

令和 6 年 6 月 21 日現在

機関番号：24405

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01016

研究課題名(和文) 密度行列分光による量子もつれ物性とそのダイナミクスの研究

研究課題名(英文) Study of entanglement properties and its dynamics in solids using density matrix spectroscopy

研究代表者

大畠 悟郎 (Oohata, Goro)

大阪公立大学・大学院理学研究科 ・准教授

研究者番号：10464653

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,800,000円

研究成果の概要(和文)：我々は、独自に開発した「密度行列分光法(DMS)」を用いて、半導体中の励起子・励起子分子系に関する量子もつれの物性とダイナミクスを研究し以下の成果を上げた。

(1) 励起子分子に内在するスピン量子もつれのダイナミクス及び光子・励起子間に現れる偏光・スピン量子もつれについて初めて測定しこれに成功した。

(2) 周波数領域・DMSを新たに開発し、これを用いて励起子分子に内在する”周波数の量子もつれ”の測定に初めて成功した。また、GaAs多重量子井戸における2励起子(重い正孔励起子/軽い正孔励起子)の重ね合わせ状態に関する密度行列とその時間変化を測定し、量子コヒーレンスとその緩和の様子を定量的に議論した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

量子情報技術で特に重要な量子力学特有の性質である、量子もつれや量子コヒーレンスは物質科学を始め様々な分野においても大変重要であるが、分光測定としてこれを明らかにする術がこれまで確立されてこなかった。今回、我々が独自に開発した密度行列分光法により、半導体中の励起子や励起子分子についてこれら量子もつれの物性やダイナミクスの測定が初めて可能となった。この手法は様々な物性測定に適用可能であり、今後の多方面の展開が期待できる。

研究成果の概要(英文)：We have investigated entanglement properties and dynamics of excitons and biexcitons in semiconductors using Density Matrix Spectroscopy (DMS) technique, achieving the following results:

(1) The dynamics of spin entanglement inherent in biexcitons and the polarization-spin entanglement between photons and excitons were successfully measured for the first time.

(2) We have newly developed frequency-domain DMS. Using this technique, the "frequency entanglement" inherent in biexcitons was successfully measured for the first time. Furthermore, the density matrix and its time evolution of the superposition state of two excitons (heavy hole exciton/light hole exciton) in GaAs multiple quantum wells were measured and the quantum coherence and its relaxation behavior were quantitatively discussed.

研究分野：光物性，量子光学

キーワード：量子もつれ 密度行列 励起子分子 量子コヒーレンス 非線形分光

### 1. 研究開始当初の背景

近年、量子暗号や量子コンピュータなど量子情報科学の発展が著しく、科学者だけの興味からいよいよ一般社会が注目するに至っている。その量子情報において特に重要な要素である「量子もつれ」と呼ばれる一種の量子相関は、量子力学の黎明期から今日に至るまで議論されてきたが、現代においてもまだ科学では完全に理解・制御できていない深く・重要な研究課題である (図1 参照)。

物性物理分野においても当然重要な観点であるが、量子もつれがどの様に我々が物性として知りたい情報とリンクしているか、量子もつれでないと示せない物性は何かの理解が進んでおらず、最近まで目覚ましい進捗がない状況であった。一方でつい最近、光合成や鳥の磁気コンパスなど生体物質や生命現象において、量子もつれによる効果が提唱され、我々を驚かせた。また、ほぼ時を同じくして量子多体系の相変化、トポロジカル物質の電子物性、さらには宇宙のブラックホールに関して等、実に様々な方面から量子もつれを「視点」とした理論研究が現れ始めており、物理、物性研究の分野としてもいよいよ目の離せない状況である。

特に生体物質・生命現象においてはその妥当性について激しく議論されている最中であるが、現在の状況において間違いなく言えることは、量子もつれを定量化する測定手法が確立されていない、ということである。このことから、生体・生命における量子性の議論も進展せず、また物性物理分野で現れた新しい量子もつれに関連した物性研究に関してもゆっくりとした進展となまっていることが考えられる。

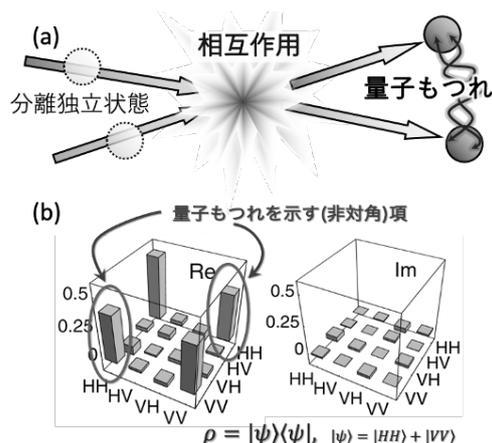


図1: (a)量子もつれの概念図。粒子(量子)同士の相互作用によって生じる量子相関と考えることができる。(b)測定された密度行列の例。密度行列における非対角項が量子もつれに対応する量であり、定量化が可能となる。

### 2. 研究の目的

これまでに我々は、物質の密度行列を定量化する分光手法「密度行列分光, DMS」を新たに考案・実現してきた (図2)。本研究では、この DMS の手法を更に発展させ、量子もつれを分光学的に測定、定量化する技術を開発する。量子もつれは、密度行列から定量化できる (相関) 量であるため、本手法によって量子もつれを部分的にではなく完全な量として測定することが可能である。今回これを用いて物質 (特に半導体中の電子状態) の量子もつれを測定し、更にその時間変化、すなわち「量子もつれダイナミクス」を調べる。また、これらがその物性にどの様に関係しているのか、量子もつれの定量化から物性として何が解るかを探求する。

この研究の先には、量子もつれを新たな「視点」とした、物理の新展開が期待される。これまで、物性物理の研究とは対象の「状態」とそのダイナミクスを調べることであった。しかしながら、全く別の観点として「相関」を対象とし更にはそのダイナミクスを議論するといった観点は理論研究においてさえもまだ不十分であり、この 21 世紀において完全に未開拓な領域である。本研究は、量子相関である量子もつれを実験的に求める手法を開拓し、新たな物理の展開を目指すものである。

### 3. 研究の方法

今回扱う DMS は従来から開発されてきた非線形分光技術と、量子情報・量子光学などで近年開発された測定手法である、量子トモグラフィ (QT) を組み合わせて、物質の量子状態を密度行列として得る測定法である (図2)。本手法は、我々が独自に開発してきており、これまでに励起子分子に内在するスピンの密度行列 (特に定常状態) について観測の実績があった。密度行列を実験的に得られることで、従来の非線形分光では求めることの出来なかった、量子もつれや量子コヒーレンスを定量化できる利点がある。

本課題ではこの DMS を発展させいくつかの対象の測定を行った。具体的には、以下(1),(2)

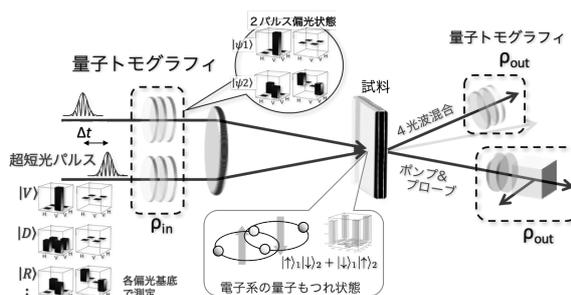


図2: 密度行列分光法の概念図。Pump&Probe 法や四光波混合法などの非線形分光手法と、量子トモグラフィの手法を組み合わせることで物質の密度行列を実験的に得る。

に示すような2つのトピックに分けて研究を推進した。

### (1) 偏光 (スピン) 自由度に着目した, 励起子分子の量子もつれダイナミクス

我々は, これまでに半導体励起子分子に内在する量子もつれについてDMSを用いて測定を行ってきた。これは, 二光子吸収や四光波混合を発展させたものであり, 励起直後の定常測定のみならずその時間変化の測定も可能である。本研究では, これを発展させ励起子分子に内在するスピンに関する量子もつれダイナミクスを測定した。また更に, 励起子分子が2つのポラリトンへと散乱する際の位相整合条件(各ポラリトンの散乱角度やエネルギー)を高精度に調整することにより, 励起子分子が散乱した後に発生する光子と励起子様ポラリトン間に現れる偏光・スピン量子もつれとその緩和についての測定を行った。

### (2) 周波数量子もつれに着目した, 励起子分子, 2励起子重ね合わせ状態のダイナミクス

今回我々は, 周波数 (時間) 領域の量子もつれに新たに着目する。図3のように4F分光光学系と空間光変調器(SLM)を用いることによって, 周波数領域において偏光の二準位と類似した二周波重ね合わせパルス (射影基底) を作り出すことができる。本研究では, 800nm帯と400nm帯のそれぞれの光パルスに対してこれら重ね合わせパルスを生成・制御し, これらを用いて周波数領域におけるDMSの測定系を新たに構築した。また周波数領域における励起子分子に内在する量子もつれの定量化を目指した。さらに, 半導体量子井戸において現れる重い正孔と軽い正孔をそれぞれ含む2種類の励起子の重ね合わせ状態について, ポンプ・プローブ法利用したDMSを用いてその密度行列の時間発展を測定した。

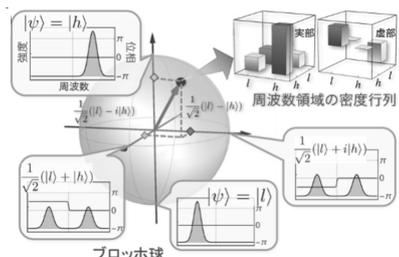


図3: 周波数領域における2準位基底(量子ビット)の例。偏光と同様に6種類の基底状態を生成可能である。

## 4. 研究成果

### (1)半導体 CuCl における励起子分子に内在するスピン量子もつれとそのダイナミクス

励起子分子におけるスピン量子もつれについては, 四光波混合型のDMSから量子もつれの時間変化の測定に初めて成功した。従来の四光波混合信号とは大きく異なり, 時間の経過の中で生き残った励起子分子は直感に反して量子もつれを長時間保持し続けていることを明らかにした。特に, 温度依存性を丁寧に測定し, 60Kを超える温度においても明確に量子もつれが保持されていることを見出した。

### (2)光子・励起子様ポラリトン間の偏光-スピン量子もつれの測定

次に, 量子もつれを保持している励起子分子が分裂・崩壊した後の状態に着目した。具体的には崩壊時に生成される, 光子と励起子に近い性質を持つ2つのポラリトン (光子様・励起子様ポラリトン) 間の偏光-スピン量子もつれについて, 研究を進めた (図4)。本実験でも試料はCuCl単結晶で低温 (約10K) において行った。

励起子分子が散乱・崩壊する際に特別な位相整合条件の散乱過程のものを抜き出すと, 性質が光子/励起子に近い2つのポラリトンを得ることができる。片方は, すぐさま試料の外に抜け出して光子として振る舞うが, もう一方は群速度が非常に遅く長い間結晶中に励起子として留まる。したがってこの間は, 光子・励起子の対として存在し,  $|\psi\rangle = (|L\rangle|\uparrow\rangle + |R\rangle|\downarrow\rangle)/\sqrt{2}$  のような波動関数で表される量子もつれが生じることが予想される。ここで,  $|L\rangle, |R\rangle$ は光子の円偏光,  $|\uparrow\rangle, |\downarrow\rangle$ は励起子のスピン状態を表す。

実験では偏光に関する四光波混合型のDMSを用いてこれを測定し, 偏光-スピン自由度についての密度行列を得ることに成功した (図5) また, 図4(b)に示すようにPump光の焦点位置を変化させ, 励起子様ポラリトンの結晶内滞在時間の違いによる量子もつれの変化を

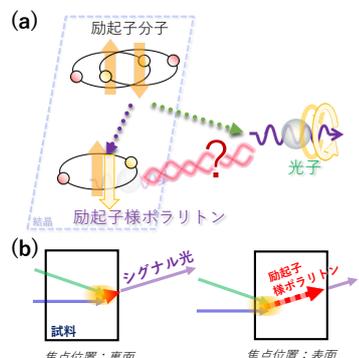


図4: (a) 励起子分子から生成された光子・励起子様ポラリトンの概念図, (b) 光パルスの焦点位置の違いと励起子様ポラリトンの伝搬距離の違いを示した図。

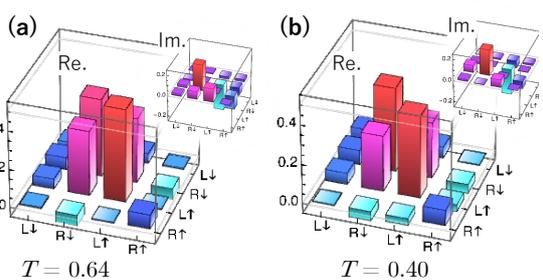


図5: 本測定によって得られた, 光子・励起子様ポラリトン間の偏光・スピンの密度行列とそこから得られたTangleの値。パルス光の焦点位置が裏面付近の場合(a)と, 表面付近の場合(b)。

調べた。その結果、滞在時間が長いほど量子もつれが緩和していく様子を初めて測定することに成功しこれを明らかにした。

これまでに、光子と物質（の電子状態）の間で保持される量子もつれが明らかにされた例は、冷却原子やダイヤモンド NV 中心など特殊な例に限られていた。このように半導体中の光子と励起子間の量子もつれが明確に測定された例は本研究が初めてであり、物性研究として大切な一歩を進んだといえる。また片方の励起子が結晶中に滞在する時間変化によって量子もつれが緩和することも初めて示された。今後、電子状態の緩和との関係などを調べることによって量子もつれ物性の理解が進むことが期待される。

### (3) 励起子分子に内在する周波数量子もつれの測定

本実験では、新たに周波数量子もつれ状態に焦点を当てた。励起子分子と、それを構成する二つの励起子の間にはエネルギー保存則が成り立つ。本来この二つの励起子のエネルギーは連続準位であるが、ここでは簡単のために二準位系に限定し、励起子のエネルギーを $\omega_l$ ,  $\omega_h$ の2つの値のみを持っているものとする。この時、励起子分子の波動関数 $|\Psi\rangle_{bx}$ は次式のように予測できる。

$$|\Psi\rangle_{bx} = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\omega_l\rangle_1 |\omega_h\rangle_2 + |\omega_h\rangle_1 |\omega_l\rangle_2) \quad (\omega_l + \omega_h = \omega_{bx})$$

ここで $\omega_{bx}$ は励起子分子のエネルギーである。これは、励起子1のエネルギーが $\omega_l$ なら励起子2のエネルギーが $\omega_h$ の状態 $|\omega_l\rangle_1 |\omega_h\rangle_2$ とその逆の状態 $|\omega_h\rangle_1 |\omega_l\rangle_2$ の重ね合わせ状態、つまり量子もつれ状態であることを表している。この励起子分子を構成する二励起子間の量子もつれ状態を実験的に定量評価した例はこれまでなかった。本研究では上式で表される密度行列を DMS の手法を用いて再構築し、励起子分子に内在する周波数量子もつれの評価を行った。

測定では先の研究と同じく CuCl 単結晶(温度:約 10K)を用いた。また測定は近紫外の 2 周波数に限定した周波数領域 DMS を新たに開発しこれを用いた。具体的には、中心周波数が $\omega_l$ のパルスと $\omega_h$ のパルスに加えて、図6に示すような二周波の間で位相差 $\Delta = 0, \pi, \pi/2, -\pi/2$ を持つ 4 種類の重ね合わせパルス計 6 種類のパルスを生成しこれを励起パルスとして用いた。

今回用いた周波数領域 DMS については、これまでのように偏光を基底とした二準位の代わりに、先ほど示した周波数の 2 準位を基底として QT を行った。図7に重ね合わせパルスを用いた二光子吸収過程の概念図を示す。6 種類のパルスを 2 つの励起パルス間で独立に制御し、合計 36 種類の組み合わせを用いて、励起子分子が生成された場合に見える散乱光 ( $M_T^R$ )を測定し、それらの信号から密度行列を再構築した。

本実験で得られた励起子分子の密度行列を図8に示す。得られた密度行列は非対角項成分に有意な値を持っている。これは励起子分子を構成する 2 つの励起子が周波数領域で量子もつれ状態であることを示す結果となった。また、量子もつれ度合いを表すタングルは 0.78 であり、高い値を示している。

周波数（時間）の量子もつれは光子対を用いた研究がこれまで進められてきており、量子計測の分野などにも応用が広がっているが、電子状態など物質の状態についての研究はこれまで極めて例が少なかった。本研究は物性研究において周波数量子もつれの観点を加える重要な進展となった。

### (3) 2 励起子重ね合わせ状態の量子コヒーレンスとその時間変化の測定

今回開発した周波数領域 DMS を用いて、半導体中の縮退していない二種類の励起子の重ね合わせ状態の密度行列も定量化可能である。特にその重ね合わせの様子もしくは度合いについては量子コヒーレンスと呼ばれるようになり、近年では光合成の研究など純粋な物性物理以外の分野でも注目されて

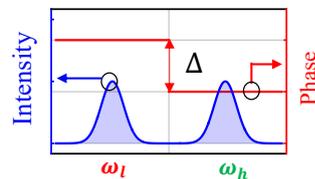


図6：重ね合わせパルスの概念図

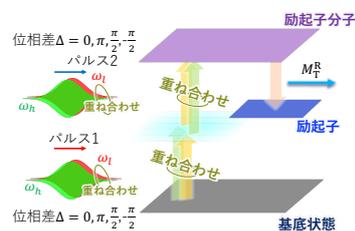


図7：エネルギーダイアグラムと量子トモグラフィの概念図。 $M_T^R$ は励起子分子から横波励起子への遷移で生じる発光。 $\Delta = 0, \pi, \pi/2, -\pi/2$

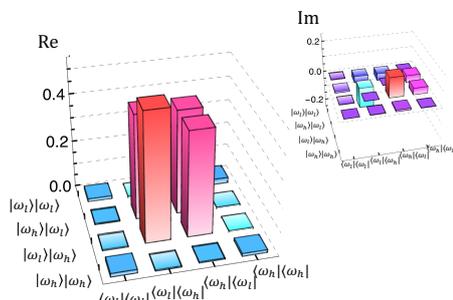


図8：二光子吸収過程に対する周波数の量子トモグラフィから得られる密度行列の実部 (Re) と虚部 (Im)

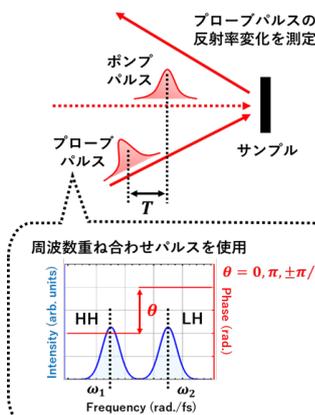


図9：ポンプ・プローブ分光法を用いた密度行列分光法の概念図。

いる。本研究では、近赤外の2周波数に限定した周波数領域DMSを開発し、これを用いてGaAs多重量子井戸における2励起子(重い正孔(HH)励起子/軽い正孔(LH)励起子)の重ね合わせ状態に関する密度行列の時間変化を測定した。このような状態はこれまでPump & Probe分光等を用いた研究において量子ビートとして研究されてきた対象である。

実験では、共鳴周波数がそれぞれ $\omega_1, \omega_2$ であるHH, LH励起子の状態 ( $|\psi\rangle = |1\rangle, |2\rangle$ ) とその重ね合わせ状態 ( $|\psi\rangle = |1\rangle + e^{i\theta}|2\rangle, \theta = 0, \pi, \pm\pi/2$ ) に対応する6種類の光パルス(二周波重ね合わせパルス)を用いた。ここで、 $\theta$ は重ね合わせの相対位相を表す。このようなパルスを用いてPump & Probe型のDMSの測定を行った。概念図を図9に示す。光源には、Ti:Sapphireパルスレーザー(パルス幅:~80fs)、試料には、30周期の(GaAs)<sub>35</sub>/(AlAs)<sub>35</sub>多重量子井戸を用いて、温度約10Kにて測定を行った。ポンパパルス(通常のフーリエ限界パルス)とプローブパルス(周波数重ね合わせパルス)間の遅延時間Tを変化させながら反射率変化を測定し、QTを行うことで2準位系の密度行列を再構成した。

図10に本測定で得られた密度行列の例を示す。得られた密度行列から、2つの励起子の占有確率を表す対角項は緩やかに変化する一方、量子コヒーレンスを表す非対角項は振動しながら緩和していく様子が明らかとなった。この様子をより明確にするために得られた密度行列の時間変化を、ブロッホ球上の奇跡として表したものが図11である。ブロッホベクトルの水平成分が、HH励起子とLH励起子のエネルギー差に対応した周期(約250fs)で回転しながら、振幅を小さくし原点に収束していく様子が見られる。このように、密度行列の時間発展を実験的に求めることで、HH励起子とLH励起子間の量子コヒーレンスが失われていく振る舞いを明らかにすることができた。

以上の様に励起子の量子コヒーレンスの振る舞いについてその密度行列を直接実験的に明らかに出来たことは重要な成果である。特に、物質の状態や性質、量子性の保持によって現れる物理的、化学的現象について量子情報科学の観点から議論していく上で重要な進歩となった。

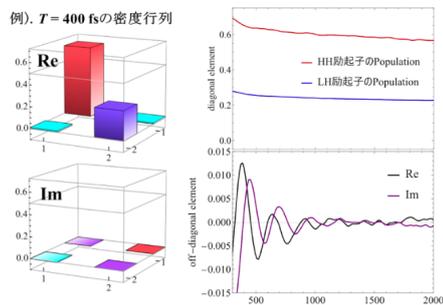


図10:再構成した密度行列の実部と虚部。例としてポンパ光とプローブ光の遅延時間が400fsのときの結果を示している。密度行列のそれぞれの要素の時間発展。

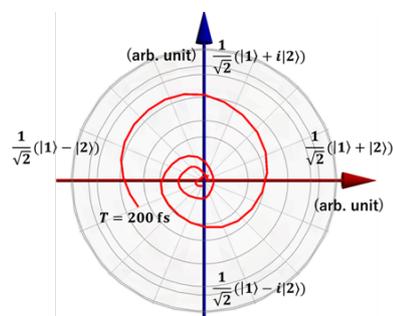


図11:実験結果の密度行列から求めたブロッホ球の|1>方向から見た量子状態の軌跡。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 I. Sakata, T. Sakata, K. Mizoguchi, S. Tanaka, G. Oohata, I. Akai, Y. Igarashi, Y. Nagano & M. Okada	4. 巻 11
2. 論文標題 Complex energies of the coherent longitudinal optical phonon-plasmon coupled mode according to dynamic mode decomposition analysis	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 23169/1-10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-021-02413-w	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計25件（うち招待講演 2件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 竹内舜弥, 森尾 東, 大畠悟郎, 溝口幸司
2. 発表標題 励起子分子の二光子吸収過程における周波数量子もつれ II
3. 学会等名 日本物理学会2024年春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 仲田壮, 大畠悟郎, 田中智, 溝口幸司
2. 発表標題 現象論的有効リウヴィリアンによるn型GaAs中の縦光学フォノンとプラズモン間の結合状態の実験研究
3. 学会等名 日本物理学会2024年春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 宮永麟太郎, 鎌田将行, 大畠悟郎, 田中智, 溝口幸司
2. 発表標題 CuCl半導体微小共振器における共振器ポラリトンの干渉測定 II
3. 学会等名 日本物理学会2024年春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 大島悟郎
2. 発表標題 密度行列分光法 ~量子もつれ, 量子コヒーレンスを定量化する新しい分光法~
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第44回年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 宮永麟太郎, 大島悟郎, 田中 智, 溝口幸司
2. 発表標題 半導体微小共振器における共振器ポラリトンの位相測定
3. 学会等名 第34回光物性研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 仲田壮, 大島悟郎, 田中 智, 溝口幸司
2. 発表標題 現象論的有効リウヴィリアンを用いたn型GaAsにおける縦光学フォノン-プラズモン結合モードの解析
3. 学会等名 第34回光物性研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 亀阪紀人, 大島悟郎, 溝口幸司
2. 発表標題 密度行列分光法を用いたGaAs/AlAs量子井戸における励起子量子コヒーレンスの解析
3. 学会等名 第34回光物性研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 鎌田将行, 大畠悟郎, 宮永麟太郎, 溝口幸司
2. 発表標題 CuCl中の励起子ポラリトンに対する複素スペクトル測定
3. 学会等名 日本物理学会第78回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 亀阪紀人, 大畠悟郎, 溝口幸司
2. 発表標題 密度行列分光法による半導体量子井戸中の励起子量子コヒーレンスの解析
3. 学会等名 日本物理学会第78回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 宮永麟太郎, 大畠悟郎, 田中 智, 溝口幸司
2. 発表標題 CuCl半導体微小共振器における共振器ポラリトンの干渉測定
3. 学会等名 日本物理学会第78回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 尾崎翔太, 大畠悟郎, 溝口幸司
2. 発表標題 励起子分子から生成された光子・励起子様ポラリトン間の偏光-スピン量子もつれとその緩和の測定
3. 学会等名 日本物理学会第78回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 R. Miyanaga, G. Oohata, S. Tanaka, and K. Mizoguchi
2. 発表標題 The incident-angle dependence of microcavities spectral profiles in CuCl
3. 学会等名 Physics of Open Systems and Beyond (POS&BYD) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大島悟郎
2. 発表標題 密度行列分光法~量子トモグラフィを利用した新しい分光手法~
3. 学会等名 強光子場科学研究懇談会 2023年度第3回懇談会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 尾崎翔太, 大島悟郎, 溝口幸司
2. 発表標題 励起子分子から励起子に近いポラリトン状態への散乱過程における偏光量子もつれの測定
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 宮永麟太郎, 大島悟郎, 溝口幸司, 田中 智
2. 発表標題 例外点近傍における共振器ポラリトンの光学特性
3. 学会等名 第33回光物性研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 森尾 東, 大島悟郎, 溝口幸司
2. 発表標題 励起分子の二光子吸収過程における励起光パルスの周波数相関
3. 学会等名 第33回光物性研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 森尾 東, 大島悟郎, 溝口幸司
2. 発表標題 励起分子の二光子吸収過程における周波数量子もつれ
3. 学会等名 日本物理学会春季大会 (2023年)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 宮永麟太郎, 大島悟郎, 溝口幸司, 田中 智
2. 発表標題 半導体微小共振器における例外点の創出と光学特性
3. 学会等名 日本物理学会春季大会 (2023年)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 上村 陸, 森尾 東, 大島悟郎, 溝口幸司
2. 発表標題 周波数領域・密度行列分光法の開発
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大畠悟郎, 木村崇彦, 溝口幸司
2. 発表標題 励起子分子に内在する量子もつれの時間発展と温度変化の測定
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 横山大樹, 西田拓哉, 大畠悟郎, 田中 智, 溝口幸司
2. 発表標題 CuCl半導体微小共振器における角度分解透過スペクトルの複素スペクトル解析
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 宮永麟太郎, 大畠悟郎, 溝口幸司
2. 発表標題 CuCl微小共振器における励起子-光子相互作用の活性層位置依存性
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 宮永麟太郎, 大畠悟郎, 溝口幸司
2. 発表標題 異なる活性層位置を持つ半導体微小共振器における光学特性
3. 学会等名 第32回光物性研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大島悟郎, 上村 陸, 溝口幸司
2. 発表標題 周波数領域・密度行列分光法を用いた励起子量子コヒーレンスの測定 (理論)
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 上村 陸, 大島悟郎, 溝口幸司
2. 発表標題 周波数領域・密度行列分光法を用いた励起子量子コヒーレンスの測定 (実験)
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 大島悟郎(分担執筆)	4. 発行年 2024年
2. 出版社 エヌ・ティー・エス	5. 総ページ数 372
3. 書名 量子生命科学ハンドブック	

〔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
研究 分担者	溝口 幸司  (Mizoguchi Kohji)  (10202342)	大阪公立大学・大学院理学研究科 ・教授   (24405)	

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
---------	---------