してガウス関数を用いてフィッティングを行った。フィッティングを用いると指定した定数とその定数に対する標準誤差を得ることが出来る。標準偏差の標準誤差を用いて半値全幅の標準誤差を得ることが出来る。標準偏差の標準誤差を $\delta\sigma$ とすると半値全幅の標準誤差は $\delta\text{FWHM} = 2\sqrt{2 \ln 2} \delta\sigma$ と表される。フィッティングによって得られたスペクトルの半値全幅と標準誤差を図 3 に示す。この結果からサンプルサイズを小さくすることによって得られる FT-ESR スペクトルの線幅が細くなっていることが分かる。これはサンプルが小さくなることによってサンプルにかかる外部静磁場の不均一度が小さくなっていることが原因だと考えられる。また、 $\phi 6 \times 3 \text{ mm}$ 以下のサイズでは線幅の減少は見られず、一定の線幅に収束していくように見える。この結果より 100 mM BDPA の本質的な線幅は 47 MHz 程度であると言える。

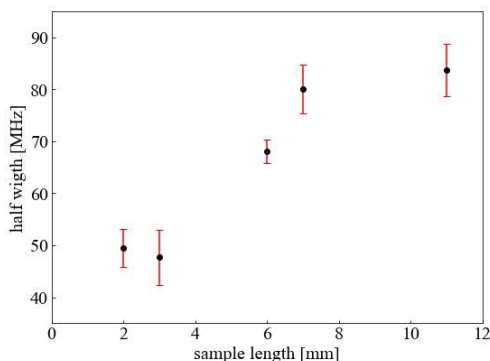


図 3 サンプルの大きさと半値全幅

4. 研究成果

本研究は Pulsed-ESR 装置の感度の向上と感度の問題により従来では不可能だった測定を行うことで今後の開発のための知見を得ることを目的に行った。感度向上へのアプローチとして信号の積算を行い信号強度に対するノイズ成分を減らす手法を用いた。積算回数の向上および装置の実用性の向上のために図 4 に示すように Python を用いて信号の高速処理が可能でかつ Pulsed-ESR 測定を完全に自動化するソフトウェアの開発を行った。ソフトウェアの開発を行ったことで

1 つのデータを取得して解析にかかる時間の高速化

Pulsed-ESR 測定の完全な自動化

ソフトウェア化による実験中のリアルタイムでの信号解析および結果の確認の 3 つが可能になった。本システムでは約 2 Hz の間隔で FT-ESR スペクトルを得ることが出来る。ソフトウェア開発以前では実験者が外部磁場を変える必要があったが、本システムでは共鳴磁場と測定を行いたい磁場範囲を入力することで測定中の磁場の制御も自動で行うことが出来る。積算回数 100 回、測定磁場 40 箇所の実験においても 30 分程度で行うことが可能になった。本開発以前は、データ収集後、手作業で解析を行い平均化を行う必要があったため、数週間の間がかかっていた。また、開発を行ったソフトウェアでは画面上から解析パラメータを変えることも可能である。また、FID 信号や FID 信号の振幅スペクトル、包絡線、各磁場の FT-ESR スペクトル、全体のスペクトルなど様々な結果の確認を実験中に行うことも可能になり、実験中に解析パラメータや実験系の調整をリアルタイムで行うことが可能になった。

開発したソフトウェアを用いた測定によって得られるデータ数が大幅に向上したことにより、FID 信号や一つの磁場での FT-ESR スペクトルに対して積算の効果がよく表れていることが分かった。各磁場における FT-ESR 強度はばらつきを示しており、このばらつきの抑制に対しても積算が有効であることも判明した。また、BDPA を用いて Pulsed-ESR 装置の感度は 10 K にて $DS_{\min} = 2.22 \times 10^{15}$ spins/Gauss、併設されている CW-ESR 装置の感度は室温にて $DS_{\min} = 1.81 \times 10^{15}$ spins/Gauss と見積もられた。また、同一サンプルのサイズを小さくすることによる線幅の減少も確認できた。これは使用している超電導磁石の磁場不均一の影響によるものだと考えられ、実験結果から正しい線幅を得るには $\phi 6 \times 3$ mm 以下の大きさの試料を用いる必要があることが分かった。また、 $\phi 6 \times 3$ mm の大きさのサンプルホルダーの作成も必要と考えられる。

今後の測定では開発を行ったソフトウェアと併設している CW-ESR 装置を用いてこれまでは見ることが出来なかった信号の観測が出来ると考えられる。Pulsed-ESR 装置と CW-ESR 装置が併設されている理由は共鳴磁場の探索するためである。今後、高い感度を持っている CW-ESR 装置にて共鳴磁場を探索し、多くの信号を積算することで Pulsed-ESR 装置だけでは測ることが出来ない希薄なスピン系での測定においても FID 信号や FT-ESR スペクトル、echo 信号の取得が可能になると考えられる。

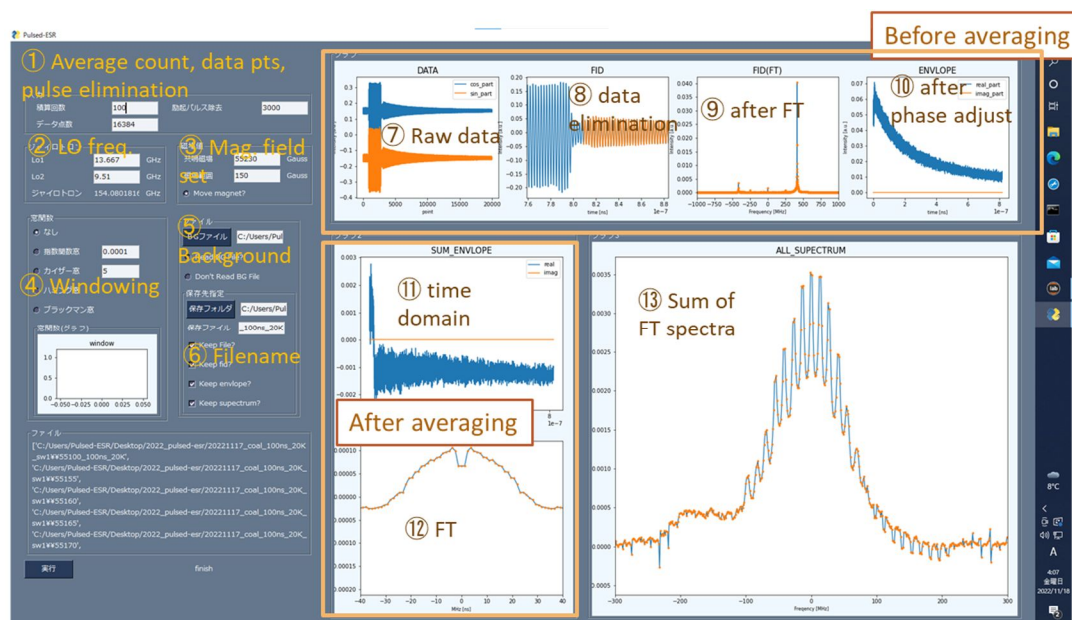


図 4 パルス ESR 計測用の自動化プログラムの制御画面

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Sabchevski Svilen, Glyavin Mikhail, Mitsudo Seitaro, Tatematsu Yoshinori, Idehara Toshitaka	4. 巻 42
2. 論文標題 Novel and Emerging Applications of the Gyrotrons Worldwide: Current Status and Prospects	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves	6. 最初と最後の頁 715 ~ 741
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10762-021-00804-8	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 Khutoryan Eduard, Kuleshov Alexei, Kishko Sergey, Ponomarenko Sergey, Glyavin Mikhail, Bandurkin Ilya, Manuilov Vladimir, Fedotov Alexey, Zotova Irina, Sabchevski Svilen, Ishikawa Yuya, Fukunari Masafumi, Saito Teruo, Tatematsu Yoshinori, Mitsudo Seitaro, Idehara Toshitaka	4. 巻 42
2. 論文標題 Increase of Gyrotron Output Power at High-Order Axial Mode Through an After-Cavity Excitation of the Next Transverse Mode	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves	6. 最初と最後の頁 684 ~ 700
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10762-021-00798-3	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 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 Mitsudo S., Dono K., Hayashi K., Ishikawa Y., Fujii Y.	4. 巻 1
2. 論文標題 Improvement in sensitivity of FT- ESR measurements by using a gyrotron as high-power millimeter wave source	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 2020 IEEE 45th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz)	6. 最初と最後の頁 1~1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/IRMMW-THz46771.2020.9370426	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 -

1. 著者名 Takahashi Hideyuki, Ishikawa Yuya, Okamoto Tsubasa, Hachiya Daiki, Dono Kazuki, Hayashi Kanata, Asano Takayuki, Mitsudo Seitaro, Ohmichi Eiji, Ohta Hitoshi	4. 巻 118
2. 論文標題 Force detection of high-frequency electron spin resonance near room temperature using high-power millimeter-wave source gyrotron	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 022407 ~ 022407
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0036800	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 -

1. 著者名 Mitsudo S., Sano T., Nishio H., Hayashi K., Ishikawa Y., Fujii Y.	4. 巻 -
2. 論文標題 Application of high frequency gyrotron to pulsed ESR measurement	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/IRMMW-THz50927.2022.9895649	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 -

1. 著者名 Mitsudo S., Dono K., Hayashi K., Ishikawa Y., Fujii Y.	4. 巻 -
2. 論文標題 Improvement in sensitivity of FT- ESR measurements by using a gyrotron as high-power millimeter wave source	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/IRMMW-THz46771.2020.9370426	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18件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 佐野巴則, 西尾英通, 林哉汰, 奥谷顕, 石川裕也, 藤井裕, 光藤誠太郎
2. 発表標題 ジャイロトロンを用いたパルスESR分光装置の感度向上III
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会（2022年）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 廣澤 康平, 石川 裕也, 林 哉汰, 藤井 裕, 大矢 健太, 浅野 貴行, 光藤 誠太郎, Jarno Jrvinen, Sergey Vasiliev
2. 発表標題 ESR/NMR二重磁気共鳴測定に向けたミリ波帯円筒型共振器の開発II
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会（2022年）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 江原颯斗, I. P. Abdi. Karya, 内山裕二, 石川裕也, 藤井裕, 光藤誠太郎
2. 発表標題 COMSOLシミュレーションを用いたD-band移相器の開発
3. 学会等名 2021年度日本物理学会北陸支部定例学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐野巴則, 西尾英通, I. P. Abdi Karya, 林哉汰, 奥谷顕, 石川裕也, 藤井裕, 光藤誠太郎
2. 発表標題 ジャイロトロンを用いたミリ波帯FT-ESRの高感度化II
3. 学会等名 2021年度日本物理学会北陸支部定例学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Seitaro Mitsudo, Tomonori Sano, Kanata Hayashi, Akira Okutani, Yuya Ishikawa, Yutaka Fujii
2. 発表標題 Development of Pulsed ESR System Using a Gyrotron as a High-power Millimeter-wave Source
3. 学会等名 ISMAR-APNMR-NMRSJ-SEST 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 S. Mitsudo, T. Sano, K. Hayashi, Y. Ishikawa, Y. Fujii
2. 発表標題 FT-ESR measurements as an application of millimeter wave gyrotron
3. 学会等名 The 46th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Mitsudo S., Dono K., Hayashi K., Ishikawa Y., Fujii Y.
2. 発表標題 Improvement in sensitivity of FT- ESR measurements by using a gyrotron as high-power millimeter wave source
3. 学会等名 2020 45th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Seitaro Mitsudo
2. 発表標題 Recent developments in magnetic resonance applications in the far-infrared region in FIR-UF
3. 学会等名 The 8th International Workshop on Far-Infrared Technologies (IW-FIRT 2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名	Hideyuki Takahashi, Yuya Ishikawa, Tsubasa Okamoto, Daiki Hachiya, Kazuki Dono, Kanata Hayashi, Takayuki Asano, Seitaro Mitsudo, Eiji Ohmichi, Hitoshi Ohta
2. 発表標題	Force-detected high-frequency electron spin resonance at 154 GHz using high-power millimeter-wave source gyrotron
3. 学会等名	The 8th International Workshop on Far-Infrared Technologies (IW-FIRT 2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年	2021年

1. 発表者名	光藤誠太郎, 佐野巴則, 林哉汰, 石川裕也, 原茂生, 藤井裕
2. 発表標題	ジャイロトロンを用いたパルスESR分光装置の感度向上
3. 学会等名	日本物理学会 第76回年次大会 (2021年)
4. 発表年	2021年

1. 発表者名	佐野巴則, 西尾英通, 高橋雅人, 石川裕也, 藤井裕, 光藤誠太郎
2. 発表標題	154 GHz パルス ESR 装置を用いた coal の FT-ESR 測定
3. 学会等名	日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年	2023年

1. 発表者名	高橋雅人, 佐野巴則, 西尾英通, 石川裕也, 藤井裕, 光藤誠太郎
2. 発表標題	二層構造を用いた新しい光 動半導体スイッチの開発
3. 学会等名	日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年	2023年

1. 発表者名 佐野巴則, 西尾英通, 林哉汰, 高橋雅人, 石川裕也, 藤井裕, 光藤誠太郎
2. 発表標題 ジャイロトロン光源を用いたパルス法ミリ波ESR測定装置の感度向上
3. 学会等名 第61回電子スピンサイエンス学会年会 (SEST2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高橋雅人, 佐野巴則, 西尾英通, 石川裕也, 藤井裕, 光藤誠太郎
2. 発表標題 多層構造を用いた光 動半導体スイッチの開発
3. 学会等名 2022年度日本物理学会北陸支部定例学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 光藤誠太郎, 佐野巴則, 廣澤康平, 石川裕也, 藤井裕, 高橋英幸, 大道英二, 太田仁
2. 発表標題 高出力遠赤外光源ジャイロトロンを用いた新しい電子スピン共鳴法の開発
3. 学会等名 第31回(2022年度)日本赤外線学会研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐野巴則, 西尾英通, 林哉汰, 石川裕也, 藤井裕, 光藤誠太郎
2. 発表標題 ジャイロトロンを用いたパルスESR分光装置の感度向上とその応用
3. 学会等名 第九回西日本強磁場科学研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐野巴則, 西尾英通, 林哉汰, 石川裕也, 藤井裕, 光藤誠太郎
2. 発表標題 ジャイロトロンを用いたパルス ESR 装置の感度向上とその応用
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tomonori Sano, Hidemichi Nishio, Kanata Hayashi, Yuya Ishikawa, Yutaka Fujii, Seitaro Mitsudo
2. 発表標題 Application of gyrotron oscillator as high-power millimeter wave light source for FT-ESR measurement
3. 学会等名 International Conference on Low Temperature Physics (LT29) (国際学会)
4. 発表年 2022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			
	institute of applied physics	the Russian Academy of Sciences		
ロシア連邦				
ウクライナ	Usikov Institute for	Radio physics and Electronics	IRE NASU	
ブルガリア	Institute of Electronics of	the Bulugarian Academy of Sciences		