

「ハイブリッド量子科学」

領域設定期間

平成27年度～令和元年度

目 次

1	はじめに	1
2	組織ならびに参加者	3
3	研究領域の目的及び概要	8
4	研究組織の連携体制	10
5	若手研究者の主体的活動	11
6	研究目的の達成度と主な成果	12
6-1	単一 NV ダイヤモンド量子センサ –n 型ダイヤモンドにより室温での最長 T_2 と単一 NV での最高磁場感度実現–	14
6-2	NV 中心の窒素核スピンコヒーレンスの制御と電氣的検出	15
6-3	ダイヤモンド集合体を用いた高感度 AC 磁場センサ	16
6-4	ミクロスコピックマイクロ波イメージング –ラビ振動を用いたマイクロ波強度分布の精密計測–	17
6-5	ダイヤモンド NV 中心による熱マグノン流の計測 –量子スピン状態と熱マグノン流の接続を実現–	18
6-6	NV センターを有するナノダイヤモンド薄膜を用いた電子デバイスのオペランド解析	19
6-7	量子テレポーテーション転写に成功 –光子の量子状態をダイヤモンドに保存、量子通信に新展開–	20
6-8	世界初！誤り耐性のある量子ビットを開発 –幾何学的エコーで自律安定する量子メモリー／量子センサー–	21
6-9	量子集積メモリーに道を開く光スピン制御の新原理実証 –量子コンピュータや量子通信の高速化を可能に–	22
6-10	スピンメーザーによる極低温・超低雑音マイクロ波増幅 –古くて新しい量子技術の確立を目指して–	23
6-11	ダイヤモンド NV センターを用いたハイブリッド量子系における双安定性	24
6-12	ダイヤモンドからの超放射を実現	25
6-13	量子系における負温度への緩和現象	26
6-14	位相緩和の影響下で古典限界を超える量子センサ	27
6-15	計測をハイブリッドにデザインする	28
6-16	2 量子ビットのハミルトニアン動力学系におけるロバスト動力学制御	29
6-17	未知ユニタリ変換の逆変換を実装するユニバーサル量子アルゴリズム	30
6-18	量子輸送制御プロトコルの開発	31
6-19	観測による量子多体状態の制御 –強い散逸による絶縁体の安定化を実現–	32
6-20	光格子中の単一原子の新しい観測法の開発	33
6-21	光と原子の量子インターフェース	34
6-22	結合共振器量子電気力学系の実現 –分散型量子コンピューターや量子ネットワークへの応用に期待–	35
6-23	結合共振器量子電気力学系における共振器暗モード –原子のある場所には光が存在しないにもかかわらず、離れた場所にある光から原子にエネルギーが受け渡される現象を観測–	36
6-24	全光量子中継実験	37
6-25	三次元半導体カイラルフォトニック結晶による円偏光発光寿命の制御	38
6-26	トポロジカルナノ共振器レーザの実現	39
6-27	単一量子リングにおける光学アハラノフ・ボーム効果 –エキシトンのウィグナー分子形成を観測–	40
6-28	微小光共振器における新奇な現象 –異常な光群遅延や高 Q 機械振動子を実現–	41
6-29	$^{167}\text{Er}^{3+}$ における光コヒーレント過渡現象 –通信波長帯光での 4f 軌道電子コヒーレント操作を実現–	42
6-30	超伝導量子ビット集団と超伝導共振器の協調的結合	43
6-31	超伝導磁束量子ビットを用いた巨視的実在性問題の実験的検証	44
6-32	超伝導量子ビットを用いた高感度電子スピン共鳴分光 –マイクロメートル領域での電子スピンの高感度検出–	45
6-33	トポロジカル絶縁体を持つ SNS 型ジョセフソン接合	46

6-34	トポロジーの変化に伴う巨大磁気抵抗効果を発見 –非散逸電流のスイッチング原理を確立–	47
6-35	トポジカル絶縁体の表面金属状態の絶縁化 –特殊な電気磁気効果観測のための物質基盤を確立–	48
6-36	電流印加による量子異常ホール効果の崩壊	49
6-37	InSb 量子ホール系における抵抗検出 NMR –量子ホール系における核スピン偏極の相反性–	50
6-38	非対称二重障壁半導体ヘテロ構造を用いた電子蒸発冷却	51
6-39	シリコントランジスタで1ビット量子シミュレーション –磁気共鳴で古くから知られる現象を単一スピんで再現–	52
6-40	近藤遮蔽雲を初めて観測	53
6-41	半導体量子ドットと量子井戸超格子のハイブリッド構造	54
6-42	量子ドット並列系の光電流におけるディック効果 –THz 光の高感度センサーへの応用–	55
6-43	Ge/Si ナノワイヤ 2 重量子ドットと共振器の相互作用	56
6-44	Ge/Si ナノワイヤにおけるヘリカルチャネルの形成	57
6-45	ポイントコンタクトにおけるミクロスコピック NMR	58
6-46	量子ポイントコンタクトにおける動的な核スピン分極とランダムポテンシャルの影響	59
6-47	ハイブリッド系におけるカーボンナノチューブの理論構築 –トポジカル状態の発見とその物性の解明–	60
6-48	フレキシブルカーボンナノチューブ電気化学センサー	61
6-49	欠陥形成によるカーボンナノチューブ中のフォノンの変調	62
6-50	単層カーボンナノチューブの熱伝導率精密計測	63
6-51	欠陥修復した酸化グラフェンからバンド伝導を観測 –高結晶性グラフェン薄膜のスケラブル製造への道筋を開拓–	64
6-52	グラフェンの移動度向上に関するモンテカルロシミュレーション	65
6-53	グラフェンフォノン結晶の同位体制御 –グラフェン内のフォノン伝導制御に向けて–	66
6-54	構造欠陥による単層グラフェンのフォノン制御とその応用 –グラフェンのフォノン伝導制御と熱電変換の高効率化–	67
6-55	指向性熱流と固体集熱の実現	68
6-56	表面フォノンポラリトンによる熱伝導の増強 –半導体デバイスの高性能化につながる新たな放熱機構–	69
6-57	熱の波動性を用いた熱伝導制御	70
6-58	フォニック結晶導波路を用いた超音波振動のパルス圧縮技術	71
6-59	一次元フォニック結晶中の弾性波トポジカル局在状態	72
6-60	非対称人工格子によるスピン・フォノン結合制御とフォトン励起	73
6-61	ゲート制御量子ドットを用いた機械共振器の高感度振動検出	74
6-62	メカニカル振動子による核スピン制御	75
6-63	機械振動を用いた半導体励起子の制御 –歪による Dark 状態と Bright 状態の結合を実現–	76
6-64	電気機械共振器における Ising スピン相互作用	77
6-65	MEMS を用いた光-熱-機械系ハイブリッド構造テラヘルツボロメータ	78
6-66	ナノギャップ電極を用いた単一分子へのテラヘルツ電磁波の集光と巨大な電場増強効果の観測	79
6-67	テラヘルツ電磁波で単一分子の超高速振動を観測	80
6-68	位相制御テラヘルツ波による超高速イオン伝導	81
6-69	単一カーボンナノチューブのテラヘルツダイナミクス	82
6-70	位相制御テラヘルツ走査トンネル顕微鏡 –テラレーメードのテラヘルツ近接場による超高速電子操作	83
6-71	トポジカルに護られた電気伝導特性の可視化に成功 –外乱に強い量子ホール状態の実証–	84
6-72	核スピン共鳴プローブ顕微鏡 –量子構造のスピン状態のミクロスコピック MRI を実現–	85

7	研究業績	86
7-1	発表論文 (査読付)	

7-2 国際・国内会議招待講演

7-3 受賞

8 おわりに・・・・・・・・・・・・・・・・

1 はじめに

新学術領域「ハイブリッド量子科学」は、電荷、クーパ対、スピン、核スピン、フォトン、フォノンなど異なる物理量を量子力学的に結合するハイブリッド量子系の基礎科学を追究し、それを様々な高感度センサー、高感度物性測定や、新しい物理の進展につなげて行こうとするものです。ハイブリッド量子系の機能を最大限に活用した **Quantum Enabled Technology** を探究することで、工学、理学から医学に至る幅広い分野にインパクトをもたらすのみならず、種々の材料、様々な物理量に対する量子もつれ物理を探求し、量子ネットワークへの助走になることを目的として 2015 年 7 月にスタートしました。量子科学・量子技術というと量子暗号など量子情報処理の実現や量子コンピュータに向けて超伝導、電子スピン、アトムやイオントラップの量子ビットを実現し、それを集積化する取り組みが主流な中で、同じタイプの量子ビットを集積化する方向とは異なるアプローチがあり、そこにも多くの量子科学の面白さが眠っていると言うことに気づいたことからこのプロジェクトは始まっています。少ない数の量子ビットでもセンサーとして従来にない高感度化を図り、さらに、異なる物理量の量子トランスデューサを実現することで、エネルギーとして、さらには距離（大きさ）として異なるスケールでの量子情報のやり取りを可能にしようとする試みがスタートしました。

この新学術領域の計画研究は 4 項目から成り、A01 では、電荷（クーパ対を含む）、スピン、核スピンの量子的な結合の制御と、これらのフォトン、フォノンとの結合、A02 ではフォトンの高度な制御技術の確立とフォトンと他の物理量の量子的な結合、A03 ではフォノンの高度な制御技術の確立とフォノンと他の物理量の量子的な結合、A04 ではハイブリッド量子科学の実現に向けた理論構築を推進しました。理論は A01 から A03 で得られた様々な実験結果、特に新しいハイブリッド現象の解釈を理論的にサポートするのみならず、領域全体を束ねてハイブリッド量子の面白さを示す点でも重要な役割を果たしました。新学術領域の大きな特徴として、公募研究の存在があります。公募研究では、これまで様々な物理系のコヒーレント制御に取り組んできた研究者、あるいはこれまでは古典的なシステムの研究をしてきたが技術を活かして量子的な方向に研究を拡張したい研究者、新学術領域に参加している研究分担者と共同して新境地を拓きたい研究者などが素晴らしい研究を提案してくれました。当初はハイブリッド量子と言う研究分野の特性から公募研究が集まりにくいのではないかと心配もありましたが、予算額を比較的大きくしたこともあり、多数の応募があり、その中から質の高い研究を採択することができました。実際、計画研究に遜色のない素晴らしい成果を上げた公募研究も多く、また、計画研究との共同研究も活発に行われました。装置の共有や共同研究に必要な旅費などを総括班で積極的にサポートしたことも良い方向に働いたと思います。お陰様で、十分とは言えませんが、領域全体が一丸となって、量子とハイブリッドという新しい領域の地平を切り拓いていくことができたと思います。異なる物理量ということで、電荷、電子スピン、核スピン、フォトン、フォノンの研究を行っていた研究者が集まるとなると、単なる寄せ集めになる心配もあり、実際に新学術領域プロジェクトのスタート時はそのような状況もありましたが、着実に領域内での共同研究が進捗し、その印象は年々薄れていきました。この変化は領域代表として、大変嬉しいものでした。

いくつかの共同研究が進む中で面白い方向も出てきました。量子的な結合を目指して電荷、スピン、フォトン、フォノンの最先端の技術が協働するのですが、量子制御は難しいので、なかなか量子には到達できない部分が出てきます。その中で、量子に行く前の古典的なハイブリッドでもこれまで世の中になかったような素晴らしい機能を示すものが出てきました。また、ハイブリッド自動車がこれまでのガソリン車と電気自動車をハイブリッドしたように、電荷、スピン、フォトン、フォノンの分野で古典と量子をハイブリッドする量子トランスデューサとは別の意味での“ハイブリッド量子”も出てきました。いろいろ意見はあるでしょうが、100%量子でなければいけないという考えは捨てて、ハイブリッド化により出現した面白い取り組みも積極的に支援するという領域運営を進めてきました。ハイブリッド量子の領域

は純粋基礎研究が多く、なかなか応用には繋がりにくいのですが、このような成果の中には企業が興味を持ってくれるものも含まれているように思います。

もっと重要なことは電荷・スピン、フォトン、フォノン、理論の計画研究と公募研究が交わる中で、研究の進め方、測定法などに関する異なる常識の交流が行われたことです。共同研究を通してこれまでの枠を超えた多くの人と交わることで、研究者、さらには人としてのハイブリッド化も進んだのではないかと期待しています。現在の世界情勢を考えると、いろいろな面でハイブリッドなセンスを持ち続けることは研究者としても人としても大切に思います。

この小冊子は新学術領域「ハイブリッド量子科学」の5年間の活動と得られた研究成果を紹介することを目的にしたものです。はじめに、領域の組織ならびに参加者を紹介したあと、研究領域の目的及び概要、さらに研究組織の連携体制を紹介しています。特に、若手委員が中心になり、若手による若手に絞った若手のための活動も積極的に行ったことから、項目を作って若手研究者の主体的活動を紹介しています。さらに、領域における研究目的の達成度を簡単に紹介したのち、本領域の活動で得られた主な成果を72件紹介しています。本小冊子は日本語を原則にしており、英語については重要な部分を中心に英語版を作成し、webで紹介する予定ですが、日本語がわからない留学生などにも情報が提供できるように、主な成果については日本語と英語両方を掲載しています。最後に、全論文、さらには招待講演、受賞など業績リストを掲載しています。多くのメンバーが参加し、5年間に及ぶため抜けている部分もありますが、この点をご容赦下さい。この小冊子が私たちの新学術領域「ハイブリッド量子科学」をご理解頂く一助になり、少しでも皆様の将来の研究の参考になれば大変嬉しく思います。

新学術領域「ハイブリッド量子科学」領域代表
東北大学教授
平山祥郎

2 組織ならびに参加者

*なお所属研究機関・部局は領域活動期間のものである。

総括グループ

研究課題名	研究代表者	所属研究機関・部局	研究期間
ハイブリッド量子科学の研究 総括 ※国際活動支援班代表兼務	平山 祥郎	東北大学・理学研究科	平成 27 年度 ～令和元年度
電荷・スピンハイブリッド量子科学の研究 ※国際活動支援班分担者兼務	石橋 幸治	国立研究開発法人理化学研究所 ・石橋極微デバイス工学研究室	平成 27 年度 ～令和元年度
フォトンハイブリッド量子科学の研究 ※国際活動支援班分担者兼務	平川 一彦	東京大学・生産技術研究所	平成 27 年度 ～令和元年度
フォノンハイブリッド量子科学の研究 ※国際活動支援班分担者兼務	山口 浩司	NTT 物性科学基礎研究所 ・量子電子物性研究部	平成 27 年度 ～令和元年度
ハイブリッド量子科学の理論的研究 ※国際活動支援班分担者兼務	根本 香絵	国立情報学研究所 ・情報学プリンシプル研究系	平成 27 年度 ～令和元年度

電荷・スピングループ

区分	氏名	所属研究機関・部局	役割分担等	研究期間
研究代表者	石橋 幸治	国立研究開発法人理化学研究所・開拓研究本部	半導体ナノ構造、ナノカーボンを用いたナノ構造、半導体/超伝導体における電荷・スピン結合と制御に関する研究	平成 27 年度 ～令和元年度
研究分担者	大野 雄高	名古屋大学・未来材料・システム研究所	ナノカーボンにおける電荷・スピンとフォトンとの相互作用の研究	平成 27 年度 ～令和元年度
研究分担者	平山 祥郎	東北大学・理学研究科	半導体ナノ構造、ナノカーボン構造における電荷・スピンと核スピン、フォノンとの相互作用の研究	平成 27 年度 ～令和元年度
研究分担者	神田 晶申	筑波大学・数理物質系	ナノカーボン構造における電荷・スピンとフォノン、クーパーペアの相互作用の研究	平成 27 年度 ～令和元年度
研究分担者	小林 慶裕	大阪大学・工学研究科	ナノカーボンを用いたハイブリッドナノ構造作製技術の開発	平成 27 年度 ～令和元年度
研究分担者	川村 稔	国立研究開発法人理化学研究所・創発物性科学研究センター	トポロジカル絶縁体におけるハイブリッド相互作用の研究	平成 27 年度 ～令和元年度

公募研究者	古賀 貴亮	北海道大学・情報科学研究科	インターバンドラッシュバを用いたスピン軌道ブロッケードの最適化	平成 28 年度 ～平成 29 年度
公募研究者	黒田 眞司	筑波大学・数理物質系	格子歪を介した単一スピンと機械的振動との結合	平成 28 年度 ～平成 29 年度
公募研究者	高橋 義朗	京都大学・理学研究科	量子気体顕微鏡による光格子中原子スピンとフォトンのハイブリッド量子制御	平成 28 年度 ～平成 29 年度
公募研究者	山本 倫久	東京大学・工学系研	固体の電子波の量子もつれ制御	平成 30 年度 ～令和元年度
公募研究者	島田 宏	電気通信大学・情報理工	高品質トンネルスピンインジェクタを用いた電荷・スピン・超伝導複合効果の研究	平成 30 年度 ～令和元年度
公募研究者	安 東秀	北陸先端科技大	スピン波で接続したハイブリッド量子スピン系の実現	平成 30 年度 ～令和元年度
公募研究者	毛利 真一郎	立命館大学・理工学部	分極場による遷移金属ダイカルコゲナイドのバレー・スピン制御	平成 30 年度 ～令和元年度
公募研究者	久保 結丸	沖縄科学技術大学院大学	ダイヤモンド超伝導 3 次元ハイブリッド量子系	平成 30 年度 ～令和元年度
連携研究者	田中 啓文	九州工業大学・生命体工学研究科		平成 27 年度 ～令和元年度

フォトングループ

区分	氏名	所属研究機関・部局	役割分担等	研究期間
研究代表者	平川 一彦	東京大学・生産技術研究所	極限ナノ構造のテラヘルツ分光、MEMS を用いた新規光検出法の開拓、および研究のとりまとめ	平成 27 年度 ～令和元年度
研究分担者	水落 憲和	京都大学・化学研究所	ダイヤモンドの単一 NV 中心を用いた単一フォトン、単一電荷、単一スピン間の量子操作	平成 27 年度 ～令和元年度
研究分担者	岩本 敏	東京大学・生産技術研究所	フォトニック結晶を用いた光輻射場の制御と量子ドット-光子ハイブリッド系への応用	平成 27 年度 ～令和元年度
研究分担者	早瀬 潤子	慶應義塾大学・理工学部	量子ドット集合体-光ハイブリッド量子系およびダイヤモンド NV 中心の制御と機能創成	平成 27 年度 ～令和元年度
研究分担者	赤羽 浩一	国立研究開発法人情報通信研究機構・ネットワークシステム研究所ネットワーク基盤研究室	垂直光共振器構造や半導体量子ドットの結晶成長、作製した構造の光学特性評価	平成 27 年度～ 平成 29 年度、 令和元年度

公募研究者	小坂 英男	横浜国立大学・大学院工学研究院	光子・電子・核子スピン量子もつれエンジニアリング	平成 28 年度 ～平成 29 年度
公募研究者	青木 隆朗	早稲田大学・理工学術院	共振器量子電気力学系の非局所コヒーレント結合の研究	平成 28 年度 ～令和元年度
公募研究者	俵 毅彦	日本電信電話株式会社 NTT 物性科学基礎研究所・量子光物性研究部	ノンスピンバス希土類フォトニック結晶によるフォトン-スピンコヒーレント結合	平成 28 年度 ～平成 29 年度
公募研究者	野村 晋太郎	筑波大学・数理物質科学研究科	光-電子スピン-核スピン格子ハイブリッド系の量子コヒーレント制御	平成 30 年度 ～令和元年度
公募研究者	武田 淳	横浜国立大学・工学系研究科	テラヘルツ近接場による超高速ナノ空間電子マニピュレーション	平成 30 年度 ～令和元年度
公募研究者	井上 修一郎	日本大学・理工学部	プラズモニック量子デバイスの開発とその量子ウォークへの応用	平成 30 年度 ～令和元年度

フォノングループ

区分	氏名	所属研究機関・部局	役割分担等	研究期間
研究代表者	山口 浩司	日本電信電話株式会社 NTT 物性科学基礎研究所・量子電子物性研究部	半導体機械共振器の作製と評価	平成 27 年度 ～令和元年度
研究分担者	本間 芳和	東京理科大学・理学部第一部物理学科	ナノチューブ材料の成長と評価	平成 27 年度 ～令和元年度
研究分担者	野村 政宏	東京大学・生産技術研究所	フォノンニック結晶の作製と評価	平成 27 年度 ～令和元年度
研究分担者	有江 隆之	大阪府立大学・工学研究科	カーボン機械共振器の作製と評価	平成 27 年度 ～令和元年度
公募研究者	田畑 仁	東京大学・大学院工学系研究科(工学部)	傾斜歪超構造によるスピン・フォノン結合制御とフォトン励起	平成 28 年度 ～令和元年度
公募研究者	山本 俊	大阪大学・基礎工学研究科	超高Q値ボトル型光共振器によるフォトン-フォノン量子系	平成 28 年度 ～令和元年度
連携研究者	齊藤 志郎	NTT 物性科学基礎研究所	超伝導量子回路の研究	平成 27 年度
連携研究者	米谷 玲皇	東京大学・大学院工学研究科	FIB-CVD によるナノワイヤの作製	平成 27 年度 ～平成 29 年度
連携研究者	秋田 成司	大阪府立大学・工学研究科	ナノカーボン共振器の研究	平成 28 年度 ～平成 29 年度

理論グループ

区分	氏名	所属研究機関・部局(着任時)	役割分担等	研究期間
研究代表者	根本 香絵	国立情報学研究所・情報学プリンシプル研究系	ハイブリッド量子系のデザイン・解析・評価	平成 27 年度～令和元年度
研究分担者	江藤 幹雄	慶應義塾大学・理工学部	ハイブリッド量子系の物性理論	平成 27 年度～令和元年度
研究分担者	松崎 雄一郎	国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域	ダイヤモンド中の NV 中心を用いた多機能量子計測スキームの開発	平成 27 年度～令和元年度
研究分担者	森 伸也	大阪大学・工学研究科	ハイブリッド量子デバイスのシミュレーション	平成 27 年度～令和元年度
公募研究者	泉田 渉	東北大学・理学研究科	カーボンナノチューブのスピนมカニクス	平成 28 年度～令和元年度
公募研究者	青野 友祐	茨城大学・工学部	量子ポイントコンタクト構造における微小磁化と核スピン相関の理論的解明	平成 28 年度～平成 29 年度
公募研究者	村尾 美緒	東京大学・大学院理学系研究科(理学部)	ハイブリッド量子系を用いた量子操作・量子測定アルゴリズムの実装理論	平成 28 年度～令和元年度
公募研究者	内山 智香子	山梨大学・総合研究部	光励起輸送の自律組織化を目指した制御プロトコルの開発	平成 30 年度～令和元年度
連携研究者	林 正彦	秋田大学・教育文化学部	超伝導ハイブリッドナノ構造の理論	平成 27 年度～令和元年度

諮問委員会

国内アドバイザー

氏名	所属
青野 正和	物質・材料研究機構、国際ナノアーキテクトニクス研究拠点 (MANA) 機構長
小谷 元子	東北大学、原子分子材料科学高等研究機構 (AIMR) 機構長
榊 裕之	豊田工業大学、学長
横山 直樹	富士通研究所、名誉フェロー

国際アドバイザー

氏名	所属
Gerald Bastard	Professor, École Normale Supérieure, France
Ian Walmsley	Professor, University of Oxford, UK
Jörg Peter Kotthaus	Professor, Ludwig-Maximilians-Universität München, Germany
Robert Westervelt	Professor, Harvard University, USA
Hongqi Xu	Professor, Peking University, China, and Lund University, Sweden

企業委員

氏名	所属
東 和文	株式会社島津製作所
小田川 明弘	パナソニック株式会社
棚本 哲史	株式会社東芝
藤井 英治	パナソニック株式会社
綿引 達郎	三菱電機株式会社

若手委員

氏名	所属
清水 麻紀	東京理科大学
富松 透	東北大学
仲山 将順	国立情報学研究所
根岸 良太	大阪大学
畑中 大樹	NTT 物性科学基礎研究所
濱 祐介	国立情報学研究所
藤原 正規	京都大学
松崎 雄一郎	NTT 物性科学基礎研究所、国立研究開発法人産業技術総合研究所

事務局

氏名	所属
富松 透	東北大学
高橋 喜子	東北大学

3 研究領域の目的及び概要

1. 研究領域の背景

量子ナノ構造において電荷、スピン、核スピンの量子コヒーレント操作を行う研究は、量子計算を目指して世界中で活発に研究され、物理量の新しい量子操作として、学術的に大きなインパクトをもたらした。その一方で、大規模な量子計算を目指す方向とは異なる、量子操作の別の観点からの発展が模索されてきた。通常の量子計算よりかなり簡単な方法で量子シミュレーションを行う D-Wave が脚光を浴びたが、より身近な方向として量子結合にベースをおいた、量子高感度計測などを目標とする **Quantum Enabled Technology (量子コヒーレンスの制御によって可能となる科学技術)** が世界的に急速に進展してきた。計測は科学技術のベースであり、理学、工学から医学に至るまでの広範な分野での応用が期待される。こういった背景を受けて推進された内外の研究活動で明らかになったことは、これらの新しい応用では、異なる物理系の間で量子エンタングルメントを受け渡す手法が本質的な役割を果たすという点である。すなわち、その実現には、様々な物理量の量子情報の小規模な量子トランスデューサ機能が必須となる。特に、量子情報を異なる場所に運び測定系に載せるために光子、フォノンが重要になる。光子は以前から離れた量子系を接続する媒体として広く研究されてきたが、フォノンの重要性も最近着目され、フォトニック結晶ならずフォノン結晶の研究も発展してきた。

これらの状況を勘案して、**電荷 (クーパ対を含む)、電子スピン、核スピン、光子、フォノン**で活躍している研究者が集まり、異なる物理系の間で革新的なハイブリッド系を実現し、小規模な量子結合などを通して **Quantum Enabled Technology の基礎を確立する「ハイブリッド量子科学」の研究分野を提案したのが本領域**である。図1に本領域提案時に描いた簡単な概念を示す。ハイブリッド量子科学の分野では理論と実験の融合が不可欠であることから、電荷 (クーパ対を含む)、電子スピン、核スピン、光子、フォノンの分野でこれまで実績をあげてきた研究者で構成する A01 電荷・スピン計画研究、A02 フォトン計画研究、A03 フォノン計画研究に加えて、ハイブリッド量子科学に関連する理論で世界をリードしている理論研究者を A04 理論計画研究に配置した。特に信号を中長距離に転送し、中長距離で異なる量子を結合するには光子、フォノンが不可欠になることから、これらを独立して計画研究班 (A02、A03) とし、その制御技術の確立に力を入れた。また、様々な物理量の量子的な結合、さらには、新規材料、革新的構造が不可欠であることから、ナノ材料、ナノ構造の研究者を巻き込んだ。計画研究が4つと少なく、項目も設けていないが、これは本領域の戦略として、細分化するのを避けたためである。様々なハイブリッド化が最も重要な本領域では、細分化しないことで計画研究内、計画研究間の融合を推進することを目指した。さらに、公募研究についても各計画研究班を跨ぐ研究課題を積極的に採用し、公募研究が計画研究間の融合をさらに促進するように努めた。

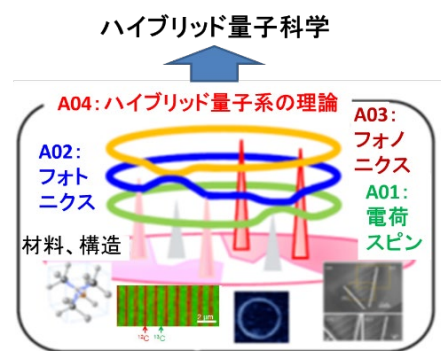


図1
本領域の
簡略化した
概念図

2. 我が国の学術水準の向上・強化から見た重要性

第一に、ハイブリッド量子科学に着目するなかで、参加メンバーが有している研究の優位性をより一層活かせる方向に発展させることができ、それぞれの分野で我が国の学術レベルの向上に貢献する点がある。具体的には、電荷・スピン班には電荷(クーパ対を含む)や電子スピンの制御、電子スピン系と核スピン系の結合や核スピンを利用した計測で世界をリードしているグループがあるが、これらの研究方向に新しい方向を加えることで、それぞれの学術水準が強化された。フォトニック結晶による光制御、THz と量子構造の結合に関する分野、ダイヤモンド NV 中心と電磁波との結合などで世界の第一線を行く研究を展開しているフォトングループ、さらには、弾性体に周期構造を与えることでフォノン結晶を実現し、フォノン伝搬の電氣的制御で世界に先駆けているフォングループも同様である。理論グループは Quantum Enabled Technology を提唱するなど、世界的に活躍しているメンバーがそろっているが、この分野も実験系と議論しながら課題を追究することで研究の底上げがなされた。さらに、公募研究が連携することで各研究のレベルが一層向上した。

第二に、これが最も重要であるが、それぞれの量子系で世界的に優位に立っている研究グループが集結して、さらに第一線の理論的研究と協力して、ハイブリッド化を内外に先駆け達成していくことで、後述するように国内外を牽引する革新的、創造的研究が実現され、世界的に重要性を増しているこの分野で、

我が国の研究レベルを大幅に増強できる点がある。領域全体で、公募研究も含めて計画研究を跨いだ融合研究をプッシュしたことで、本領域がなければ実現されていないと思われる革新的な研究がスタートした。大変重要な成果も出てきており、我が国の学術水準の向上・強化に大きな役割を果たしている。第三の重要な役目は、高感度量子計測などを様々な計測分野で実現するには新しいナノ材料、ナノ構造が不可欠であることから、ナノテク分野で世界をリードするグループが参画した点である。日本はナノテク材料が強く、高い材料、構造作製技術を有しているが、これまでは古典的なデバイスを中心に研究してきたグループが多かった。これらのグループにハイブリッド量子という新しい研究方向を提示することで、高い技術・ノウハウが新しい方向を見出し、日本のナノテク分野のさらなる進展に貢献することが見込まれる。ナノテクグループを巻き込めたことは、様々な要請が出現する量子ハイブリッド系に新規材料、構造をスムーズに導入できる点で、本領域全体にとっても大変有用であった。

第四に、広く様々な分野をハイブリッド量子に巻き込むことで、大学では少ないという問題点がある量子分野の研究者、特に若手研究者のすそ野を広げる点である。本領域の研究活動は大規模な量子結合を目指すものではないことから、それぞれのグループがそれぞれのベースで量子に手を出すことができ、量子を扱うグループを国内に広げるのに役立った。特に領域内の若手委員会はこの役割に大いに貢献した。今後の量子分野の重要性を考えると、量子分野の底上げは、我が国の学術水準の向上・強化から見て大変重要である。

3. 革新的・創造的な学術研究の発展と終了後への期待

領域全体の成果を通して様々な物理系の量子トランスデューサ機能の研究が進展する一方、ハイブリッド量子が意味する幅も広がった。ハイブリッド系には古典100%から量子100%まで様々な段階があるが、量子100%でなくても魅力があることを示せた点は、産業界への展開の可能性としても重要なものである。それぞれの計画班の中では、トポロジカル絶縁体やトポロジカルジョセフソン接合の研究、電子スピン系と核スピン系の相関を利用した高感度計測と二重スピン系の量子相関、理論による多様な量子技術の可能性の実証、ノイズ下でも量子ゲインが得られる量子計測手法の提案など大きな成果が得られた。数桁にわたるエネルギー領域で様々な物理系のハイブリッド量子科学の理論体系を示し、それを実験系へ応用することで、多様な現象を生み出すことに成功した点も本領域での融合が活かされた成果である。本領域で力を入れたフォトン、フォノン系の制御の高度化に関しては、カイラルフォトニック結晶による量子ドットの円偏光発光制御、フォトニック結晶にトポロジーの概念を導入したトポロジカルフォトニクス分野の開拓と後方散乱のない光導波効果の実現、ダイヤモンド中のNV中心をベースにした超高感度・局所計測、様々な独創的機能を有するフォノニック結晶の世界に先駆けた実現など革新的で未来につながる成果が得られた。メカニカル振動子は「巨視的」物理系の代表例であり、「微視的」な物理系の代表である電子、スピン、光子との「もつれ状態」の実現は、我々が日常的に接している巨視的な世界と量子力学が支配する微視的な系がどのように連続的につながるのかという、根本的な命題に挑戦できる重要なプラットフォームであり、学術的にも重要性が高い。

さらに本領域の革新的・創造的な部分として、計画研究、公募研究を超えて電荷、スピン、フォトン、フォノンのハイブリッド化が進んだ点がある。将来に発展が期待できるインパクトのある成果として、金属ナノギャップにトラップされた分子による電荷、フォノンとTHzの結合がある。「THz ナノサイエンス」という新しい学問領域の扉を開くとともに電荷、スピン、フォノン（分子振動）、THzフォトンのすべてを量子的に結合できる可能性を示している。MEMS共振器構造における機械振動とTHzのハイブリッドでは、量子に行く前の段階で既存デバイスを超えるTHz電磁波検出性能が実証された。スピン系と超伝導量子系の量子結合も実現され、ナノファイバー共振器QED系を光ファイバーで接続し、多数の共振器QED系がフォトン、フォノンを介してコヒーレントに結合する独創的な量子ネットワークの基礎研究も進展した。量子メモリーとして期待される電子・核スピン相関、量子状態を遠距離伝播させるフォトンと異なる物理系のインターフェースとしての独創的なメカニカル系の研究も進んだ。これらは、量子トランスデューサとして未来の量子ネットワークの鍵になる可能性が広く議論されている。

4 研究組織の連携体制

総括班が中心となり、(1) 電荷(クーパー対を含む)、スピン、核スピンの量子的な結合の制御に加えて、これらとフォトン、フォノンの量子的な結合、(2) フォトンの高度な制御技術の確立とフォトンと他の物理量の量子的な結合、(3) フォノンの高度な制御技術の確立とフォノンと他の物理量の量子的な結合、(4) ハイブリッド量子科学の実現に向けた理論的牽引と様々な物理系を総括する理論の構築の4つの計画研究を有機的に連携させた。特に、日本が優位な位置にあるナノ構造、ナノ材料分野を、量子制御の分野に引き込み発展させることのほか、実験研究と理論研究、異なる材料系(半導体系、カーボン系、ダイヤモンドなど新規材料)、フォノン制御とフォトン制御などの連携を実現した。実際に、研究の融合に向けて、領域会議から小さな勉強会まで多くの試みが、総括班のみならず、A01からA04の計画研究班で積極的に行われ、公募研究も巻き込んだ連携が確立された。

図2に領域内の共同研究相関図を示す。実験を主に行う計画研究(A01電荷・スピン、A02フォトン、A03フォノン)をA04理論がまとめ、さらに公募研究が加わった領域全体に、共同で実験や研究を行ったり、共同での研究発表があったりする連携を実線で示している。勉強会を開催するなどはすべての公募研究も含めて行われているが、この図にはより進展した連携を載せている。全部の連携研究について述べることは難しいが、ダイヤモンドNV中心などの電子スピンと超伝導量子系のカップリングの研究がA01からA02、A03、A04のすべての計画研究を結んで進められ、ダイヤモンドNV中心をベースにした高感度量子計測がA02、A04に公募研究が連携して行われた。さらに、独自の作製技術を有するカーボンナノ材料をA01、A03のみでなく、広く領域で共有して研究を進める体制が整い、A02を中心にしたTHz分子スペクトロスコピの研究は電荷、スピン、フォノンとの結合も視野に入ってきた。核スピンと電子スピンの多体のコヒーレントな相関の研究はA01、A04の連携で進められ超放射のような新概念にたどり着いており、A04と公募の理論研究の間でも密な連携が進展している。面白い進展はA02、A03、公募研究を結んだフォトニック・フォノン結晶の研究や、メカニカルシステムや光ファイバー共振器を用いたフォノン、フォトン、電荷、スピンの融合研究であり、小規模ハイブリッド量子ネットワークにつながる礎が築かれつつある。半導体のナノ構造作製など装置類を公募研究も含めた各グループで必要に応じて共用する体制も整えられた。実現された連携体制は、A01はフォトン、フォノンとの結合、A02は電荷・スピンとフォノンとの結合、A03は電荷・スピンとフォトンとの結合を常に念頭において研究を進めていくという領域の方針がほぼ実現されていることを示している。領域内共同研究相関図は複雑で、きれいに切り分けて表現することが難しいが、このこと自体がハイブリッド量子系の実現に向けて様々な連携が実現され、本新学術領域を通して新しい研究グループ、研究体制が構築されたことを示している。

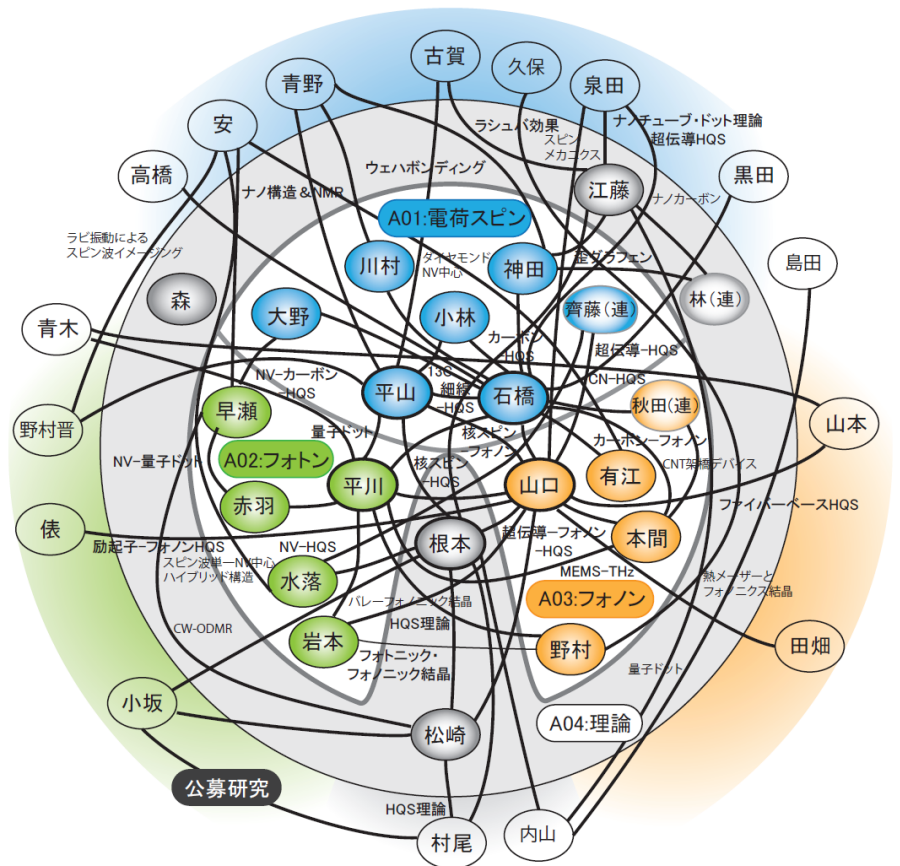


図2 領域内共同研究相関図

5 若手研究者の主体的活動

本新学術領域では、“ハイブリッド”と”量子”という言葉を中心として、多様な専門分野の一流の研究者が集結している。この環境を若手研究者育成の場としてフル活用すべく、様々な企画を盛り込んだ若手研究会を年2回の頻度で開催した。研究会開催にあたり、(1)若手メンバーがハイブリッド量子に関わる研究に関して幅広い分野の見識を深め、多角的な視点を持ってもらうこと、(2)若手メンバー同士が刺激し合う風土を作ることで、ボトムアップ的に本領域を活性化させることを目標として掲げた。

前半は、ハイブリッド量子科学分野の第一線で活躍する研究者の講演や、若手研究者の研究発表を中心に研究会を企画した。講演の質疑応答では、熱意のある若手メンバーから様々な独自の視点の質問が飛び交った。若手メンバーのみで企画したポスターセッションでも、セッション終了時刻をオーバーするほどの活発な討論が行われた。若手間の親交も急速に深まり、専門以外の研究に触れることで融合研究に対する意識も芽生えた。若手研究者が本領域の国際アドバイザーの前で直接研究発表を行うセッションでは、ホワイトボードを使った白熱した議論も繰り広げられ、目的意識をもって研究を進めている様子が伺えた。国際アドバイザーからは、若手研究者の研究に対する熱意に関して非常に高い評価をいただいた。

後半は、研究発表に加え”若手の意見の発信と議論”を更に促進するため、研究会にグループディスカッションや、アクティブラーニングを積極的に取り入れた。分野を異にする若手メンバーの専門テーマや要素技術を組み合わせ新たなハイブリッド研究ができないかを議論いただくグループディスカッションでは、メンバー間で真剣な議論を通して融合研究のモデルケースとなるような斬新な提案も生まれた。更に、領域代表の講演「タイトル：若手メンバーへ期待すること」を通して、自身の体験談やシニア視点での研究への向き合い方を若手に伝える場も設けた。このような活動を通して、若手の横のつながりのみならず、シニアメンバーとの縦のつながりの強化も図ることができた。

こうした通常の研究ワークショップでは行わない斬新な企画に挑戦したことで、若手研究者ならではの柔軟性や適合力を引き出し、量子研究に関する高いレベルでの知識共有と本領域研究の活性化が達成された。量子研究の応用や、研究以外の一般的な議題で討論してもらう機会もあり、産業界に貢献する視点からの人材育成もできたのではないかと考えている。表1に、若手研究会の主な実施事項を示す。これらのアクティビティを反映して、領域の若手の活躍は素晴らしいものがあり、野村政宏准教授(東大)が ISCS Young Scientist Award、R. S. Deacon 博士(理研)が文部科学大臣表彰若手科学者賞を受賞したほか、助教、大学院生などの国際、国内学会での講演奨励賞やベストポスター賞の受賞が25件以上に上った。

表1 若手研究会における実施事項

日時	開催地	実施事項
2016年8月24日	東京理科大学	講師によるチュートリアル講演、ポスターセッション
2017年2月28日	理化学研究所	若手メンバーによる研究発表、国際アドバイザーとの議論
2017年9月14日	東北大学	講師によるチュートリアル講演、ラボツアー
2018年1月5日～6日	国立情報学研究所	講師によるチュートリアル講演、グループディスカッション(議題：新たなハイブリッド研究の提案)
2018年8月8日	名古屋大学	アクティブラーニングを取り入れたチュートリアル講演、領域代表の講演
2018年10月26日	東京理科大学	“量子センサー”をテーマとした勉強会とポスターセッション
2019年1月10日～11日	沖縄科学技術大学院大学	講師によるチュートリアル講演、ラボツアー、グループディスカッション(議題：量子研究の課題や最近の研究者事情について)
2019年8月6日～7日	しいのき迎賓館	演習を導入したチュートリアル講演、他己紹介、ポスター発表

6 研究目的の達成度と主な成果

電荷・スピン計画研究(A01)ならびに関連する公募研究

量子的な情報担体としての電子・クーパペア、電子・核スピンの単一及び集団的量子的な制御とその背景物理の解明、そしてそれらの間、あるいはフォトン、フォノンとの量子トランスデューサ機能を目指して研究した。量子媒体のハイブリッド化には材料のハイブリッド化が必要であることから、伝統的な化合物半導体ナノ構造に加え、カーボンナノ材料、トポロジカル絶縁体など新規材料系に研究を拡張した。上記目標に対して、電子スピン、核スピン集団の量子的な制御をシリコン極微細トランジスタや化合物半導体ナノ構造など特徴ある系で確立するとともに、高感度核スピン計測を実現した。加えて、カーボンナノチューブ中での励起子の量子制御の実現にも成功した。異なる物理系のハイブリッド化に関して、スピン系とマイクロ波フォトンあるいはフォノンの相互作用メカニズムを明らかにすることができた。これらは量子情報処理や量子計測における異種量子のハイブリッド化への発展が期待される成果である。特徴のある材料系として積層薄膜化した磁性トポロジカル絶縁体やトポロジカル絶縁体と超伝導体のハイブリッド構造で量子技術の新たな担い手となる量子状態発現の足掛かりを得ることができた。

フォトン計画研究(A02)ならびに関連する公募研究

フォトンを中心にした量子トランスデューサ機能とその実現に向けたフォトン制御の高度化を目指して研究を推進した。この目標に対して、ダイヤモンド中の NV 中心を用いた超高感度・局所量子計測技術の開拓に取り組み、室温での固体系電子スピン T2 の世界最長時間の実現、核スピンコヒーレンスの世界初の電氣的検出、単一 NV 中心での世界最高磁場感度の実現など大きな成果が挙げられた。ナノフォトニクスの高度化では、三次元カイラルフォトニック結晶における量子ドット円偏光発光制御に成功した。さらに、光の軌道運動量制御やトポロジカルフォトニクスなど、計画時には想定していなかった革新的な展開が開けた。ナノファイバー共振器 QED 系を光ファイバーで融着接続し、共振器 QED 系をコヒーレントに結合する試みも大きな進展があった。THz アンテナとして機能する金属ナノギャップ電極を用いて、単一分子をトラップし、分子振動が電子伝導に与える影響を明らかにした。この成果をベースにテラヘルツスペクトロスコピ分野を開拓するとともに、分子をベースに電荷、フォノン、THz フォトン量子結合する基礎を築いた。さらに、機械的共振を用いた新しい原理による高性能テラヘルツ検出器も実現した。

フォノン計画研究(A03)ならびに関連する公募研究

フォノンを中心にした量子トランスデューサ機能とその実現に向けたフォノン制御の高度化を目指して研究を推進した。この目標に対して、フォノン結晶の作製技術や、量子ドット・メカニカル共振器の量子ハイブリッド構造作製技術が大きく進展し、グラフェン成長の同位体制御など全く新しいナノ構造作製技術も確立された。量子性を活用した素子動作の実現については、量子ドットを用いた超高感度振動センサの実現、核スピンとフォノンの量子もつれ状態生成技術、ボトル型光共振器と半導体電気機械共振器との融合による光電気機械ハイブリッドシステムの実証など量子トランスデューサのマイルストーンとなる基盤技術を獲得した。その他にも、フォノンの量子性に着目したフォノン伝導制御を提案・実証した。これらの成果は十分な学術的価値と新技術を生み出し、目的は高いレベルで達成できた。

理論計画研究(A04)ならびに関連する公募研究

ハイブリッド量子科学の系統的な理論体系の創出、Quantum Enabled Technology の実現へ向けた設計指針と提案、様々な物理系のハイブリッド量子系の理論的理解を目指して研究を進めた。この目標に対して、電荷、スピン、フォトン、フォノンと様々な物理系が持つ、量子光学、超伝導、半導体物性、ナノ構造物理などさまざまな分野での現象や概念を融合し、ハイブリッド化を通してユニバーサルな物理として捉えるための理論を構築した。具体例としては、ハイブリッド量子系での超放射現象のエネルギー領域で数桁にわたる拡張などがある。また、カーボンナノチューブのトポロジカル絶縁体としての性質を明らかにし、ハイブリッド量子系の振る舞いにフォノンが与える影響を解明した。さらに、ハイブリッド量子系で可能となる新しいリソースの活用や、量子テレポーテーションなどの量子プロトコルとのハイブリッド化などを通して現実的なノイズ下でも量子優位性を発揮する量子計測手法を示した。また、量子トランスデューサをユニバーサルに捉えることで、様々な組み合わせでの設計において共通に見られる特徴や問題点を設計上のノウハウとして明らかにした。

なお、本領域では Nature 1 件、Nature Physics 1 件、Nature Photonics 2 件、Nature Nano. 3 件、Nature Communications 16 件、Communication Physics 3 件、Science Advances 4 件、Phys. Rev. Lett. 17 件など、IF の高いジャーナルへの活発な論文発表が期間中になされており、これも高いレベルの研究達成を反映している。

以下に得られた成果の中でも重要なもの 72 件について、その概要を示す。なお、すでに述べてきたように、この領域ではハイブリダイゼーションを積極的に進めたこともあり、計画研究、公募研究をまたぐ成果も多い。従って、個々の成果については、A01 から A04 の計画研究に拘らず、関連する分野の成果をまとめる形で掲載する。

単一 NV ダイヤモンド量子センサ

—n型ダイヤモンドにより室温での最長 T_2 と単一 NV での最高磁場感度実現—

E. D. Herbschleb¹, 加藤 宙光², 丸山 祐一¹, 檀上 拓哉¹, 牧野 俊晴², 山崎 聡²,
大木 出¹, 林 寛¹, 森下 弘樹¹, 藤原 正規¹, 水落 憲和¹
京都大学化学研究所¹, 産業技術総合研究所²

ダイヤモンド中の NV 中心（窒素—空孔中心）は、室温でも長いスピンコヒーレンス時間（ T_2 , T_2^* ）を有し、超高感度量子センサや量子情報素子の実現および量子センサの生命科学分野への応用の観点から注目されます。スピンコヒーレンス時間は重要な特性で、量子センサではスピンコヒーレンス時間が長いほど感度が良くなります。

今回、我々は産総研で作製された高品質リンドープ n 型ダイヤモンドにおける NV 中心のスピンコヒーレンス時間が、あるリン濃度で非常に長いことを見出しました。固体系で室温での最長電子スピンコヒーレンス時間であり、更なる NV 中心を用い、単一 NV 中心を用いた量子センサでの最高磁場感度実現に成功しました。

図 1 にハーンエコー法により測定したエコー減衰の結果を示します。ここから T_2 は 2.4 ミリ秒と見積もられます。これまでの最長記録は 2009 年に報告された 1.8 ミリ秒でした。更なる T_2 最長の単一 NV 中心において、交流磁場感度を見積り、単一 NV 中心の室温における最高感度（9 ナノテスラ/ $\sqrt{\text{Hz}}$ ）も実証しました。また、直流磁場センサにとって重要な自由誘導減衰時間（ T_2^* ）の最長報告値は 0.47 ミリ秒でしたが、今回我々は 1.5 ミリ秒を実証しました。図 2 には自由誘導減衰の結果で、ここから T_2^* は 1.5 ミリ秒と見積もられます。これらの T_2 , T_2^* は、他の固体系電子スピンの中でも室温では一番長いものです。

リンは電子スピンを有するため磁気ノイズ源となり、リンをドープするとスピンコヒーレンス時間は短くなると考えるのが常識ですが、今回の結果はそれに反する結果でした。系統的にリン濃度のみを変えた試料での結果からも、一定量以上のリンがドープされた試料において最長のスピンコヒーレンス時間が測定され、リンドープの効果が確認されました。n 型ダイヤによるスピンコヒーレンス時間の長時間化は、合成中に生成した空孔欠陥が電荷を帯び、磁気ノイズ源となる複合欠陥の生成が抑制されたためと考えられます。精密なノイズ測定より、今回の試料でのノイズ源は、リン以外の不純物欠陥の電子スピンであることが示唆されましたが、それらの抑制により、更なるスピンコヒーレンス時間の長時間化も期待されます。

n 型ダイヤモンドにより最長のスピンコヒーレンス時間を実現した点は意義深く、更なる高感度化に加え、n 型半導体特性を活かした量子デバイスへの幅広い応用へ道を拓くものと期待されます。

Reference : E. D. Herbschleb, H. Kato, Y. Maruyama, T. Danjo, T. Makino, S. Yamasaki, I. Ohki, K. Hayashi, H. Morishita, M. Fujiwara, N. Mizuochi, “Ultra-long coherence times amongst room-temperature solid-state spins”, Nature Communications, 10, 3766 (2019)., DOI : <https://doi.org/10.1038/s41467-019-11776-8>

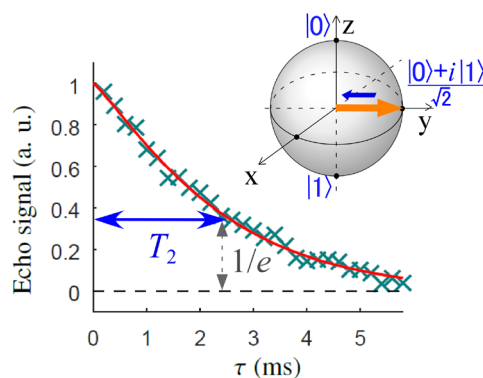


図 1 ハーンエコー信号の測定結果。NV 中心は電子スピンを有しており（図中オレンジ色の矢印）、0 と 1 の重ね合わせ状態を実現できる。その重ね合わせ状態が $1/e$ の大きさ（およそ 0.37。e は自然対数の底）に小さくなるまでの時間がコヒーレンス時間 T_2

また、直流磁場センサにとって重要な自由誘導減衰時間（ T_2^* ）の最長報告値は 0.47 ミリ秒でしたが、今回我々は 1.5 ミリ秒を実証しました。図 2 には自由誘導減衰の結果で、ここから T_2^* は 1.5 ミリ秒と見積もられます。これらの T_2 , T_2^* は、他の固体系電子スピンの中でも室温では一番長いものです。

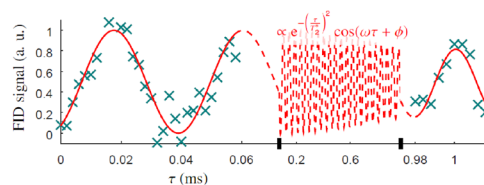


図 2 自由誘導減衰の結果。 T_2^* は 1.5 ms と見積もられる。

NV 中心の窒素核スピンコヒーレンスの制御と電氣的検出

森下 弘樹,¹ 小林 悟士,¹ 藤原 正規,¹ 加藤 宙光,² 牧野 俊晴,² 山崎 聡,² 水落 憲和¹
¹京都大学 化学研究所, ²産業技術総合研究所

ダイヤモンド中の NV 中心は、室温下でも長いコヒーレンス時間 (T_2) を持つため、量子情報処理デバイスや量子センサの実現に向けて広く研究されています。これらの研究では、NV 中心のスピン状態を光学的な手法や電氣的な手法によって検出しています。電氣的なスピン検出法は、集積化等に向けた今後のデバイス応用に重要な技術です。原理的に光学的なスピン検出法よりも検出感度が約3倍高いと理論予測され、注目されます。しかし、光学的なスピン検出法によって単一の電子・核スピンの検出が行われている一方、電氣的なスピン検出法は、電子スピンの検出に成功している段階です。以前、我々は核スピンを用いた電子スピンとの量子ハイブリッド系において、電子スピンの磁場情報をスピンコヒーレンス時間の長い核スピンへ転写することにより、量子センサ感度を1桁向上できることを理論的に示していました。[1] この観点からも、核スピンのコヒーレンスを制御と観測は重要です。

そこで本研究は、核スピンの検出に向けて電子・核二重共鳴検出 (EDENDOR) に注目し、核スピンコヒーレンスの電氣的検出を試みました。EDENDOR とは、ENDOR の技術と NV 中心の電氣的な電子スピンコヒーレンスの検出法を組み合わせた手法であるため、核スピンコヒーレンスの電氣的検出が可能になります。

本研究では、アンサンブル NV 中心の窒素 (^{14}N) 核スピンの EDENDOR 測定を室温で行いました。まず、この ^{14}N 核スピンのラビ振動を Davies ENDOR パルスシーケンスを応用して測定しました。その結果、図1に示すように室温下において核スピンのラビ振動の電氣的検出に初めて成功しました。また、この試料における ^{14}N 核スピンコヒーレンスを観測し、図2に示すようにエコー法による T_2 測定を電氣的検出により行いました。核スピンの T_2 が電子スピンのスピン - 格子緩和時間によって制限されていることが分かりました。核スピンのラビ振動、及び T_2 測定を、つまり核スピンコヒーレンスの制御と観測を、室温で電氣的に実証した例は他材料における系を含めて初めてです。

[2]

Reference: [1] Y. Matsuzaki, T. Shimo-Oka, H. Tanaka, Y. Tokura, K. Semba, N. Mizuochi, "Hybrid quantum magnetic field sensor with an electron spin and a nuclear spin in diamond", *Physical Review A*, 94, 52330 (2016).

[2] H. Morishita, S. Kobayashi, M. Fujiwara, H. Kato, T. Makino, S. Yamasaki, N. Mizuochi, "Room Temperature Electrically Detected Nuclear Spin Coherence of NV centers in Diamond", *Scientific Reports*, 10, 792 (2020). DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-57569-8>

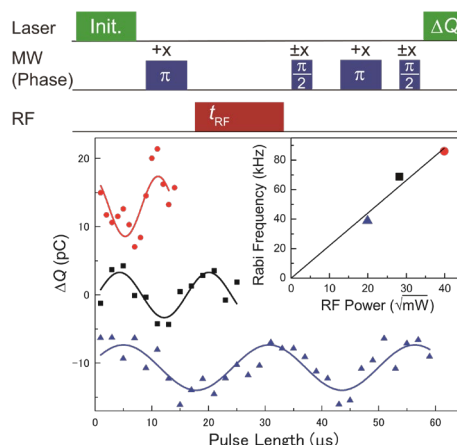


図1 核スピンラビ振動の電氣的検出用パルスシーケンス(上)とその結果(下). 振動周波数の RF パワーの平方根依存性(挿入).

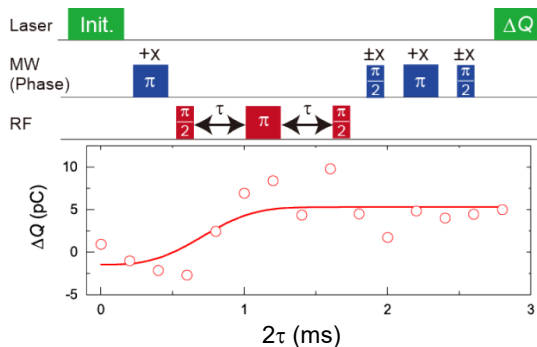


図2 NV 中心の ^{14}N 核スピンコヒーレンス緩和時間測定の電氣的検出のパルスシーケンス (上) と測定結果 (下)

ダイヤモンド集合体を用いた高感度 AC 磁場センサー

早瀬潤子¹, 松崎雄一郎², 渡邊幸志², 水落憲和³, 齊藤志郎⁴

¹慶應義塾大学理工学研究科, ²産業技術総合研究所,

³京都大学化学研究所, ⁴NTT 物性科学基礎研究所

ダイヤモンド中の窒素空孔中心 (NV センター) は、ナノスケールの空間分解能をもつ高感度量子磁場センサーとして期待されています。その理由は、NV センターに局在した電子スピン三重項状態が (1) 光学的に初期化・読み出しができること、(2) マイクロ波を用いてコヒーレントに制御可能なこと、(3) 室温で長いコヒーレンス時間を有するためです。本研究では、NV センター集合体を用いて高感度 AC 磁場センサーを実現するための新しい電子スピン制御法を 2 つ提案・実証することに成功いたしました。

1 つ目の提案手法は、多周波マイクロ波を用いることで、NV センター電子スピンを制御するセンシング手法であり、ベクトル磁場センサの感度を向上させることが可能となります。鍵となる重要なアイデアは、4 つの異なる配向を有する NV センター集合体を、4 つの異なる周波数のマイクロ波により同時に制御することで、信号増強・ノイズ低減をするというものです^[1]。我々のグループは、スピンエコーを用いた AC 磁場センシングに、多周波マイクロ波制御を導入することにより、単一周波マイクロ波によるベクトル磁場感度よりも高い感度を得ることに成功いたしました^[2]。本手法はあらゆるパルスシーケンスに適用できるため、高感度ベクトル磁場センサを実現する上で重要な成果であると言えます。

2 つ目の提案手法は、従来 DC もしくは低周波 AC 磁場センシングにしか適用できなかった連続波光検出磁気共鳴 (CW-ODMR) において、高周波 (MHz) AC 磁場センシングを可能にする手法です^[3]。本手法は、ゼロ磁場もしくは横磁場下の NV センター電子スピン 3 準位系における 2 重共鳴現象を用いたもので、新たなドレスド状態生成など非常に興味深い量子現象の研究にもつながる重要な成果です。

Reference:

- [1] S. Kitazawa, Y. Matsuzaki, S. Saijo, K. Kakuyanagi, S. Saito, and J. Ishi-Hayase, “Vector-magnetic-field sensing via multifrequency control of nitrogen-vacancy centers in diamond”, *Physical Review A* **96**, 042115/1-7 (2017).
- [2] K. Yahata, Y. Matsuzaki, S. Saito, H. Watanabe and J. Ishi-Hayase, “Demonstration of simultaneous vector magnetic field sensing with nitrogen-vacancy centers in diamond via multifrequency control of microwave pulses”, *Applied Physics Letters*, **114**, 022404/1-5 (2019).
- [3] S. Saijo, Y. Matsuzaki, S. Saito, T. Yamaguchi, I. Hanano, H. Watanabe, N. Mizuochi and J. Ishi-Hayase, “AC magnetic field sensing using continuous-wave optically detected magnetic resonance of nitrogen-vacancy centers in diamond”, *Applied Physics Letters*, **113**, 082405/1-5 (2018).

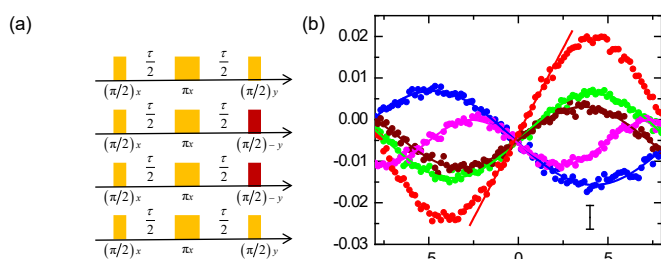


Fig. 1 (a) 多周波マイクロ波制御によるスピンエコー AC 磁場センシングのパルスシーケンス (b) AC 磁場振幅に対するスピンエコー信号強度。単一周波制御による磁場感度よりも、多周波制御による磁場感度が高いことが示された。

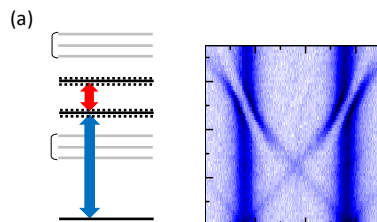


Fig. 2 (a) 特定の配向の NV センターに垂直な横磁場を印加した場合の電子スピンのエネルギー準位 (b) 異なるマイクロ波・ラジオ波周波数に対する CW-ODMR

ミクロスコピックマイクロ波イメージング — ラビ振動を用いたマイクロ波強度分布の精密計測 —

野元嵩平¹、Giacomo Mariani¹、柏谷聡²、野村晋太郎¹
¹筑波大学数理物質系、²名古屋大学大学院工学研究科

非破壊検査のためのイメージングは物質評価、医療、保安等の広い範囲で活用されています。X線は波長が短いため高い空間分解能が得られ、医療用途として広く一般的に活用されています。一方でX線被曝の線量に制限があり用途に限られます。この制限がないマイクロ波は、幅広い用途で活用されています。これまでマイクロ波アレーアンテナを用いたイメージング手法が用いられてきました。これはアンテナを密に配置してイメージを得るものですが、相互インダクタンスによる影響と定量性に課題がありました。また、空間分解能はミリ波を用いた場合でも波長程度のミリメートルにとどまるのが現状でした。

今回我々は、量子情報や量子センシングの舞台として大きな注目を集めているダイヤモンドNV中心量子センサを用いてマイクロ波強度分布をマイクロメートル空間分解能で定量的に計測することに成功しました。開発したマイクロ波イメージ顕微鏡は、外部磁場によってダイヤモンドNV中心の共鳴周波数を調整し、検出対象のマイクロ波周波数を選択します。ダイヤモンドNV中心の量子スピン準位間のラビ周波数が検出対象のマイクロ波の振幅に比例することを活用して、マイクロ波強度分布を定量的にイメージマッピングすることに常温で成功しました。

開発したマイクロ波イメージ顕微鏡を用いて、図1に示す直線型マイクロ波共振器（左）と、線幅が広い部分と狭い部分が交互に分布した示すテーパー型マイクロ波共振器（右）の周囲のマイクロ波強度分布を測定しました。ダイヤモンドNV中心の量子スピン準位間のラビ振動をフーリエ変換することによりイメージ上の各ピクセルのラビ周波数を得ました。こうして取得したマイクロ波強度分布イメージの例を図2に示します。直線型、テーパー型共に測定結果はFDTD法によるシミュレーション結果と良く一致していることがわかります。さらにマイクロ波共振器によりマイクロ波振幅が2.2倍、パワーが4.60倍に増強されていることがわかりました。

本研究成果は、これまでに評価手段がなかったマイクロメートル空間分解能でのマイクロ波強度分布計測のための新しい技術を提供するものであり、今後、マイクロ波デバイスやメタマテリアル素子の評価、バイオイメージング等への応用が期待されることから、量子スピンを用いた量子センシング分野の促進につながると考えられます。

Reference: Giacomo Mariani, Shuhei Nomoto, Satoshi Kashiwaya, and Shintaro Nomura, “System for the remote control and imaging of mw fields for spin manipulation in NV centers in diamond”, *Sci. Rep.* **10**, 4813 (2020). DOI: 10.1038/s41598-020-61669-w

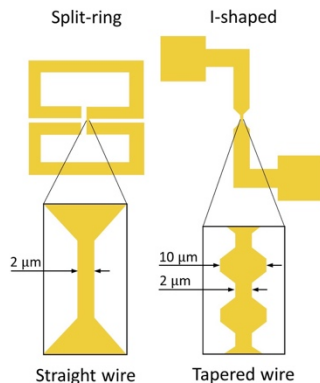


図1 直線型(左)、テーパー型(右)マイクロ波共振器の構造の概略図。

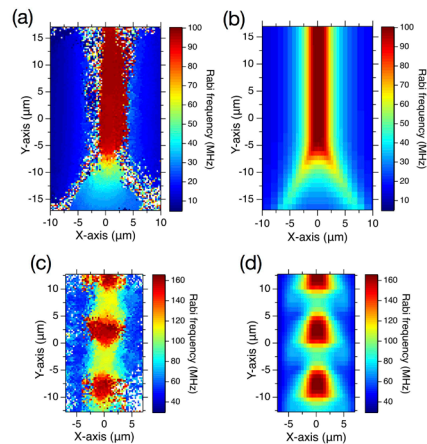


図2 直線型マイクロ波共振器の周りのマイクロ波強度分布の(a)測定結果と(b)FDTD法によるシミュレーション結果。テーパー型マイクロ波共振器の周りのマイクロ波強度分布の(c)測定結果と(d)FDTD法によるシミュレーション結果。

ダイヤモンド NV 中心による熱マグノン流の計測 - 量子スピン状態と熱マグノン流の接続を実現 -

Dwi Prananto¹、貝沼雄太¹、林都隆¹、水落憲和²、内田健一³、安東秀¹

¹北陸先端科学技術大学院大学、²京都大学化学研究所、³物質・材料研究機構、

熱的に励起されたマグノンやその流れ（熱マグノン流）はスピントロニクスやマグノンスピントロニクス分野への応用が期待され研究が進展しています。通常、熱マグノン流はスピントロニクス効果などにより計測され、注入されたスピン流はスピンホール効果などを利用して起電力に変換し、その際には Pt 薄膜などマイクロメートル程のサイズの電極が必要です。一方、ダイヤモンド中の NV（窒素-空孔）中心は高分解能（ナノメートルスケール）、高感度な物性計測を実現する量子センサーとして期待されています。最近では、スピン波（コヒーレントマグノン）からの交流漏洩磁場を NV 中心により計測可能なことが報告されています。スピン波は熱マグノン流による熱スピントルクの印加により振幅変調されることが既に知られ、スピン波を介して熱マグノン流を NV 中心により計測可能であると考えられます。

今回、我々は磁性絶縁体であるイットリウム鉄ガーネット (YIG) を用いて、NV 中心によるスピン波を媒介した熱マグノン流の計測に成功しました (図 1)。温度勾配を印加して熱マグノン流を生成した YIG 試料に表面スピン波を励起し、この表面スピン波を NV 中心により計測することにより熱マグノン流信号を計測します。ダイヤモンドには NV 中心を含有する梁状に加工した構造とナノダイヤモンドを YIG 上に設置して用いました。この結果、NV 中心によるスピン波の漏洩 AC 磁場を計測した際に、ラビ振動の振動周波数が温度勾配に依存して変化することを確認しました (図 2)。同様に、ナノダイヤモンド中の NV 中心の T_1 緩和時間も変化することを確認しました。

本研究成果は、ナノスケールの NV 中心量子スピン状態と熱マグノン流とを接続する方法を示したもので、新しい方式や、極小のスピントロニクスデバイスの実現の可能性につながると考えられます。

Reference: D. Prananto, Y. Kainuma, K. Hayashi, N. Mizuochi, K. Uchida, and T. An, "Probing thermal magnon current via nitrogen-vacancy centers in diamond", arXiv:2007.13433

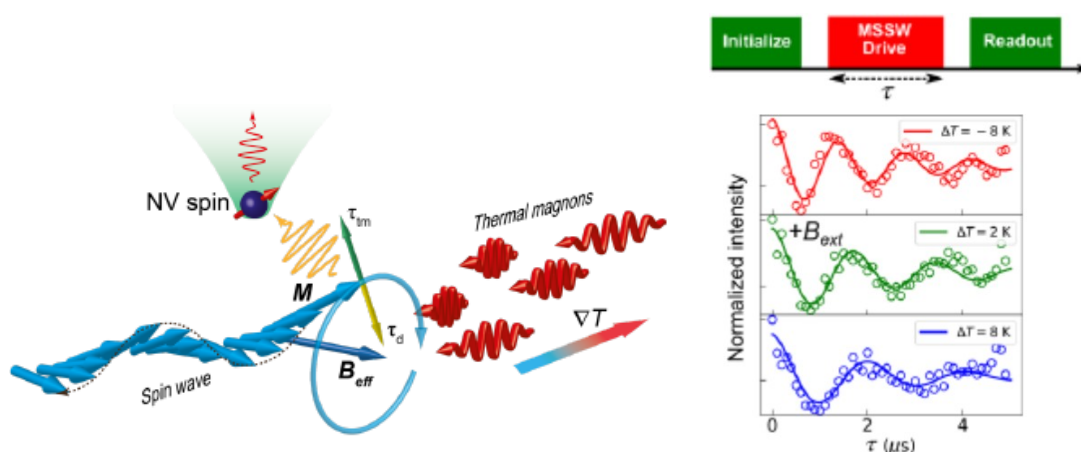


図1 スピン波を媒介したダイヤモンド NV 中心による熱マグノン流計測の模式図

図2 熱マグノン流による NV 中心のラビ振動周波数の変調

NV センターを有するナノダイヤモンド薄膜を用いた電子デバイスのオペランド解析

内山晴貴¹, 西條蒼野², 岸本茂¹, 早瀬順子², 大野雄高¹

¹名古屋大学工学研究科, ²慶應義塾大学理工学部

電子デバイスのオペランド解析は素子性能や信頼性の向上、熱制御等に関する情報を得る上で効果的な手法である。ダイヤモンド中の NV センターは多種の物理パラメータに対して優れた感度を有し、オペランド解析のセンシング媒体として有用である。単結晶ダイヤモンド中に形成された NV センターを用いてセンシングすることが多いが、その場合、電子デバイスの活性チャネルのごく近傍に設置することは難しい。本研究では、簡単な溶液法によりデバイス上に直接形成可能なナノダイヤモンド薄膜を用いることオペランド解析手法を提案した。

ナノダイヤモンド中の NV センターは表面に起因するランダムテレグラフノイズを示し、センシング感度が低いことが知られている。我々は、はじめに詳細なノイズ解析から光検出磁気共鳴(ODMR)の高感度化を図った。NV センターのフォトルミネッセンスのノイズスペクトルを調べたところ、低周波では大きな $1/f$ ノイズやスパイクノイズが存在するものの、高周波領域のショットノイズは単結晶ダイヤモンドと同等であることを見出し、高 S/N 比の測定が可能であることが示唆された。ロックイン検出を用いてショットノイズ領域で計測することにより、ODMR の S/N 比を 36 倍向上した。

シリコン基板上に形成した微小配線に電流を流し、その近傍に形成される磁場やジュール熱による温度の上昇の検出を実証し、複数の物理パラメータの同時検出が可能であることを明らかにした。また、磁場の空間分布は計算による予測と良い一致が得られ、本手法の有効性を示した。

ナノダイヤモンド薄膜は室温の溶液プロセスにより成膜可能であり、多様な電子デバイス上の多成分オペランド解析の実現に繋がるものである。

Reference: H. Uchiyama, S. Saijo, S. Kishimoto, J. Ishi-Hayase, and Y. Ohno, "Operando Analysis of Electron Devices Using Nanodiamond Thin Films Containing Nitrogen-vacancy Centers", ACS Omega 4, 7459-7466 (2019). doi:10.1021/acsomega.9b00344

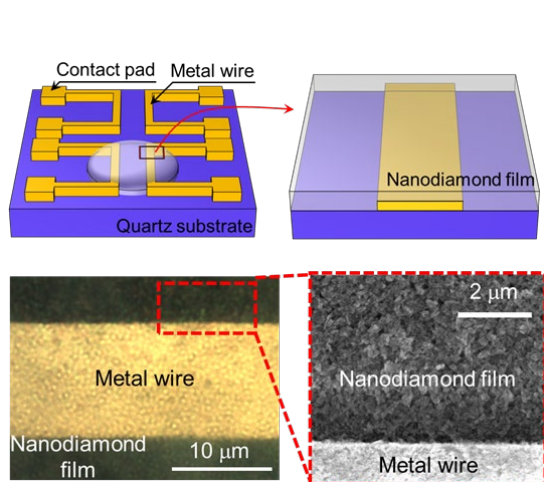


図 1 ナノダイヤモンド薄膜を用いたオペランド解析の実証に用いたテストデバイス。

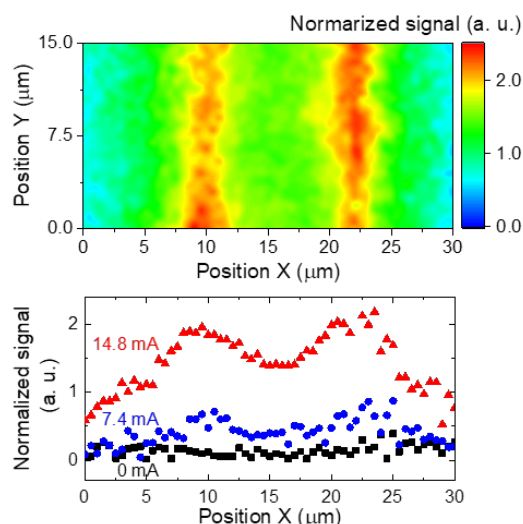


図 2 ナノダイヤモンド薄膜中の NV センターにより計測された金属配線近傍に形成された磁場の強度分布。

量子テレポーテーション転写に成功

－光子の量子状態をダイヤモンドに保存、量子通信に新展開－

小坂英男¹
¹横浜国立大学

横浜国立大学大学院工学研究院の小坂英男教授と Stuttgart 大学（ドイツ）のグループは、量子通信に用いる光子を量子メモリーとなるダイヤモンド中に量子テレポーテーションの原理で転写して長時間保存する新原理の実証に、世界で初めて成功しました。

今回の成功は、核子と量子もつれ状態にある電子に光子を吸収させるだけで、直接作用しない核子に光子の量子状態を転写し、長時間保存可能なことを示す画期的な発見です。

今回得られた結果は、量子中継の基本原則である量子テレポーテーションを極めて単純な原理で実現し、光子の量子状態を直接は届かない遥か遠方に高速かつ確実に再生かつ長時間保存できることを示唆するもので、物理法則で絶対的な安全性が保証された量子通信網の飛躍的長距離化・高信頼化に道を開くものと期待されます。

量子テレポーテーションにはあらかじめ原子内に量子もつれを用意する必要があります。これには物質に内在する量子もつれを利用します。原子を構成する電子と核子のスピンは超微細相互作用という量子もつれを導く力でつながっています。我々はマイクロ波やラジオ波でこの量子もつれを純粋化することから始めました。次にこの量子もつれを種とし、先の論文（Hideo Kosaka, et. al., Phys. Rev. Lett., 114, 053603 (2015)）で実証した吸収による量子もつれ検出の応用で光子の量子状態を核子に転写することに成功しました。

今回実証に成功した光子から核子への量子テレポーテーション転写の動作原理を図に示します。あらかじめ電子と核子を量子もつれ状態に準備しておきます。本実験ではこれをマイクロ波やラジオ波の照射で実現しています。その後、光子を電子に衝突（吸収）させます。その際に、光子と電子が特定の量子もつれ状態にあることを検出した際に、光子の量子状態が核子に転写されます。

Reference: Sen Yang, Ya Wang, Thai Hien Tran, S. Ali Momenzadeh, M. Markham, D. J. Twitchen, Rainer Stohr, Philipp Neumann, Hideo Kosaka, and Jorg Wrachtrup, "High fidelity transfer and storage of photon states in a single nuclear spin", Nature Photonics (2016). DOI:10.1038/nphoton.2016.103

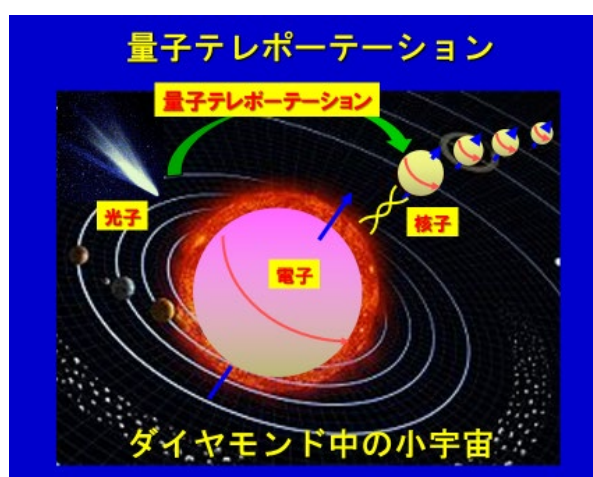


図1 ダイヤモンド内の量子もつれを利用した量子テレポーテーション。あらかじめ電子と核子を量子もつれ状態とし、その後衝突した光子が電子を特定の軌道に励起した際、光子の量子状態は瞬時に核子に転写される。

世界初！誤り耐性のある量子ビットを開発

—幾何学的エコーで自律安定する量子メモリー／量子センサーへ—

小坂英男¹
¹横浜国立大学

量子通信、量子計算、量子計測に用いられる誤り耐性のある量子ビットの新たな構成法とこれを自律的に安定化させる新原理を実証することに、世界で初めて成功しました。本成果は、量子情報処理の基本要素である量子ビットとして有望な、ダイヤモンド中の単一欠陥の電子スピンを用い、誤り耐性のある量子ビット構成を考案し、従来の動的エコーとは全く異なる幾何学的スピンエコーと呼ぶ新原理の安定化技術で自律的に安定化できることを示した画期的な発見です。磁場を完全に排除した無磁場環境下で、量子ビットを破壊する原因となる環境ノイズや制御エラーを自律的に排除できることを示すもので、誤り訂正の不要な量子メモリーや究極の感度を持つ量子センサーに道を開くものと期待されます。

量子情報科学は、これまでの情報を担ってきた古典力学的な情報単位（古典ビット）を量子力学的な情報単位（量子ビット）に拡張する新時代の情報科学です。情報の入出力にまで量子効果を許すことで、今までにない計算能力を持った量子計算機や、原理的に安全な量子通信を実現できるといわれています。また、超高感度なセンサーなどを実現する量子計測にも応用できるとして期待されます。これらを実現するためには、量子ビットを正確に操作し、安定に保持する必要がありますが、これまでに提案されている量子ビットは操作誤りが累積し、またこれを安定に保持することは困難でした。

今回、ダイヤモンド中の窒素空孔中心（NV 中心）の電子スピン対に着目し、誤り耐性のある量子ビットの構成法とこれを自律的に安定化させる新原理を実証することに、世界で初めて成功しました。NV 中心はダイヤモンド中の窒素不純物と炭素欠損が隣接して対となったもので、真空中の孤立原子と同様に安定な量子媒体となり、この空孔に局在した電子スピン対は量子ビットとしての応用が期待されています。従来の量子ビットはこれを構成する二つの量子状態を利用しますが、今回の量子ビットは補助となる第三の量子状態を加えて利用することで、誤り耐性のある量子ビットを構成します。従来の動的スピンエコーとは全く異なる幾何学的スピンエコーと呼ぶ新原理の安定化技術により、磁場を完全に排除した無磁場下でこの量子ビットが自律的に安定化できることを示しました。量子状態が持続する時間（コヒーレンス時間）は、通常の 0.6 マイクロ秒から約 140 倍の 83 マイクロ秒に延びることを示しました（図）。本結果は、磁場を完全に排除した無磁場環境下で、量子ビットを破壊する原因となる環境ノイズや制御エラーを自律的に排除できることを示すものです。

Reference: Yuhei Sekiguchi, Yusuke Komura, Shota Mishima, Touta Tanaka, Naeko Niikura and Hideo Kosaka*, Nature Communications, 7, 11668 (2016). DOI:10.1038/ncomms11668

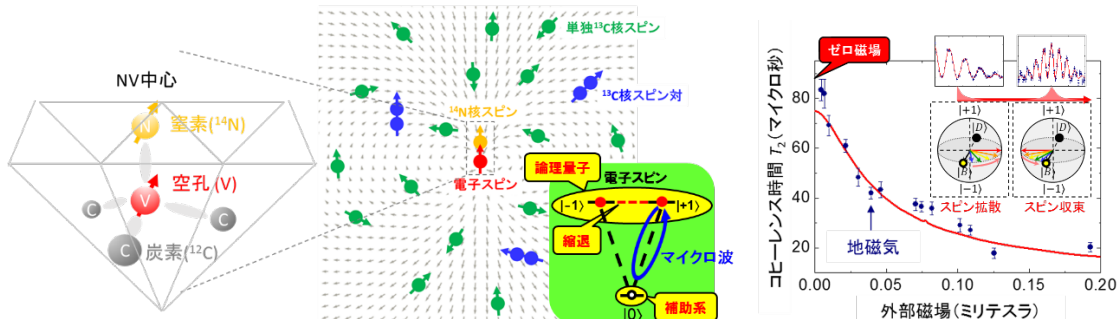


図1 NV 中心とスピンバス配置の概略図(左図)とコヒーレンス時間 T_2 の磁場依存性(右図)。NV 中心に局在した電子スピンは、その周囲に磁気双極子場を作る(左図の灰色矢印)。ゼロ磁場で幾何学的スピンエコーを施すことで、ノイズの原因となるスピンバス(13C)のダイナミクスを効果的に抑えることができ、コヒーレンス時間 T_2 が極大をとる。

量子集積メモリに道を開く光スピン制御の新原理実証

—量子コンピュータや量子通信の高速化を可能に—

小坂英男¹

¹横浜国立大学

量子情報計算、量子情報通信と呼ばれる量子力学の法則を利用した次世代の量子情報技術の登場によって、従来の計算能力を凌駕するコンピュータや、絶対に安全な通信を実現できることが期待されています。これらを実現させるための基盤として、量子性を持つ様々な物質系が提案されています。中でもダイヤモンド中の電子スピンを情報の単位（量子ビット）として扱う方法は、情報の保持と集積化の観点で優れていることが知られています。ダイヤモンドに集積配列された電子スピンを量子制御するためには、スピン一つ一つを個別に、自在に、正確に制御する技術が求められます。レーザー光の局所電場を利用することで電子スピンの選択的制御が可能ですが（図1）、これまでに提案、実証されている制御手法では、限られた制御しかできないうえに、制御の忠実度も高くありませんでした。

本研究グループは、ダイヤモンド中の窒素空孔中心（NV 中心）の単一電子スピンをレーザー光で自在に、正確に制御する技術の実証に成功しました。これまでは、磁場の印加によって物理系にどれだけ大きなエネルギー差をつけるかが重要とされてきましたが、本研究では反対に、磁場を厳密に排除することにより物理系のエネルギー差を取ってなくし、結果的に出現する空間の自由度を巧みに利用する方法を考案し、これを実験で実証しました。従来とは真逆の発想によって、時間のかかる断熱的操作ではなく時間のかからない非断熱的操作を可能にし、ナノ秒（ 10^{-9} 秒）の速さで、忠実度が90%以上と極めて正確かつ完全に自在な制御の実現に世界で初めて成功しました。これは、マイクロワット（ 10^{-6} W）という小さな光パワーを用いながらも、従来の約100倍の速さに当たり、忠実度を約3倍向上したことになります。これにより108個のNVスピンを光で一括制御する可能性を示しました。さらに、スピンの制御機構もノイズ耐性の低い動的位相回転からノイズ耐性の高い幾何学的位相回転へと移り変わることを理論的シミュレーションによって明らかにしました。本成果によって、量子情報処理に必要な全操作が現実的なレベルで行えるようになり、今後の量子情報実験を加速させることが期待されます。

本成果によって、量子情報処理に必要な3つの基本要素技術である書き込み、ゲート制御、読み出しをすべてレーザー光の技術で完成することができました。これらの技術を利用し、量子情報ネットワークの実現に向けて、量子テレポーテーション転写や量子もつれ測定などの発展的な量子情報技術の実証へ応用を進めていきます。また、これらの量子技術は、繊細な物理量を扱うために、超高感度な電磁場センシング、バイオイメージング技術といった応用への道も開かれています。

Reference: Yuhei Sekiguchi, Naeko Niikura, Ryota Kuroiwa, Hiroki Kano and Hideo Kosaka*, “Optical holonomic single quantum gates with a geometric spin under a zero field”, Nature Photonics. DOI:10.1038/nphoton.2017.40

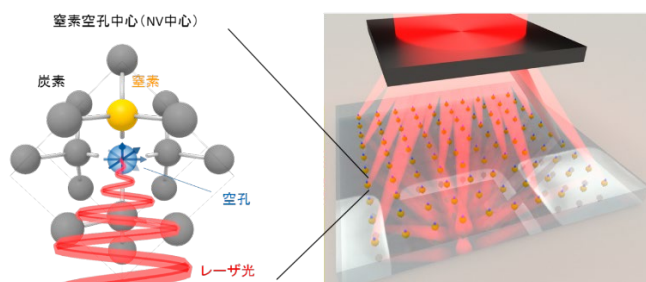


図1 ダイヤモンド中の窒素空孔中心(NV 中心)とレーザー光による電子スピン制御の概略図 ダイヤモンド中の炭素が窒素と空孔に置換されたものを NV 中心と呼びます。空孔には電子スピンの局在しています。レーザー光は集光できるため、狙った電子スピンだけを選択的に制御することができます。

スピンメーザーによる極低温・超低雑音マイクロ波増幅

—古くて新しい量子技術の確立を目指して—

Jason Ball¹、Petr Moroshkin¹、久保結丸¹
¹ 沖縄科学技術大学院大学 量子ダイナミクスユニット

超伝導量子コンピュータに代表されるように、マイクロ波周波数帯で動作する極低温固体量子デバイスの研究が目覚ましい勢いで進展しています。その根幹をなす技術の 1 つに、極低温 (~10 mK) において超微弱なマイクロ波信号 (~ μW) をいかに効率良く増幅できるか、が挙げられます。これまでは、この極低温におけるマイクロ波増幅は専らジョセフソンパラメトリック増幅器を用いてのみ実現されてきました。

ジョセフソン接合 (超伝導トンネル接合) は非線形かつ無散逸という、一見すると相反する 2 つの要請を同時に満たす夢のような特性を持ちます。この特性を巧みに利用して実現されたデバイスの代表が超伝導量子ビットです。更に 2000 年代の後半には上述のジョセフソンパラメトリック増幅器も開発・実証され、量子コンピュータ開発研究において必須の極低温マイクロ波量子技術となっています。しかしながら、ジョセフソンパラメトリック増幅器は飽和パワーが小さく、また磁場中では動作しないなどの弱点があり、これらはスピンセンシングや磁気共鳴イメージングへの弊害と考えられます。

本研究では、スピンの誘導放出を利用したメーザー (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation, 誘導放出によるマイクロ波増幅) の原理を用いて「古くて新しい」極低温マイクロ波増幅器を実現しました (図)。我々は、メーザー増幅器は極めて高い飽和パワーを持ち、なおかつジョセフソンパラメトリック増幅器に匹敵する超低雑音の増幅であることを確認しました。[特許申請済, US 16/806, 874, 日本 2020-035699]。

現在、このメーザー増幅器の更なる高性能化 (特に広帯域化) に取り組んでいます。また、類似のデバイスで極低温における極めて低雑音のマイクロ波発信器が実現できるなど、スピンメーザーは量子情報技術に大変有用である可能性を持っています。今後はメーザーの様々な応用の可能性も追求していきたいです。他方、メーザーは半導体増幅技術の台頭によってその有用性・優位性を失ったために 1960 年代で研究が廃れてしまい、多くの興味深い研究やアイデアが宙ぶらりんのままになってしまった歴史的経緯があります。私たちは、上述の量子情報技術への応用研究と平行して、「古くて新しい」メーザーに潜む物理も探究していきたいです。

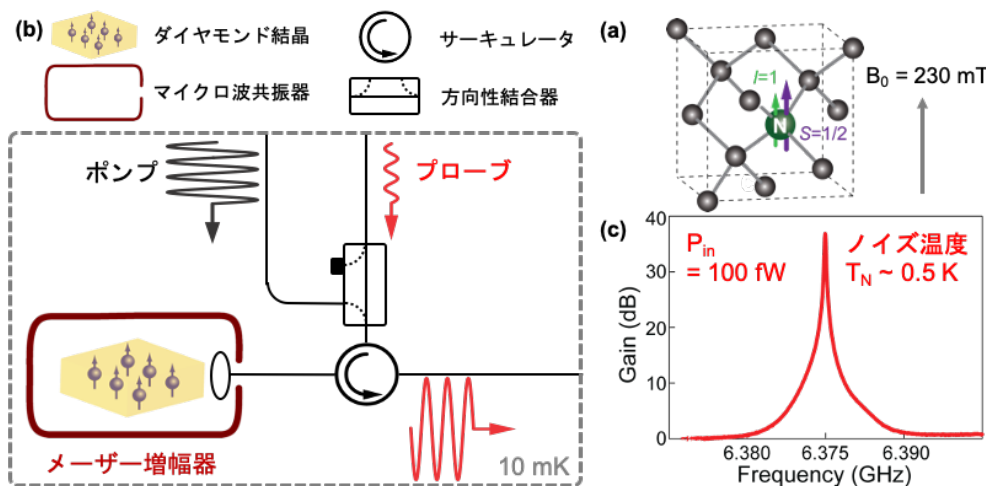


図 実証したメーザー増幅器. (a) 本研究で用いた不純物電子スピン: ダイヤモンド結晶中の窒素中心 (P1 中心). (b) 実験の概観. ポンプマイクロ波によりスピンの反転分布が形成され、プローブ信号が増幅される. (c) 結果の一例. およそ 36 dB のゲインが得られ、雑音レベルは温度に換算して約 0.5 K とほぼ量子限界だった. なお、入力信号 100 fW は、ジョセフソンパラメトリック増幅器において報告されている飽和パワー最大値であることにも注目されたい。

ダイヤモンド NV センターを用いたハイブリッド量子系における双安定性

Andreas Angerer¹, Stefan Putz¹, Dmitry O. Krimer¹, Thomas Astner¹, Matthias Zens¹, Ralph Glattauer¹, Kirill Streltsov¹, W. J. Munro^{2,3}, Kae Nemoto³, Stefan Rotter¹, Jorg Schmiedmayer¹, and Johannes Majer¹

¹ ウィーン工科大学、² NTT 物性科学基礎研究所、³ 国立情報学研究所

ハイブリッド量子系では、異なる物理系や物理量などを組み合わせることで、今までは考えられなかった新しい性質や、実験的に実現が難しい量子系固有の性質を生み出すことができると考えられています。これまでに、様々な物理系を用いたハイブリッド量子系が理論的に提案され、個別の物理系では出現しないハイブリッド系固有の性質が予言されてきました。本研究では、これらハイブリッド系の中でも、量子的に優れた性質をもつダイヤモンド格子中の NV (窒素-空孔) センターの電子スピン集団と超伝導共振器とのハイブリッド系を用いて、ハイブリッド量子系の示す非線形量子現象を実証することに成功しました。

本研究で用いたハイブリッド量子系は、ダイヤモンド NV センターの電子スピン集団、超伝導共振器、ドライブ光(入力光)からなる系で、入力の強度を変化させることで、ハイブリッド系の示す応答を観測しました。実験が行われた低温 (25mK) においては約 10^{12} 個ある NV センターのほぼすべて (99%) の電子スピンの基底状態へ偏極した状態になっていると考えられます。この量子系をドライブのある Tavis-Cummings 型の相互作用でモデル化し、それぞれの電子スピンのゼロ磁場分裂 2.878GHz、共振器との相互作用は平均 12Hz の結合としました。

このハイブリッド量子系の入力光(ドライブ)に対する応答から、系の定常状態における 2 重安定現象を解析しました。入力光のパワーを上げるにつれて、電子スピン系は共振器から相互作用しなくなり、共振器内の光強度が臨界値に達したところで完全に独立することがわかります。この非線形飽和現象は 2 重安定性に必須な性質で、系が協同的に振る舞うことにより初めて実験的に検証が可能となりますが、実際には電子スピン集団には協同現象を妨げる不均一性があるため、実験とともに数値解析を行いました。不均一性を 9.5MHz と仮定した場合には、相互作用の臨界値は $C_{coll}=42.4$ と見積もることができ、これより小さい値では、共振器内の光強度は入力光の連続関数となりますが、臨界値ではシステム応答はステップ関数となり、2 つあるドライブ強度の臨界点では相転移現象を示します。

さらに、系のダイナミクスを実験的・理論的に調べ、定常状態への緩和時間の入力光強度依存性など、NV センターのスピン集団による協同的な非線形現象を実験的に検証し、理論的にそのメカニズムを明らかにしました。本研究は、非線形な量子現象の新しい可能性を拓く研究結果です。

Reference: Andreas Angerer, Stefan Putz, Dmitry O. Krimer, Thomas Astner, Matthias Zens, Ralph Glattauer, Kirill Streltsov, William J. Munro, Kae Nemoto, Stefan Rotter, Jörg Schmiedmayer and Johannes Majer, "Ultralong relaxation times in bistable hybrid quantum systems", Science Advances Vol. 3, no. 12, e1701626 (2017).

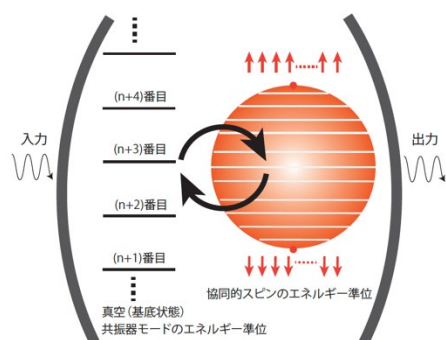


図1 ダイヤモンド NV センター集団と共振器からなるシステムの概念図を示す。NV センターが集団的に共振器と相互作用することで、それまでには見られなかった量子現象が出現する。

ダイヤモンドからの超放射を実現

Andreas Angerer¹, Kirill Streltsov¹, Thomas Astner¹, Stefan Putz¹, Hitoshi Sumiya², Shinobu Onoda², Junichi Isoya², W. J. Munro^{3,4}, Kae Nemoto⁴, Jorg Schmiedmayer¹, and Johannes Majer¹

¹ウイーン工科大学、²筑波大学、³NTT 物性科学基礎研究所、⁴国立情報学研究所

超放射が観測されるときには、その物質から閃光が発せられたように見えます。その「超放射」とはどのような現象なのでしょう。放射とは、ひとつの原子でエネルギー状態が変わるときに、そのエネルギーの差が光として放出されること言います。放出される光は、可視光であったり、マイクロ波であったりと、様々な波長の光が原子内のエネルギー差に合わせて光子として放出されます。一方、「超放射」とは、原子のひとつが光を放出するときに、他の原子も同時に光を放出することによって起こされる現象で、短い時間の間に強い光が放出されるため「超」放射と呼ばれています。

理論的には長いあいだ予言されてきた現象ですが、実現は困難と考えられてきました。通常は、原子からの光子の放出はばらばらに起こるため、いつ放出が起こるのかを予測することはできません。ところが、原子同士が十分に近くにあるときには、この現象に変化が起こり、量子的な効果が現れます。ひとつの原子が光子を放出すると、そばにある他の原子に影響し、多くの原子が一斉にエネルギーを光子として放出するようになります。しかしながら、多くの原子を放射される光の波長よりも短い範囲に集めることはできないので、通常の原子集団では超放射を起こすことは不可能と考えられてきました。

本研究では、ダイヤモンド結晶中にある窒素と空孔からなる格子欠陥 (NV センター) が人工原子のように振る舞うことを用いることで、光の波長の領域にたくさんの人工原子を集めることを可能にしました。また、NV センターが放出するマイクロ波の波長はとても長く数 cm もあるので、多くの人工原子を光の波長領域に集めやすくなります。

超放射の実証の鍵は、放射強度の NV センターの数に対する非線形的性質の検証にあります。実験に用いるダイヤモンドの中に NV センターがいくつあるのかを確認するのは簡単なことではありません。本研究ではその代わりに、ダイヤモンドが持つ特徴を利用して NV センターの数を変化させました。共振器と共鳴する NV センターの数を n 個から $4n$ 個まで 4 倍変化させて非線形性の実証に初めて成功しました。超放射の実証は、マイクロ波のレーザーなど固体を用いた多様な量子技術の発展の基礎としても重要な研究成果です。

Reference: Andreas Angerer, Kirill Streltsov, Thomas Astner, Stefan Putz, Hitoshi Sumiya, Shinobu Onoda, Junichi Isoya, W. J. Munro, Kae Nemoto, Jorg Schmiedmayer, and Johannes Majer
Nature Physics (2018)

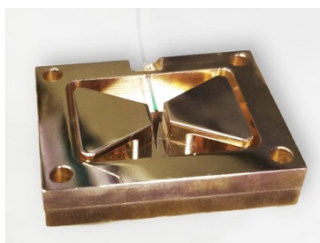


図1 高濃度の NV センターを含むダイヤモンドと相互作用する3D マイクロ波共振器を示す。

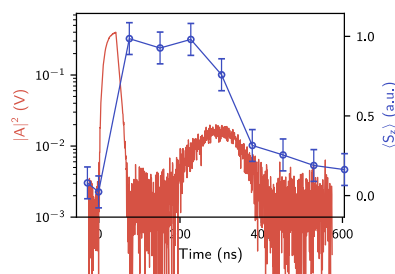


図2 ハイブリッド量子系が示すダイナミクスを示す。約 300 ナノ秒でスピン集団(青線)は急速に減衰し、マイクロ波の閃光が共振器から放射されている。超放射がない場合には、スピン集団の減衰時間は 40000 秒のオーダーであることがわかっている。

量子系における負温度への緩和現象

濱祐介¹、湯川英美^{1,2}、W. J. Munro^{3,1}、根本香絵¹

¹国立情報学研究所、²理化学研究所、³NTT 物性科学基礎研究所

観測の対象となっている物理系は、その周りにある環境から完全に切り離すことはできないため、環境との相互作用から生じる「緩和」は普遍的に見られる本質的な物理現象のひとつです。物理系が量子力学的に振る舞う場合でも同様に熱平衡状態へ向かって緩和がおき、徐々に量子性が失われていきます。ところが、量子的な系では、単純なモデルであっても古典系とは異なる緩和を起こすことが知られており、そのひとつが超放射です。超放射は、物理系と環境系との相互作用がコヒーレントであることによって引き起こされます。例えば、物理系がスピン-1/2 のような2準位系の集まりであるとする、このスピン集団とボゾン熱浴が相互作用しているという簡単な系で、通常の指数的な緩和より速い緩和をみることができると予測されます。このような現象は予言されてはいましたが、実証は難しく、最近になってマイクロ波を用いることでようやく実験的に検証されました。(本報告「ダイヤモンドからの超放射を実現」参照)

本研究では、ハイブリッド量子系でのコヒーレントな相互作用が引き起こす緩和現象を調べることで、通常は起こらない負温度への緩和現象を見出しました。2つのスピン集団がひとつのボゾン熱浴と相互作用しているモデルを考えます。スピン集団がひとつのときは、先の超放射が期待できますが、超放射を起こすときの系の対称性に着目し、2つのスピン集団の初期状態を系のハミルトニアンに反した状態におくことで、これまでとは異なる、負温度への緩和といった一見物理的に矛盾した現象が観測されることが予測できます。特に、スピン集団の構成スピンの数を非対称にし、その差を大きくすることで、小さい方のスピン集団の状態をほぼ完全に励起状態へ緩和させることもできるようになりました。

さらに、スピン集団の間のエンタングルメントを調べることで、この現象の背後にある物理的原理を明らかにしました。このハイブリッド系では、2つのスピン集団には直接的な相互作用項も、熱浴を介した相互作用項もないのですが、緩和過程において系の対称性が保存されることで、2つのスピン集団間にエンタングルメントが生成されることが明らかになりました。

この原理に、近年急速に進んだ量子状態操作の技術を用いて初期状態を準備することで、様々な緩和現象が引き起こされる可能性が示されました。また、系の対称性が有効であるタイムスケールを変えることで緩和現象をデザインすることもできるようになります。このようなデザインされた緩和現象は量子技術への応用も可能で、これまでとは異なる新しい量子技術の可能性が拓かれました。

Reference: Yusuke Hama, W. J. Munro, and Kae Nemoto, Phys. Rev. Lett. 120, 060403 (2018)

Yusuke Hama, Emi Yukawa, W. J. Munro and Kae Nemoto, Phys. Rev. A 98, 052133 (2018)

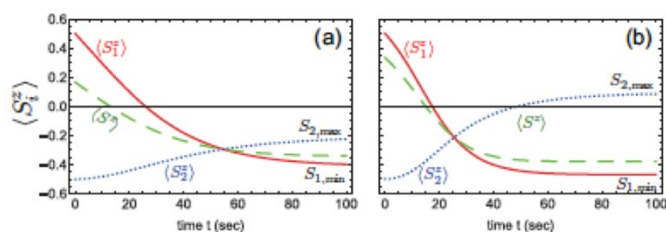


図1 ドメイン2のスピンの高温へ緩和する様子を示す。図(a)はドメイン1のスピン集団中のスピンの数が2の場合、図(b)はスピンの数が5の場合を示す。ドメイン1の集団中のスピンの数が増えていくに従い、ドメイン2のスピンは負温度へ緩和するようになり、スピン数無限大の極限ではドメイン2は負温度領域の完全偏極状態へ漸近することを示す。

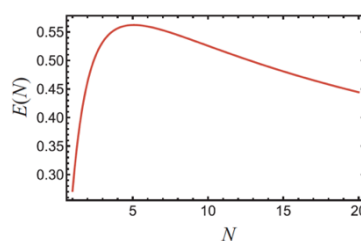


図2 緩和により生成されるドメイン間のエンタングルメントの量のスピンの数依存性を示す。

位相緩和の影響下で古典限界を超える量子センサ

松崎 雄一郎¹、Simon Benjamin²、仲山将順³、齊藤 志郎¹、W. J. Munro¹

¹NTT 物性基礎研、²オックスフォード大学、³国立情報学研究所

磁場センサは、医療や材料工学など、様々な分野で用いられています。磁場センサの性能を測る指標のひとつとして、推定誤差 δB があげられます。推定誤差の逆数が感度に対応しており、推定誤差の抑制は応用上極めて重要です。現在用いられている古典センサにおいては、積算時間を T とすると、推定誤差は $T^{-0.5}$ で減少することが知られています。この $\delta B \propto T^{-0.5}$ という関係式を古典的なスケーリングと呼びます。

近年になり、量子性を用いるセンサが理論と実験の両面から研究されるようになりました。特に、量子ビットを用いた磁場センサは、原理的には高感度化が期待できるため、有望な素子だと考えられています。量子的な重ね合わせ状態を用いることで、ノイズのない理想的な状況では、量子センサは高い感度を出すことが知られています。具体的には、積算時間 T に対して、推定誤差は、 T^{-1} に比例して減少します。この $\delta B \propto T^{-1}$ という関係式を量子的なスケーリングと呼びます。しかしながら、量子センサはノイズに対して脆弱であり、現実的な環境の下で動作させると、多くの場合は感度が下がってしまいます。特に、現実的なノイズの一つとされる位相緩和に対しては脆弱で、量子センサを用いても、位相緩和とノイズの下では積算時間 T に対して推定誤差は $\delta B \propto T^{-0.5}$ でという古典的なスケールでしか減少しません。そのため、スケーリングに関しては古典センサと同等になってしまいます。

そこで我々は、位相緩和ノイズに対してロバストな、新しい量子センサを理論的に提案しました。我々の提案する新量子センサは、位相緩和の影響下でも、積算時間 T に対して、推定誤差は T^{-1} に比例して減少するため、古典センサの感度をスケールで上回ります。この性能を引き出すためのポイントは、量子テレポーテーションの活用です。これまでの研究では、量子テレポーテーションは、量子通信や量子コンピュータの分野で主に議論されてきました。しかし我々は、量子テレポーテーションがノイズの抑制にも有用であることに着目して、量子センサへ応用することを考えました。そこで我々は、量子ビットを複数用意し、量子ビットが磁場と相互作用している間に、量子ビット間に量子テレポーテーションを実行するというスキームを提案しました。このスキームにおいては、磁場からの情報は量子ビットに蓄えられますが、位相緩和の量子ビットへの影響は抑制できることを、理論的に示しました。そのため、我々の提案する新量子センサでは、位相緩和の影響下でも、量子的なスケーリングである、 $\delta B \propto T^{-1}$ を得られます。

本研究成果は、量子センサの高感度化に貢献するものであり、将来的には医療や材料工学への応用が期待されます。

Reference: Y. Matsuzaki, S. Benjamin, S. Nakayama, S. Saito, and W. J. Munro, Phys. Rev. Lett. **120**, 140501 (2018).

	古典センサ	量子センサ	本研究が提案する 新量子センサ
理想 (ノイズなし)	$\delta B \propto T^{-1/2}$	$\delta B \propto T^{-1}$	$\delta B \propto T^{-1}$
現実 (位相緩和あり)	$\delta B \propto T^{-1/2}$	$\delta B \propto T^{-1/2}$	$\delta B \propto T^{-1}$

図1 従来のセンサと、我々の提案する新しい量子センサとの性能比較。 δB は磁場の推定誤差を、 T は積算時間をあらわし、センサの感度は推定誤差の逆数に対応します。積算時間を長くするほど推定誤差を小さくできるため、高感度化を目指す際には、そのスケーリングが重要になります。我々の提案する新量子センサは、位相緩和が存在するような現実的な状況でも、推定誤差と積算時間のスケーリングが古典のスケーリングを上回るため、高感度化が期待できます。

計測をハイブリッドにデザインする

Shane Dooley¹, Michael Hanks^{2,1}, Shojun Nakayama¹, William J. Munro^{3,1}, and Kae Nemoto^{1,2}

¹国立情報学研究所、²総合研究大学院大学、³NTT 物性科学基礎研究所

測定には必ず、どこまで正確に測れるかという精度の限界があります。物理学においても、技術を使う時でも、起こっている現象を確認し実証するには「測定」は必須であり、私たちの科学・技術は測定の上に成り立っていると言うことができます。測定精度の限界は、すなわち技術の精度の限界であり、どこまで正確に測れるかという問いは物理学の根源的問いであるとともに、技術の限界にも直結している重要なテーマです。近年急速に発達したナノテクノロジーは、ナノメートル(1メートルの10億分の1の長さ)の物理的スケールを特徴とする技術ですが、この領域の一番小さなスケールでは、すでに測定の限界が見え始めています。この限界は、量子標準限界(またはショットノイズ限界)と呼ばれる限界で、測定方法が古典物理学的である限り、これ以上精度をあげることができないという物理学が示す本質的な限界です。量子計測では、量子的な性質を用いて、この古典物理が示す測定の限界に挑戦します。

量子計測における本質的な課題は、量子的性質を計測装置に(プローブ)に使うため、雑音に対して弱く、量子計測のもつ精度を引き出すことができない点にあります。本研究では、プローブに用いる量子状態を工夫することにより、雑音に強い量子計測の方法を理論的に示しました。これまであまり考えられてこなかった量子プローブ内の量子的な相互作用に着目し、量子プローブに用いるスピン間にむしろ強い相互作用を与えることで熱雑音に対して強い量子測定の方法がデザインできることを見出しました。量子プローブのエネルギー・スペクトル(図1)は、相互作用により変化するので、これを利用してより安定な計測をデザインします。例えば、 $J > \omega$ のときには、 ω の情報は2つの基底状態の相対位相が担っています。この2つの場合の感度を数値的に比較したものが図2で、強い相互作用によって、より高い感度を達成することが可能になっていることを示しています。

Reference: Shane Dooley, Michael Hanks, Shojun Nakayama, William J. Munro, and Kae Nemoto, "Robust quantum sensing with strongly interacting probe systems", npj Quantum Information, volume 4, Article number: 24 (2018)

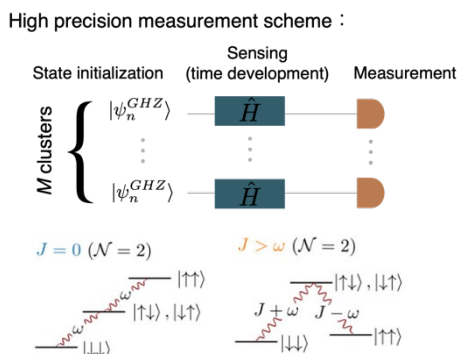


図1 上図に量子計測の概念を示す。下左図は、量子プローブが2体のスピン相互作用の場合のときの $J = 0$ に対するエネルギー・スペクトラムで、下右図は $J > \omega$ に対するエネルギー・スペクトラムを表す。

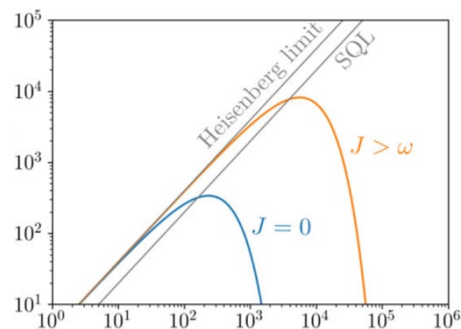


図2 量子プローブが2体のスピン相互作用の場合のときの $J = 0$ と $J > \omega$ に対する感度を数値的に比較したグラフ。

2量子ビットのハミルトニアン動力学系における ロバスト動力学制御

坂井亮介¹、添田彬仁¹、村尾美緒¹、Daniel Burgarth²

¹ 東京大学大学院理学系研究科、² Department of Physics and Astronomy, Macquarie University

未知パラメータを含む2量子ビットのハミルトニアン動力学系に対して、一方の量子ビットのみの制御ハミルトニアンを付加することで任意の2量子ビットゲートを実装する、ロバスト動力学制御が可能であることを示しました。従来のフィードバック制御で未知パラメータを含む量子系に対して量子ゲートを実装するには、量子測定によって未知パラメータを推定してから、量子ゲートに必要な制御ハミルトニアンを計算するという古典情報処理ステップが必要でした。ロバスト制御では、未知パラメータの推定は行わずに、設定した範囲のどの値でも同じ量子ゲートを実行する制御ハミルトニアンを求めて実行します。このようなロバスト動力学制御は、これまで1量子ビット系についてしか実現可能性が示されていませんでした。

本研究では、まず、ロバスト動力学制御が可能で2量子ビット系のクラスが存在を群論に基づいて解析的に示しました。しかし、ロバスト動力学制御が可能で系であっても、解析的な方法で制御ハミルトニアンを求めると、量子ゲートの実装に非常に長い時間がかかってしまう場合があります。そこで、設定した範囲の未知パラメータを離散化して、それぞれの離散化したパラメータ値を異なる「モード」とみなし、すべてのモードにおいて同じ2量子ビットゲートを実装できる最適な制御ハミルトニアンの制御パルスを、GRAPE アルゴリズムによる数値計算で求めました。そして、求めた制御ハミルトニアンを離散化する前の連続未知パラメータに作用させた場合に実装される量子ゲートの誤差を調べました。その結果、解析的な方法ではロバスト動力学制御が可能であるかどうか判明していない2量子ビット系においても、ある程度細かく離散化を行うならば、設定した範囲の連続未知パラメータに対するロバスト動力学制御が高い精度で可能となる場合があることを示しました。

本研究成果は、一部のパラメータのカリブレーションの精度が十分でなくても、制御パルスの最適化により任意の量子ゲートが実装可能となる場合があることを示唆します。量子コンピュータを実現するには、パラメータのカリブレーションに多くの労力を要します。量子系の全パラメータを完全には把握していなくても、量子系を思う通りに動かすことができるというロバスト動力学制御の考え方は、量子コンピュータの実現に役立つ可能性があります。

Reference : R. Sakai, A. Soeda, M. Muraio and D. Burgarth, Phys. Rev. A 100, 042305 (2019).
DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.100.042305>

未知パラメータ

プログラム

可能部分

$$H_w(t) = H_d(w) + v(t)H_c$$

ドリフト
制御
ハミルトニアン
ハミルトニアン

ターゲットとする量子ゲート:

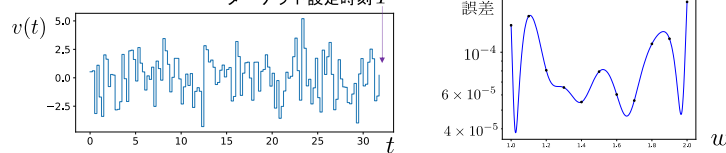
$$U(T) = \mathcal{T}e^{-\frac{i}{\hbar} \int_0^T H_w(t) dt}$$

例: CNOT (制御NOT)

ロバスト動力学制御可能な2量子ビット系の例：ターゲットは設定時刻 T でのCNOT

$$H_d(w) = \omega X \otimes I + X \otimes X + Y \otimes Y + Z \otimes Z, \text{ 未知パラメータ: } 1 < w < 2$$

$$H_c = Z \otimes 1 \quad (\hbar = 1) \quad \text{ターゲット設定時刻 } T$$



図：ロバスト動力学制御可能な2量子ビット系と制御パルスの例。 w の値によらず、実装した量子ゲートの誤差は 10^{-3} の範囲内に収まっています。

未知ユニタリ変換の逆変換を実装する ユニバーサル量子アルゴリズム

Marco T. Quintino¹、董青秀雄¹、新保厚¹、添田彬仁¹、村尾美緒¹
¹ 東京大学大学院理学系研究科

量子力学において状態の可逆な変換はユニタリ変換で記述されます。ある物理学者が、ユニタリ変換を実装することが保証されている実験装置を受け取った場合を考えます。その実験装置の物理系の次元 d は知らされていますが、それ以上はブラックボックスとなっていて、どんなユニタリ変換を実装しているのは不明です。このブラックボックスは未知のハミルトニアン動力学によって時間発展している系だと考えることもできます。この物理系で所望の量子コンピュータプログラムを実行するために、元のハミルトニアン動力学の効果を打ち消したい場合について考えます。一般に、ユニタリ変換を打ち消す最も簡単な方法は、ユニタリ変換の逆変換を作用させることです。ユニタリ変換の正体（行列表現）を知っている場合は逆変換を作用させることができます。しかし、ユニタリ変換がブラックボックスで与えられている場合に、ブラックボックスのユニタリ変換の正体を知ることなく、その逆変換を実装することは可能なのでしょうか？単純な戦略として、量子トモグラフィを行ってユニタリ変換の正体を突き止めてから逆変換を計算し、その逆変換に対応する量子ゲートを作用させるという方法があります。しかし、この戦略で正確な逆変換を実行するには、確率的な成功しか要求しないと条件を緩和しても、無限回ブラックボックスを使わないといけないことが知られています。有限回のブラックボックスの使用でも正確に逆変換を実装できる、ユニバーサルな方法はないのでしょうか？

我々は、ブラックボックスを有限回しか使わずに確率的に正確な逆変換を実装するユニバーサルな量子アルゴリズムを発見しました。この量子アルゴリズムは、最近発展している高階量子演算のアイデアに基づいており、ブラックボックスの使用回数に関して指数関数的に成功確率を上げることができます。ブラックボックスを直列的に使用し、 d 次元の物理系では、少なくとも $d-1$ 回以上はブラックボックスを使う必要があることも示しました。さらに半正定値計画法(SDP)を用いた数値計算により量子アルゴリズムの定式化と最適化を行いました。そして、不定因果関係を持つ高階量子演算を用いると、通常の因果関係に従うどのような量子アルゴリズムよりも成功確率を上げることができることを示しました。

Reference: M. T. Quintino, Q. Dong, A. Shimbo, A. Soeda da and M. Murao, Phys. Rev. Lett. 123, 210502 (2019). DOI: 10.1103/PhysRevLett.123.210502

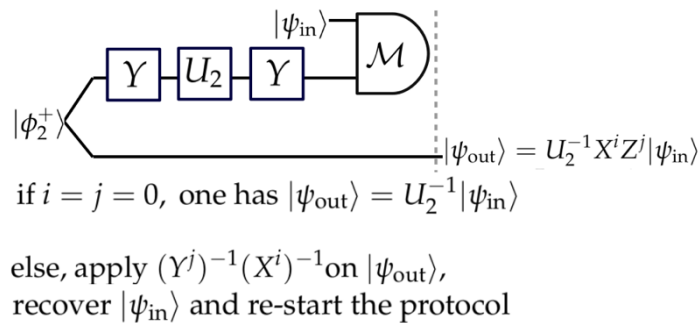


図: ブラックボックスによって実装される量子ビット ($d = 2$) の未知ユニタリ変換 U_2 を逆変換 U_2^{-1} に変換する量子アルゴリズムを記述する量子回路。まず最初に2量子ビットの最大エンタングル状態 $|\phi_2^+\rangle$ を準備し、そのうちの図の上側の量子ビットに YU_2Y (Y はパウリ行列 σ_y を表す) を作用させることで U_2 の複素共役 U_2^* を作用させる。次に状態 $U_2^* \otimes I |\phi_2^+\rangle$ の上側の量子ビットと入力状態 $|\psi_{\text{in}}\rangle$ をベル測定 \mathcal{M} する。ベル測定後、入力状態 $|\psi_{\text{in}}\rangle$ はそれぞれ確率 $1/4$ で $U_2^{-1} X^i Z^j |\psi_{\text{in}}\rangle$ の状態に変化する。もしベル測定の結果が $i \neq 0$ or $j \neq 0$ であるならば、 U_2 を作用させることにより入力状態 $|\psi_{\text{in}}\rangle$ を復活することが可能であるので、このプロトコルを最初からやり直す。

量子輸送制御プロトコルの開発

内山智香子^{1,2}

¹山梨大学、²国立情報学研究所

近年、量子コンピュータや量子暗号等の量子情報処理が急速に現実味を帯びてきています。この背景には、ナノサイズにおける実験・制御技術の急速な発展があります。ナノサイズとは、1メートルの10億分の1（1ナノメートル）を長さの尺度として用いるほど微小なサイズのことです。このようなサイズでは、原子や分子が単体として持つ特性（量子力学的性質）が顕著にあらわれます。量子情報処理分野は、量子力学の原理を情報処理に利用する、というコンセプトのもと研究が進められています。この分野のさらなる発展には、演算素子や記憶装置を始めとする、異なる量子（ハイブリッド）デバイス間の量子情報のやりとりを確実に行う手法の開発が求められます。その際、量子情報を担う物理的実体の輸送（量子輸送）制御が必要となります。しかし、輸送の対象実体が小さいため、周りをとりまく環境世界からの不可避的な影響を受けやすく、これにより輸送効率・精度が低下してしまうことが問題となります。

この環境世界からの影響について、従来は排除する方向の研究が多く行われてきましたが、今回我々は、これまでの常識に反し、環境世界の影響を活用した輸送制御プロトコルの開発を行いました。開発に際して、光合成細菌と呼ばれる生体の適応戦略モデルを基礎に置きました。この生体は、僅かな光しか届かない深い湖底で、光合成によりエネルギーを得て生存しています。その機構を支える光捕集分子が、僅かな光によって得られた励起エネルギーを光合成反応中心に輸送する際、構成分子の熱的な揺らぎを利用することが過酷な状況下での生存を可能にしていると説明されています。我々は、この適応戦略のうち「揺らぎの利用」に注目し、その性質を人工合成することにより、輸送効率の上昇が可能であることを発見しました。特に、揺らぎの時空間相関の様相が輸送効率に大きな影響を与えることが明らかとなりました[1, 2]。

この他、量子情報を担う実体の代表例である電子スピンの輸送における、スピン偏極の制御手法プロトコルの開発[2]や、量子情報消去に必要なエネルギーの下限の見積もり[3]等を行いました。

本研究成果は、量子情報を担う異なる量子力学的実体の量子輸送に対する新たな制御プロトコルを提供するものであり、今後、量子スイッチ素子、スピントランジスタ等への応用が期待され、量子情報処理分野の促進につながると考えられます。

Reference:[1] C. Uchiyama, W. J. Munro, and K. Nemoto, “Environmental engineering for quantum energy transport”, npj Quantum Information, 4, 33 (2018). DOI:10.1038/s41534-018-0079-x [2] C. Uchiyama, W. J. Munro, and K. Nemoto, in preparation. [3]K. Hashimoto, G. Tatara and C. Uchiyama, “Spin backflow: A non-Markovian effect on spin pumping”, Phys. Rev. B. 99, 205304 (2019). DOI:10.1103/PhysRevB.99.205304 [4]K. Hashimoto, B. Vacchini, and C. Uchiyama, “Lower bounds for the mean dissipated heat in an open quantum system”, Phys. Rev. A 101, 052114 (2020). DOI:10.1103/PhysRevA.101.052114

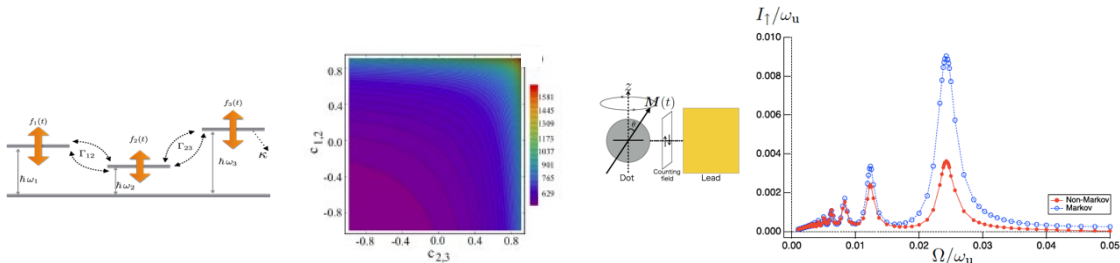


図1 揺らぎを利用したエネルギー伝送モデル(左)で得られた、揺らぎの空間相関に対する輸送所要時間の依存性(右)[1]。

図2 電子リードと相互作用する量子ドットに回転磁場を印加することによるスピン流生成モデル図(左)スピン流の回転磁場周波数依存性(右)[3]

観測による量子多体状態の制御

–強い散逸による絶縁体の安定化を実現–

高橋義朗
京都大学大学院理学研究科

量子力学に従う物質で構成された系は、散逸の影響で容易にその状態が変わってしまうため、量子多体系に対して散逸がどのような影響を及ぼすかを明らかにすることは、物質中で起こる物理現象の理解や量子技術を用いたデバイスの開発にとって重要です。散逸の影響で状態が変化するという性質は、量子力学において重要な概念である「観測」と強く関係しています。量子力学では、観測という行為によって対象の量子状態が変化してしまう場合があり、量子多体系に対する散逸の影響には、観測と関連した量子力学特有の性質が現れることが予想されます。

今回我々は、光格子中に捕捉された極低温イッテルビウム原子に対して散逸を与える特殊なレーザーを照射し、量子多体系への影響を調べました。具体的な現象として、光格子中のボース粒子系で現れる「モット絶縁体→超流動相転移」に注目しました。この量子相転移では、光格子の各格子点のポテンシャル深さが十分に深いとき、同じ格子点に同席した原子同士はお互いに反発しエネルギーが上昇するため、同席する原子の数をなるべく減らし、原子は各格子点に決まった数だけ局在した「モット絶縁体状態」と呼ばれる状態となる一方で、光格子を浅くして隣の格子点との間の障壁を下げると、原子が格子点間を動き回る「超流動状態」へと相転移します。この実験では、1格子点あたり1原子が局在しているモット絶縁体状態を初期状態として、光会合光を照射しながら光格子の深さを浅くしました。その結果、光会合光による強い散逸を導入した場合には、超流動状態への相転移が散逸のない場合と比べて大きく遅れることが分かりました（図1）。これは、量子ゼノ効果と呼ばれる量子力学特有の奇妙な現象によって説明することができます。

本研究成果により、冷却原子を用いた量子シミュレーターが扱うことのできる物理現象の範囲が、散逸のある開放量子多体系にまで拡張され、より広範囲の物理現象を実験的に研究できるようになったと言えます。実際の物質はほとんどの場合何らかの散逸の影響を受けているため、本研究により、現実的な量子多体現象の理解につながると言えます。またこの他にも、量子力学の原理を利用したデバイスの開発をする上での基礎的な知見を与えると予想されます。

Reference: T. Tomita, S. Nakajima, I. Danshita, Y. Takasu, and Y. Takahashi, “Observation of the Mott insulator to superfluid crossover of a driven-dissipative Bose-Hubbard system”, Science Advances, 3, e1701513. (2017). DOI: 10.1126/sciadv.1701513.

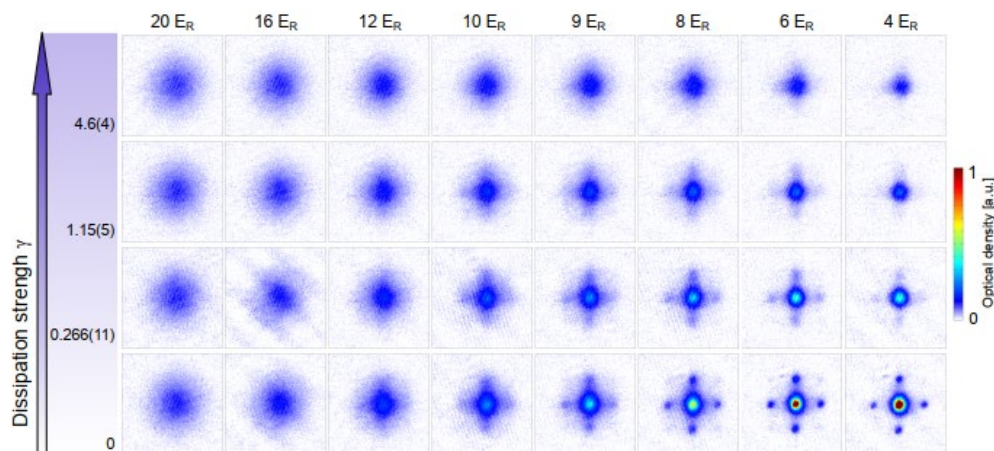


図1 散逸の強さ γ を変化させたときの原子の運動量分布のカラースケールイメージ。超流動性を表す原子波の干渉ピークが、散逸を強くすると、抑制されている様子がわかる。

光格子中の単一原子の新しい観測法の開発

高橋義朗
京都大学大学院理学研究科

近年、2次元光格子に導入された超低温の原子集団について、単一サイトの空間分解能で単一原子を観測する技術である量子気体顕微鏡が開発されました。その高い制御性から究極の量子シミュレーターの実現が期待されています。実際、この技術により、2次元光格子中に導入されたアルカリ原子のスピンの成分フェルミ気体の反強磁性秩序相が観測されています。

今回、我々はアルカリ原子とは異なるユニークな応用が期待されている2電子系原子のイッテルビウム原子に対して、新しい手法の量子気体顕微鏡の開発に成功しました。これまでの手法は、原子の測定時にプローブ光による発光を高効率で検出することにより、サイトを分解して高感度に単一原子を観測していました。こうした発光を検出する方法ではなく、分散型相互作用に基いた、非共鳴なプローブ光の偏光回転（ファラデー回転）を検出する、ファラデー量子気体顕微鏡の開発に成功しました(図1参照)。この方法で、単一原子に対して最大約 10° の回転角を得ることに成功しています。この手法では、測定時における原子の加熱を抑えられることが期待されますが、我々は最近、コヒーレント光を用いた場合のファラデー量子気体顕微鏡の限界を理論的に明らかにし、さらにこの限界を超える新しい方法として、プローブ光に加えて、スクイーズド真空を用いる手法を考案し、共焦点型顕微鏡の配置にすることにより、測定時の光吸収を抑えて単一原子の検出を可能にする非破壊測定の可能性を理論的に明らかにしました。

本研究成果により、光格子中の量子気体をより非破壊的に検出できるようになったと言えます。量子多体系の様々な量子ダイナミクスを研究する新しい可能性を与えたといえます。

Reference: R. Yamamoto, J. Kobayashi, K. Kato, T. Kuno, Y. Sakura, and Y. Takahashi, "Site-resolved imaging of single atoms with a Faraday quantum gas microscope", Phys. Rev. A 96, 033610 (2017). DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.96.033610>.

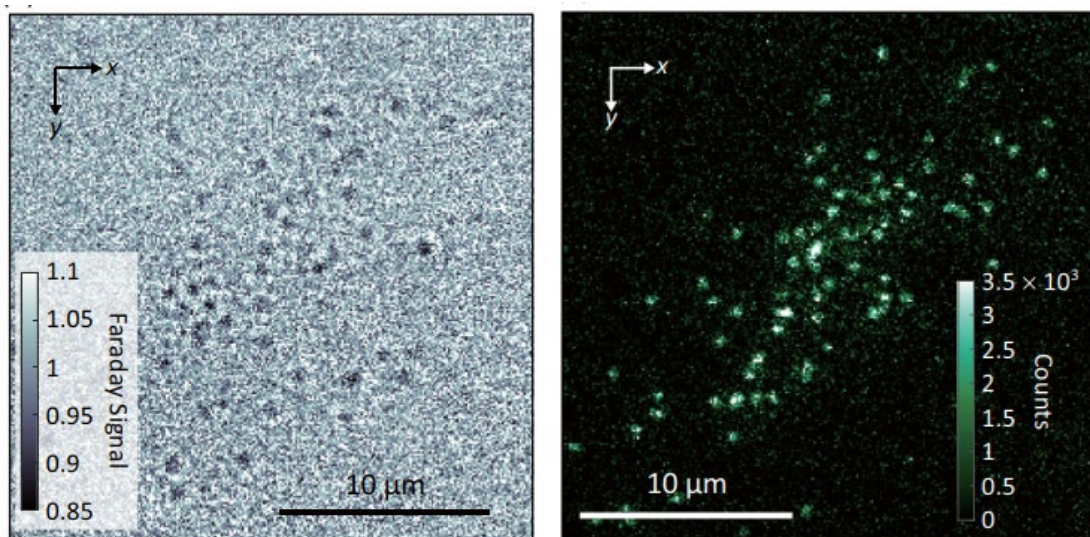


図1 分散型量子気体顕微鏡により得られた光格子中の単一原子の画像。(左)単一原子による入射直線プローブ光の偏光の回転(ファラデー回転)を検出した画像。(右)ダークフィールド型のファラデー回転信号を検出した画像。この時には、入射プローブ光は偏光板により検出器では検出されず、回転した偏光成分のみが検出される。

光と原子の量子インターフェース

山本俊^{1,2}

¹大阪大学大学院基礎工学研究科、²大阪大学先導的学際研究機構

量子インターネットやそのための量子インターコネクトは光と物質系からなるハイブリッド量子系を繋ぐことによって可能になる。特に長距離ファイバー通信技術とのインターフェースは長距離通信の観点から重要であるだけでなく、高性能な通信技術による量子状態操作という観点からも重要である。本研究では光と中性原子やトラップされたイオンとの間の通信技術との量子インターフェースに進展があった。

まず、カルシウムイオンの共鳴波長である 866nm の光子を光ファイバー通信波長である 1550nm 帯へ変換する高効率で低雑音の量子周波数変換器を実現した。これにより、従来問題となっていた波長ギャップを埋める量子インターフェースが可能になり、カルシウムイオンに対して通信波長の光子を読み書きすることが可能になった。この量子周波数変換器を英サセックス大学の光共振器結合したカルシウムイオントラップに組み込むことで、カルシウムイオンからの単一光子を通信波長帯(1550nm 帯)へ変換する実験に成功した。866nm では 10km も進むと 1000 分の 1 の光子しか残らないのに対して、1550nm 帯では約 15km まで半分の光子が残る。この波長変換による損失低減によって、トラップイオンでは当時の世界記録となる 10 km の単一光子ファイバー通信を実現した。変換効率を加味しても、866 nm の単一光子の直接送信を十分に超える効率となり、波長変換器の優位性が明確に示される結果となった。

次に、光子の偏光状態を変えずに通信波長帯へ波長を変換する偏光無依存型量子周波数変換器を実現し、これにより世界で初めて冷却原子(Rb)量子メモリと通信波長光子の量子インターフェースを実現した。開発した偏光無依存型量子周波数変換器を組み込むことにより、発生した短波長光子(780nm)を光ファイバー通信波長帯(1522nm)に変換した。また、冷却原子(Rb)量子メモリと短波長光子(780nm)をエンタングルさせ、それを変換することで冷却原子(Rb)量子メモリと光ファイバー通信波長光子の量子状態がエンタングルしていることを確認した。これにより、偏光無依存型量子周波数変換器による世界初の冷却原子(Rb)量子メモリと通信波長光子のエンタングルメント生成に成功した。

Reference: T. Walker et al., "Long-Distance Single Photon Transmission from a Trapped Ion via Quantum Frequency Conversion" Phys. Rev. Lett. 120, 203601, 2018. R. Ikuta et al., "Polarization insensitive frequency conversion for an atom-photon entanglement distribution via a telecom network" Nature Communications, 9, 1997, 2018.

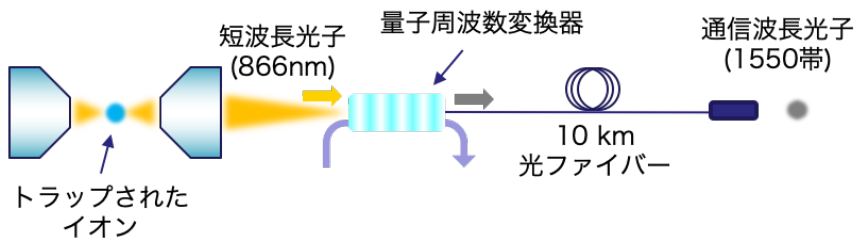


図1 トラップされたイオンからの単一光子の量子周波数変換器による 10-km ファイバー送信

結合共振器量子電気力学系の実現

—分散型量子コンピューターや量子ネットワークへの応用に期待—

加藤真也^{1,2}、Nikolett Németh³、千賀功平¹、水上翔太¹、黄心和¹、Scott Parkins³、青木隆朗¹
¹早稲田大学理工学術院、²JST さきがけ、³University of Auckland

光共振器に閉じ込められた光子と原子が量子力学的に相互作用する系を共振器量子電気力学系といいます。共振器量子電気力学系では、光子と原子の間でエネルギーを交換する過程が、エネルギーを損失する過程に対して支配的となり、通常の系ではさまざまな損失過程に阻まれて困難な、純度の高い量子状態の生成や特異な現象の観測が可能になります。これらの特長から、共振器量子電気力学系は光子や原子の量子性を探求する上で理想的な実験対象です。さらに、共振器量子電気力学系は光子を用いた量子情報技術の実現に有力な系であると期待されています。2012年には、共振器量子電気力学の実験技術の開拓に貢献したセルジュ・アロシュ氏がノーベル物理学賞を受賞しました。近年では、光共振器の代わりに超伝導電気回路を、自然の原子の代わりに人工原子を用いた「回路量子電気力学系」が考案され、Google や Intel を始めとする世界中の多くのグループが回路量子電気力学系に基づいた量子コンピューターの実現を目指して研究を進めています。

アロシュ氏の共振器量子電気力学系や、それに続く回路量子電気力学系は、いずれも周波数が数 GHz～数十 GHz 程度のマイクロ波光子を用いるものです。マイクロ波光子のエネルギーは室温の熱エネルギーより小さく、マイクロ波光子は室温では量子性を保つことができません。そのため、これらの実験では、系全体を数 mK 程度の極低温に冷却する必要があります。一方、光領域の光子を用いた共振器量子電気力学系の研究も進められています。光領域の光子は周波数が数百 THz であり、室温の熱エネルギーよりずっと大きなエネルギーを持つため、室温においても全く量子性を失いません。さらに、光ファイバーによって量子性を保ったまま長距離伝送できます。

このような光領域の共振器量子電気力学系の特長を生かして、量子コンピューターや量子ネットワークといった量子情報技術を実現するには、多数の共振器量子電気力学系を低損失・高効率に結合することが必要です。しかし、従来の光領域の共振器量子電気力学系は、共振器と光ファイバーの結合効率が悪く、複数の系の高効率な結合は実現されていませんでした。

今回、我々は、ナノ光ファイバーとファイバーブラッグ格子を組み合わせたナノ光ファイバー共振器と、その表面近傍にトラップされた原子を用いた共振器量子電気力学系を2つ構築し、これらを光ファイバーで高効率に結合することで、結合共振器量子電気力学系を実現しました。また、この系において、数メートル離れた原子と、2つの共振器に同時に存在する光子の間の相互作用を初めて観測しました。

Reference: S. Kato, N. Németh, K. Senga, S. Mizukami, X. Huang, S. Parkins, and T. Aoki, “Observation of dressed states of distant atoms with delocalized photons in coupled-cavities quantum electrodynamics”, Nature Communications, 10, 1160 (2019).

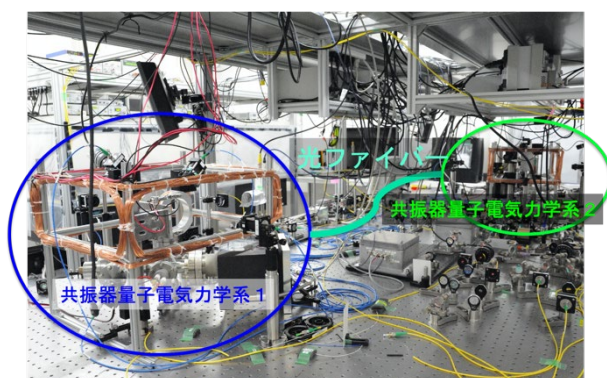


図 2つのナノ光ファイバー共振器量子電気力学系を、単一モード光ファイバーでつないだ結合共振器量子電気力学系

結合共振器量子電気力学系における共振器暗モード -原子のある場所には光が存在しないにもかかわらず、 離れた場所にある光から原子にエネルギーが受け渡される現象を観測-

Donald White¹、加藤真也^{1,2}、Nikolett Németh³、Scott Parkins³、青木隆朗¹
¹早稲田大学理工学術院、²JST さきがけ、³University of Auckland

光が原子に当たると、原子の中の電子が光の振動する電場に揺さぶられることで、光のエネルギーを原子が受け取ります。また、この光が強くなると、原子は光から一定程度以上エネルギーを受け取ることができなくなります（飽和します）。このような、原子と光のエネルギーの受け渡しは、原子の位置における光の電場によって起こります。

我々は、2つのナノ光ファイバー共振器量子電気力学系を1本の光ファイバーでつないだ結合共振器量子電気力学系において、光ファイバーに閉じ込められた光のエネルギーが、離れた原子に受け渡される現象を観測しました（図1）。このとき、原子が閉じ込められている共振器には光は存在していません。これは「共振器暗モード」と呼ばれる、結合共振器量子電気力学系に特有のモードです。また、光ファイバーに閉じ込めた光のエネルギーを強くしたとき、共振器内に光が存在しない状態を保ったまま、原子が飽和する現象を観測しました。

我々は、結合共振器量子電気力学系を世界で初めて構築していましたが、これまでこの系への光の入出力は、原子の閉じ込められている共振器に対してしかできませんでした。今回、2つの共振器をつないでいる光ファイバーに光の入出力ポートを導入することに成功しました。これにより、光ファイバーのみに光を閉じ込めること、また、光ファイバーに閉じ込められている光を検出することが可能になりました。

さらに我々は、結合共振器 QED 系の5つの固有モード（図2）全ての観測と同定に成功しました。この成果は、多数の共振器 QED 系がコヒーレントに結合した大規模量子ネットワークの構築につながります。

Reference: D. White, S. Kato, N. Németh, S. Parkins, and T. Aoki, “Cavity dark mode of distant coupled atom-cavity systems”, Phys. Rev. Lett., 122, 253603 (2019).

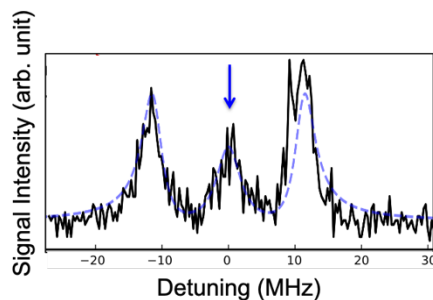


図1 結合共振器量子電気力学系における共振器暗モードの観測結果

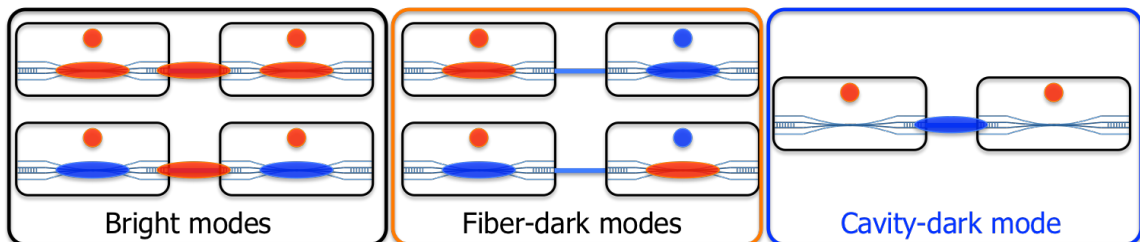


図2 結合共振器量子電気力学系の5つの固有モード

全光量子中継実験

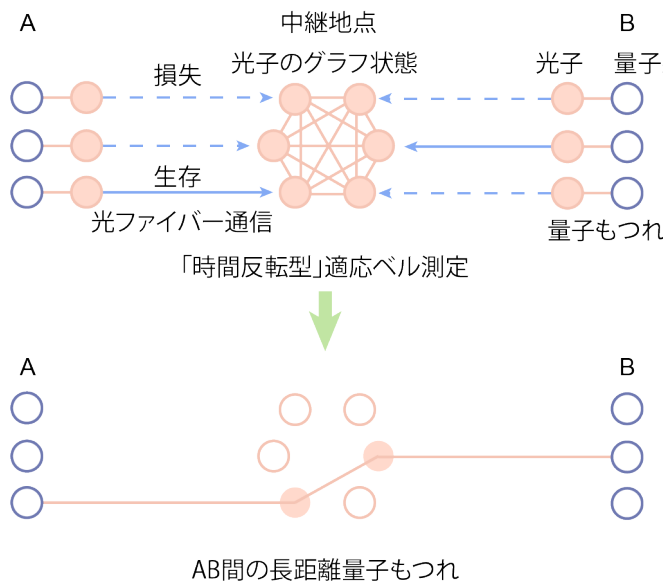
山本俊^{1,2}

¹大阪大学大学院基礎工学研究科、²大阪大学先導的学際研究機構

量子インターネットにおいて、ハイブリッド量子系を光で効率的につなぐことが可能になる量子中継手法において、長く主流となっている方法は、(1) 量子情報を保存する量子メモリを中継点に多数配置し、光子が「届いた」場合に、その量子情報を保存する、(2) これを複数の通信路で並列に行い、「届いた」場合の量子メモリを2つ選んでBell測定を行う（これをAdaptive Bell測定と呼ぶことにする）、というものである。この結果として、隣の中継点に量子情報が転送される量子テレポーテーションが実現し、損失が抑制される。最近になって、この量子メモリ方式とは異なり、光デバイスだけで量子中継を実現する新しい「全光」量子中継がNTTグループから理論提案された[1]。この「全光」量子中継は、これまでの(1)と(2)の操作の順番を量子もつれの性質を使い、逆転させた「時間反転 (Time Reversal)」により、Adaptive Bell測定と同等の効果をもたらすものであった。

我々は、NTTグループらと共に、この「全光」量子中継を、小規模な光デバイスから大規模なものへ徐々に拡張できるように整理し、その中核となるTime-Reversed Adaptive Bell (TRABell)測定（トラベル測定）を提唱し、このトラベル測定を実現するための新しい光学系を考案した。図のように中継点に複数あるサイトにグラフ状態と呼ばれる光子の量子もつれ状態を発生させる。各通信路を通った光子は各サイトにそれぞれ送られ、グラフ状態の光子と共に Type II Fusion Gateにより測定される。このとき、光子が「届いた」場合は、この測定によって光子の量子状態がグラフ状態の残りの光子にテレポートされるが、「届かない」場合は、残りの光子を「別の通信路のために使える」グラフ状態に保つ。これにより、光子が「届いた」任意の2つの通信路に対して、Bell測定を行うトラベル測定が可能になり、AからBへ「届いた」量子情報がテレポートされる。実験では、このトラベル測定の実現のために、3光子のグラフ状態を発生させ2つの通信路に光子を入力する最も簡単な実験系を作成し、実験を行った。実験結果から、どちらの通信路に対しても、光子が「届いた」場合にグラフ状態の残りの光子に量子情報がテレポートされることを確認することができ、世界で初めてトラベル測定が動作することを実証した。同時に、「全光」量子中継および量子中継の基本動作原理の世界初の実証実験となった。

Reference : Y. Hasegawa, et al., "Experimental time-reversed adaptive Bell measurement towards all-photonic quantum repeaters" Nature Communications, 10, 378, 2019.



[1] K. Azuma, et al., "All-photonic quantum repeaters" Nature Communications 6, 6787 (2015).

図1 中継地点で発生させた光子のグラフ状態を到着する光子とトラベル測定することで、AB間に量子もつれを生成。

三次元半導体カイラルフォトンニック結晶による円偏光発光寿命の制御

高橋駿^{1,2}、太田泰友¹、田尻武義³、館林潤¹、岩本敏^{1,3,4}、荒川泰彦^{1,3}
¹東京大学 ナノ量子情報エレクトロニクス研究機構、²京都工芸繊維大学、
³東京大学 生産技術研究所、⁴東京大学 先端科学技術研究センター

光の円偏光は、三次元ディスプレイや生物化学におけるカイラル分子のセンシングなどで実用化されているほか、固体中の電子や正孔とのスピン角運動量転写を利用することで、スピントロニクスや量子情報処理技術への応用も期待されています。このような円偏光の生成には、偏光子と波長板の組み合わせや外部磁場などが用いられていますが、系の小型化や集積化に向けて、直接的に円偏光を出射する半導体素子の開発が期待されます。円偏光に偏極した光の電場および磁場ベクトルは、伝播とともに波長周期の三次元的ならせん軌道を描くため、同様のらせん周期構造を用いることで、円偏光制御が期待できます。我々は、独自の手法で作製した三次元的なサブミクロン周期構造であるカイラルフォトンニック結晶によって、円偏光に接続する真空場を変調し、構造内部の半導体量子ドットの円偏光発光寿命を制御することで、直接的な円偏光発光を実現しました。

測定した構造は、500nm 周期の格子構造をもつ GaAs 薄膜を 60° 面内に回転させながら 16 層積層させた回転積層型 woodpile 構造 (図 1) です。50nm 以下のわずかな誤差での精密な積層には Micro-manipulation 法を用いました。この左巻きカイラルフォトンニック結晶において、左回り円偏光 (LCP) の状態密度が抑制され、発光寿命が延びる円偏光バンドギャップが形成されます。そこで、構造中央の 3 層に埋め込んだ InAs 量子ドットに対して、Ti:sapphire モードロックレーザおよび超伝導単一光子検出器による時間分解フォトルミネッセンス測定を行いました。円偏光バンドギャップ内の発光波長 1200nm に注目したところ、図 2 のとおり、ドットの発光強度の時間変化が左右円偏光成分によって異なり、LCP の発光寿命が右回り円偏光 (RCP) の寿命よりも 10% 程度長い結果が得られました。また、同様の測定を様々な発光波長で行ったところ、数値計算によって得られた円偏光バンドギャップの波長帯域と一致して、円偏光の発光寿命が変調されていることが判明しました。この発光寿命の制御によって、量子ドットの発光の内、最大で 75% を RCP に偏極させることに成功しました。

本研究成果は、小型で集積化可能な円偏光発光素子として応用できるだけでなく、半導体におけるスピン角運動量転写を通じて、スピンと円偏光フォトンの強力なハイブリッド化が可能です。このハイブリッド量子を用いることで、スピン/円偏光フォトンそれぞれの高感度なセンシングなど、フォトンクスとスピントロニクスの両分野への応用が期待できます。

Reference: S. Takahashi, Y. Ota, T. Tajiri, J. Tatebayashi, S. Iwamoto, and Y. Arakawa, "Circularly polarized vacuum field in three-dimensional chiral photonic crystals probed by quantum dot emission," *Physical Review B* **96**, 195404 (2017). DOI: 10.1103/PhysRevB.96.195404

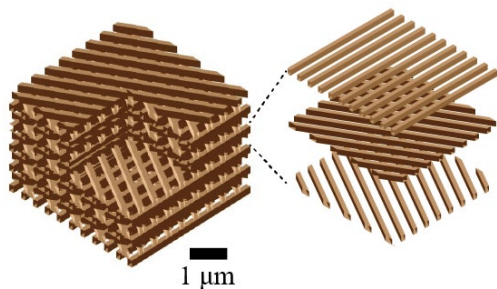


図1 作製した三次元半導体カイラルフォトンニック結晶の模式図。

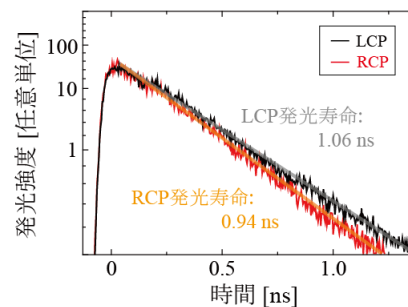


図2 量子ドットからのフォトルミネッセンス光 (波長 1200 nm) の左回り/右回り円偏光 (LCP/RCP) 成分の時間分解測定結果。

トポロジカルナノ共振器レーザの実現

太田泰友¹、荒川泰彦¹、岩本敏^{1,2,3}

¹東京大学ナノ量子情報エレクトロニクス研究機構、²東京大学先端科学技術研究センター、
³東京大学生産技術研究所

トポロジーは数学の一分野であり、そのよく知られた応用にドーナツとボールといった物の形のざっくりとした分類があります。同概念は、固体物性物理学の理解に新しい切り口をもたらし、その理論的研究に2016年のノーベル物理学賞が与えられたことは記憶に新しいかと思えます。現在、トポロジーは物理学の広い範囲において応用され、光分野もその例外ではありません。トポロジカルフォトンクスでは、誘電率の周期構造における光バンド構造を中心に、その波数空間でのトポロジーが調べられ、光の振る舞いを制御する新しい手法が次々に発見されています。初期の研究では、主に理論研究が先行し、cmスケールの周期構造を用いたマイクロ波領域における実験が行われていました。しかし近年、光周波数領域で動作するナノフォトンクス構造を用いたトポロジカルフォトンクスの研究も急速に進展しつつあります。その中で、同概念を活用した光導波路やリング共振器などが実現され、集積光回路技術など発展的な技術への応用が大いに期待されているところです。

今回我々は、トポロジカルフォトンク結晶ナノ共振器を設計し化合物半導体を用いて設計構造を作製することで、トポロジカルナノ共振器レーザを実現しました。図1に設計した構造の概略図を示します。二つのバンドトポロジーの異なる1次元フォトンク結晶を中心に接合した構造となっています。このような接合界面では、トポロジカル物理でよく知られているバルクエッジ対応原理から、決定論的にトポロジカルエッジモードが出現します。電磁界計算で得られたエッジモードの電磁界分布を同図に示します。エッジモードは接合面に強く局在するため、同モードをナノ共振器として活用することができます。エッジモード共振器は、1次元フォトンク結晶におけるトポロジカルなバンドギャップに保護されており、高い単一モード性を担保することが可能です。実験では、設計構造をインジウム砒素量子ドットを含むガリウム砒素スラブ中に形成しました。図2に光励起下で取得した作製構造の発光スペクトルを示します。励起強度を増加させることで、期待通り単一モードレーザ発振を得ることに成功しました。

本研究成果により、トポロジカルフォトンクスが微小光源の開発にも応用できることが分かりました。我々の研究グループでは、2次元フォトンク結晶中におけるトポロジカルコーナー状態を利用したナノ共振器の実現にも成功しています。これらの成果は、トポロジカルフォトンクスを活用した集積光回路技術の革新に繋がっていくと期待できます。

Reference: Y. Ota, R. Katsumi, K. Watanabe, S. Iwamoto, and Y. Arakawa, "Topological photonic crystal nanocavity laser", Commun. Phys. 1, 86 (2018). DOI: 10.1038/s42005-018-0083-7

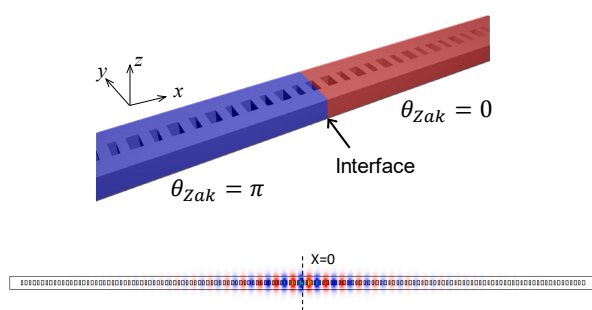


図1 設計したトポロジカルナノ共振器の概略図(上)とエッジモードの電磁界分布(下)。 θ_{Zak} はトポロジカル指数となるZak位相を表している。

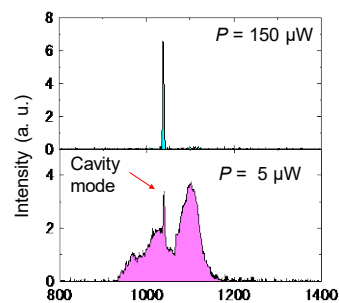


図2 作製したトポロジカルナノ共振器の発光スペクトラム

単一量子リングにおける光学アハラノフ・ボーム効果 - エキシトンのウィグナー分子形成を観測 -

奥山倫¹、江藤幹雄²

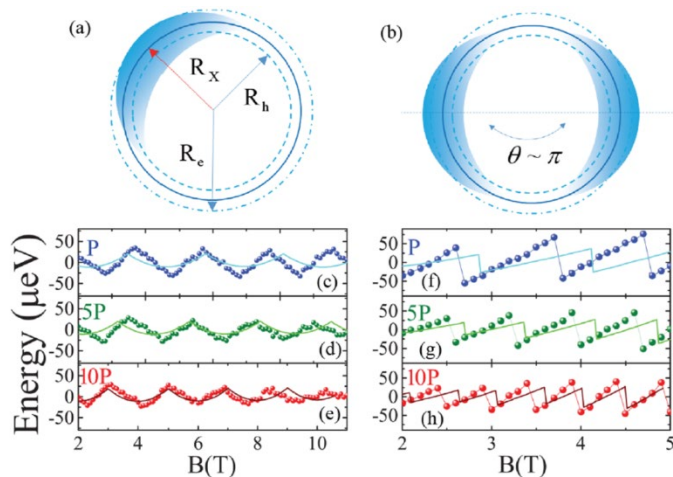
¹ 明治大学理工学部、² 慶應義塾大学理工学部

微小なリングの内部に磁束を挿入すると、アハラノフ・ボーム (A B) 効果によって電子の干渉パターンが変化します。通常、A B 効果は電気伝導測定による「2重スリットの干渉実験」で観測されます。一方、孤立したリングに光を当ててエキシトンを形成すると、A B 効果によって電子・ホール状態が磁束と共に変化し、その様子が発光スペクトルを通じて観測されます (光学 A B 効果)。我々は Pusan National University の K. Kyhm 教授のグループと共同で、単一量子リングにおける光学 A B 効果を実験、理論両面から詳細に調べました。以下の結果は、量子リング中の量子状態および多体効果が、光によって制御可能であることを示しています。

実験で用いたのは GaAs/AlGaAs の量子リングです。AlGaAs 基板上に GaAs を成長させるとき、その条件を工夫すると量子リングが形成されます。図 (a) は光照射によって電子・ホール対が励起され、その結果形成されたエキシトンの概念図です。電子とホールはクーロン相互作用によって強く結びついています。有効質量の違いを反映して電子とホールの軌道半径が異なるため、中性粒子にもかかわらず、エキシトンは A B 効果を示します。図 (c)-(e) は、励起光の強度を変えながら、エキシトンからの発光スペクトルを磁場の関数として示したものです。観測された A B 振動は、理論計算の結果 (実線) とよく一致しています。励起光の強度を増すと量子リングの外部にも電荷が励起され、それが作る有効電場がエキシトンの波動関数に影響を与えます。

図 (b) はバイエキシトンの概念図、図 (f)-(h) は発光スペクトルの磁場依存性です。この系でのバイエキシトンは、電子とホールが強く結合したエキシトンが 2 個形成され、それらがクーロン相互作用によって互いに離れる「ウィグナー分子」状態になることがわかりました。その結果、A B 振動の周期は、単一エキシトンの A B 振動の周期のほぼ 1/2 になります。もう一つの特徴は、A B 振動が不連続な構造を示すことです。これは、バイエキシトンの基底状態の角運動量が磁場と共に変化するためです。光放出による遷移先のエキシトンは、始状態のバイエキシトンと同じ角運動量を持ちます。そのため、バイエキシトンの角運動量の変化と共に終状態が変わり、放出する光子のエネルギーが不連続に変化します。理論計算 (実線) との良好一致は、エキシトンのウィグナー分子が形成されることを強く示唆します。

Reference: H. Kim, S. Park, R. Okuyama, K. Kyhm, M. Eto, R. A. Taylor, G. Nogues, L. S. Dang, M. Potemski, K. Je, J. Kim, J. Kyhm, and J. Song, "Light Controlled Optical Aharonov-Bohm Oscillations in a Single Quantum Ring," NANO Lett. **18**, 6188 (2018). DOI: 10.1021/acs.nanolett.8b02131



図(a)、(b) 単一量子リングにおけるエキシトン、およびバイエキシトンの概念図。
図(c)-(e) エキシトンからの発光スペクトルの磁場依存性。励起光の強度 P を 5 倍、10 倍と変化させた。実線は理論計算の結果を示す。
図(f)-(h) バイエキシトンからの発光スペクトルの磁場依存性。

微小光共振器における新奇な現象

– 異常な光群遅延や高 Q 機械振動子を実現 –

浅野元紀¹、山本俊^{2,3}

¹NTT 物性科学基礎研究所、²大阪大学大学院基礎工学研究科、³大阪大学先導的学際研究機構

ウィスパーリングギャラリーモード (WGM) 微小光共振器は、非常に強い光閉じ込め効果によって光と多様な物理系との相互作用を増強することができるため、新たな光量子インターフェースとして注目を集めています。我々は、導波路・共振器間結合の精密制御によるパラメータ特異点近傍での異常な光群遅延の観測や、ボトル型共振器構造におけるフォトン-フォノン間結合の自在制御を通じて、WGM 微小光共振器の新規機能性の創出に取り組みました。

WGM 微小光共振器系では、細線加工した導波路光ファイバと共振器との距離を変えることで、導波路・共振器間結合を自在に操ることが可能です。この特徴を活かして、結合の大きさに依存した光パルスの群遅延制御が注目されてきました。従来、光パルスの群遅延の大きさは共振器の時定数 (線幅の逆数) 程度であると考えられてきました。我々はこの結合の大きさとレーザー離調とからなる 2 次元パラメータ空間に着目し、そこに存在する特異点近傍で共振器を制御することで、時定数を上回る異常に大きな群遅延 (時間シフト) を実現しました (図 1) [1]。このような物理量の異常シフトは、量子弱測定の種類としてこれまで 2 次元、3 次元の古典光学系において確認されてきましたが、我々は、散逸を有する 1 次元光学系においても異常シフトが存在することを初めて明らかにし、微小共振器を用いた本実験を通じてその原理検証に成功しました。

WGM 共振器は、光だけでなく機械振動や音響波に対しても強い閉じ込め効果を有することが知られています。同一構造に光と機械振動が閉じ込められるため、光放射圧や光歪効果を介した光機械結合を生み出すことが可能です。我々は、近年提案されたボトル形状の WGM 微小光共振器に着目し、機械振動フォノン (~30 MHz) および音響波フォノン (~11 GHz) とフォトンとの結合をそれぞれ初めて観測しました [2, 3]。特に、 10^7 を超える非常に高い Q 値を示す光共鳴を用いることで、機械振動周波数に比べて光共振器の散逸が小さくなるサイドバンド分解領域を達成しました (図 2)。これにより、レーザー冷却によるフォノン基底状態の実現やフォトン-フォノン量子もつれ状態の生成などへ展開が期待できます。また、ボトル形状の最適化や共振器近接場を利用した光機械結合の実現 [5] など、新規機能性の創出に取り組みました。

Reference:

- [1] M. Asano et al., Nat. Commun. **7**, 1 (2016).
- [2] M. Asano et al., Laser & Photon. Rev. **10**, 603 (2016).
- [3] M. Asano et al. Opt. Express **24**, 12082 (2016).
- [4] M. Asano et al., Appl. Phys. Rev. **112**, 201103 (2018).

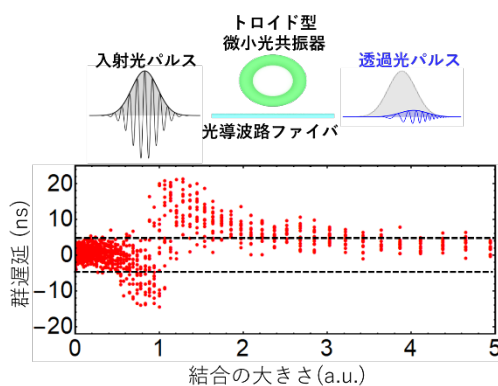


図 1 トロイド型微小光共振器による群遅延制御の概念図 (上) と実験結果 (下)。共振器の時定数は 4.6ns (黒点線)。

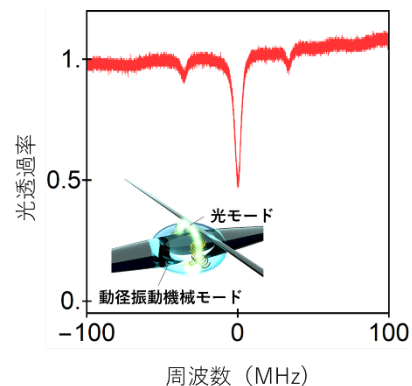


図 2 光透過測定によるサイドバンド分解の直接検証。挿入図はボトル型共振器における光機械結合の概念図。

$^{167}\text{Er}^{3+}$ における光コヒーレント過渡現象 -通信波長帯光での4f軌道電子コヒーレント操作を実現-

俵 毅彦
NTT 物性科学基礎研究所

固体材料における量子重ね合わせ状態の光コヒーレント操作は、量子情報ネットワークの実現に不可欠な要素技術の1つです。材料内の光学的アクセス可能な量子2準位系の位相緩和時間 T_2 は、この量子操作のパフォーマンスを決定するため、 T_2 の長寿命化は重要な課題の一つとなっています。位相緩和の主な原因は、量子2準位系周囲に存在するスピン磁気モーメントの揺らぎです。我々は通信波長帯光 ($1.53\mu\text{m}$) でアクセス可能な2準位系を持つ希土類元素エルビウム(Er)の4f軌道電子に着目しています。今回同位体純化された Er^{3+} を固体結晶に希薄添加することで、スピン磁気モーメントの揺らぎの抑制と T_2 の長寿命化、さらには Er 4f軌道電子の通信波長帯光によるコヒーレント操作を試みました。

我々は、まず同位体の中で唯一核スピンを持つ $^{167}\text{Er}^{3+}$ のみを 0.001% 添加した Y_2SiO_5 結晶 ($^{167}\text{Er}^{3+}:\text{YSO}$) を CZ 法で作製しました。この試料に対しスペクトルホールバーニング (SHB) 測定により $^{167}\text{Er}^{3+}$ 超微細構造準位における均一幅 Γ_h を調べ、 $\Gamma_h = 1/(\pi T_2)$ の関係より T_2 を見積もりました。この同位体純化の結果、 $^{167}\text{Er}^{3+}$ 以外の Er 同位体そのものが作り出す磁気ゆらぎが抑制され、 T_2 を4倍程度長寿命化させることに成功しました (図1)。さらにこの超微細構造が作る Λ 型3準位間におけるコヒーレント過渡現象、つまり Rabi 振動と光エコーの観測にも成功しました (図2)。Rabi 振動は photoluminescence (PL) 積分強度の励起光パルス幅依存性により測定され、振動周期から π および $\pi/2$ パルス面積条件が得られます。このパルス条件を用いて2パルス光エコーをゼロ磁場下で測定したところ、 $T_2 = 12\mu\text{s}$ での光の保存と再生が観測されました。これまで Er^{3+} での光コヒーレント操作は実現しておらず、今回 Er 同位体純化による超微細構造準位の T_2 の長寿命化の実現により、通信波長帯光による4f軌道電子のコヒーレント操作に初めて成功しました。

本研究成果は、通信波長帯光子による長距離量子情報通信に必須となる量子中継ノードの固体材料プラットフォームとして、 $^{167}\text{Er}^{3+}$ 添加結晶が有望であることを示すものです。現在 Er^{3+} だけでなく添加母体結晶の同位体純化および薄膜化、さらにはそれらのフォトニックナノ構造との融合を進めています。これらにより微小かつ高効率な固体量子中継光デバイスの実現に貢献すると期待されます。

References:

T. Tawara, G. Mariani, K. Shimizu, H. Omi, S. Adachi, and H. Gotoh, "Effect of isotopic purification on spectral-hole narrowing in $^{167}\text{Er}^{3+}$ hyperfine transitions", *Applied Physics Express*, **10**, 042801 (2017). DOI: 10.7567/APEX.10.042801

M. Hiraishi, M. IJspeert, T. Tawara, S. Adachi, R. Kaji, H. Omi, and H. Gotoh, "Optical coherent transients in $^{167}\text{Er}^{3+}$ at telecom-band wavelength", *Optics Letters*, **44**, 4933 (2019). DOI: 10.1364/OL.44.004933

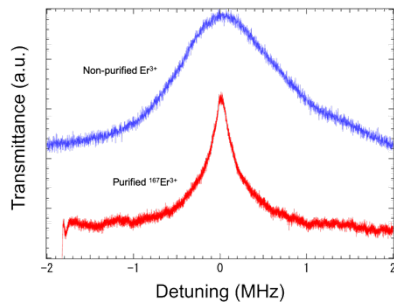


図1 同位体純化なし(青)とあり(赤)のSHBスペクトル

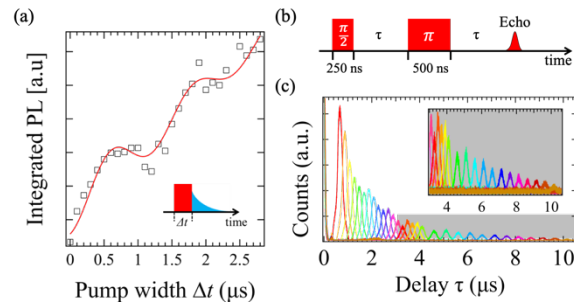


図2 (a)PL強度のRabi振動、(b,c)2パルス光エコーのパスシーケンスとエコーシグナル

超伝導量子ビット集団と超伝導共振器の協調的結合

角柳孝輔¹、松崎雄一郎¹、C. Deprez¹、樋田啓¹、
仙場浩一²、山口浩司¹、W. J. Munro¹、齊藤志郎¹
¹NTT 物性科学基礎研究所、²情報通信研究機構

原子集団が集まってできる物質は様々な物性を示しますが、原子間の相互作用を自在に制御することは困難です。超伝導量子ビットによる人工原子集団は量子ビット間の相互作用を自由に設計できるので、多体系の量子シミュレータや現実の物質にはない性質を持つ量子メタマテリアルを構成できる可能性があるとして注目されています。

特に超伝導マイクロ波共振器と2準位系集団の結合系は、量子情報処理実現のための有力な素子として考えられています。このようなハイブリッド素子を作製するために、これまで多くの研究では原子中の電子スピンの用いられてきました。しかし天然の原子を用いると設計の自由度が小さく、パラメータの調整が難しいことが課題でした。

近年になり、回路設計の自由度が高い人工原子である「超伝導量子ビット」の集団を作製しマイクロ波共振器に結合させるアプローチが着目を集めています。実際に8個の超伝導磁束量子ビットがマイクロ波共振器とコヒーレントに結合した例が報告されています[2]。

そこで私達は、4300個の超伝導磁束量子ビットをマイクロ波共振器の近傍に作製して実験を行った結果[3]、透過分光測定において250 MHz程度の大きな周波数シフトを観測しました(図1)。理論解析により、この周波数シフトは、数千個の超伝導磁束量子ビットとマイクロ波共振器のコヒーレントな結合に由来することが示されました。私達の素子では、単一の超伝導磁束量子ビットとマイクロ波共振器の結合定数は、不均一広がり線幅よりも2桁程度小さいですが、集団の超伝導磁束量子ビットが協調的に振る舞うことで、不均一広がり線幅と同程度になるまで結合定数が増強されています。

数千個という、これほど大きな数の超伝導量子ビットがマイクロ波共振器と結合した例は報告されておらず、量子情報処理実現のための重要な成果だと言えます。今後は集団量子ビットの特性の均一化を図るとともに集団量子ビットと共振器の間の結合を増加させることが課題です。

[1] Z. L. Xiang et al., Rev. Mod. Phys. **85**, 623 (2013).

[2] P. Macha et al., Nature Commun. **5**, 5146 (2014).

[3] K. Kakuyanagi et al., Phys. Rev. Lett. **117**, 210503 (2015).

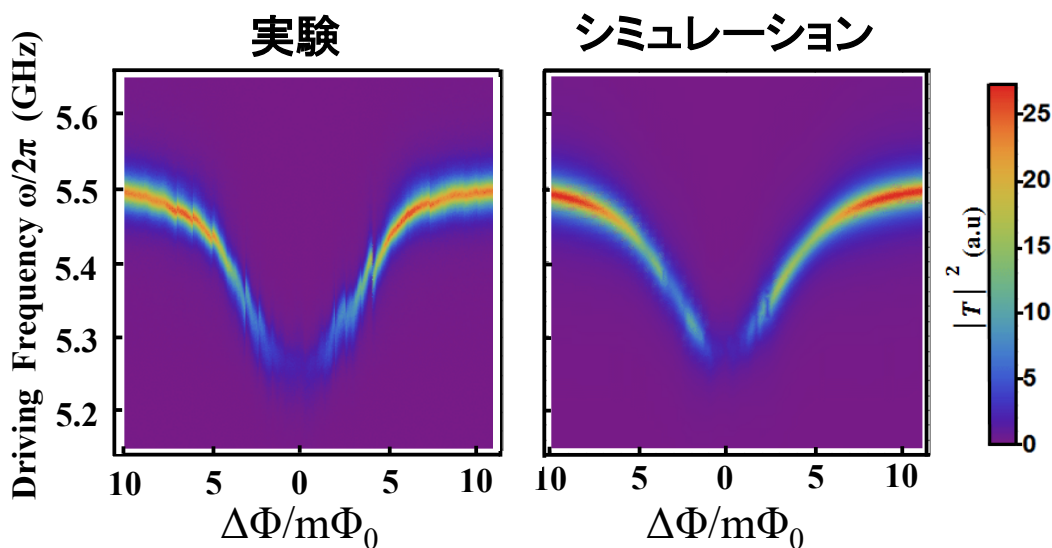


図1 超伝導磁束量子ビット集団が結合した共振器の透過分光測定。(左)実験結果。(右)数値計算結果。

超伝導磁束量子ビットを用いた 巨視的実在性問題の実験的検証

George C. Knee¹、角柳孝輔¹、Mao-Chuang Yeh²、松崎雄一郎¹、樋田啓¹、山口浩司¹、
齊藤志郎¹、Anthony J. Leggett²、William J. Munro¹
¹NTT 物性科学基礎研究所、²University of Illinois

私達の暮らす巨視的世界では、観測されたものは観測以前から状態が確定しているという「実在性」が成り立っているように見えます。一方で、量子力学に従う微視的な世界では量子重ね合わせ状態が現れ、この状態は観測によってはじめて状態が確定することから、微視的世界では「非実在性」が現れると考えられています。巨視的な系も量子力学に従う微視的な系から成り立っていますが、巨視的な系でも「非実在性」が現れるかどうかは量子力学の黎明期からの問題でした。

超伝導磁束量子ビットは複数のジョセフソン接合と超伝導ループから成る回路であり、その非線形性のために2準位系と見なせる系です。この2つの状態はそれぞれ1秒間に1億個という巨視的な数の電荷の流れである電流の右回りと左回りの状態に対応します。私達はこの超伝導磁束量子ビットを用いて電流状態での実在性の破れを示すことを試みました。

実在性が成り立つ際には Leggett-Garg 不等式と呼ばれる条件が満たされることが理論的に知られています。もし超伝導磁束量子ビットで実在性が成り立っているのであれば、量子重ね合わせ状態は実現せずに、観測前に状態が確定しているはずで、観測は状態を変化させません。一方で、量子重ね合わせ状態が実現しているならば、観測による固有状態への射影が起こり、状態は観測に依存します。量子重ね合わせが実現していた場合に観測の有無により終状態に違いが現れるような測定を行い、その差を調べました。この方法は Leggett-Garg 不等式と数学的に等価な条件を調べることに対応し、高精度な実験が可能な方法です。この方法で非実在性を示すには、観測が射影以外の外乱を生み出さないことを示す必要があるため、そのような外乱の大きさを定量的に評価する実験も行いました。

超伝導磁束量子ビットを観測前から確定している状態に準備し、観測の外乱による差を評価した結果が図1の d_g と d_e となり、ほぼ差がない(≈ 0)ことが分かります。一方、重ね合わせと考えられる状態を用意したのち、観測の有無による状態の差 d_p を調べると、 d_g や d_e よりも優位な差が生じていることが判明しました。これは巨視的な電流状態でも量子重ね合わせ(図2)が現れ、観測により電流の向きが確定することを意味しています。

Reference: G. C. Knee, K. Kakuyanagi, M-C. Yeh, Y. Matsuzaki, H. Toida, H. Yamaguchi, S. Saito, A. J. Leggett, and W. J. Munro, *Nature Commun.* **7**, 13253 (2016).

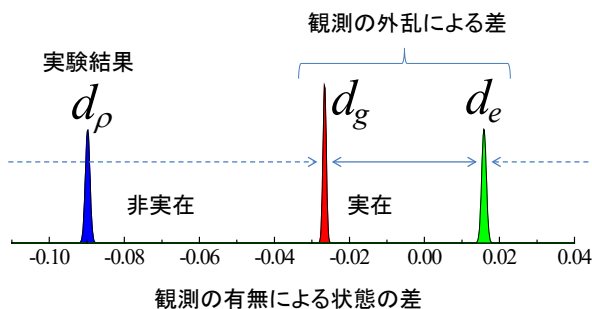


図1 超伝導磁束量子ビットでの観測の有無による状態の差の実験結果。

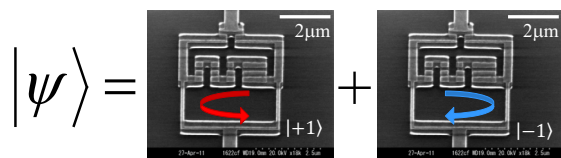


図2 超伝導磁束量子ビットにおける電流状態の量子重ね合わせ。

超伝導量子ビットを用いた高感度電子スピン共鳴分光

– マイクロメートル領域での電子スピンの高感度検出 –

樋田啓¹、松崎雄一郎¹、角柳孝輔¹、Xiaobo Zhu¹、William J. Munro¹、山口浩司¹、齊藤志郎¹

¹NTT 物性科学基礎研究所

超伝導量子ビットは制御性・拡張性の良さから、量子計算機の実現に向けて精力的に研究が進められています。その技術は円熟期に入り、小規模なシステムも構築されてはじめています。我々は、この技術の新しい応用先として量子センシングを目指して研究を進めています。具体的には、超伝導磁束量子ビットと呼ばれる磁場に対して感度の高い素子を用いて、高感度かつ高空間分解能な電子スピン共鳴分光 (ESR) を実現しました。

ESR は、物質中の不対電子の情報を得ることができ、材料物性、創薬、医療分野において不可欠な分析手法です。通常の ESR では、体積が数 mL 程度の試料を数 cm 角の共振器中に設置し、共振器の共鳴特性の変化を測定します。共振器と電子スピンの結合が弱いため、測定には 10^{13} 個程度の電子スピンを含む試料が必要です。この手法では、ESR 測定用のマイクロ波の周波数は共振器の共鳴周波数近傍に限られます。そのため測定中は、磁場のみを掃引することになります。一方、超伝導磁束量子ビットを用いた局所 ESR 測定では、共振器を利用せず、試料の磁化を直接測定するため、周波数と磁場の 2 軸掃引が可能で、より広範囲な測定が可能となります。さらに、空間分解能が素子のサイズで決まるため、より高い空間分解能、すなわち微小な検出体積を実現することができます。今回の実験では、検出感度 $400 \text{ spin}/\sqrt{\text{Hz}}$ 、検出体積 0.05 pL を達成しました。

図 1 に局所 ESR 装置の概念図を示します。磁束量子ビットの量子状態は、超伝導量子干渉計の臨界電流を通して観測し、電子スピンの磁化を測定します。ESR スペクトルを観測するために、電子スピンに印加するマイクロ波の周波数および印加磁場を掃引することで、より広範囲なスペクトルが得られます。図 2 に、ダイヤモンド中の窒素-空孔 (NV) 中心に起因する電子スピンの ESR 測定結果を示します。周波数と磁場の 2 軸掃引によって得られたピーク位置をフィッティングすることで、 g 因子やゼロ磁場分裂を求め、先行研究と良く一致していることを確認しました。

固体中の電子スピンの中には、低磁場・低周波数領域において複雑なエネルギー準位を示す例も多く、磁束量子ビットを用いた局所 ESR 測定はこのような物性評価に有用であることが実証されました。さらに素子のアレイ化により、高空間分解能を活かした ESR のイメージングも期待できます。将来は、物性評価だけではなく、生体試料の測定や病理診断への応用を考えています。

Reference: Hiraku Toida, Yuichiro Matsuzaki, Kosuke Kakuyanagi, Xiaobo Zhu, William J. Munro, Hiroshi Yamaguchi, and Shiro Saito, “Electron paramagnetic resonance spectroscopy using a single artificial atom”, Communications Physics, 2, 33. (2019). DOI: 10.1038/s42005-019-0133-9

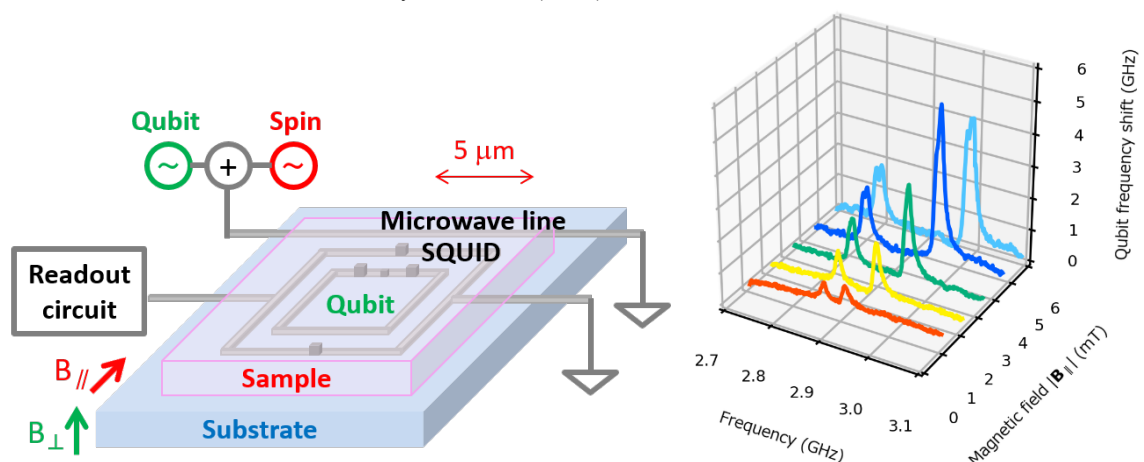


図 1 磁束量子ビットを用いた ESR 分光装置

図 2 ダイヤモンド NV 中心の ESR スペクトル

トポロジカル絶縁体を持つ SNS 型ジョセフソン接合

Russell S. Deacon^{1,2}、石橋幸治^{1,2}
理化学研究所・開拓研究本部¹、創発物性科学研究センター²

トポロジカル絶縁体と超伝導体をハイブリッドした系には、マヨラナ粒子が現れることが理論的に予測されている。マヨラナ粒子はトポロジカルな量子ビットとして利用することが提案されており、コヒーレンスの点で極めて優れていると考えられるため、トポロジカル量子コンピュータの観点から注目されている。しかし、その存在に関しては、いまだ確固たる実証が得られていないとも言えない。マヨラナ粒子（ゼロモード）によると考えられる現象として、トポロジカル絶縁体でジョセフソン接合を形成した際に、通常ジョセフソン接合の 2π を周期とする電流位相関係ではなく、 4π を周期とする電流位相関係となることが理論的に指摘されている。この特異な電流位相関係を明らかにするために、交流ジョセフソン効果に係るマイクロ波照射下における電流電圧特性の測定、および電圧バイアス下でのマイクロ波放射の測定を行った。電流位相関係が 4π であることから、前者ではシャピロステップにおいて奇数次のステップが消失することが予想される。後者では、通常ジョセフソン周波数の半分の周波数のマイクロ波が放射されることが予想される。

トポロジカル絶縁体として2次元および3次元の HgTe 量子井戸を用い、アルミニウムによる SNS 型ジョセフソン接合を作製した (図1)。ゲート電圧を調節することにより、フェルミレベルをバルク絶縁体ギャップの中にセットすることができる。2次元の試料の場合、試料の周囲に沿ってヘリカルエッジ状態が形成され、それを介して超伝導電流が流れると考えられる。このことは、磁場を印可した時に超伝導電流が SQUID 的なふるまいを示すことから、実験的にも示唆されている。図2にはシャピロステップを示すが、周波数が低い場合には奇数次のステップの消失が認められる。また図3は n 領域に近いところでのマイクロ波の放出を示すが、通常ジョセフソン周波数 ($f_J/2$) のマイクロ波放射が観測されている。これらの結果は 4π 周期の電流位相関係を示唆している。

本研究は、Wurzburg 大学の L. Molenkamp 教授グループとの共同研究として行われた。

Reference:

1. J. Wiedenmann, E. Bocquillon, R.S. Deacon, S. Hartinger, O. Herrmann, T.M. Klapwijk, L. Maier, C. Ames, C. Brüne, C. Gould, A. Oiwa, K. Ishibashi, S. Tarucha, H. Buhmann & L.W. Molenkamp, Nature Communications. **7**, 10303 (2016)
2. Erwann Bocquillon, Russell Deacon, Jonas Wiedenmann, Philipp Leubner, Teun M. Klapwijk, Christoph Brüne, Koji Ishibashi, H. Buhmann, Laurens W. Molenkamp, Nature Nanotechnology, **12**, 137 (2017)
3. Russell Deacon, Jonas Wiedenmann, Erwann Bocquillon, Teun M. Klapwijk, Philipp Leubner, Christoph Brüne, Seigo Tarucha, Koji Ishibashi, Hartmut Buhmann, Laurens W. Molenkamp, Phys. Rev. X **7**, 021011 (2017)

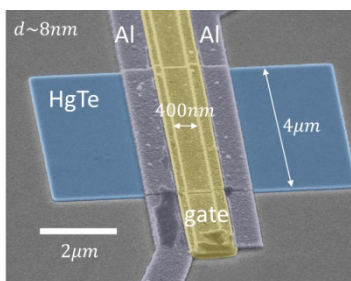


図1: HgTe と Al から作製したジョセフソン接合 [1]

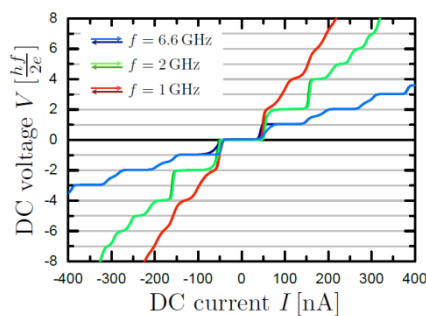


図2: マイクロ波照射下における電流電圧特性 (シャピロステップ) [2]

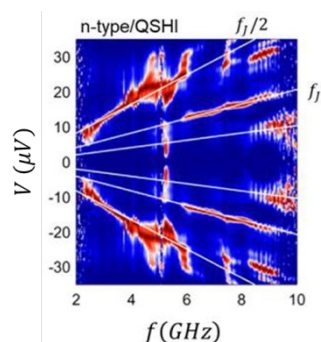


図3: 放射されたマイクロ波の接合の電圧と周波数の関係 [3]

トポロジーの変化に伴う巨大磁気抵抗効果を発見

–非散逸電流のスイッチング原理を確立–

茂木将孝¹、川村稔²、吉見龍太郎²、塚崎敦³、高橋圭²、川崎雅司^{1,2}、十倉好紀^{1,2,4}

¹東大工、²理研 CEMS、³東北大学 IMR、⁴東大東京カレッジ

物質中の電子状態をトポロジーによって特徴づけられるトポロジカル物質において、エネルギー損失を伴わない「トポロジカル電流」が流れることが分かってきました。こうしたトポロジカル電流は、室温で利用できる可能性もあり、世界中で活発に研究されています。トポロジカル電流を引き起こす代表例として「量子異常ホール効果」があります。量子異常ホール効果は、磁性元素を添加した「トポロジカル絶縁体」において2013年に初めて報告されました。この状態では、トポロジカル電流の一種である「端電流」を磁性体薄膜試料の端や磁壁に沿って流すことができます。端電流を小さな外部刺激によって自由に制御できれば、トポロジカル電流の応用の幅を大きく広げることにつながります。我々は、高品質な薄膜を成長させる方法の一つである分子線エピタキシー法を用いて、磁性元素V（バナジウム）やCr（クロム）を添加したトポロジカル絶縁体「 $(\text{Bi}_{1-y}\text{Sb}_y)_2\text{Te}_3$ （Bi：ビスマス、Sb：アンチモン、Te：テルル）」の積層構造薄膜を開発しました。薄膜の上部と下部に選択的に磁性元素であるVやCrをそれぞれ添加することで、磁性/非磁性/磁性の三層構造を形成しています（図1A）。この積層薄膜の電気抵抗を測定したところ、薄膜試料に対して垂直方向に強い外部磁場（ $\sim 2\text{T}$ ）を加えて、V添加層とCr添加層の磁化方向を揃えたところ、量子異常ホール効果が観測されました（図1B）。外部磁場の方向を反転させてだんだん強くしていくと、ある大きさの磁場（ $\sim 0.2\text{T}$ ）で保磁力の小さいCr添加層の磁化が反転し、Cr層とV層の磁化方向が反対向き（反平行）になります。この磁場領域において、電流端子間の2端子抵抗を測定すると、量子異常ホール状態の約20k オーム（ Ω ）より10万倍大きい、2 ギガ（G） Ω を超える抵抗値が観測されました（図1C）。これを磁気抵抗比に換算すると、10,000,000%を超える非常に大きな値となります。

この結果は、外部磁場による磁化方向制御を行うことで、量子異常ホール効果のトポロジー変化を引き起こし、端電流を流したり遮断したりできたことを示しています。すなわち、非散逸電流のスイッチング原理の確立を意味しています。さらに、この高抵抗状態は「アクシオン絶縁体」と呼ばれ、量子化された電気磁気効果の発現が理論的に予測されています。Cr、V三層構造を開発したことで、これまでに報告に比べて、より安定なアクシオン絶縁体が実現しました。

Reference: M. Mogi, M. Kawamura, A. Tsukazaki, R. Yoshimi, K. S. Takahashi, M. Kawasaki and Y. Tokura, "Tailoring tricolor structure of magnetic topological insulator for robust axion insulator", *Science Advances* **3**, eaao1669 (2017). DOI: 10.1126/sciadv.aao1669.

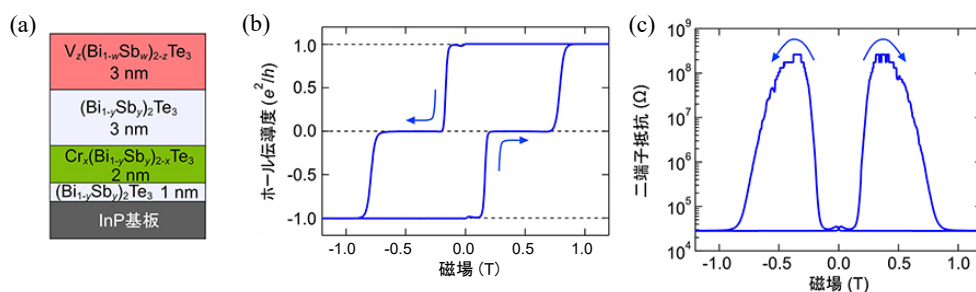


図1:(a) 作製したトポロジカル絶縁体薄膜の積層構造。(b) ホール伝導度の磁場依存性。ホール伝導度が e^2/h に量子化する量子異常ホール効果が観測される。(c) 二端子抵抗の磁場依存性。抵抗値が 20 k Ω から 2 G Ω へと大きく変化していることが分かる。

トポロジカル絶縁体の表面金属状態の絶縁化

－特殊な電気磁気効果観測のための物質基盤を確立－

茂木将孝¹、川村稔²、吉見龍太郎²、塚崎敦³、高橋圭²、川崎雅司^{1,2}、十倉好紀^{1,2,4}

¹東大工、²理研 CEMS、³東北大学 IMR、⁴東大東京カレッジ

トポロジカル絶縁体は、電子状態のトポロジーを反映して、内部は絶縁体である一方、表面には金属状態が現れる物質です。トポロジカル絶縁体に磁性不純物を添加して磁化を持たせると、表面の電子と磁化の相互作用によって、試料の端にだけ電流が流れる量子異常ホール効果が生じることが知られています [図 1(a)]。これに加えて磁性トポロジカル絶縁体では、電場を印加すると磁化が生じ、逆に磁場を印加すると電気分極が生じる電気磁気効果が起こることが理論的に予測されています [図 1(b)]。この電気磁気効果は、将来の省電力メモリー素子や再構成可能な論理回路への応用が期待されています。電気磁気効果は特殊な磁性体でも観測される効果ですが、トポロジカル絶縁体の電気磁気効果は巨大であり、その大きさが物質に依らず基礎物理定数だけで決まる値になるという特徴があります。電気磁気効果を測定するためには、磁性トポロジカル絶縁体の表面を絶縁化する必要があります。理論的には、磁化をすべての表面から外向きに揃えると、表面の金属的な状態が消えて完全な絶縁体になると予測されています。しかし、これまでの磁性トポロジカル絶縁体では、磁化方向を自在に制御するのは困難でした。

そこで我々は、磁性トポロジカル絶縁体の積層構造を作製することにより、磁化方向を制御することを目指しました。分子線エピタキシー装置も用いて、独自に開発した磁気変調ドーピング法により、トポロジカル絶縁体 $(\text{Bi}_{1-y}\text{Sb}_y)_2\text{Te}_3$ と、磁性元素 Cr を添加した磁性トポロジカル絶縁体 $\text{Cr}_x(\text{Bi}_{1-y}\text{Sb}_y)_{2-x}\text{Te}_3$ を交互に重ねた磁性/非磁性/磁性の 3 層構造薄膜を作製しました。2 つの磁性層に保磁力差をつけるで、それぞれの層の磁化方向を独立に制御すること可能にしました。

作製した薄膜試料に外部磁場を印加して磁化方向を揃えたところ、量子異常ホール効果が観測されました。次に磁化と反対方向に外部磁場を印加し、磁場を強くしていくと、ある大きさの磁場で保磁力の小さい層の磁化が反転し、2 つの磁性層の磁化が反平行になります。電気抵抗を測定しながら磁化方向を反転させると、反転と同時に薄膜試料に電流が流れなくなることを観測しました。これは磁化の方向を制御することによって、トポロジカル絶縁体の表面を絶縁化し、量子異常ホール効果から特殊な電気磁気効果の観測が期待される絶縁体状態へ変換できたことを示しています。この結果は、磁性トポロジカル絶縁体の磁化方向制御によって、特殊な電気磁気効果観測のための物質基盤を確立したことになります。

Reference: M. Mogi, M. Kawamura, R. Yoshimi, A. Tsukazaki, Y. Kozuka, N. Shirakawa, K.S. Takahashi, M. Kawasaki, and Y. Tokura, "A magnetic heterostructure of topological insulators as a candidate for an axion insulator", Nature Materials **6**, 516 (2017). DOI: 10.1038/nmat4855

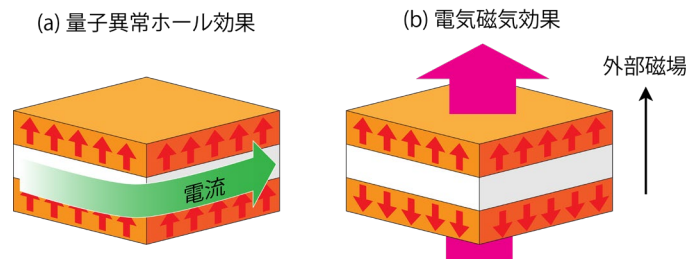


図1:トポロジカル絶縁体積層膜における量子異常ホール効果と電気磁気効果の概念図。(a)磁化(赤矢印)が1方向に揃っている場合には、試料の端にだけ電流が流れる(緑の大きな矢印)量子異常ホール効果が現れる。(b)磁化が反平行の場合には、試料の端にも電流が流れなくなり、完全な絶縁体を実現する。この絶縁体状態では、特殊な電気磁気効果が期待され、外部磁場を印加すると同じ向きに電気分極が生じる(ピンクの大きな矢印)。

電流印加による量子異常ホール効果の崩壊

川村稔¹、吉見龍太郎¹、塚崎敦²、高橋圭¹、川崎雅司^{1,3}、十倉好紀^{1,3,4}

¹理研 CEMS、²東北大 IMR、³東大物工、⁴東大東京カレッジ

トポロジカル絶縁体は、絶縁性のバルク状態と金属的なディラック表面状態を持つ物質です。トポロジカル絶縁体に磁性元素を導入して強磁性状態にした磁性トポロジカル絶縁体では、ホール抵抗値がフォンクリッチング定数 h/e^2 に量子化する量子異常ホール効果が現れます。量子異常ホール効果を観測するためには、試料を温度 100 mK 以下の低温まで冷却する必要があります。磁性トポロジカル絶縁体試料に流す電流を増大させていった場合、ある閾値電流を越えたところで量子異常ホール効果が崩壊し、ホール抵抗値が量子化値からずれ始めることが期待できます。量子異常ホール効果崩壊を引き起こす閾値電流は、量子異常ホール効果の安定性を示す重要な指標の一つです。そこで本研究では、量子異常ホール効果の崩壊の閾値電流を調べる実験を行いました。

分子線エピタキシー法を用いて磁性トポロジカル絶縁体 $\text{Cr}_x(\text{Bi}_{1-y}\text{Sb}_y)_{2-x}\text{Te}_3$ 薄膜試料を作製、希釈冷凍機を用いて試料を温度 30 mK まで冷却することにより、量子異常ホール効果を観測しました。試料に流す電流を大きくすると、ある閾値電流を越えたところで、ホール抵抗が量子化抵抗値よりも小さくなる量子異常ホール効果の崩壊現象を観測しました。サイズの異なる試料を複数個の試料を用いて量子異常ホール効果崩壊を測定したところ、量子異常ホール効果が崩壊する電流値が、試料の幅に比例して増大することを見出しました。このことは、電流印加によって試料内に発生したホール電場が量子異常ホール効果崩壊を引き起こしていることを示唆しています。さらに、量子異常ホール状態における抵抗の温度依存性から、低温にける電気伝導は不純物による局在状態を介したホッピング機構が支配的であることが分かりました。このことは、不純物濃度が量子異常ホール効果崩壊の閾値電流に影響を与えていること示しています。本研究結果から、より安定した量子異常ホール効果を観測するためには、試料中に含まれる不純物を少なくしていく必要があることが分かりました。

Reference: M. Kawamura, R. Yoshimi A. Tsukazaki, K. S. Takahashi, M. Kawasaki, and Y. Tokura “Current-driven instability of quantum anomalous Hall effect in ferromagnetic topological insulator thin films”, *Physical Review Letters* **119**, 016803 (2017). DOI: 10.1103/PhysRevLett.119.016803

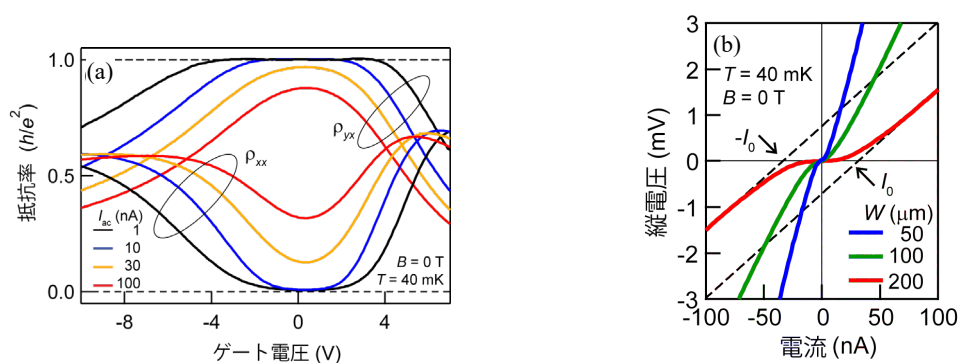


図1:(a) 縦抵抗率とホール抵抗率のゲート電圧依存性。測定電流を 30 nA よりも大きくするとホール抵抗が量子化値からずれはじめる。(b) 幅の異なる3つの試料での電流-電圧特性。試料幅が広がると、量子異常ホール効果崩壊の閾値電流が大きくなる。

InSb 量子ホール系における抵抗検出 NMR

–量子ホール系における核スピン偏極の相反性–

平山祥郎

理学研究科、CSIS、CSRN 東北大学

InSb 二次元系は極めて大きな g 因子を有しており、傾斜磁場下で、基底ランダウ (LL) 準位の下向きスピンと第一 LL の上向きスピンが交差し、交差点で $\nu=2$ の量子ホール強磁性状態 (QHF) が形成される。この InSbQHF においては、電流誘起による動的な核スピン偏極と抵抗検出 (RD) NMR が実現されている [1]。この QHF は整数量子ホール効果 $\nu=2$ で出現するもので、最もシンプルな QHF であり、QHF における動的核スピン偏極の基本的な特性を理解するのに絶好なシステムである。

実験では InSb 二次元系からスタートして、コルビノディスク型とホールバー型の構造を作製した。良く知られているように、ホールバー構造には一方向に走るカイラルエッジチャンネルが存在するが、コルビノディスクにはエッジチャンネルが存在しない。傾斜磁場下で実現した $\nu=2$ QHF において、どちらの構造においても RDNMR が観測されたが、コルビノディスクにおいては、RDNMR 信号は電流の方向に対して対称で、2K で消失した。一方で、ホールバー構造においては、RDNMR 信号は電流の向きによって非対称に変化し、6K まで確認された。この実験結果は電流による動的核スピン偏極においてカイラルエッジチャンネルが重要な役割を果たしていることを示している [2]。ホールバー構造において、バルク (エッジ) が支配する核スピン偏極が消失する (維持される) 温度である 3K に設定して実験を行ったところ、QHF のカイラルエッジチャンネルの特性を反映した RDNMR 信号の明瞭な相反性を確認した。具体的には、電流あるいは磁場の方向を反転すると RDNMR 信号は変わるが、両方を反転するともとの特性に戻る状況を確認した [2]。

上述した RDNMR と InSb 二次元系のゲート制御を組み合わせると、InSb 量子ホール系での核スピン緩和のポンプ・プローブ測定も可能になる。得られた結果は、 $\nu=1$ の量子ホール状態ではコリング型の温度依存性を有する長い核スピン緩和時間 (T_1) が測定されるのに対して、 $\nu=2$ QHF では温度依存性の小さい短い T_1 が得られることを示している。これは、QHF のドメインウォールにおいて低エネルギーな集団的スピン励起が存在することと関連していると考えられる。

Reference: [1] H. W. Liu, K. F. Yang, T. D. Mishima, M. B. Santos, and Y. Hirayama, Phys. Rev. B 82(RC), 241304, doi.org/10.1103/PhysRevB.82.241304 (2010) [Editor's suggestion] [2] K. Yang, K. Nagase, Y. Hirayama, T. D. Mishima, M. B. Santos, and H. Liu, Nature Comm. 8: 15084, doi: 10.1038/ncomms15084 (2017). [3] K. F. Yang, M. M. Uddin, K. Nagase, T. D. Mishima, M. B. Santos, Y. Hirayama, Z. N. Yang and H. W. Liu, New Journal of Physics 21, 083004 doi.org/10.1088/1367-2630/ab34ce (2019).

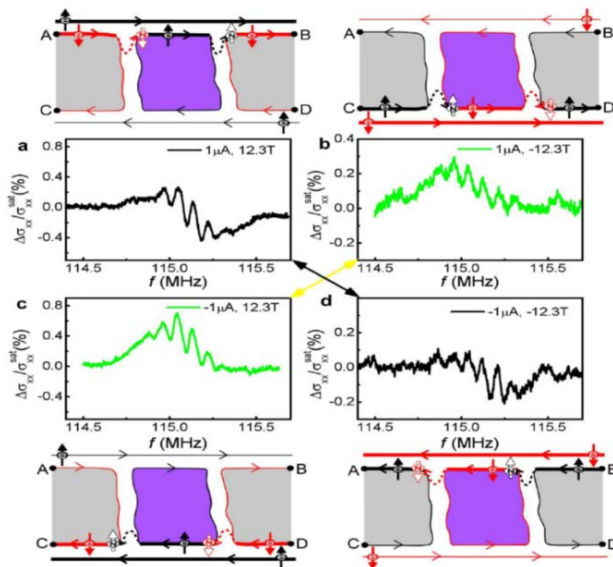


図1 $\nu=2$ QHF を有するホールバー構造で測定された RDNMR 信号の相反性

非対称二重障壁半導体ヘテロ構造を用いた電子蒸発冷却

Marc Bescond^{1,2}, Aymen Yangui^{1,2}, 長井奈緒美¹, 平川一彦^{1,2}

¹東京大学生産技術研究所、²LIMMS-CNRS

トランジスタや半導体レーザなど、ほとんどのデバイスは、電圧を印加し電流を流すことで機能します。現代のエレクトロニクスの進歩を阻んでいるのが、このデバイスの発熱による問題であり、高効率冷却技術の開発は将来のエレクトロニクス発展の鍵を握る重要な技術と言っても過言ではありません。

我々は、より高い冷却効率を実現することを目指して、半導体ヘテロ構造を適切に設計し、共鳴トンネル効果と熱電子放出を制御して実現できる熱電子放出冷却 (thermionic cooling) 技術に注目して研究を行いました。この素子構造では、薄くてエネルギー障壁が高い障壁層 (エミッタ障壁) を介して、電子が共鳴トンネル効果により量子井戸層に注入されます。注入された電子は、量子井戸層内で熱的な分布を取りますが、量子井戸層を出るときには、低くて厚い障壁 (コレクタ障壁) の高さ以上のエネルギーを持つ高エネルギーの熱電子のみが超えていくという過程で電子が伝導し、電流を流すにつれて量子井戸層内の電子系からエネルギーが奪われていき、電子系の温度が下がります (蒸発冷却; evaporative cooling)。これは水が蒸発するとき熱が奪われる現象と似ています。このとき、電子系と熱的に接している量子井戸内の結晶格子系とが相互作用し、格子系も冷却されていく (熱電子放出冷却; thermionic cooling) というのが本素子の動作原理です。

この素子構造では、数 nm (ナノメートル) 程度の半導体超薄膜内に冷却効果が発生するため、極薄膜中の温度を精密に測定する技術の開発が必要です。我々は、量子井戸内の電子系の温度を評価する方法として、フォトルミネセンス分光法に注目し、フォトルミネセンスピークのスペクトル形状から電子系の温度 (電子温度) を評価する実験を行い、量子井戸中の電子温度が 300 K から 250 K まで、約 50 K も低下することがわかりました。

本素子はトランジスタや半導体レーザなどのデバイス活性層を局部的に高効率に冷却する新しい素子技術として、省エネルギーに大きく貢献することが期待されます。

Reference: Aymen Yangui, Marc Bescond, Tifei Yan, Naomi Nagai, and Kazuhiko Hirakawa: “Evaporative electron cooling in asymmetric double barrier semiconductor heterostructures”, Nature Communications, 10, 4504 (2019), DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-019-12488-9>

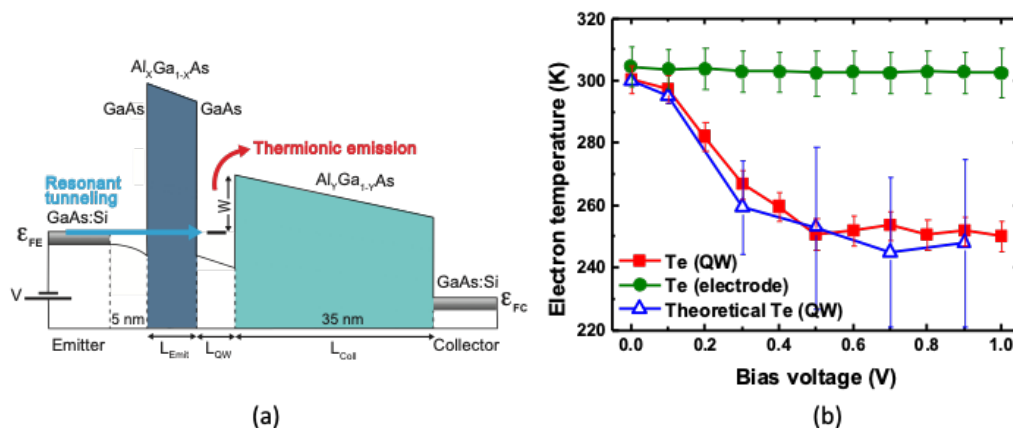


図1 (a)GaAs/AlGaAs 系ヘテロ接合非対称二重障壁熱電子放出構造、(b)フォトルミネセンスで評価した電子温度; 緑: GaAs 電極中の電子、赤: 量子井戸中の電子、青: 量子井戸中の電子 (理論)

シリコントランジスタで1ビット量子シミュレーション - 磁気共鳴で古くから知られる現象を単一スピンの再現 -

大野圭司¹、S. N. Shevchenko²、森貴洋³、森山悟士⁴、F. Nori¹
¹理研、²B. Verkin Institute、³産総研、⁴物材機構

Motional narrowing (averaging) とは磁気共鳴分野で古くから知られている現象で、不均一な磁気的環境に置かれた粒子が素早く動き回ることにより実効的な環境が均一化され、結果共鳴線幅が狭くなるというものです。通常磁気共鳴には数多くのスピンのかかわっており、不均一な環境も自在に制御できるものではありませんでした。

我々はスピン量子ビットを用いることでこの現象を単一のスピンのみで、そしてより制御された磁気的環境で実験的にシミュレートすることに成功しました。量子ビットはシリコントンネル電界効果トランジスタをベースとしており、このトランジスタに導入された深い不純物が電子スピン量子ビットとなります。スピン状態の時間アンサンブル平均をトランジスタのソース・ドレイン電流 I_{SD} として読み出します。素子は温度 1.6 K に冷却され、静磁場 およびマイクロ波帯域周波数 f の交流磁場を印可することで磁気共鳴を起こしました。この条件を満たしつつ、素子のゲート電圧 V_G を変化させるとシュタルク効果によりスピンの g 因子が変化し、ゼーマンエネルギーの変化を通じて共鳴周波数が変化します。ゲート電圧による高速な共鳴周波数変調により後述する実験が可能になりました。

ゲート電圧に方形波変調 (図 1(a)) を印可した場合の結果を図 1(b-d) に示します。変調周波数がコヒーレンス時間の逆数 (4 MHz) よりもずっと小さい場合、変調の各ステージ (方形波の高・低) での共鳴周波数を反映し、2つのピークが現れます (図 1(d))。これは I_{SD} 測定の時定数が 1 秒程度と遅いためです。この方形波の変調周波数を増やしてゆくと、この自明な2つのピークは複雑な干渉パターン (図 1(c)) を経て、高い変調周波数 ($\gg 4$ MHz) においては単一のピーク (図 1(b)) を示しました。これは、コヒーレンス時間よりも早く変調されたスピンの平均値を感じることを示しており、Motional averaging として理解することができます。さらに方形波の形状を非対称 (図 1(e)) にした場合に同様に得られた結果 (図 1(f-h)) では、電子スピンの g 因子変調の重み付き平均値の外場を感じていることがわかりました。この結果は量子ビットを用いた重み付き平均値のアナログ計算とみなすこともできます。

本研究成果は 1 量子ビットのシミュレーションであっても有用な知見が得られることを示しており、比較的技術的難度の低い量子ビット応用の一つの方向を示したといえます。

Reference: K. Ono, S. N. Shevchenko, T. Mori, S. Moriyama, F. Nori, Quantum interferometry with a g-factor-tunable spin qubit, Phys. Rev. Lett. 122, 207703 (2019). DOI : <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.122.207703>

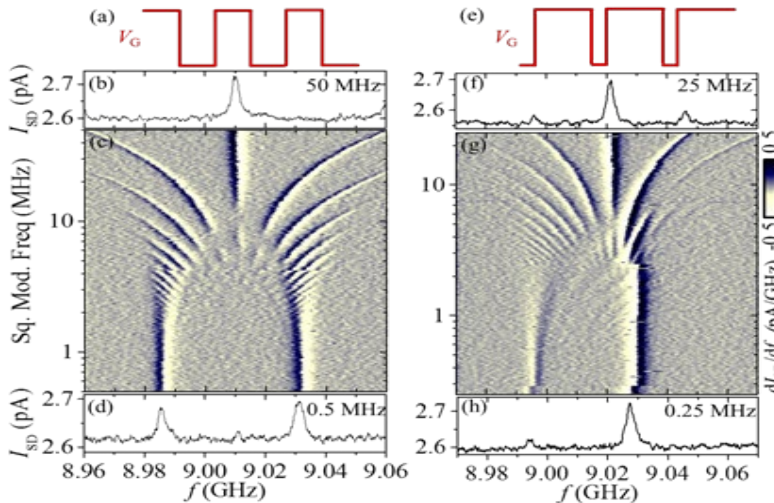


図 1 (a)ゲート電圧の“対称”変調波形。方形波の高・低比率を 1:1 で固定。(b) 変調周波数 50MHz における磁気共鳴スペクトル。(c)磁気共鳴信号の変調周波数依存性。ピーク位置を強調するため I_{SD} の f に対する微分をプロットした。(d) 変調周波数 0.5MHz におけるスペクトル。(e)ゲート電圧の”非対称”変調波形。方形波の高・低比率を 4:1 で固定。(f-h)非対称変調に対する (b-d)と同様なプロット。

近藤遮蔽雲を初めて観測

Ivan V. Borzenets¹、Jeongmin Shim²、Jason C. H. Chen³、Arne Ludwig⁴、
Andreas D. Wieck⁴、樽茶清悟⁵、Heung-Sun Sim²、山本倫久⁵

¹香港城市大学物理学科、²韓国科学技術院物理学科、³東京大学工学系研究科、
⁴Ruhr 大学 Bochum 校物理天文学科、⁵理化学研究所創発物性科学研究センター

通常、金属の電気抵抗は、温度が下がると減少します。しかし、磁性不純物を含む金属では、ある温度以下で電気抵抗は逆に増大します。この現象は 1930 年代に発見されましたが、1964 年に日本の物理学者である近藤淳博士が、その起源が「磁性不純物と伝導電子との間の量子力学的な相互作用」にあることを突き止めたことから、「近藤効果」と呼ばれています。近藤効果は、局在スピンを取り囲む伝導電子が“雲”のように局在スピンと結合し、局在スピンを遮蔽する現象として理解できます。単一局在スピンの近藤効果の理論は既に確立しており、実験的にも多くの性質が検証されています。しかし、「近藤状態（近藤雲）」の空間的な広がりについては長年の課題とされてきました。近藤雲の広がりへの検証の重要さは古くから認識されており、現在に至るまで 50 年にわたって世界中でさまざまな手法による検証実験が試みられ、検証を目指した理論も多く提案されてきましたが、いずれも成功には至りませんでした。

本研究では、半導体の人工原子に局在したスピンを閉じ込め、これを周囲の伝導電子と結合させることによって形成される近藤雲を長さ可変の電子の量子干渉計に埋め込みました（図 1 参照）。近藤効果では、局在スピンと伝導電子のスピンは、互いに逆向きになるように量子力学的にもつれ合った状態で結合して近藤雲を形成します。この結合のエネルギーを温度に換算した「近藤温度」より温度が高いと近藤効果は抑制されます。本研究では、電気伝導度の温度依存性を調べることで、近藤温度が得られるように実験条件を設定しました。また、近藤雲は、スピンの相関を介して量子力学的に広がっており、近藤温度は量子干渉の影響を受けます。しかし、量子干渉計が近藤雲より大きくなると、近藤雲が広がっていない部分には局在スピンの影響が及ばないため、近藤温度が量子干渉の影響を受けにくくなります。実験では、近藤温度が量子干渉によって変調される様子を観測することによって、近藤雲の広がりを検証しました。その結果、近藤雲の大きさが近藤温度の逆数に比例することと、近藤雲が局在スピンの周りに集中して分布している一方、長い尾を引いた普遍的な形状をしていることを明らかにしました（図 2 参照）。

近藤雲の広がりが観測可能になったことにより、複数の局在スピンを持つ物理系の理解が大きく進展すると期待できます。また、半導体では、近藤雲の広がりが数マイクロメートルにも及んでいることが明らかになりました。これは、半導体量子デバイス素子の一般的なサイズを大きく上回る値です。このスピンの量子力学的な結合状態を介して、隣接せずに離れて配置された局在スピンを互いに結合させることが可能になると考えられます。伝導電子を介した結合は、結合の大きさだけでなく、結合の符号（離れたスピンが同じ向きに揃おうとするか反対向きになろうとするか）を含めて電氣的に制御できます。従って、これを利用した多彩なスピンの結合状態の実現や、新しい機能を持つ量子デバイスの構築が期待できます。

Reference: I. V. Borzenets, J. Shim, J. C. H. Chen, A. Ludwig, A. D. Wieck, S. Tarucha, H.-S. Sim, M. Yamamoto, “Observation of the Kondo screening cloud”, Nature 579, 210-213 (2020). DOI : 10.1038/s41586-020-2058-6

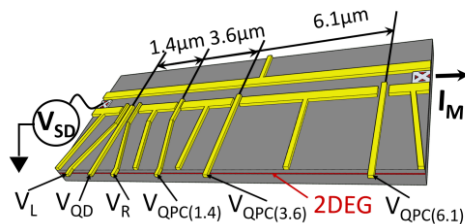


図1 近藤雲検出に用いた試料の模式図。
 V_{QD} によって人工原子と近藤雲の状態を制御し、 V_{QPC} によって量子干渉を導入する。

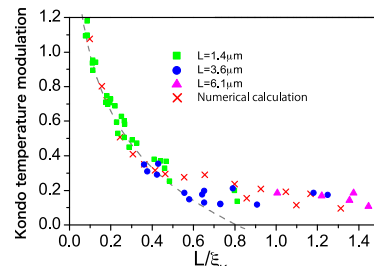


図2 近藤温度の変調具合として計測された近藤雲の形状。横軸は、局在スピンからの距離を近藤雲の大きさと割ったもの。

半導体量子ドットと量子井戸超格子のハイブリッド構造

赤羽 浩一

国立研究開発法人 情報通信研究機構

半導体量子ドットは高性能な半導体レーザなどの光デバイスの高性能化が期待できることや量子科学への応用が可能であることから盛んに研究がなされています。InP 基板上に形成された自己形成 InAs 量子ドットは 1550nm 帯の発光を示すことから光ファイバ通信デバイスへの応用が期待されているところですが、この際、InAs 量子ドットは通常 InGaAlAs 材料で埋め込まれ、InGaAlAs のバンドギャップを組成制御により変化させることにより発光波長の制御が可能になっています。しかしながら InGaAlAs は Ga と Al の交換による格子定数の変化が小さいことから、その組成を非破壊的な測定である X 線回折などから同定することが困難です。この点を解決し、さらには新しい半導体中のキャリアダイナミクスの制御方法を確立するため、本研究グループでは自己形成量子ドットを量子井戸超格子で埋め込む技術を開発しました[1]。

量子ドットと量子井戸超格子のハイブリッド構造は精密な結晶成長が可能な分子線エピタキシー装置を用いて行いました。超格子としては InGaAs/InAlAs 量子井戸を基本とした周期構造を用い、各層の膜厚や層数を変化させることにより量子ドット内のエネルギー準位、キャリアの減衰時間を調べる実験を行いました。図 1 は 2ML 周期の超格子で InAs 量子ドットを埋め込んだ試料の断面を透過電子顕微鏡により観察した結果です。InAs 量子ドット（白い部分）が上下の周期的な超格子構造の中にきれいに埋め込まれている様子がわかります。このような構造においては超格子におけるミニバンエネルギーが実質的なバンドギャップとして機能するため、超格子の周期を変化させることで量子ドット内の様々な物性を変化できるものと考えられます。図 2、図 3 はこれを確認するために量子ドットからの発光を測定した結果です。図 2 は発光スペクトルを示していますが、埋め込む際の超格子の周期を 2ML（赤で示したスペクトル）から 16ML（青のスペクトル）に変化させることにより発光波長短波長側にシフトさせることに成功しています。また、図 3 は発光の時間変化を超高速分光系により測定した結果になり、発光の時間変化すなわち量子ドット内のキャリアダイナミクスも制御可能であることが示されました。具体的には周期の大きな超格子で埋め込んだ際には発光減衰時間が長くなるという結果が得られています。

本研究成果は、量子ドットにおける電子・ホールエネルギー状態やダイナミクスを超格子の構造パラメータにより制御可能なことを示す結果であり、量子ドットと量子井戸超格子間の相互作用がより詳細に明らかになることにより、量子ドットを用いた光デバイス分野、量子科学分野の進展につながるものと考えられます。

Reference: [1] Kouichi Akahane et. al., J. Cryst. Growth, 432, 15 (2015).

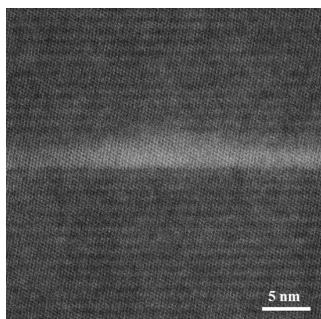


Fig. 1 ハイブリッド構造の断面の透過電子顕微鏡像

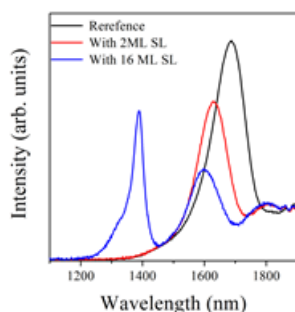


Fig. 2 2ML (赤)、16ML (青)の超格子で埋め込んだ量子ドットからの発光スペクトル (黒はレファレンスサンプル)

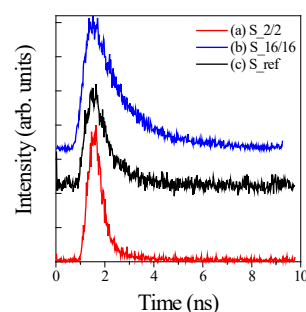


Fig. 3 2ML (赤)、16ML (青)の超格子で埋め込んだ量子ドットの発光の時間分解測定 (黒はレファレンスサンプル)

量子ドット並列系の光電流におけるディック効果

– THz 光の高感度センサーへの応用 –

江藤幹雄¹、奥山倫²

¹慶應義塾大学理工学部、²明治大学理工学部

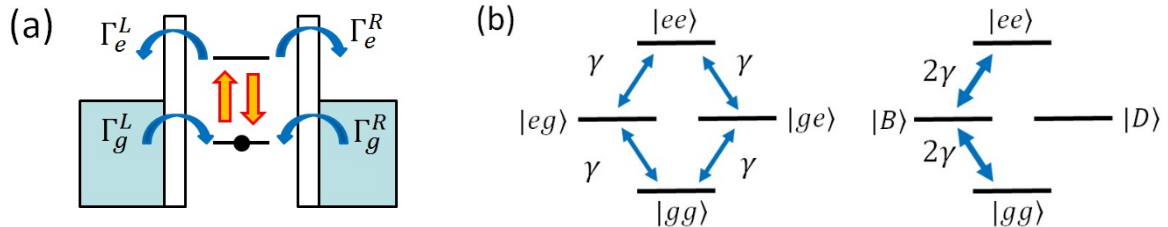
フォトン班の平川教授（東大生研）のグループで、単一量子ドットに THz 光を照射したときの光電流が観測されています [1]。自己形成型 InAs 量子ドットでは、離散エネルギー準位の間隔が THz 光のエネルギーに相当します。単電子トランジスタのクーロンブロッケード状態において、光照射によってフェルミ準位 (E_F) より下のエネルギー準位 ($|g\rangle$) の電子が、 E_F より上のエネルギー準位 ($|e\rangle$) に励起されると、ソース・ドレイン電極間のバイアス電圧がゼロでも光電流が流れます (図 (a))。光電流の向きは、トンネル結合の強さ $\Gamma_g^L, \Gamma_g^R, \Gamma_e^L, \Gamma_e^R$ の非対称性で決まり、 $\Gamma_g^L/\Gamma_g^R \neq \Gamma_e^L/\Gamma_e^R$ のときには電流が流れません。この系は THz 光の高感度検出器への応用が期待されています。

我々は、量子ドットの並列系における光電流を理論的に研究し、量子効果によるさらなる高感度センサーの可能性を調べました。 N 個の量子ドットが共通のソース・ドレイン電極に接続され、また量子ドット間のトンネル結合はないものと仮定します。基本的なアイデアは、量子ドット間の距離が光の波長よりも短い時に生じるディック効果（超放射）です。フォトンの吸収・放出によって、量子ドット間にもつれ合った状態（エンタングルメント）が作られます。例えば $N=2$ の場合、基底状態 $|gg\rangle$ は状態 $|B\rangle = (|eg\rangle + |ge\rangle)/\sqrt{2}$ に励起されます。その $|B\rangle$ から $|gg\rangle$ または $|ee\rangle$ への遷移率は状態 $|eg\rangle$ や $|ge\rangle$ の場合の 2 倍になります (図 (b) を参照)。なお、もう一つのもつれ合い状態 $|D\rangle = (|eg\rangle - |ge\rangle)/\sqrt{2}$ は「ダーク状態」で、光遷移は禁制です。

我々はまず、図 (a) の単一量子ドットにおけ光電流を密度行列の方法で導出しました。

$$I/e = \left[\frac{\Gamma_e^R - \Gamma_e^L}{\Gamma_e^R + \Gamma_e^L} - \frac{\Gamma_g^R - \Gamma_g^L}{\Gamma_g^R + \Gamma_g^L} \right] \frac{g^2 \Gamma_1}{(\hbar\omega - \Delta)^2 + (\hbar\Gamma_2/2)^2}$$

ここで g は電子と光の結合定数、 Δ は $|g\rangle$ と $|e\rangle$ のエネルギー間隔です。 Γ_1 と Γ_2 は定数で、 $\Gamma_e^R + \Gamma_e^L, \Gamma_g^R + \Gamma_g^L$, および g で決まります。光電流は、フォトンのエネルギー $\hbar\omega$ が Δ に一致するとき最大になること、カッコ内の非対称因子に比例すること、がわかります。次に N 個の等価な量子ドットの並列系における光電流について調べ、次の結論を得ました。(i) 量子ドットが共通の電極でなく、 N 対のソース・ドレイン電極の一つずつ結合している場合、光誘起のもつれ合い状態は電流の観測によって壊れる。その結果、光電流は、単一量子ドットのそれの単なる N 倍になる。(ii) ソース・ドレイン電極が単一伝導モードを持ち、かつ N 個の量子ドットとのトンネル結合がすべて等価である理想の場合、光電流は $(N+2)/3$ という因子で増大し得る。(iii) 電極中の伝導モードが複数の場合の光電流は、一般に (ii) の場合より小さくなる。



[1] Y. Zhang, K. Shibata, N. Nagai, C. Ndebeka-Bandou, G. Bastard, and K. Hirakawa, Nano. Lett. **15**, 1166 (2015); Phys. Rev. B **91**, 241301(R) (2015); *ibid.* **93**, 235313 (2016).

Ge/Si ナノワイア 2 重量子ドットと共振器の相互作用

Rui Wang¹, Russell S. Deacon^{1,2}, Jian Sun¹, 石橋幸治^{1,2}
理化学研究所・開拓研究本部¹, 創発物性科学研究センター²

Ge コアを Si のシェルでくるんだコアシェルナノワイアは数十ナノメートルの直径を有し、Ge コアに蓄積したホール（正孔）が伝導キャリアとなる。ホールは電子に比べて大きなスピン軌道相互作用を持つため、それを介してスピンを電氣的に制御することが可能である。4 族原子からなる材料の電子スピンはコヒーレンスよいため量子ビットとして期待されている。電子スピンからなる量子ビットと共振器中の光子とコヒーレントな結合が実現できると電子スピンと光子の間で量子情報をやり取りすることが可能である。また、共振器を介して空間的に離れた量子ビット間で量子情報のやり取りが可能となるため、このようなハイブリッド相互作用は量子情報処理にとって有用である。電子スピンは電磁界の磁場成分と相互作用するため、一般に共振器との相互作用は弱い。そこで、スピン軌道相互作用を介して電子スピンと電磁界の電界成分との相互作用を利用する。実際の系では、コヒーレントな相互作用を実現するために、その大きさが共振器中の光子の寿命や量子ビットのデコヒーレンスよりも大きいことが必要である。本研究では、2 重結合量子ドットの電荷量子ビットとしての共振器との相互作用を調べた。

図 1 は試料構造を示す。2 重量子ドットはナノワイアの下に hBN 絶縁膜を介して形成したフィンガーゲートの正の電圧を印可することにより形成する。共振器は超伝導体で作製したコプレーナ型マイクロ波共振器である。共振器の電界強度が強い位置に 2 重結合量子ドットを設置する。希釈冷凍機にデバイスをセットし、それぞれの量子ドットのポテンシャルを変化させるゲート電圧 (V_{P1} , V_{P2}) を変化させて共振器を透過するマイクロ波の位相変化を測定すると、図 2 (左) に示す 2 重量子ドットの形成を示す電荷安定図を得ることができる。矢印の方向にゲート電圧を変化させると、左のドットと右のドットの量子準位の差 (detuning) を変えることができ、2 つのドットの間で 1 個の電子を動かすことができる。真ん中の線上では左と右のドットの量子準位は一致し (detuning=0)、両ドットに広がった分子軌道を形成する。図 2 (右) は detuning を変化させながら共振特性を測定し、共振数波数の変化をプロットしたものである。Detuning がゼロの近くで、共振周波数が変化していることが分かる。この変化を、量子ビットと共振器に電荷と光子の相互作用を加え (Jaynes-Cummings モデル) に 2 重ドットのデコヒーレンスを考慮したモデルでシミュレーションすることにより、この結合系の重要なパラメータを得ることができる。その結果、この系では電荷と光子の相互作用よりも電荷量子ビットのデコヒーレンスが大きいと、量子的な結合は存在するもののコヒーレントな相互作用が実現されていないことが分かった。

Reference:

Rui Wang, Russell S. Deacon, Jian Sun, Jun Yao, Charles M. Lieber, Koji Ishibashi, Nano Lett. 19, 1052–1060 (2019)

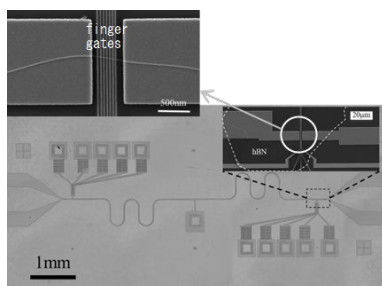


図1: 試料構造 超伝導金属で作製した共振器中にナノワイアを設置する。

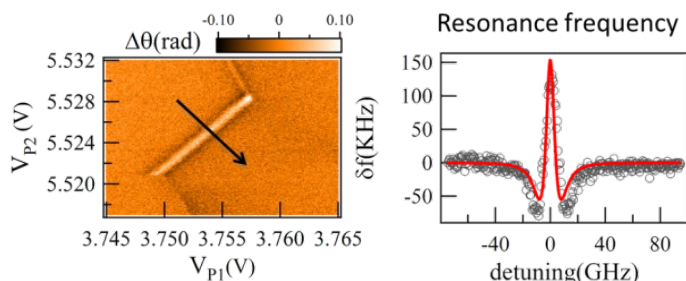


図2: (左) 左右それぞれのドットのゲート電圧 (V_{P1} , V_{P2}) を変化させて共振特性を測定して得られた 2 重量子ドットの電荷安定図 (位相変化をプロット)。(右) detuning を変えたときの共振周波数の変化

Ge/Si ナノワイアにおけるヘリカルチャネルの形成

Jian Sun¹, Russell S. Deacon^{1,2}, Rui Wang¹, 石橋幸治^{1,2}
 理化学研究所・開拓研究本部¹, 創発物性科学研究センター²

Ge コアを Si のシェルでくるんだコアシェルナノワイアは数十ナノメートルの直径を有し、Ge コアに蓄積したホール（正孔）が伝導キャリアとなる。ホールは電子に比べて大きなスピン軌道相互作用を持つため、それを介してスピンを電氣的に制御することが可能である。また、スピン軌道相互作用が大きな半導体ナノワイアと外部磁場を組み合わせることにより、スピンと運動量がロックしたヘリカル状態の形成が期待できる。これに、超伝導を誘起するとトポロジカル超伝導を実現できることが期待され、ナノワイアの両端にはマヨラナゼロモードという束縛状態が形成されることが予測されている。マヨラナゼロモードはデコヒーレンスが生じにくいことから、量子情報を安定に保持できる新たな量子情報媒体（量子ビット）として期待されている。まず、超伝導を誘起する前に、ヘリカル状態が形成されていることが必要であり、本研究では、Ge/Si コアシェルナノワイアの外部磁場を印可した場合のコンダクタンスのゲート依存性を調べることで、ヘリカルエッジ状態が形成されていることを示唆する実験結果を得た。

1 次元量子細線にヘリカル状態が形成された場合のエネルギー分散関係を図 2 に示す。スピン軌道相互作用のためスピニアップとダウンの放物線の分散関係がシフトし、外部磁場を印可するとゼーマン分裂（ヘリカルギャップ）が生じることが特徴である。一般に弾道的な準 1 次元細線のコンダクタンスは、サブバンドの数によってコンダクタンスの量子化を示す。ヘリカルギャップが存在する場合には、その影響が量子化値からのコンダクタンスの減少（実験的には“へこみ”）として現れると期待される。試料構造を図 1 に示す。表面酸化したシリコン基板上に金属ゲートを形成し、hBN 膜を絶縁膜としてその上にナノワイアを設置する。その上に電流電圧特性を測定するためのいくつかの電極（コンタクト）を形成する。ゲート電圧によりフェルミエネルギーを変化させる。

図 2（右）は、7.5K におけるコンダクタンスのゲート電圧依存性を示す。期待されたようなコンダクタンスのへこみが観測されており、このへこみの幅は磁場の増加とともに増加する。ゼロ磁場においてもへこみが見られているが、簡単なモデルでは見られないはずのギャップが観測されている理由はわからない。ヘリカルギャップの大きさは、外部磁場の方向とホールの運動方向 (k) と電界の方向で決まるスピン軌道相互作用に関連した有効磁場 (B_{so}) の方向に依存する。本研究では外部磁場の印可方向を変えながらコンダクタンスが減少（へこみ）するゲート電圧の範囲を調べることでヘリカルギャップの形成を明らかにした。

Reference:

1. Rui Wang, Russell Deacon, Jun Yao, Charles Lieber, and Koji Ishibashi, *Semiconductor Sci. Technol.*, **32**, 094002 (2017)
2. Jian Sun, Russell Deacon, Rui Wang, Jun Yao, Charles M. Lieber, Koji Ishibashi, *Nano Lett.* **18**, 6144-6149 (2018)

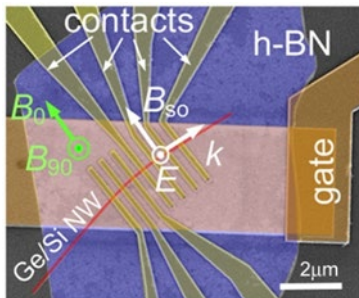


図1: 測定した試料の構造

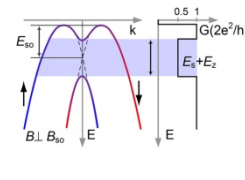
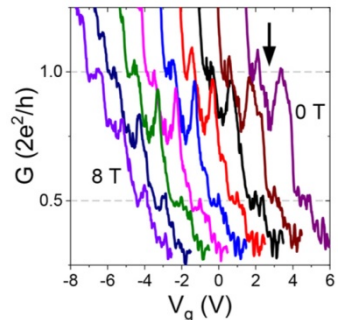


図2: (左)ヘリカル状態が形成された場合のエネルギー分散



(右)磁場を BSO に垂直に印可した時のコンダクタンスのゲート電圧依存性

ポイントコンタクトにけるマイクロスコピック NMR

M. H. Fauzi*, 平山祥郎
理学研究科、CSIS、CSRN 東北大学

抵抗検出 NMR (RDNMR) を GaAs をベースにした量子ポイントコンタクト (QPC) に応用したところ、スピントリプルを伴うエッジチャンネル間の散乱が QPC 近傍で生じる量子ホール効果領域で面白い特性が得られることを確認した。RDNMR 信号は QPC の両側の充填率(ν_b) が偶数で、QPC 内の充填率(ν_{QPC}) が $\nu_b - 2 < \nu_{QPC} < \nu_b - 1$ の時に得ることができ、基底ランダウ準位で $\nu_b = 2$ に設定した場合、図 1 に示すように $B = 1.25$ T の低磁場まで RDNMR 信号を得ることができた。すべての NMR スペクトルは四重極分離を反映した 3 つのピークを示すが、歪などの影響を受けないセンターピークの半値幅が $B = 3$ T までは磁場に比例して増加し、その後飽和することがわかった。この飽和には電子に働くクーロン相互作用が影響していると考えられる[1]。

さらに、RDNMR は高いランダウ準位でも測定でき、第 5 番目のラインダウ準位 ($\nu_b = 10$ で $8 < \nu_{QPC} < 9$) に設定した場合、1T 以下の測定磁場でも信号が観測されることがわかった。この状況では、QPC の基底一次元サブバンドのスピントリプルが保たれ、さらに磁場による電子軌道への影響がポテンシャル閉じ込めより十分に弱い状況にある。この RDNMR 測定技術はゼロ磁場に近い QPC の電子状態を NMR で研究するのに大変有力である[2]。

パターン化したゲートからの電界による閉じ込めは、半導体で低次元デバイスを実現するのに幅広く用いられているが、特に低温では金属ゲートと半導体の熱膨張率の違いにより歪が導入される。これが半導体中に埋め込まれた電子の輸送特性に影響を与える可能性は長い間議論されてきたが、その大きさと変化をきちんと測定することは難しかった。ここでは、RDNMR の四重極分離が歪によることを利用して、図 2 に示すように、狭いチャンネルを流れる電子が実際に感じる歪を正確に測定することに成功した。検出された歪の大きさは 10^{-4} のオーダーであり、チャンネル位置のナノスケールのシフトにより大きく変化することが明確になった。これは半導体量子デバイスにおける歪の影響を研究する重要なヒントになる[3]。

Reference: [1] A. Noorhidayati, M. H. Fauzi, M. F. Sahdan, S. Maeda, K. Sato, K. Nagase, and Y. Hirayama, Phys. Rev. B 101, 035425, doi.org/10.1103/PhysRevB.101.035425 (2020). [2] M. H. Fauzi, A. Noorhidayati, M. F. Sahdan, K. Sato, K. Nagase, and Y. Hirayama, Phys. Rev. B 97 (RC), 201412 doi.org/10.1103/PhysRevB.97.201412 (2018). [3] M. H. Fauzi, M. F. Sahdan, M. Takahashi, A. Basak, K. Sato, K. Nagase, B. Muralidharan, and Y. Hirayama, Phys. Rev. B 100 (RC), 241301, DOI: 10.1103/PhysRevB.100.241301 (2019).

*present address: Research Center for Physics, Indonesian Institute of Sciences, Indonesia

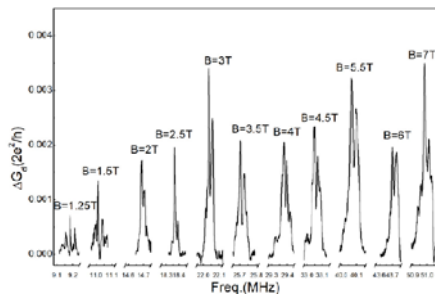


図1 $\nu_b = 2$, $\nu_{QPC} < 1$ で測定された QPC の RDNMR 信号の磁場依存性。

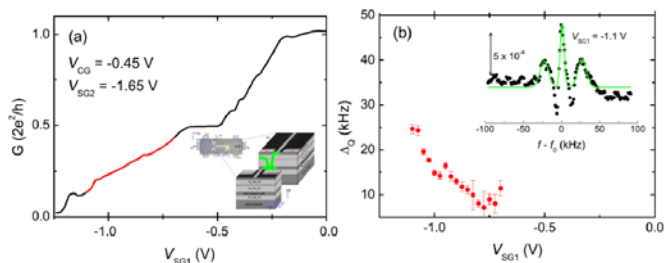


図2 (a) $V_{SG2} = -1.65$ V, $V_{CG} = -0.45$ V で測定された QPC の対角磁気伝導特性の V_{SG1} 依存性。挿入図は QPC デバイスと V_{SG1} によるチャンネル位置の変化を模式的に表したものである。(b) RDNMR スペクトルから求めた四重極分離 ΔQ_0 。四重極分離は歪に対応しており、(a)の赤線の範囲で測定されている。挿入図は RDNMR スペクトルの一例。

量子ポイントコンタクトにおける動的な核スピン分極とランダムポテンシャルの影響

青野友祐¹
¹茨城大学工学部

電子スピンは磁場を用いてスピン偏極を容易に偏極できますが、核スピンでは容易ではありません。核スピン分極を引き起こす方法の一つとして、電子と核スピンの間のスピンフリップフロップを用いて、核スピンへの分極を実現する、動的核スピン分極(DNP)と呼ばれる方法があります。近年になり、NMR信号を電気抵抗変化として検出する抵抗検出型NMR法と呼ばれる手法が開発され、半導体ナノ構造におけるDNP生成の検出が可能となりました。

量子ポイントコンタクト(QPC)を用いたDNP生成と抵抗検出型NMRによるDNP検出を理論的に考察しました。面内磁場中QPCがスピン偏極するようにゲート電圧を調整して、コンダクタンス G が e^2/h のときに、有限バイアス電圧を印加すると、図1に示したように、ソース電極側とドレイン電極側でDNPの符号が反転する、双極子型のDNPが生成されることがわかりました。この双極子型のDNPは、抵抗検出型NMR法によって検出したときに、均一な核スピン分極とは定性的に異なる応答特性をもつことがわかりました[1]。本研究は、理研・川村研究員(電荷・スピングループ)、スタノ研究員、茨城大・小峰准教授(連携研究者)との共同研究です。

QPCのコンダクタンスのゲート電圧依存性の中には、QPCのポテンシャル構造が反映されます。QPCポテンシャルが放物型の場合には、コンダクタンスのゲート電圧依存性のスロープの幅がポテンシャルの曲率を与えます。最近の実験において、約100個のQPCのコンダクタンスを測定することで、ポテンシャルの曲率とスプリットゲート長の関係が調べられました。スプリットゲート長が大きくなれば、QPC曲率は小さくなると予想されますが、この予想とは異なり、曲率はゲート長を変えてもほとんど変化がないことが示されました。さらに、この特性が乱れポテンシャルによってもたらされていることが示唆されました。

乱れポテンシャルのあるQPCのコンダクタンスのゲート電圧依存性を、1次元と2次元のタイトバインディング模型を用いて考察しました。図2(左)のように、放物型のポテンシャルエネルギーに乱れポテンシャルエネルギーを加えたモデルを考えます。乱れポテンシャルは、ポテンシャルの相関関数が、ガウシアン型の空間相関を持つとします。乱れポテンシャルの大きさと空間相関長を与えたときに、ゲート電圧依存性のサンプル平均をとることで、実効的なQPC長を求めました。図2(右)に示したように、実効的なQPC長さの変化は、QPC長に対してあまり変化しないことがわかりました。むしろ、QPC長の増加に対して、実効的なQPC長さが緩やかに減少することもあることがわかりました[2]。本研究は、電荷・スピングループの東北大学の平山教授グループとの共同研究です。

Reference: [1] P. Stano, T. Aono, M. Kawamura, “Dipolelike dynamical nuclear spin polarization around a quantum point contact” Phys. Rev. B **97**, 075440 (2018). DOI: 10.1103/PhysRevB.97.075440 [2] T. Aono, M. Takahashi, M. Fauzi, Y. Hirayama, “Quantum point contact potential curvature under correlated disorder potentials” Phys. Rev. B **102**, 045305 (2020). DOI: 10.1103/physrevb.102.045305

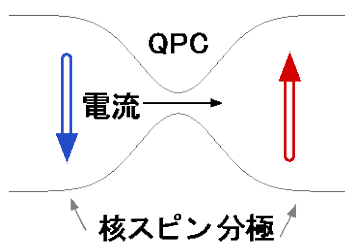


図1: QPCを流れる電流と生成される双極子型の自発的核スピン分極

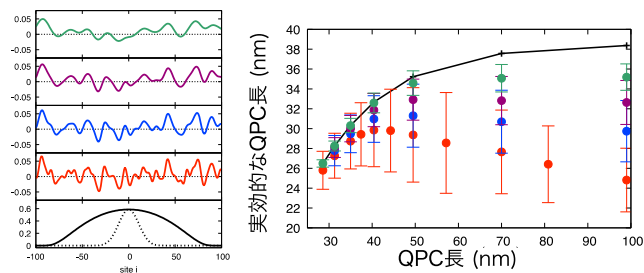


図2: (左)QPCポテンシャル(黒実線と点線)とガウシアン乱れポテンシャル (右)QPC長と実効的なQPC長の関係

ハイブリッド系におけるカーボンナノチューブの理論構築 －トポロジカル状態の発見とその物性の解明－

泉田 渉
¹東北大学理学研究科

カーボンナノチューブは、ナノスケールの理想的な一次元導体として、精力的に研究されてきた。ここ 20 年ほどの間に、欠陥や不純物のない単層ナノチューブを半導体基盤に埋め込んだハイブリッド構造が作成され、量子伝導測定により、電子状態に微細構造が存在することが明らかとなってきた。ナノチューブの電子状態は、グラフェンの電子状態に周回方向の境界条件を課すことで理解されている。だが、観測される微細構造には、このような単純な描像では説明できないナノチューブ特有の効果が現れている。このような、ナノチューブ特有な効果の現れる量子現象に着目し、理論的な研究を行った。

ナノチューブはマイクロメートル程度の長さであるため、電子は量子閉じ込めによる離散準位を形成する。エネルギーバンドに 2 つの谷が存在することを反映して、離散準位には、谷状態の縮退による 4 重縮退が生じると考えられていた。スピン軌道分裂の観測によりこの描像は修正されるが、依然として谷は良い量子数であると考えられていた。離散準位における谷の役割に関しては、不明な点が多かった。この問題に対して微視的理論の構築に取り組んだ。

系の回転対称性を利用して、図に示すように、1 次元モデルの構築を行った。これを用いて端付近の原子構造の寄与を微視的に調べた。端における境界条件のもと形成される波動関数には端付近の減衰波も寄与することを示し、谷の役割を調べた。そこで展開した理論が、エネルギーギャップ中に生じる端状態にも拡張できることを指摘し、端状態とバルク系のトポロジカル不変量の間に厳密な対応があることを見いだした。これによりトポロジカル物質としてのナノチューブの一面をあらわにした [1, 2, 3]。

さらには、国際共同研究として、トポロジカル端状態に対して、電子相関のある場合に、両端に生じるスピン間に、強磁性的、反強磁性的な結合があることを示した [4]。また、超伝導体とのハイブリッド構造において、超伝導近接効果により、マヨラナ準粒子などのトポロジカル端状態が出現することを示した [5, 6, 7]。

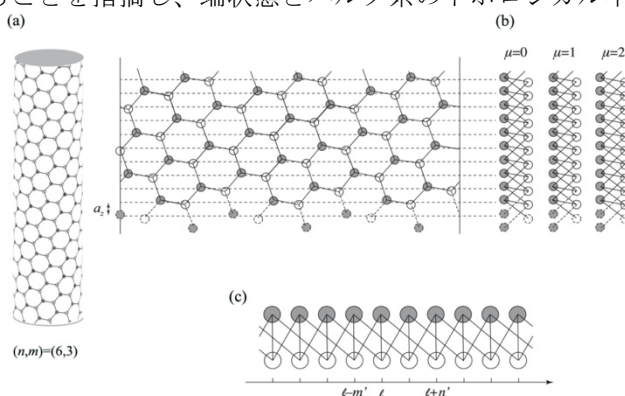


図 ナノチューブの 1 次元モデルの構築

References:

- [1] W. Izumida, R. Okuyama, A. Yamakage, R. Saito, "Angular momentum and topology in semiconducting single-wall carbon nanotubes", *Physical Review B*, **93**, 195442 (2016).
- [2] R. Okuyama, W. Izumida, M. Eto, "Topological Phase Transition in Metallic Single-Wall Carbon Nanotube", *Journal of the Physical Society of Japan*, **86**, 013702 (2017).
- [3] R. Okuyama, W. Izumida, M. Eto, "Topological classification of single-wall carbon nanotube", *Physical Review B*, **99**, 115409 (2019).
- [4] C. P. Moca, W. Izumida, B. Dóra, Ö. Legeza, J. K. Asbóth, G. Zaránd, "Topologically Protected Correlated End Spin Formation in Carbon Nanotubes", *Physical Review Letters*, **125**, 056401 (2020).
- [5] W. Izumida, L. Milz, M. Marganska, M. Grifoni, "Topology and zero energy edge states in carbon nanotubes with superconducting pairing", *Physical Review B*, **96**, 125414 (2017).
- [6] M. Marganska, L. Milz, W. Izumida, C. Strunk, M. Grifoni, "Majorana quasiparticles in semiconducting carbon nanotubes", *Physical Review B*, **97**, 075141 (2018).
- [7] L. Milz, W. Izumida, M. Grifoni, M. Marganska, "Transverse profile and three-dimensional spin canting of a Majorana state in carbon nanotubes", *Physical Review B*, **100**, 155417 (2019).

フレキシブルカーボンナノチューブ電気化学センサー

グエン・シュアン・ビエット、西村圭太、牛山拓也、岸本茂、大野雄高
名古屋大学工学研究科

カーボンナノチューブ(CNT)を用いた電気学センサは優れた柔軟性と生体親和性をもち、ウェアラブルセンサや埋込型生体医療センサ等への応用が期待されている。一方で、その電気化学的特性は十分に理解されていないことに加え、応用においてはCNTセンサの均一性や信頼性の高い作製プロセスの確立が課題となっている。本研究では、単層CNTの電気化学活性の起源を理解するとともに、電子交換速度の向上を実現した。さらに、プラスチックフィルム上に均一なCNT微小電極を作製する技術を確認した。

浮遊触媒CVD法を用いて高結晶かつ清浄な単層CNTを成膜し、電気化学センサを作製した。しかしながら、作製したCNTセンサの電気化学活性は低く、CNTの電気化学活性はCNT表面のグラフェン層ではなく、存在する欠陥に起因することが示唆された。硫酸を用いて電気化学的にCNT表面に修飾を行うことにより、電気化学活性の向上に成功した。この方法の制御性は高く、電位窓の低下を起こすことなく、電子交換速度の向上が可能であった。電子交換速度とラマン散乱分光によるDバンド強度との相関を見出すとともに、XPSから表面修飾によって形成されたC-OやC=Oをもつ官能基が電気化学活性サイトになっていることが示唆された。

また、高均一にフレキシブルカーボンナノチューブセンサを作製する技術を確認した。清浄なCNT薄膜を用いることに加え、プロセス中にCNT表面を無機膜により保護し、表面の汚染を低減した。作製したCNT微小電極はほぼ理想的な特性を示し、四分位電位 $\Delta E = |E_{3/4} - E_{1/4}|$ は28個の電極において、 60.4 ± 2.9 mVであった。また、作製したCNT電極は市販のカーボンファイバー電極や金電極と比較して、優れた汚染耐性を示した。神経伝達物質のひとつであるドーパミンを高感度 (LOD = 50 nM) に検出可能であることを実証した。

本研究はCNT電極の高感度性や均一性、信頼性を実証し、フレキシブル電気化学センサの基盤となるものである。

Reference:

1. K. Nishimura, T. Ushiyama, N. X. Viet, M. Inaba, S. Kishimoto, and Y. Ohno, "Enhancement of the electron transfer rate in carbon nanotube flexible electrochemical sensors by surface functionalization", *Electrochimica Acta* **295**, 157-163 (2019). doi:10.1016/j.electacta.2018.10.147
2. N. X. Viet, S. Kishimoto, and Y. Ohno, "Highly Uniform, Flexible Microelectrodes Based on Clean Single-walled Carbon Nanotube Thin Film with High Electrochemical Activity", *ACS App. Mater. Interfaces* **11**, 6389-6395 (2019). doi:10.1021/acsami.8b19252

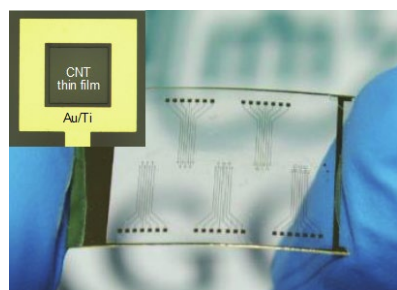


図 1 プラスチックフィルム上に作製した高均一なフレキシブルCNT電気化学センサ。

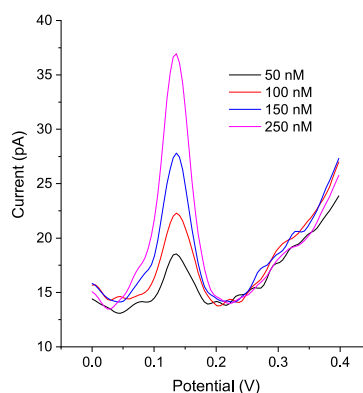


図 2 表面を活性化したCNT微小電極によるドーパミンの高感度検出。

欠陥形成によるカーボンナノチューブ中のフォノンの変調

稲葉工, 本間芳和
東京理科大学理学部

単層カーボンナノチューブ (SWCNT) は、電子、光子、フォノンのハイブリッドシステムと言えます。SWCNT のフォノンは、擬一次元電子状態に共鳴するラマン散乱分光法で高感度に検出することができます。SWCNT の共鳴ラマン遷移は、熱的に安定な励起子を介するものであり、量子ハイブリッド制御として魅力的です。しかし、SWCNT の格子フォノンの技術的応用は、なお未踏領域にあり、SWCNT のフォノンの固有特性と、それらの光子および電子との相互作用をさらに研究する必要があります。

我々は、SWCNT への分子吸着・内包、および欠陥形成による SWCNT フォノンの変調を研究しています。その一環として、有限の格子運動量をもつ K 点フォノンに起因する中間周波数モード (IFM) の欠陥導入による強度変調を明らかにしました。IFM は、有限運動量の音響フォノンでありながら、運動量がほぼゼロの光子と結合できるため、興味深いものです。

SWCNT の直径に依存して $300\sim 500\text{ cm}^{-1}$ の周波数範囲にある IFM のラマンスペクトルを、欠陥密度に敏感なフォトルミネッセンス (PL) スペクトルとともに、単一架橋 SWCNT を使用して測定しました。高強度の励起レーザー照射で欠陥を導入することにより、K 点フォノン (IFM および D モードピーク) に由来するラマンピークが増強され、運動量ゼロの Γ 点フォノン (動径呼吸モード: RBM、面外横光学モード (oTO)、および G モードのピーク) が減少しました。(11, 3) SWCNT からの各ラマンピークの強度を PL 強度に対してプロットしたものを図 1(c) に示します。 Γ 点フォノンである RBM、oTO、および G モードの強度は、PL 強度に比例して減少するのに対し、IFM および D モードの強度は、PL の強度と逆相関で増加しています。K 点フォノンの場合、グラフェン格子の欠陥によって弾性的に散乱される必要があるため、欠陥が存在しないと検出されません。したがって、K 点フォノン強度は欠陥を導入することによって増強することができます。言い換えれば、光子-フォノン結合は欠陥によって強化される可能性があります。

SWCNT の格子フォノン特性を量子情報技術に適用することは簡単ではありませんが、格子フォノン物性を深く理解することで、この分野にブレークスルーがもたらされることが期待されます。

Reference : T. Inaba, Y. Tanaka, S. Konabe, and Y. Homma, "Effects of Chirality and Defect Density on the Intermediate Frequency Raman Modes of Individually Suspended Single-Walled Carbon Nanotubes", J. Phys. Chem. C 122, 9184 (2018). DOI : 10.1021/acs.jpcc.8b01017
*https://www.researchgate.net/publication/337706741_IFM_Animation

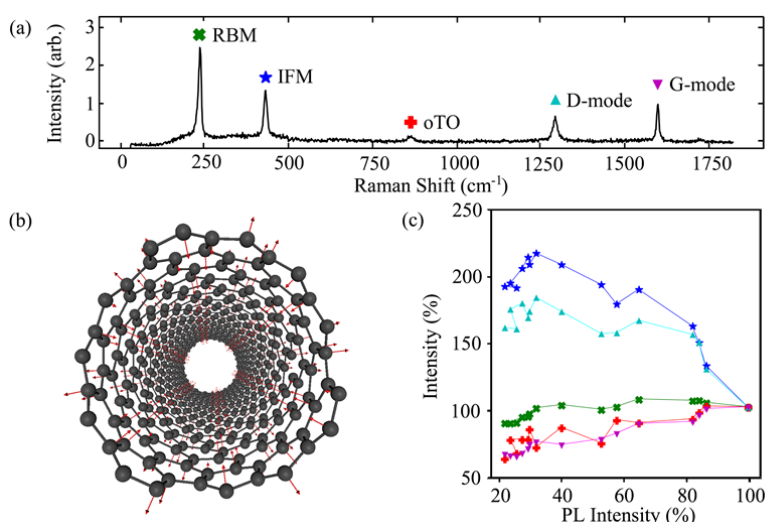


図 1 (a) 単一架橋 (11,3) SWCNT のラマンスペクトル
(b) (11,3) SWCNT における IFM の原子変位ベクトルの模式図*
(c) ラマンピーク強度と PL 強度の相関

単層カーボンナノチューブの熱伝導率精密計測

本間芳和
東京理科大学理学部

単層カーボンナノチューブ (SWCNT) は直径 1 nm 程度のナノサイズの物質で、理論的には高い熱伝導率を持つことが予測されています。しかし、単一 SWCNT の熱伝導特性は未だ明らかにはなっていません。SWCNT の構造の指標であるカイラリティが特定された試料を用いた研究は少なく、真に 1 本であるのが明確でなかったのが現状です。

我々は、蛍光分光イメージングによる単層カーボンナノチューブ (SWCNT) の熱伝導率計測法を開発し、構造を精密に決定した SWCNT の熱伝導率の温度依存性を明らかにしました。

蛍光及びラマン分光法を用いてカイラリティや結晶性を精密に評価した単一架橋 SWCNT に対して、非接触・非破壊に熱伝導率測定を行いました。本測定法は、蛍光スペクトルのピーク位置の温度依存性を利用して、1 本の SWCNT の軸に沿ったレーザ加熱時の温度分布を分光イメージングにより取得し、これから熱伝導率を導出する方法です。350 K から 1000 K までの広い範囲で熱伝導率の温度依存性を導出することができ、その温度依存性は 1 次の 3 フォノン散乱過程 (絶対温度の逆数に比例) で良く表現できることがわかりました。今回得られた熱伝導率は、4 本の同一カイラリティの SWCNT で一致し、信頼性の高いものと言えます。

本研究成果は、SWCNT の単一架橋構造形成技術と SWCNT 一本の計測を可能にする高感度共鳴分光法を組み合わせ、非接触での熱伝導率測定を可能にしたものです。SWCNT は電子・光子・フォノンのハイブリッドの舞台であり、熱伝導率をはじめとするフォノン基礎物性の理解は、ハイブリッド量子技術の展開に寄与するものです。

Reference: K. Yoshino, T. Kato, Y. Saito, J. Shitaba, T. Hanashima, K. Nagano, S. Chiashi, and Y. Homma, "Temperature Distribution and Thermal Conductivity Measurements of Chirality-Assigned Single-Walled Carbon Nanotubes by Photoluminescence Imaging Spectroscopy", ACS Omega, 3, 4352 (2018). DOI: 10.1021/acsomega.8b00607

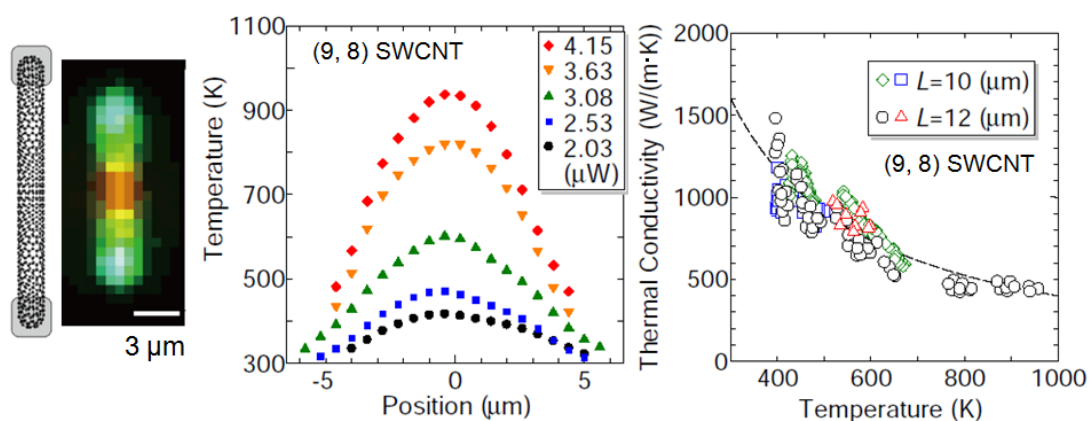


図 1 蛍光イメージングによる(9, 8)の SWCNT の熱伝導率計測

蛍光発光波長の温度依存性を利用して、1 本の SWCNT の軸に沿ったレーザ照射 (2.03~4.15 μ W) 時の温度分布を分光イメージングにより取得し、これから熱伝導率を導出しました。長さ L の異なる 4 本の(9, 8)SWCNT のデータが一致しています。

欠陥修復した酸化グラフェンからバンド伝導を観測 ～高結晶性グラフェン薄膜のスケラブル製造への道筋を開拓～

根岸良太、小林慶裕
大阪大学工学研究科

スケラブルに製造可能な酸化グラフェン (graphene oxide, GO) を反応性雰囲気での1100°C以上の高温加熱処理により結晶性を飛躍的に向上させ、処理後の薄膜においてグラフェン本来の電気伝導特性を反映したバンド伝導の観測に初めて成功しました [1]。

GOは、その還元処理によりグラフェンが生成可能であり、グラフェンの大量合成に向けた出発材料として注目されています。しかし、化学処理や加熱による一般的な還元法では、合成中に形成した欠陥が多く残ります。このような手法で作製したグラフェン薄膜でのキャリア輸送特性は、欠陥のために電子が局在したホッピング伝導となり、グラフェンの優れた物性を反映したバンド伝導ではありませんでした。そのため、キャリア移動度も高々数 cm^2/Vs と低く、グラフェンとは全く異なる低結晶性の材料に留まることが課題となっていました。

本研究グループでは、GO薄膜をエタノール雰囲気中の高温で加熱還元してグラフェンを生成するプロセスを検討してきました。1100°C以上でこの処理を行うと欠陥が大幅に修復することがラマン分光測定や透過顕微鏡観察から検証されました。結晶性が顕著に向上した結果、GO薄膜としては最高レベルのキャリア移動度 ($\sim 210\text{cm}^2/\text{Vs}$) が観測されました。さらに、高移動度グラフェン薄膜でコンダクタンスの温度特性を解析した結果、室温から40Kの範囲で非線形な変化を示し、バンド伝導が発現することを見出しました。これはグラフェン本来の電子構造を反映しており、GO由来のグラフェン薄膜からは初めて観測されたものです。～900°Cでの低温処理の場合、欠陥が残留し、ホッピング伝導となっています。これらの挙動から、結晶性の向上で電子構造の途切れが少なくなり、ホッピング伝導からバンド伝導へと変化することがわかります。バンド伝導発現は、X線吸収微細構造分光や光電子分光測定による電子構造解析からも裏付けられました。さらに最近の研究で、GOの還元で形成した乱層・多層グラフェン薄膜において、層数の増加とともに、非線形にコンダクタンスが向上する現象を見出しました。この伝導特性の特異な向上は、基板表面の不純物電荷による散乱などの環境効果が多層構造で遮蔽され、劇的に低減したためであり、乱層グラフェン薄膜の電子材料としての優位性を示しています。

このように、GOから高結晶性グラフェン薄膜のスケラブルな製造の可能性が開拓され、グラフェンを利用した電子デバイスやセンサーなど様々な応用が可能となりました。さらに、欠陥修復過程を利用したグラフェン格子への ^{13}C 導入による核スピン制御材料開発、意図的な欠陥導入による局所電子構造の変調とそれを利用した量子デバイス応用への展開も期待されます。

Reference: R. Negishi, M. Akabori, T. Ito, Y. Watanabe and Y. Kobayashi, "Band-like transport in highly crystalline graphene films from defective graphene oxides" Sci. Rep. 6, 28936-1-10 (2016). DOI: 10.1038/srep28936

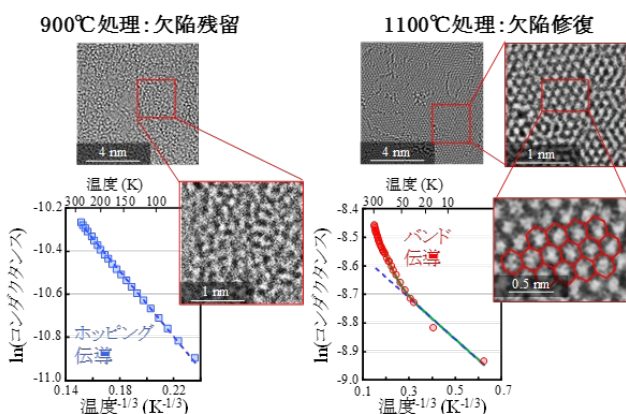


図1 構造修復酸化グラフェン薄膜の透過型電子顕微鏡像とキャリア輸送特性

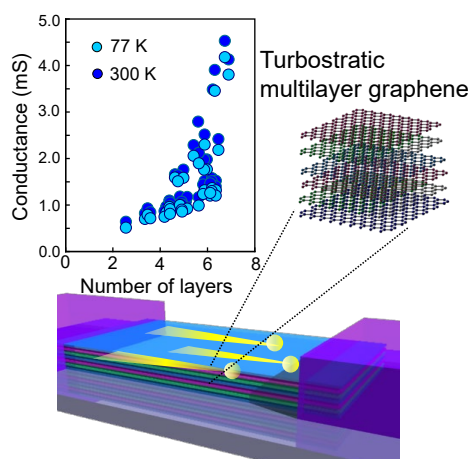


図2 低欠陥の乱層・多層グラフェンにおける自己遮蔽効果による輸送特性向上

グラフェンの移動度向上に関するモンテカルロシミュレーション

森 伸也¹, S. A. Mojtahedzadeh¹, L. Turyanska², O. Makarovsky², L. Eaves², and A. Patané²

¹大阪大学大学院工学研究科, ²ノッティンガム大学

剥離グラフェンは高い室温キャリア移動度を示すが、工業的にスケール可能な大面積手法で作製されたグラフェンは低キャリア移動度に留まっている。このキャリア移動度劣化の原因は、通常、結晶欠陥や基板上のイオン化不純物によるキャリア散乱とされている。このような移動度を制限する機構を解明し、理解することが、大面積グラフェンの実用化を加速させるために重要である。本研究では、コロイド状量子ドットを用いて単層グラフェンの表面を機能化し、電荷の空間的な相関を制御することにより、単層グラフェンにおけるキャリア移動度の向上を実現した。

表面をコロイド PbS 量子ドットで修飾した単層グラフェン (図 1) におけるキャリアのモンテカルロシミュレーションを行った。基板上のイオン化不純物と表面キャップ層における局在電荷との空間的な相関を、相関長 r_{\max} と呼ばれるパラメータを用いてモデル化した。その結果、強い空間的な相関 (小さな r_{\max}) がポテンシャル揺らぎを抑制し (図 2), キャリア移動度を増加させることがわかった。移動度のキャリア密度依存性に関して、シミュレーション結果は測定結果と良い一致を示した (図 3)。このキャリア移動度の制御法は、高キャリア移動度が必要なグラフェンデバイスへの応用のみならず、電荷の相関現象に関する基礎的な研究へも展開できる。

- [1] L. Turyanska, O. Makarovsky, L. Eaves, A. Patané, and N. Mori, "Mobility enhancement of CVD graphene by spatially correlated charges," 2D Materials, Vol. 4, 025026 (1-6), 2017, DOI: 10.1088/2053-1583/aa55b4
- [2] O. Makarovsky, L. Turyanska, N. Mori, M. Greenaway, L. Eaves, A. Patané, M. Fromhold, S. Lara-Avila, S. Kubatkin, and R. Yakimova, "Enhancing optoelectronic properties of SiC-grown graphene by a surface layer of colloidal quantum dots," 2D Materials, Vol. 4, 031001 (1-7), 2017, DOI: 10.1088/2053-1583/aa76bb

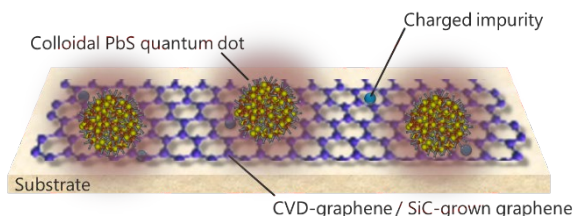


図 1 コロイド PbS 量子ドットで修飾した単層グラフェンの模式図。量子ドットは電子ドナーとして働く。イオン化不純物が基板上に存在する。

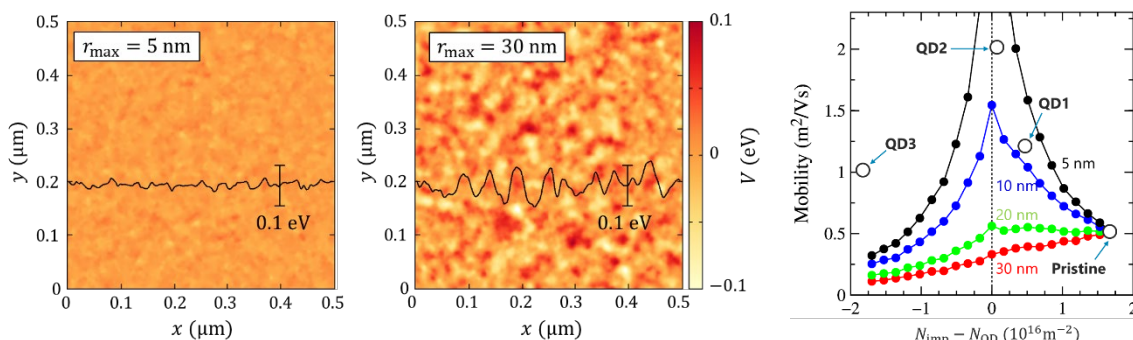


図 2 [左図, 中図] 異なる相関長 r_{\max} を仮定した場合のポテンシャル分布のシミュレーション結果。
 図 3 [右図] 移動度のキャリア密度依存性。開いたマークが測定結果を表す。測定結果として、異なるキャップ分子を被覆した量子ドットで修飾した単層グラフェン (QD1, QD2, QD3) と、量子ドットで修飾していない単層グラフェン (Pristine) の結果をプロットした。閉じたマークは、モンテカルロシミュレーションの結果を表す。相関長 r_{\max} をパラメータとした。

グラフェンフォノンニック結晶の同位体制御

—グラフェン内のフォノン伝導制御に向けて—

有江隆之、秋田成司
大阪府立大学

グラフェンはユニークな電氣的・機械的特性をもち、次世代電子デバイスとして注目されています。我々はグラフェン内の熱が格子振動であるフォノンによって運ばれることに着目し、フォノン伝導を制御するためグラフェン格子内に同位体元素である炭素 13 を任意の位置に導入することを試みました。このようなフォノン制御の試みは、グラフェン内の熱伝導制御を可能にし、熱マネジメント材料への応用、特に熱電変換デバイスとしての効率を向上させる上で、非常に重要な知見が得られると期待しています。

炭素 13 の導入法としては、化学気相成長法 (CVD) で成長させた炭素 12 からなるグラフェンの任意の部分を酸素プラズマによりエッチングし、再度炭素 13 を用いて CVD を行うトップダウン的な合成法と、CVD 中に間欠的に炭素 12 と炭素 13 を切り替えて導入することで、単結晶グラフェン内に炭素 12 と炭素 13 からなるグラフェンの超格子構造を作製する、ボトムアップ的な合成法を確立しました。

まずトップダウンにより作製したグラフェンの炭素 12 と炭素 13 間の界面では、熱抵抗が大幅に増大しました。これは同位体の質量差によるフォノン周波数のずれに起因したフォノン散乱の増大が原因であることを示唆しました。一方ボトムアップによる超格子構造では、界面数に応じて熱抵抗の線形的な増大が見られ、界面間隔がグラフェン内のフォノン平均自由行程と同程度になると、線形的に変化していた熱抵抗がさらに急激に増大しました。これはフォノンの弾道的輸送が、グラフェン内の熱輸送において支配的になったためであると考えています。

炭素 12 と炭素 13 は電氣的には同じ性質であると考えられているため、異なる同位体からなるグラフェン界面では、電氣的特性を変化させることなく熱的特性のみ変化させることが可能です。このような界面形成は、熱マネジメント材料への応用に資する一つの指針を提供するとともに、核スピンを利用した新しいデバイスへの応用にも繋がる技術であると期待されます。

References: Y. Anno, K. Takei, S. Akita, T. Arie, "Artificially controlled synthesis of graphene intramolecular heterojunctions for phonon engineering" *Phys. Status Solidi RRL* **8**, 692 (2014) /DOI 10.1002/pssr.201409210.

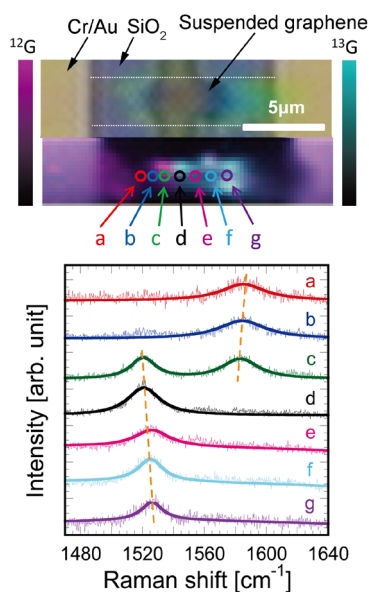


図 1 トップダウンによる同位体グラフェン界面 (上) と各位置のラマンスペクトル (下)。

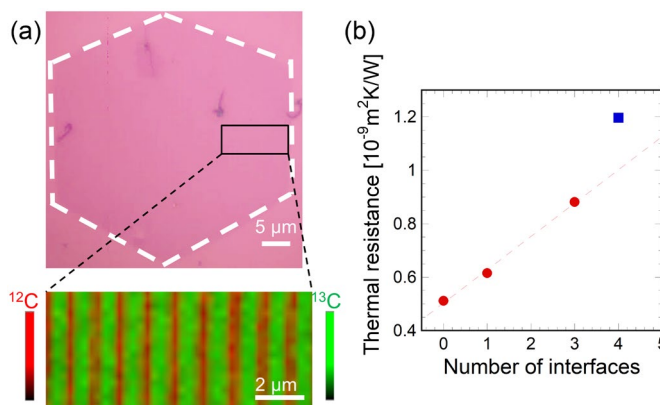


図 2 (a)ボトムアップにより炭素 12 と炭素 13 の界面を配置したグラフェン単結晶超格子。下はラマン 2D バンドのマッピング像で、緑色が炭素 13、赤色が炭素 12 に対応する。(b)界面数による熱抵抗変化。

構造欠陥による単層グラフェンのフォノン制御とその応用

—グラフェンのフォノン伝導制御と熱電変換の高効率化—

有江隆之、秋田成司
大阪府立大学

グラフェン内の熱伝導は主に格子振動であるフォノンが担っているため、グラフェン内の構造制御により熱伝導をコントロールすることが可能です。電気特性をなるべく変化させることなく熱伝導のみを抑制することができれば、熱電変換材料といった熱マネジメント材料としての応用も期待できます。我々はこれまで同位体元素の質量差によるフォノン周波数のずれに着目し、グラフェン内の同位体によるフォノン伝導制御を試みました。ここでは欠陥を人為的に制御して導入したときの熱電特性と熱伝導の変化を調べました。

導入した欠陥は、酸素プラズマを照射する時間により密度を制御することができます。低欠陥密度では sp^2 結合が sp^3 結合に変化した状態（ステージ 1）であり、さらに欠陥密度を増加させると空孔へと遷移（ステージ 2）することを明らかにしました。それぞれのステージごとのラマン散乱スペクトルを図 1(a)に示します。空孔欠陥へと遷移するステージ 2 では、欠陥を示す D バンドに加え、D'バンドが顕著に現れます。また欠陥密度の変化による熱電特性を測定することにより、キャリアの散乱過程を可視化することが可能であることを示しました。ステージ 1 ではフォノンによる散乱が支配的であるのに対し、ステージ 2 では中性不純物による散乱から電荷不純物による散乱へと遷移する様子が見られます（図 1(b)）。

一方グラフェンを架橋構造にした熱伝導率の測定では、欠陥を導入していないグラフェンでは熱伝導率がおおよそ $2,670\text{W/mK}$ だったのに対し、欠陥を導入したグラフェン（D バンドと G バンドの強度比 $I_D/I_G \approx 2.4$ ）では熱伝導率は 150W/mK と、大幅に減少することを明らかにしました。またこのときの欠陥密度はおおよそ炭素原子 1000 個中、1 個が欠損している状態であると見積もられました。これらの結果は、構造欠陥が効果的にフォノン伝導を抑制し、グラフェン内の熱伝導率を低下させることを示しています。

グラフェン面内への構造欠陥の導入では、同位体の導入とは異なり、フォノン伝導のみならず、電気伝導や熱電特性も影響を受けます。しかしながら欠陥のステージにより減少率が異なり、空孔欠陥が導入されるステージ 2 では、熱伝導率の低下が電気伝導に比べ顕著になります。そのため導入する欠陥のステージを制御することにより、グラフェンの熱電変換の効率を向上させることが可能であることを本研究は示しています。

References: Y. Anno, Y. Imakita, K. Takei, S. Akita, T. Arie, "Enhancement of graphene thermoelectric performance through defect engineering" 2D Mater. **4**, 025019 (2017) /DOI 10.1088/2053-1583/aa57fc.
Y. Anno, M. Takeuchi, M. Matsuoka, K. Takei, S. Akita, T. Arie, "Effect of defect-induced carrier scattering on the thermoelectric power of graphene" Appl. Phys. Lett. **110**, 263501 (2017) /DOI 10.1063/1.4989820.

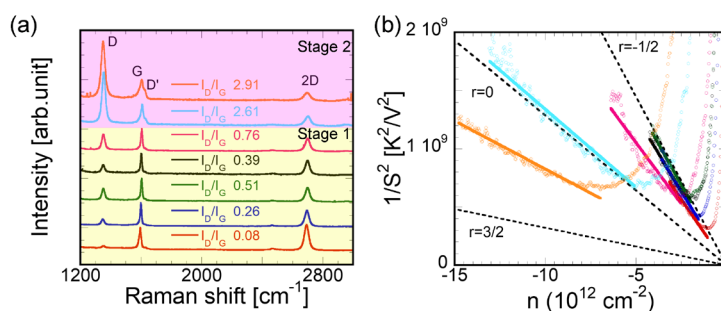


図 1 (a)欠陥密度によるラマンスペクトル変化。 $I_D/I_G=0.76$ までステージ 1、それ以降はステージ 2 に対応する。(b)欠陥密度によるキャリア散乱過程の変化。

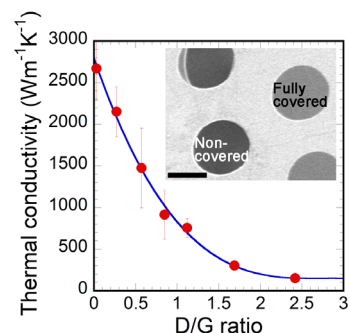


図 2 欠陥密度を増加したときの熱伝導率変化。

指向性熱流と固体集熱の実現

Roman Anufriev, Aymeric Ramiere, Jeremie Maire, 野村政宏
東京大学生産技術研究所

熱は固体中を四方八方に拡散するため、特定の方向に熱をより多く流すことはできず、より高度な熱マネジメントを必要とするデバイスなどで、熱流制御への期待が高まっています。

本研究ではナノスケールで顕著になる、フォノンが平均自由行程内ではまっすぐに移動する性質（弾道性）に着目し、モンテカルロ法によるシミュレーションにより、シリコンナノワイヤーの両端を半円状に加工したナノ構造を直線的に配列することで、熱流に指向性を与えられることを実証しました。フォニックナノ結晶構造を抜けてきたフォノンのうち約20%は、指向性を持つことがわかりました図1（左）。実験的にも確認し、加工しないナノワイヤー構造と比較し、提案した構造が、熱流に指向性を与えていることを示しました。

ナノ構造を放射状に配置してレンズのような働きを持たせ、熱を一点に集中させる、集熱を実現しました。図1（右）のように焦点となる一点から放射状に円孔を配置することで、レンズのような構造を作製しました。図の下から上に熱を流すことで、フォノンは焦点に向かって指向性をもって移動し、熱流が焦点に集中することがシミュレーションからわかりました。集熱の実証実験には、焦点位置とそこから右にずらした位置に熱の逃げ道となるスリットを設けた構造を複数用意し、熱散逸時間を計測しました。スリットが焦点位置にあるときに、最も熱散逸が早く、スリットが焦点位置からずれるにしたがい、熱散逸が遅くなることがわかりました。フォノンの弾道の輸送特性を利用したこのレンズ構造により、世界で初めて固体中の集熱を実現しました。

本研究成果は、固体中での熱流制御に新しい選択肢をもたらし、フォノンエンジニアリング分野の基礎研究を進展させ、高度な熱マネジメントが望まれる半導体分野への応用が期待できます。本研究によって、半導体などにおける放熱性能の向上や、これまでに意識されていなかった熱流の指向性を考慮して積極利用する構造設計、局所的な熱流や温度分布を必要とする系への利用が考えられます。高度な熱制御は、放熱問題の解決などを通じてエレクトロニクスやフォトニクスの更なる発展に寄与することも期待できます。

Reference: R. Anufriev, A. Ramiere, J. Maire, and M. Nomura, "Heat guiding and focusing using ballistic phonon transport in phononic nanostructures," Nat. Commun. 8, 15505 (2017). DOI : 10.1038/ncomms15505 (2017).

R. Anufriev, S. Gluchko, S. Volz, and M. Nomura, "Quasi-ballistic heat conduction due to levy phonon flights in silicon nanowires," ACS Nano 12, 11928 (2018). DOI: 10.1021/acsnano.8b07597.

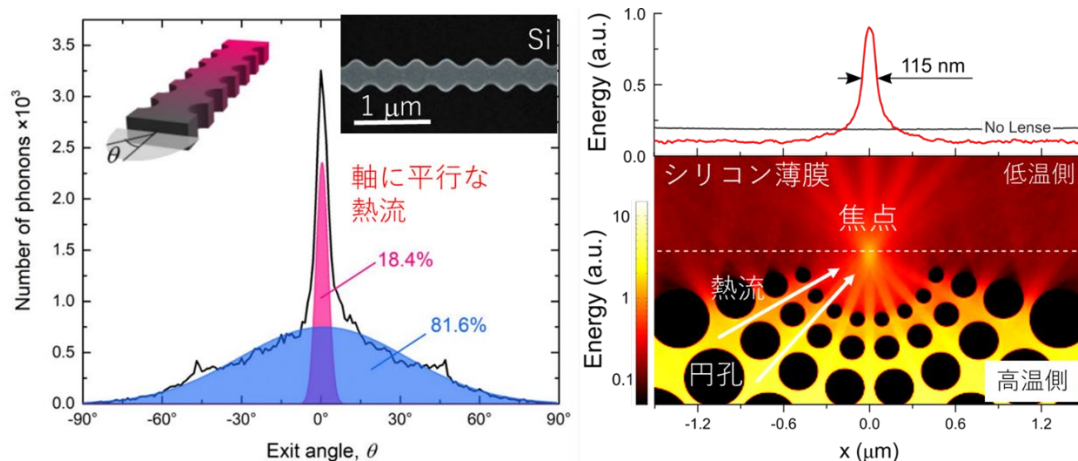


図1 (左) 熱流に指向性を与えるよう加工されたシリコンナノワイヤー構造と、指向性を示すモンテカルロシミュレーションの結果。(右) 円孔を放射状に配置することで、熱流が焦点に向かって流れ、固体集熱が可能になることを示す結果。実験的にも実証された。

表面フォノンポラリトンによる熱伝導の増強

—半導体デバイスの高性能化につながる新たな放熱機構—

Yunhui Wu¹、Roman Anufriev¹、Sebastian Volz^{1,2}、野村 政宏^{1,2}

¹東京大学生産技術研究所、²LIMMS-IIS, CNRS

半導体デバイスの薄膜構造においては、フォノンが薄膜の表面に高頻度で衝突し、ランダムな方向に散乱を受けて移動が阻害され、熱伝導率が大幅に低下します。また、温度が高くなるとフォノン同士の衝突も多くなり、ますます熱伝導率が低下します。高集積化、微細化された多くの薄膜構造を含む半導体デバイスでは、局所的に大きな電力が投入されるため、発熱が激しく熱伝導率も低下することから放熱が難しくなります。

本研究では、表面フォノンポラリトン熱伝導の確実な証拠を得るため、温度が高くなるにつれて熱伝導率が高くなること、および薄い膜ほど表面フォノンポラリトンによる熱伝導率の増強効果が大きくなることを観測しました。30, 50, 100, 200 nmの異なる厚さの4つの薄膜試料を用いて、室温から500度の間で温度を変えて熱伝導を測定しました。

従来、熱伝導率は物質の温度が上昇すると熱伝導率が低下し、厚さ100 nmと200 nmの薄膜（緑と青点）では、その様子が観測されました。200 nmの薄膜は、温度の2乗で減少しており、十分に厚い材料と同様に音響フォノンが主に熱伝導を担うことが分かりました。しかし、厚さ100 nmの薄膜では、減少傾向が薄れ、厚さ30 nmと50 nmの薄膜（黒と赤点）では、逆に熱伝導率が増加する様子が観測されました。これは、表面フォノンポラリトンによる熱伝導が薄膜で重要な熱伝導の担い手となっている確実な証拠であるといえます。表面フォノンポラリトンは、薄膜の面内寸法で制限される1000倍程度以上の非常に長い平均自由行程を持っていることが分かりました。これは、フォノンが光と混合状態を形成し、桁違いに高速で低損失な伝搬を実現したためです。厚さ30 nmと50 nmの薄膜では、フォノン熱伝導と同等になり倍増することが明らかになりました。

本研究成果は、熱伝導率が著しく低下する薄膜構造で表面フォノンポラリトンが熱伝導に大きく貢献し、主な放熱機構にもなり得ることを示しました。伝導、対流、放射に加えて、光の力を借りたフォノンによる第4の放熱機構の利用に道筋を示したといえます。高集積化と微細化が進んだ半導体デバイスにおける放熱問題の緩和が期待でき、半導体分野への応用が見込めます。局所発熱の激しい部分から伝導に加えて表面フォノンポラリトン熱伝導を利用して放熱することで、デバイスのさらなる高性能化に寄与すると期待されます。

Reference: Y. Wu, J. Ordonez-Miranda, S. Gluchko, R. Anufriev, D. De Sousa Meneses, L. Del Campo, S. Volz, and M. Nomura, "Enhanced thermal conduction by surface phonon-polaritons," *Sci. Adv.* 6, eabb4461 (2020). DOI: 10.1126/sciadv.abb4461

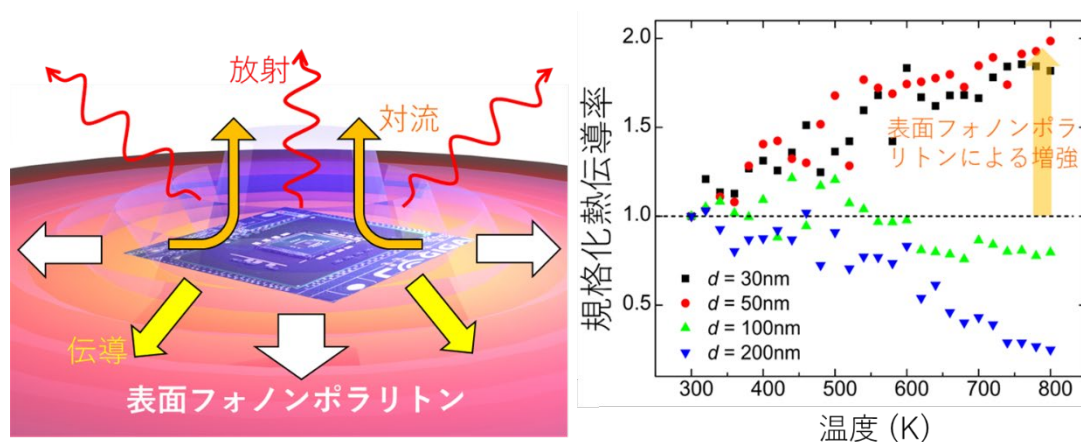


図1 半導体薄膜における表面フォノンポラリトンの熱伝導は、従来の主要な熱輸送である伝導、放射、対流に次ぐ放熱機構となりうる。室温 (295 K) で規格化された熱伝導率の温度依存性。

熱の波動性を用いた熱伝導制御

Jeremie Maire, Roman Anufriev, 野村政宏
東京大学生産技術研究所

半導体中の熱伝導は、主にフォノンの移動で説明され、ほぼ全ての熱伝導現象は粒子的な描像で説明されてきた。しかし、熱の本来の姿は原子や分子などの振動であり波動性を持つため、コヒーレンスが保たれた周期構造中では干渉を起こし、熱伝導が変化する可能性が指摘されていた。これは、熱制御を粒子的描像から波動的描像で表現する領域に拡張する第一歩になるため、多くの研究グループが興味をもって挑戦してきた。しかし、周期構造を形成し熱伝導の変化を観測しても、その変化が干渉効果に起因するのか、構造形成によって新たに導入された界面におけるフォノン散乱効果に起因するのかが区別できず、明確な実証は困難であった。

本研究では、その実証を一つの目的として行い、高精度で測定可能な、レーザ光を用いた非接触型の測定系を構築し様々なフォノンニックナノ構造における熱伝導を測定した。図 1(a)に示すような厚さ 145 nm の単結晶シリコン薄膜に周期 300 nm で円孔を形成した構造（フォノンニック結晶）と、その周期性をわざと乱した構造を作製し、熱伝導を比較した[図 1(b)]。構造は、下部のシリコン酸化膜を除去することで両持ち梁構造となっており、測定したい構造を通じてのみ熱が散逸する構造になっている。中央のアルミ薄膜に加熱用パルスレーザ光と温度変化による反射率変化を観測する連続光を集光し、熱散逸時間を測定した。295 K では、フォノン-フォノン散乱頻度が高く、熱フォノンのコヒーレンス長が周期より短いため、熱伝導は人工結晶の周期の乱れに鈍感である。一方、約 10 K 以下になるとコヒーレンス長が長くなって熱の波動性が顕著になり、熱フォノンは周期構造を感じて伝導する。4 K における実験では、円孔位置のずれ量が小さくなり、完全結晶に近づくにつれて散逸時間が長くなる様子が観測された。これは、直感に反する結果のように感じるが、完全結晶ではブリルアンゾーンの高対称点近傍で群速度が大幅に抑制されるため、熱伝導率が大幅に低減されるという物理で説明される。

本研究により、十分に低温では、トップダウン的に高い設計自由度を持ったフォノンニック結晶系で、バンドエンジニアリングに基づいたフォノン輸送・状態密度制御が可能であることが実証された。また、フォノン輸送制御にとどまらず、様々なフォノンモードの集団輸送である熱伝導まで制御できることが実証された。今後、フォノンバンドエンジニアリングに基づいた、より高度なフォノン場・輸送制御技術および熱伝導制御技術の実現が期待でき、フォノンハイブリッド量子科学分野への応用が見込まれる。

Reference: J. Maire, R. Anufriev, A. Ramiere, R. Yanagisawa, S. Volz, and M. Nomura, "Heat conduction tuning by wave nature of phonons," *Sci. Adv.* 3, e1700027 (2017). DOI: 10.1126/sciadv.1700027

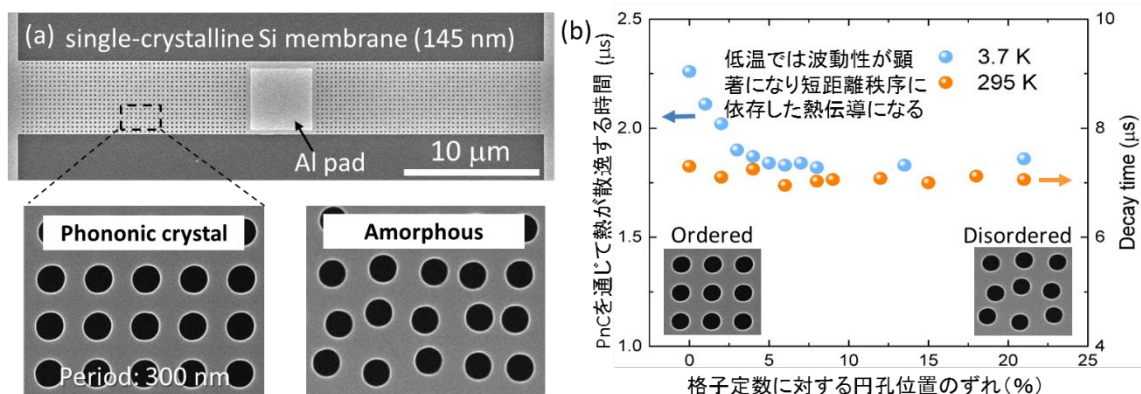


図1 フォノンニック結晶と周期性を乱した系での熱拡散の違いを観測し、低温では熱の波動性に基づいた干渉効果により熱伝導が変化することを実証した。(a) 測定したシリコンフォノンニック構造の SEM 写真。(b) 短距離秩序を変えて作製した構造の熱散逸時間の比較。

フォニック結晶導波路を用いた 超音波振動のパルス圧縮技術

黒子 めぐみ^{1,2}、畑中 大樹¹、山口 浩司^{1,2}
¹NTT 物性科学基礎研究所、²東北大学理学研究科

鐘をたたくと、その形や大きさによってきまる特定の周波数の音が発生することはよく知られています。このように機械的な振動に対して共振を持つ構造を機械共振器と呼びます。この音の高さは構造の大きさに反比例するため、最新のナノ加工技術を用いて作製した微小サイズの機械共振器では、超音波領域の高い周波数の振動が引き起こされます。最新のスマートフォンでは、この現象を利用した表面弾性波フィルタや発振素子などが、送受信した高周波信号の処理に応用されています。

これまで NTT の研究チームでは、微小機械共振器の技術を用いて作製したフォニック結晶と呼ばれる新しい「音の人工結晶」を用い、超音波振動の伝搬を制御する技術の研究を進めてきました。研究で使用したフォニック結晶は、図 1 に示すように太鼓の膜を一方方向に伸ばしたような微小な振動を伝える路（導波路）から構成されています。導波路端に設置した電極（図中右上）にパルス状の交流電圧を加えることで、圧電効果を介して超音波振動のパルスを誘起することができます。導波路における振動をレーザー干渉計を用いて計測することにより、フォニック結晶における振動パルスの伝搬速度（群速度）の周波数依存性、いわゆる群速度分散を実験的に明らかにすることができます。

一般に、群速度分散を持つ導波路では、異なる周波数の波が異なる速度で伝搬するため、異なる周波数成分を含んでいるパルスの形状は徐々に広がっていきます（図 2 上）。しかし、逆にこの性質を利用し、導波路端から群速度分散の効果をキャンセルするように周波数変調した振動パルスを入力すると、パルス形状は伝搬とともに狭くなり、結果としてピークにおける振動振幅を増大させることができます（図 2 下）。

今回、作製したフォニック結晶の群速度分散を精密に測定し、印加するパルスを最適化することにより、実際にパルス圧縮が実現できることを実証しました。この技術では、超音波振動波形の圧縮比や圧縮の場所、タイミングを精密に制御できるようになり、微小機械共振器を用いた信号処理デバイスの小型化や高集積化に繋がることが期待されます。今後は、さらに、素子の微細化を進めていき、ギガヘルツの超音波振動で動作する高周波フォニック結晶素子の作製も進めていきます。この構造は AlGaAs/GaAs のヘテロ構造で構成されているため、電子系やスピン系、フォトンなどとのハイブリッド構造への応用が期待されます。

References M. Kurosu, D. Hatanaka, K. Onomitsu, and H. Yamaguchi, “On-chip temporal focusing of elastic waves in a phononic crystal waveguide”, Nature Communications 9, 1331 (2018). DOI: 10.1038/s41467-018-03726-7

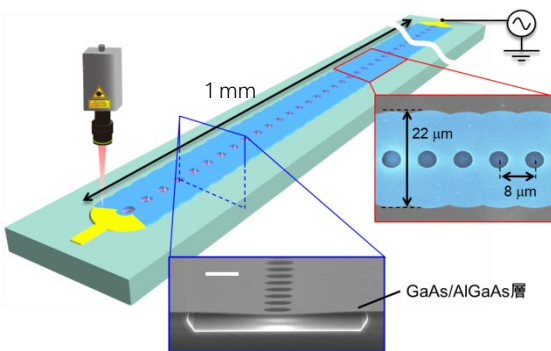


図1: フォニック結晶導波路の構造

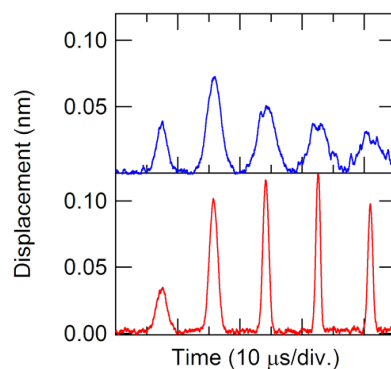


図 2: パルス伝播。分散効果によるパルス拡張（上）と圧縮（下）

一次元フォノンニック結晶中の弾性波トポロジカル局在状態

金仁基^{1,2}、荒川泰彦³、岩本敏¹⁻³

¹ 東京大学先端科学技術研究センター、² 東京大学生産技術研究所、

³ 東京大学ナノ量子情報エレクトロニクス研究機構

物性科学の分野ではバンドトポロジーの概念を活用して新しい材料や物質相が多く見出されており、その応用を目指した研究が進んでいます。この概念を周期構造中の光や音波、弾性波に適用し、その物理を探索するとともに新たな機能を実現しようとする試みが注目されています。我々のグループでもフォノンニック結晶やフォノンニック結晶を用いた光や弾性波のトポロジカル状態の実現とその応用を目指した研究を進めています。本研究では、完全フォノンニックバンドギャップを持つものの、そのトポロジカルな性質が異なる2つの1次元フォノンニック結晶を設計し、その界面に現れる弾性波のトポロジカル局在状態を観測することに成功しました。

フォノンニック結晶の単位構造は大きさと厚みの異なる2つの直方体ブロックで構成されており、バンドのトポロジーはその形状を変えることで制御出来ます。我々は、トポロジカルな性質が異なる共通バンドギャップを持つ2種類の構造を見出しました。この2つの構造を接合するとその接合界面にはトポロジカル局在状態が形成されます(図1)。図2(青線)は、石英ガラスでできた試料(図1)の端面から入射した弾性波の透過スペクトルの測定結果です。バンドギャップ中にトポロジカル局在モードに起因する鋭い透過ピークがみられ、計算(黒線)とも良い一致を示しています。この局在状態の周波数は約200kHzで、共振器としてのQ値は約5,700でした。さらに、弾性波により生じる歪に起因して光の屈折率が変化する光弾性効果を利用して、このトポロジカル局在状態の空間分布のイメージングにも成功しました。

連続体中の弾性波では縦波や横波、その混成波が存在するためバンド構造が複雑になり、完全バンドギャップ中のトポロジカル状態の実現は困難でした。今回の成果は、連続体で完全フォノンニックバンドギャップ中のトポロジカルな弾性波状態をはじめて実現したもので、Appl. Phys. Express に掲載され2018年のSpotlight論文の一つに選ばれました。サイズ縮小による高周波化やオプトメカ結晶への展開などにより、弾性波制御や光-振動ハイブリッド系などへの応用が期待されます。

Reference : I. Kim, S. Iwamoto, and Y. Arakawa, "Topologically protected elastic waves in one-dimensional phononic crystals of continuous media", Appl. Phys. Express 11, 017201 (2018). DOI: 10.7567/APEX.11.017201

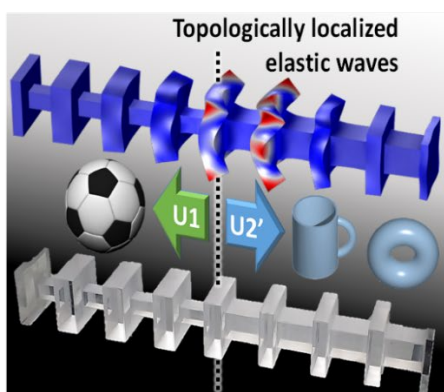


図1 石英一次元フォノンニック結晶(下)とトポロジカル局在状態の計算結果

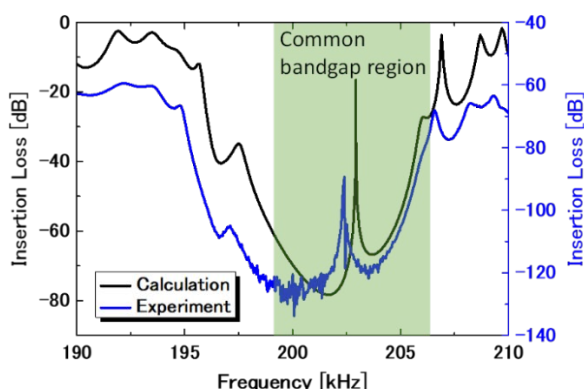


図2 弾性波の透過率スペクトル (黒: 計算、青: 実験)

非対称人工格子によるスピン・フォノン結合制御とフォトン励起

山原弘靖¹、Md. S. Sarker¹、関宗俊¹、田畑仁¹
¹ 東京大学大学院 工学系研究科 電気系工学専攻

希土類鉄ガーネット ($R_3Fe_5O_{12}$ 、RIG、R=希土類元素) はフェリ磁性絶縁体であり、ネール温度が高温 ($T_N > 550K$) であるため、室温で安定な磁化を示す。RIG は巨大な磁気光学効果を示すことから工業的には光アイソレータや光スイッチなどに応用されている。一方、RIG のバルクにおける結晶構造は $Ia3d$ に属する立方晶であり、その中心対称性から自発電気分極を生じえない。もし双極子とスピンの強制的秩序が共存することができれば、電気磁気効果 (ME 効果) によるスピン波の電界制御や多値記憶メモリとしてスピントロニクス素子への応用が期待される。本研究では $Gd_3Ga_5O_{12}$ (GGG) 基板上に成膜した $Sm_3Fe_5O_{12}$ (SmIG) 薄膜において自発分極と自発磁化が共存することを示した。基板と薄膜には 1.17% の格子ミスマッチが存在し、転位が生じる臨界膜厚は 60 nm が見積もられる。GGG 基板上に堆積した SmIG 薄膜はエピタキシャル歪みと格子緩和により、基板との界面から正方晶、傾斜歪み、立方晶の三層構造をとる。傾斜歪みにおいては、不均一な歪みの存在によってフレクソエレクトリック分極 (flexoelectricity) $P = \mu(\partial u / \partial x)$ (ここで μ 、 $\partial u / \partial x$ はフレクソエレクトリック係数と傾斜歪み) が発生する。傾斜歪み構造の存在を STEM で確認し、傾斜歪みにおける分極の存在は非線形誘電率顕微鏡 (SNDM) を用いて観察した (Fig.1)。その結果、負に分極したナノドメインが存在し、ドメインサイズは約 30 nm で転位密度に対応していることが明らかとなった。以上の結果、傾斜歪みの導入は自発磁化と自発分極の共存を実現し、新規多機能材料を開発する有望な技術だと考えられる。一方、超低ダンピングを示す $Y_3Fe_5O_{12}$ (YIG) 薄膜を用いたスピン波デバイスの作製にも取り組んでおり、局所加熱によるスピン波の動的変調技術を開発した。一對のコプレーナ線路間に DC 電源に接続した Pt ストライプを設置し、局所加熱によって YIG 薄膜の磁気特性を変化させることで、スピン波スペクトルの共鳴周波数及び信号強度を変化させた。この成果はデータ処理に必須となる簡便なスピン波変調技術を提供し、より複雑な熱分布を持つスピン波素子にも応用できると考えられる。

Reference: Md S. Sarker, H. Yamahara, H. Tabata, "Current-controlled magnon propagation in Pt/Y₃Fe₅O₁₂ heterostructure", Appl. Phys. Lett. *Accepted*. Md S. Sarker, H. Yamahara, H. Tabata, "Spin wave modulation by topographical perturbation in Y₃Fe₅O₁₂ thin films", AIP Adv., 10, 015015 (2020).

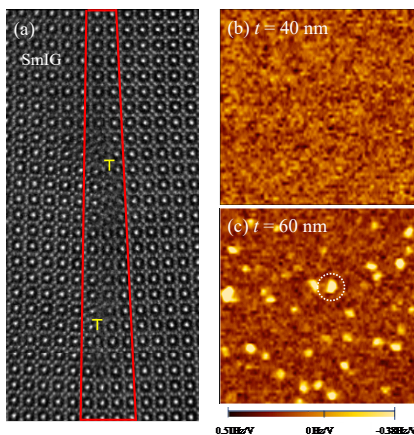


図1 (a) 傾斜歪み SmIG の STEM 像、(b,c) 正方晶(b)および傾斜歪み(c) SmIG 薄膜の SNDM 像。明色は負的分極を示す。

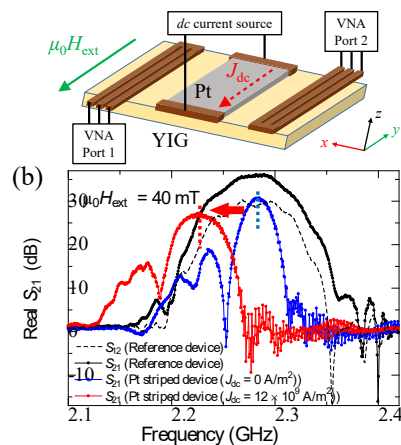


図2 (a) スピン波デバイスの概略図、(b) YIG 単層デバイス(黒線)と Pt/YIG 二層デバイス(電流無:青線、電流有:赤線)の S_{21} スペクトル。電流によるスピン波変調を示す。

ゲート制御量子ドットを用いた 機械共振器の高感度振動検出

岡崎雄馬、I. Mahboob、小野満恒二、佐々木智、山口浩司
日本電信電話株式会社 NTT 物性科学基礎研究所

GaAs/AlGaAs ヘテロ構造により作製した機械共振器は、巨視的な機械振動と半導体量子構造における様々な電子状態をコヒーレントに結合させる新しいカテゴリーのハイブリッド量子系として期待されています。その実現には、共振器が有する微細な機械振動と電子の自由度をいかにして結合させるかが、最も重要な技術的課題となります。半導体量子ドットはその役割を担う重要な微細構造素子として注目されてきましたが、これまで実験はあまり進んでいませんでした。我々は GaAs 量子ドットを両持ち梁形状に組み込んだ構造を作製することにより、量子ドットによって機械共振器の振動を高感度に検出することに成功しました。

図(a)に作製したデバイスを示します。図(b)に示すように、量子ドットは共振器の片側の支持部に形成されています。このデバイスにおいて量子ドットに流れる電流のパワースペクトル密度を測定することにより、熱振動による梁の動きを高感度に検出しました。その温度依存性より、80 mK における最小検出変位は $63 \text{ fm/Hz}^{1/2}$ となり、その結果より求めた位置分解能として 170 fm という値が求まりました。この値は、実験に用いた機械共振器の量子力学的な零点振動のわずか 70 倍という極めて小さなものでした。さらに、量子ドットにおける単一電子トンネルが機械振動に対して反作用を与え、ゲート電極に印加する電圧を制御することにより、機械振動の減衰や増幅を実現できることが明らかになりました。この結果は、機械共振器と電子状態のコヒーレント結合に向けた第一歩であり、低次元電子系における微視的な量子現象を、機械共振器という巨視的な系において実現できる可能性を秘めています。

Reference : Y. Okazaki, I. Mahboob, K. Onomitsu, S. Sasaki and H. Yamaguchi, “Gate-controlled electromechanical backaction induced by a quantum dot”, Nature Communications, 7, 11132 (2016). DOI: 10.1038/ncomms11132

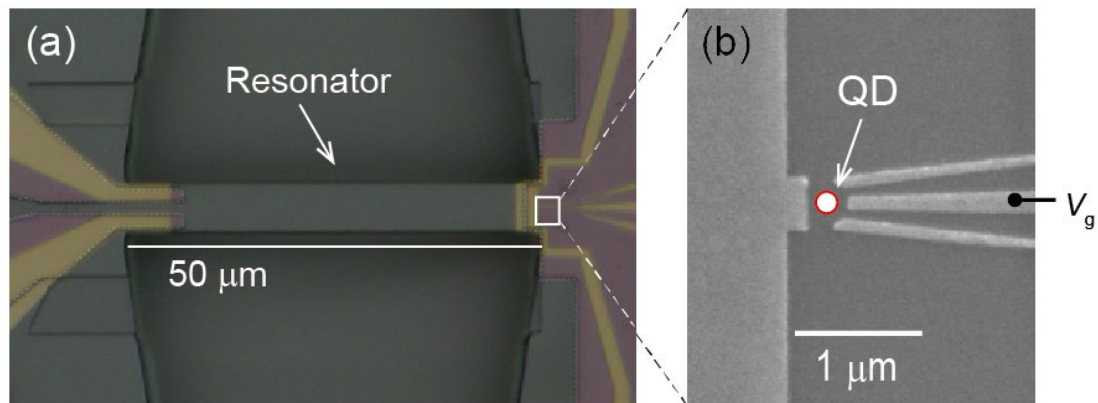


図 (a)作製したデバイスの光学顕微鏡写真。長さ $50 \mu\text{m}$ の両持ち梁が GaAs/AlGaAs ヘテロ構造により構成されている。(b)両持ち梁の支持部近傍の電子顕微鏡写真。ゲート制御量子ドットが梁の支持部に作製されている。

メカニカル振動子による核スピン制御

岡崎雄馬^{1,2}、I. Mahboob¹、小野満恒二¹、佐々木智¹、中村秀司²、金子晋久²、山口浩司¹

¹日本電信電話株式会社 NTT 物性科学基礎研究所

²国立研究開発法人 産業技術総合研究所

原子核の自転運動に相当する核スピンは、磁場中に置かれると固有の歳差運動をします。この歳差運動は核磁気共鳴法において広く利用されていますが、最近では量子情報を記録する量子メモリや磁場に敏感である性質を利用した磁場センサなど、量子技術においても注目されています。今回、核磁気共鳴の周波数が固体中のひずみに対して敏感に変化するという性質を利用し、微細なメカニカル振動子を用いて核スピンを制御することに成功しました。

図1に示すように、作製した振動子は両もち梁と呼ばれる構造を有し、圧電半導体である GaAs と AlGaAs のヘテロ接合構造を微細加工することにより作製しました。圧電効果を用いてこの構造を電氣的に振動させることにより、梁構造の根元の部分に周期的なひずみを発生させ、その領域の核スピンの振る舞いを変化させることができます。実験では、周期ひずみによる磁気共鳴周波数の変調に成功した他、梁構造の振動周波数だけ離れたところに共鳴ピークが現れるサイドバンド共鳴と呼ばれる新しい核磁気共鳴現象の観測に成功しました。観測した実験結果は理論計算の結果とよく一致していることから、振動子によって発生させたひずみによる効果であることが実証されました。

Reference: Y. Okazaki, I. Mahboob, K. Onomitsu, S. Sasaki, S. Nakamura, N. Kaneko, and H. Yamaguchi, “Dynamical coupling between a nuclear spin ensemble and electromechanical phonons”, Nature Commun. 9, 2993 (2018). DOI: 10.1038/s41467-018-05463-3

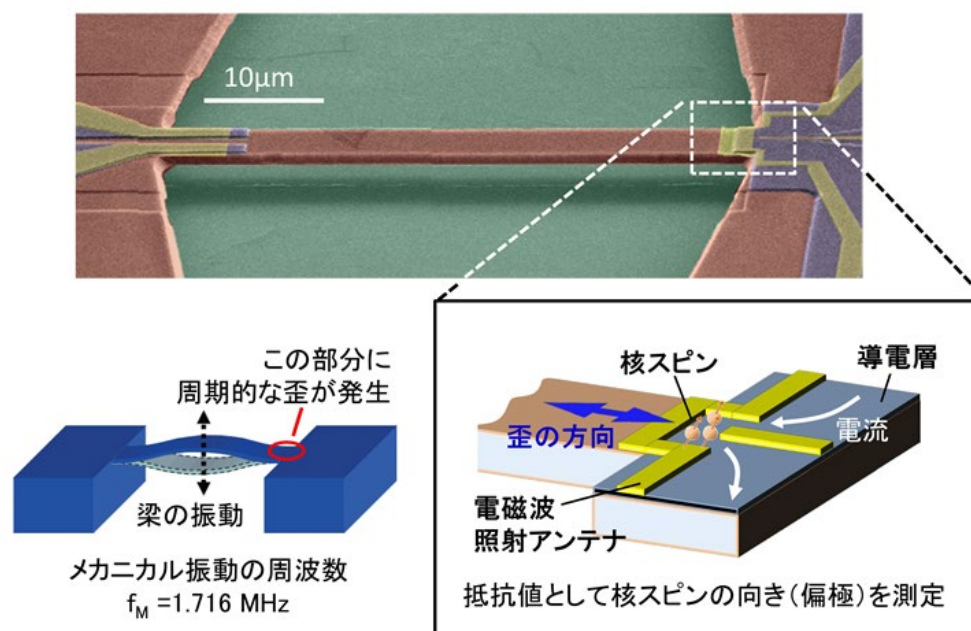


図1 各スピン制御を実現した半導体メカニカル素子

機械振動を用いた半導体励起子の制御

– 歪による Dark 状態と Bright 状態の結合を実現 –

太田竜一、岡本創、俵毅彦、後藤秀樹、山口浩司
NTT 物性科学基礎研究所

半導体中の電子-正孔対（励起子）は光と電流を変換する電子状態として、光源、検出器、変調器や増幅器など様々な半導体光デバイスに用いられています。この励起子の光学的性質は電子や正孔のスピン状態に基づく光学選択測に従い、光学遷移が許容された Bright 状態と禁止された Dark 状態に分類されます。Dark 状態は発光緩和が原理的に起こらないことから励起子寿命が長く、量子情報やスピントロニクス分野において重要な役割を担っております。しかし、光による励起や制御が難しいためその活用事例は限られておりました。我々は、機械振動で生じる面内 1 軸性歪が結晶の回転対称性を破ることから、振動により Dark 状態と Bright 状態の間に相互作用が生まれ、Bright 状態を介した Dark 状態への光学遷移が可能となることを見出しました。これまで Dark 状態と Bright 状態の結合には磁場が用いられていましたが、巨大磁場は変調が難しいことから従来手法では結合状態の動的制御が困難でした。今回実現した手法では機械振動子の高周波化によりギガヘルツ領域での動的結合制御が可能となるため、光メモリへの応用や、Dark 状態と Bright 状態の断熱的遷移など、基礎と応用の両面での活用が期待されます。

実験では、まず GaAs などの半導体多層膜から機械振動子構造を作製しました（図 1）。次に振動子を外部から振動させ、その振動周期に同期した光パルスを用いて励起子の発光スペクトルを測定しました。本手法では光パルスと振動の相対位相を変えることで振動中の任意のタイミングにおける励起子の発光特性を評価することができます。図 2(a) は振動 1 周期中の Dark 状態と Bright 状態からの発光強度を示しています。機械振動により両状態の発光エネルギーは近接しますが、交差することなく発光強度が入れ替わります。これは Dark 状態と Bright 状態の結合を表しています。また、Dark 状態からの発光強度は Bright 状態との結合により増加しており、このことは本来禁止されていた Dark 状態への光学遷移が Bright 状態を介することで可能となったことを示しています。これらの実験結果は半導体バンド理論に基づく数値計算と一致しており（図 2(b)）、実験で観測された Dark 状態と Bright 状態の結合は機械振動で生じる歪に起因することが確かめられました。

本研究成果は歪を利用した半導体励起子の新しい制御技術を提案するものであり、光デバイスの高速制御手法として、また半導体物性の新規探索手法として期待されます。

Reference: R. Ohta, H. Okamoto, T. Tawara, H. Gotoh, and H. Yamaguchi, “Dynamic control of the coupling between dark and bright excitons with vibrational strain”, *Physical Review Letters*, 120, 267401. (2018). DOI: 10.1103

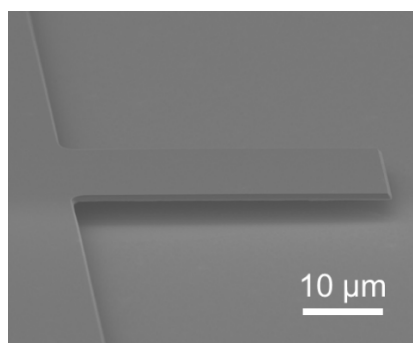


図1 半導体多層膜から作製された機械振動子の操作電子顕微鏡像

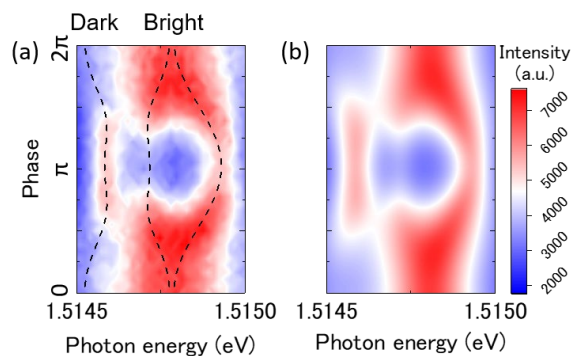


図2 Bright 状態と Dark 状態からの発光スペクトル (a) 実験結果 (b) 数値計算

電気機械共振器における Ising スピン相互作用

Imran Mahboob、岡本 創、山口 浩司
NTT 物性科学基礎研究所

調和振動子において、ばね定数などのパラメータを共振周波数とは異なる周波数で変調するものをパラメトリック振動子と呼びます。その最もよく知られた例はブランコですが、昨今ではマイクロ波増幅器から光波長変換器に至る幅広い領域で用いられています。その中で縮退パラメトリック振動子は、ばね定数を周波数の2倍の周波数で変調したもので、時間推進の対称性が破れることにより、二つの異なる位相状態の振動が現れます。この二状態は古典的なスピン状態とみなすことが可能であり、それらがお互いに結合したネットワークを演算装置として用いる手法が提案されています。このような結合パラメトリック振動子からなるネットワークは「Isingマシン」と呼ばれており、最適化問題の解を効率的に求める技術として研究が進んでいます。

今回我々は、このような結合パラメトリック振動子として電気機械共振器を用い、それらの間に Ising 型の相互作用を実現することに成功しました。具体的には、二つの両持ち梁形状の GaAs/AlGaAs 圧電共振器が結合した構造を作製し、それらが有する二つの曲げ振動モードにおける位相状態の相関を調べました。図 1 (a) は作製したデバイスと実験セットアップの模式図です。 $2\omega_S$ と $2\omega_A$ の二つの交流電圧を印加することにより、二つのモードのパラメトリック振動を引き起こします。さらに ω_p のポンプ電圧を加えることにより、二つの振動モードの結合を生み出します。図 1 (b) は二つのモード間の相関係数を測定した結果です。ポンプとして加えた交流電圧の位相を変えることにより、二つのモード間の結合を連続的に制御できることが示されました。

Reference: I. Mahboob, H. Okamoto, and H. Yamaguchi, “An electromechanical Ising Hamiltonian”, Sci. Adv. 2 : e1600236 (2016). DOI:10.1126/sciadv.1600236.

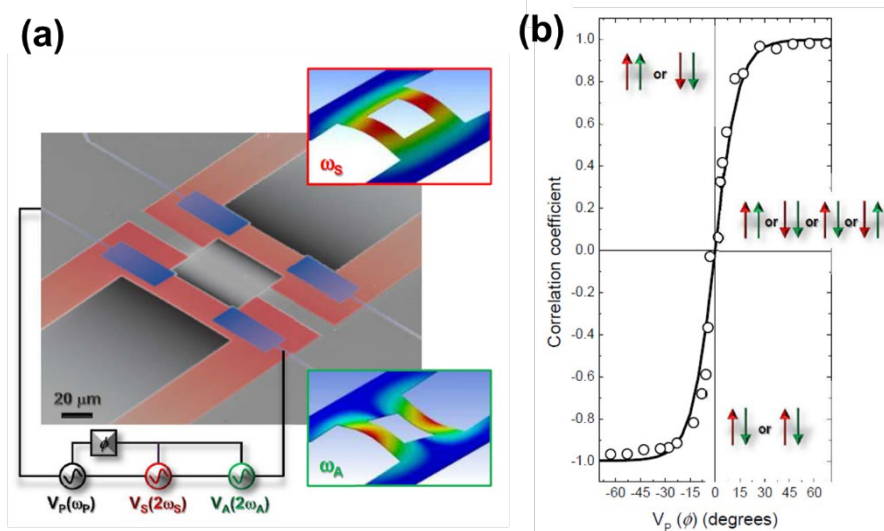


図 1 (a) 実験に用いたセットアップの模式図。対称モードと反対称モードの両者のパラメトリック振動が $V_S(2\omega_S)$ and $V_A(2\omega_A)$ の交流電圧で引き起こされ、それらの結合がポンプ電圧 $V_p(\omega_p)$ により引き起こされる。(b) ポンプ電圧の位相を変化させたときの二つの位相状態の相関係数。

MEMS を用いた光－熱－機械系ハイブリッド構造 テラヘルツボロメータ

張 亜¹、渡辺康行¹、細野優¹、邱博奇¹、牛天野¹、近藤諒佳¹、長井奈緒美¹、平川一彦^{1,2}
¹東京大学生産技術研究所、²東京大学ナノ量子情報エレクトロニクス研究機構

テラヘルツ電磁波は、さまざまな物質と相互作用し、その構造や機能などを調べるのに適しています。一般に、広い周波数範囲に感度を持つテラヘルツ検出器では、テラヘルツ電磁波を一旦熱に変換し、それによる検出素子の温度上昇を信号として読み出すことを原理とする検出素子（ボロメータ）が用いられてきました。しかし、高感度を得るために、多くの場合、検出素子を極低温まで冷却する必要があり、テラヘルツ技術が広く応用されるためには、冷却を必要としない高感度・高速なテラヘルツ検出技術の開発が必要不可欠でした。我々は、MEMS 技術を用いて作製した半導体微小機械共振器構造の共振周波数が、テラヘルツ電磁波の入射により高感度に変化する現象を用いた新しいテラヘルツ検出器を開発しました。

半導体微細加工技術を用いて実現される微小な機械構造である MEMS (microelectromechanical systems) 技術を用いると、両持ち梁構造のようなミクロンサイズの微小な半導体機械共振器構造を実現することができます。このような微小機械共振器構造は、室温でも数千程度の高い Q 値を持った非常に急峻な共振スペクトルを示すことが知られています。

我々は、GaAs 系半導体で作製した長さ約 100 μm 程度の MEMS 両持ち梁共振器構造にテラヘルツ電磁波が入射すると、テラヘルツ電磁波の吸収による MEMS 梁の温度上昇で、梁が熱膨張し、ちょうどギター弦の張力が緩むように、共振周波数が敏感に低下することを見いだしました。今回開発したテラヘルツ検出素子は、この周波数変化の大きさから入射したテラヘルツ電磁波の強度を測ることができる素子です。

この素子は従来の室温動作熱型テラヘルツ検出器（焦電検出器や酸化バナジウムボロメータ）と同等の感度を持ちつつ、さらにそれらに比べて 100 倍以上の高速なテラヘルツ検出が可能で、また、半導体微細加工技術を用いて作製できることから、将来の集積化にも優れています。

今回、冷却が不要で簡便に使える高感度・高速テラヘルツ検出器が実現されたことから、本素子がさまざまなテラヘルツ計測器に組み込まれ、化学、薬学などの基礎から応用に関わる広い分野に大きな発展をもたらすと期待されます。

Reference: Ya Zhang, Suguru Hosono, Naomi Nagai, Sang-Hun Song, and Kazuhiko Hirakawa, “Fast and sensitive bolometric terahertz detection at room temperature through thermomechanical transduction”, *Journal of Applied Physics* **125**, 151602 (2019); <https://doi.org/10.1063/1.5045256> など

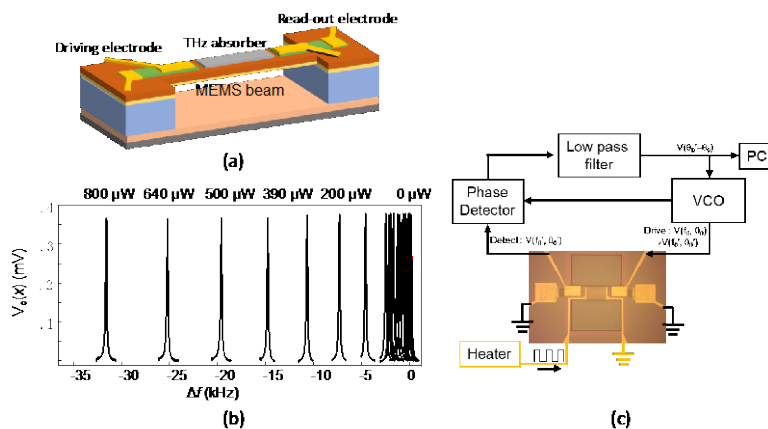


図1 (a) GaAs/AlGaAs 半導体ヘテロ構造を用いて作製する MEMS 両持ち梁構造、(b) MEMS 梁への入力パワーに対する共振周波数のシフト、(c) 位相同期回路 (PLL) を用いた信号読み出し回路

ナノギャップ電極を用いた単一分子へのテラヘルツ電磁波の集光と巨大な電場増強効果の観測

吉田健治¹、柴田憲治¹、平川一彦^{1,2}

¹東京大学生産技術研究所、²東京大学ナノ量子情報エレクトロニクス研究機構

様々な機能を有する分子をエレクトロニクスに応用することは、大きな可能性を秘めています。我々は、電子を極限的に小さな領域に閉じ込め、さらに化学的な機能を用いることができる単一分子を活性層とする極限ナノトランジスタ (図 1(a)) を作製し、電子がどのように分子を経由して伝導するのかを調べる研究を行ってきました。特に、最近ではテラヘルツ電磁波を用いて電子伝導のダイナミクスの解明と制御に関する研究を行っています。

一般に、テラヘルツ電磁波の波長は 100 μm 程度もあり、1 nm 以下の単一分子とは相互作用が極めて小さいと言う問題があります。我々は、単一分子トランジスタ構造のソース・ドレイン電極をテラヘルツ電磁波のアンテナとして用いることにより、回折限界を 10 万倍も越えて、テラヘルツ電磁波を単一 C_{60} フラーレン分子に集光させることに成功しました。

図 1 (b) に単一 C_{60} 分子を活性層とするトランジスタの伝導度のカラーマップを示します。この試料に波長 119 μm のテラヘルツレーザー光を照射したところ、通常の分子軌道を経由したトンネル伝導に加えて、その上下に光子エネルギー 10 meV の整数倍だけ離れたところに新しい伝導チャンネルが形成されることを見いだしました。この現象は、分子内の量子準位が強いテラヘルツ電界に揺さぶられて、フォトンサイドバンドに分裂し、新しい伝導チャンネルが形成されたことを表しています (光子支援トンネル効果)。さらに、フォトンサイドバンドの形成は、ナノギャップ電極により挟まれている単一 C_{60} 分子が、数百 kV/cm オーダーの非常に強いテラヘルツ電界を感じていることを意味しています。今回の実験では、試料外のテラヘルツ電界は数 V/cm 程度ですので、ナノギャップ電極によりテラヘルツ電界が 10 万倍も増強されていることを意味します。この非常に大きなテラヘルツ電界増強効果は、波長 λ (約 100 μm) のテラヘルツ電界がナノギャップ電極の間隔 d (約 1 nm) に閉じ込めるため、 λ/d 倍 (約 100 $\mu\text{m}/1 \text{ nm} = \text{約 } 10^5$ 倍) に増強されると理解することができます。

本研究では、ナノギャップ電極が nm サイズのナノ構造のテラヘルツダイナミクスを明らかにする上で適しているとともに、10 万倍もの非常に巨大な電界増強効果をもたらすことを示しました。今後、原子スケールの新たな物理を探る上で非常に貴重な機会を提供すると期待されます。

Reference: K. Yoshida, K. Shibata, and K. Hirakawa, Phys. Rev. Lett. **115**, 138302 (2015); DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.115.138302>

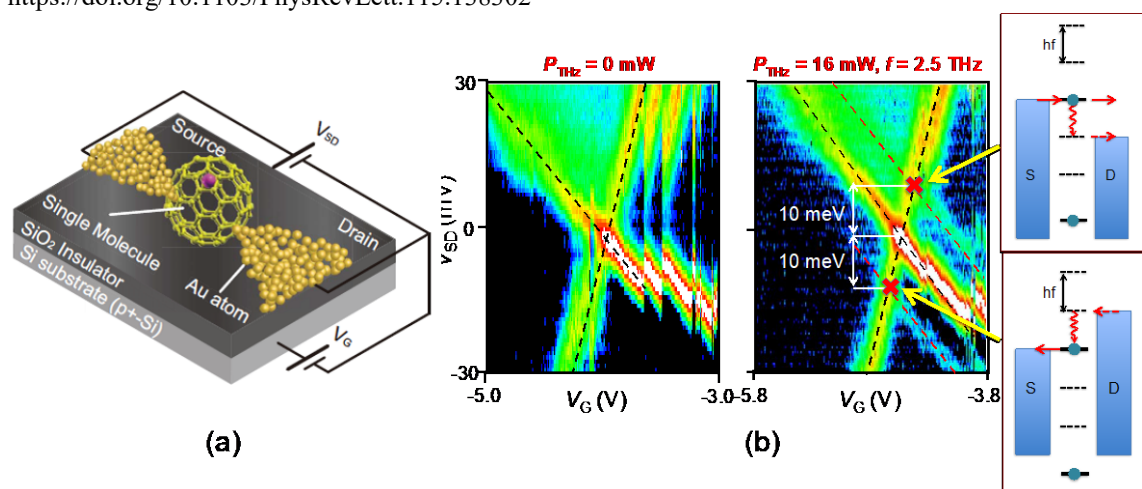


図1 単一分子とテラヘルツ電磁波の相互作用 (a)単一分子トランジスタ構造、(b)テラヘルツ電磁波を照射しないとき(左)と照射したとき(右)の単一 C_{60} 分子トランジスタのクーロン安定化ダイアグラム。

テラヘルツ電磁波で単一分子の超高速振動を観測

杜少卿¹、吉田健治¹、張 亜¹、平川一彦^{1,2}

¹東京大学生産技術研究所、²東京大学ナノ量子情報エレクトロニクス研究機構

テラヘルツ電磁波は、さまざまな分子の振動周波数と整合し、分子の構造や機能などを調べるのに適しています。しかし、テラヘルツ電磁波の波長が 100 μm 程度と非常に長いため、これまでは電磁波の回折限界のために、非常に多数の分子の「平均的な情報」しか得ることができませんでした。

光（一般的には電磁波）をレンズや鏡を用いて集光するとき、「回折限界」という制約があります。このため波長が 100 μm 程度のテラヘルツ電磁波をレンズや鏡で集光しても、波長の 10 万分の 1（約 1 nm）程度しかない 1 分子からの信号を得ることは不可能です。

これまで、我々は金属電極に 1 ナノメートル程度の隙間を設け（ナノギャップ電極）、その隙間に 1 分子を捕えた「単一分子トランジスタ構造」を精密に作製する技術を開発してきました。本研究の特徴的な点は、このナノギャップ電極をテラヘルツ電磁波に対するアンテナとして用いることにより、1 分子に効率よくテラヘルツ電磁波を集光することができた点です。また 1 分子からの極微弱なテラヘルツ信号を、分子を経由して流れる電流の変化として読み出すことができることも極めて有効です。

この単一分子トランジスタ構造を用いて 1 個の C_{60} （フラーレン）分子をテラヘルツ電磁波で観測したところ、ピコ秒程度の時間スケールで 1 分子が超高速に振動している様子を検出することができました。このようなテラヘルツ計測は、原子レベルの超微細加工技術とフェムト秒レーザーを用いた超高速時間領域テラヘルツ測定技術の両方がそろって初めて可能となったものです。また C_{60} 分子に電子を 1 個注入することにより、振動周波数が微細に変化する様子も観測されました。このような電子 1 個がもたらす分子振動数のわずかな変化も観測できるようになったのは、単一分子トランジスタ構造を用いて、分子の中の電子数や電位（静電ポテンシャル）を精密に制御できるようになったからです。

分子振動の微細構造なども明らかにできる 1 分子のテラヘルツ計測が可能になったことにより、遺伝子やタンパク質の分子レベルの構造や機能の解析、分子レベルの情報に基づいた医薬品の開発など、物理、化学、生物学、薬学などの基礎から応用に関わる広い分野に大きな発展をもたらすと期待されます。

Reference: Shaoqing Du, Kenji Yoshida, Ya Zhang, Ikutaro Hamada, and Kazuhiko Hirakawa, “Terahertz dynamics of electron-vibron coupling in single molecules with tunable electrostatic potential”, Nature Photonics, **12**, 608–612 (2018), <https://doi.org/10.1038/s41566-018-0241-1>

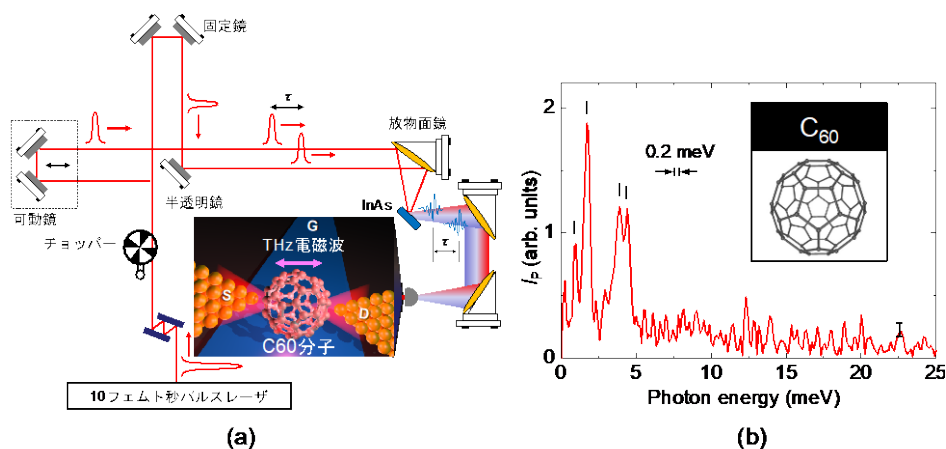


図 1 (a)ナノギャップ電極とフェムト秒レーザーパルスを用いた単一分子テラヘルツ分光系、(b)金電極上で C_{60} 分子が重心運動する分子振動スペクトル

位相制御テラヘルツ波による超高速イオン伝導

武田 淳
横浜国立大学 工学研究院

位相制御した単一サイクルの高強度テラヘルツ (THz) 波は、固体の高次高調波発生や非摂動的な高速電子操作など、新規の非線形物理現象を誘起するツールとして注目されています。しかしながら、高強度 THz 波による物性変化を誘起するこれまでの研究は、電子の状態を変化させるものが大半であり、イオンの状態を変化させる研究はごく限られていました。これは、イオンの質量が電子の質量に比べて3桁以上重く、外場により動かすのが難しいためです。

本研究では、二次電池材料として使われる超イオン伝導体 (ナトリウム・ベータ・アルミナ) を研究対象とし、高強度 THz 電場を印加してイオンを動かし、マクロな電流として取り出すことに挑戦しました。ナトリウム・ベータ・アルミナでは、ナトリウム (Na) イオンがアルミナのスピネルブロックに挟まれた2次元層をホッピング移動し電流となります。2次元面内のイオン伝導率は室温で液体電解質と同等の1 S/mにもなります。

位相制御した単一サイクルの高強度 THz 波を照射しながら電流を計測したところ (図1)、イオンが移動した証拠となるイオン電流を捉えることに成功しました (図2)。これは、高強度 THz 波照射により、Na イオンが振動モードから伝導モードへ変換したことで説明できます。THz 波の透過率変化から、イオンの移動に要する時間は~1 ピコ秒であること、また、一般的な電流計で電流を捉えることができたことから、イオンは移動した先で留まっていることがわかりました。これらの成果は、超高速固体イオニクス研究に新風を吹き込むものと期待されます。

Reference: Y. Minami, B. Ofori-Okai, P. Sivarajah, I. Katayama, J. Takeda, K. A. Nelson, and T. Suemoto, Physical Review Letters, 124, 147401 (2020). DOI: 10.1103/PhysRevLett.124.147401

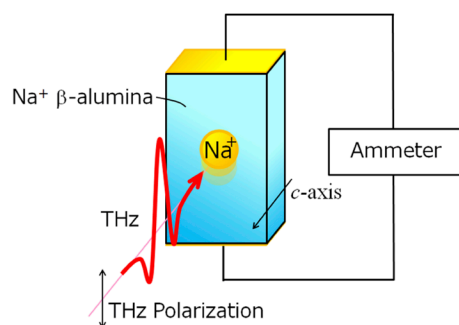


図1 THz パルス照射に伴うイオン電流計測の概念図。

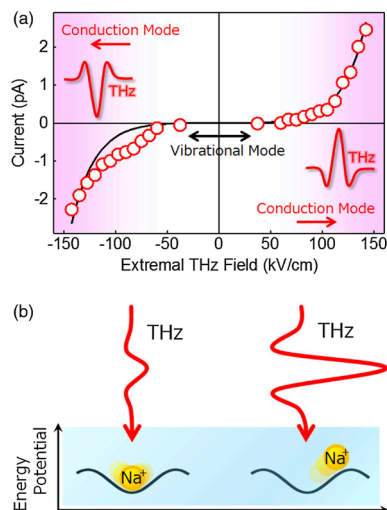


図2 (a) イオン電流の THz パルス強度依存性と (b) THz パルスによるナトリウムイオン伝導の概念図。

単一カーボンナノチューブのテラヘルツダイナミクス

鶴谷拓磨¹、吉田健治¹、清水真希²、本間芳和²、平川一彦^{1,3}

¹東京大学生産技術研究所、²東京理科大学、³東京大学ナノ量子情報エレクトロニクス研究機構

カーボンナノチューブは金属もしくは半導体として振る舞う一次元的な伝導体であり、その優れた性質から極微配線材料や超高速トランジスタなどへの応用が期待されています。

カーボンナノチューブは、1 次元的な電子状態を持つ伝導体ですが、その上の2ヶ所にポテンシャル障壁を導入することで、量子ドットとして機能することが知られています。我々は、触媒から成長させたクリーンで金属的な特性を持つ単一のカーボンナノチューブに、微細なギャップを有する電極を形成し、単一カーボンナノチューブ量子ドットトランジスタを作製しました(図1(a))。図1(b)は、この試料の伝導度を、ゲート電圧、ソース・ドレイン電圧の関数として、色でマッピングしたものです。クーロンダイヤモンドと呼ばれている菱形のパターンが見えていることから、カーボンナノチューブを量子ドットとする単一電子トランジスタとして振る舞っていることがわかります。

この試料にテラヘルツ電磁波を照射し、テラヘルツ電磁波により誘起された光電流スペクトルを図1(c)に示します。カーボンナノチューブ量子ドット中の電子がテラヘルツ電磁波と共鳴し、約 10 meV のエネルギーで量子化された電子軌道間での光学遷移を起こす様子が世界で初めて観測されました。線幅は 0.3 meV 程度と非常にシャープな共鳴が観測されています。この非常に鋭い線幅は、カーボンナノチューブ内では非常に電子散乱が少なく、少なくとも散乱時間が 10 ps 以上であることを示しています。また、得られた共鳴エネルギーは、カーボンナノチューブの長さ L とフェルミ速度 v_F から見積もられる量子化準位間隔 $\Delta E = \hbar v_F / 2L$ によく一致しています(\hbar : プランク定数)。

一般に、1 次元導体中では、その発散的な特異な状態密度を反映して、朝永-ラッティンジャー効果と呼ばれる電子間相互作用による共鳴周波数の補正が入ることが予想されていますが、今回、そのような効果は観測されませんでした。今後、このような測定をベースとして、カーボンナノチューブ内の電子間相互作用、電極金属との相互作用などを明らかにしていく必要があります。

Reference: Takuma Tsurugaya, Kenji Yoshida, Fumiaki Yajima, Maki Shimizu, Yoshikazu Homma, and Kazuhiko Hirakawa, "Terahertz Spectroscopy of Individual Carbon Nanotube Quantum Dots", Nano Letters, **19**, 242–246 (2019), <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.8b03801>

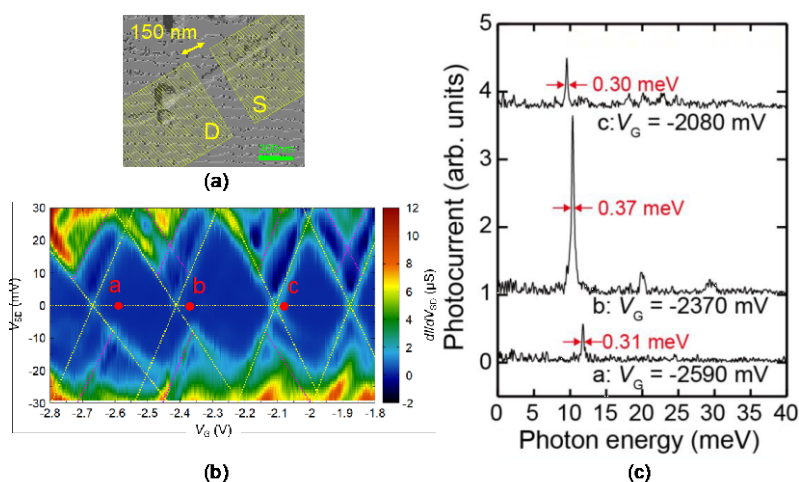


図1 (a)金属的な単一カーボンナノチューブにナノギャップ電極を形成した試料の AFM 像、(b)単一カーボンナノチューブトランジスタの伝導度を色でマッピングしたもの、(c)測定したテラヘルツ励起光電流スペクトル

位相制御テラヘルツ走査トンネル顕微鏡

— テーラーメイドのテラヘルツ近接場による超高速電子操作 —

武田 淳
横浜国立大学 工学研究院

現代の情報技術は電子制御の「高速化」と「微細化」の推進により発展してきました。しかしながら、従来技術の延長には限界があり、高度情報化社会を支える電子制御技術の発展に陰りが見えはじめています。近年、電子制御を飛躍的に高速化させる次世代の手法として、超短パルスレーザーや単一サイクルのテラヘルツ (THz) 波のキャリア・エンベロープ位相 (以降、CEP；光・THz 波中の振動電場の位相) を積極的に利用することが提案され、光・THz 電場の振動周期よりもさらに短い究極の時間スケールで電子を操ることが可能となってきました。そこで、当研究グループでは、CEP を制御した高強度 THz 波と走査型トンネル顕微鏡 (STM) を組み合わせた THz-STM を開発し、回折限界を超えた超微細領域で電子をコヒーレントに自在に操作することを行いました。

独自開発した THz-STM と広帯域 THz 位相シフタを組み合わせ、はじめて THz 近接場波形のその場 (in situ) 観察を可能にしました。更に、THz 位相シフタの CEP を $0\sim 2\pi$ と連続的に調整することにより (図 1)、探針形状に依らず、任意の単一サイクル THz 近接場を創り出すことに成功しました。そして、実験結果と有限統合シミュレーションを比較することにより、THz 近接場波形が探針におけるマクロスコピックな電子の集団運動によって決定されることを突き止めました。また、時間間隔を調整したダブルパルスの THz 近接場を用いることにより、探針・試料間に電流バーストを創り出し、そのタイミングや方向をフェムト秒の精度で制御し、直接計測できることを実証しました (図 2)。これらの成果は、超高速かつ微細空間での電子制御技術に新たなプラットフォームを提供するものであり、次世代超高速ナノエレクトロニクス開発や強光子場物理の学問分野に新風を吹き込むものと期待されます。

Reference: K. Yoshioka, I. Katayama, Y. Arashida, A. Ban, Y. Kawada, K. Konishi, H. Takahashi, and J. Takeda, Nano Letters, 18, 5198-5204 (2018). DOI: 10.1021/acs.nanolett.8b02161

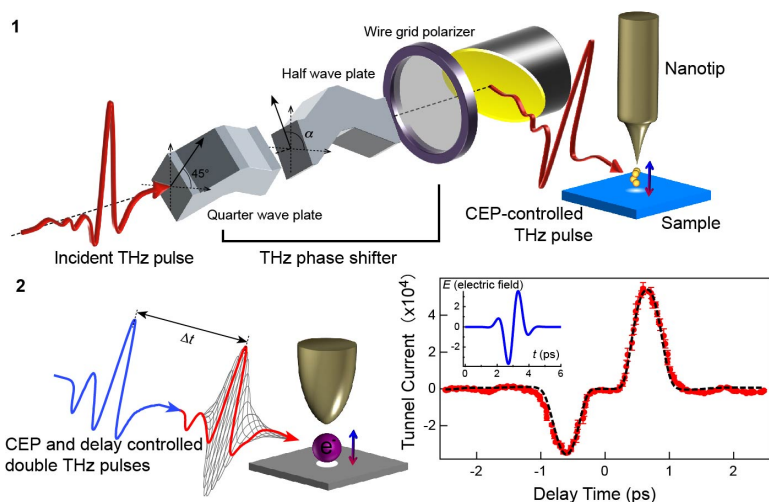


図1 位相制御 THz-STM の概念図。THz 位相シフタの 1/2 波長板部分を回転させることにより、任意の位相の単一サイクル THz パルスを STM 探針部に導入できる。

図 2 位相制御したダブルパルスによる高速電子操作の概念図とサイン型 THz 近接場により創り出したサブピコ秒の電流バーストの時間発展。

トポロジカルに護られた電気伝導特性の可視化に成功

—外乱に強い量子ホール状態の実証—

橋本克之^{1,2}、富松透¹、平山祥郎^{1,2}

¹東北大学理学研究科、²CSIS、CSRN 東北大学

次世代の情報処理デバイス材料として期待されているトポロジカル物質は、従来の物質よりも電子による情報伝達が不純物などに邪魔されにくいという特性を持っています。今回我々は、トポロジカルに護られた電子状態の一つである量子ホール状態を過剰電流で乱し走査ゲート顕微鏡観察を行うことで、その特殊な絶縁性領域を可視化することに成功しました。図1 (a)に示すように、この手法で観察された量子ホール絶縁領域（白く明るい領域）は、ホールバー左側に沿って現れ、電子充填率 ν を整数値に近づけることでホールバー端から中央側に移動します。この絶縁領域の位置の充填率依存性を理論計算と比較することで（図1 (b)）、トポロジカルに護られたミクロスコピックな状態が、過剰電流といった外乱下でも保持されていることが実証されました。一方で、より大きな電流を流すと、特徴的な充填率依存性（図2(a) (b)）が消失し（図2(c) (d)）、量子ホール状態が壊れる様子も明らかになりました。

本研究成果は、トポロジカル普遍性が作り出すミクロスコピックな状態を探るための新しい手法を提供するもので、今後、様々なトポロジカル量子状態観察に応用が期待されることから、より外乱に強い情報処理デバイス材料の探索に貢献すると考えられます。

Reference: K. Hashimoto, T. Tomimatsu, S. Taninaka, S. Nomura, and Y. Hirayama, “Probing the breakdown of topological protection: Filling-factor-dependent evolution of robust quantum Hall incompressible phases”, *Physical Review Research*, 2, 013128. (2020). DOI : <https://doi.org/10.1103/PhysRevResearch.2.013128>

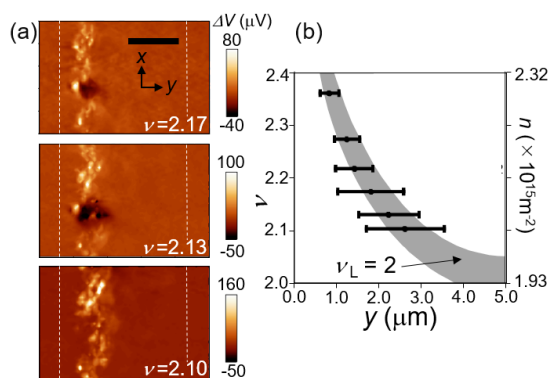


図1 (a)ホールバー端(破線)に沿って現れている量子ホール絶縁領域(白明るい領域)の電子充填率依存性。(b)観測した絶縁領域の中心位置(点)及び幅(横線)の充填率依存性と理論計算による絶縁領域(灰色領域)との比較。

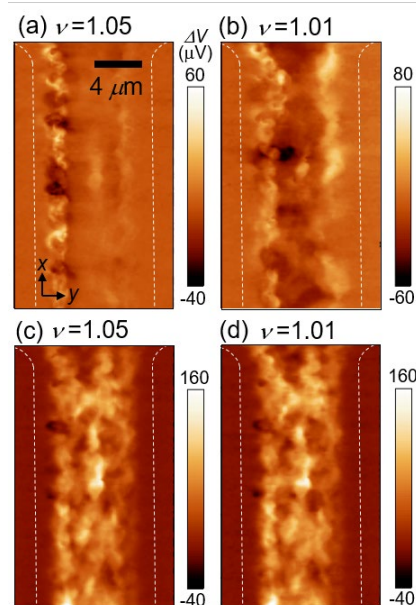


図2 過剰電流下(0.5~1.0 μA)で観測される量子ホール絶縁領域の電子充填率依存性(a)(b)は、より大きな過剰電流下(2.3~2.5 μA)で消失する(c) (d)。

核スピン共鳴プローブ顕微鏡

—量子構造のスピンの状態のミクロスコピック MRI を実現—

橋本克之^{1,2}、富松透¹、平山祥郎^{1,2}

¹東北大学理学研究科、²CSIS、CSRN 東北大学

MRI (核磁気共鳴イメージング) は、医療分野で病気の画像診断に広く用いられています。小さな病気を発見するためには MRI を細かい画素で表示する必要がありますが、画素の間隔が髪の毛よりも細い数十マイクロメートル以下となるような高分解能診断は難しいのが現状です。量子構造を持つ半導体デバイスにおいても、MRI の根幹技術である核スピン共鳴が、量子構造のスピンの状態を調べるための強力な手段として用いられています。しかし、MRI を半導体デバイスのようなナノからミクロンスケールに閉じ込められた構造に用いる場合は、前述の分解能の問題に加え、半導体中に埋め込まれた量子構造からの核スピン共鳴信号をどのように抽出するかが問題となります。

今回我々は、走査プローブ顕微鏡に核スピン共鳴技術を組み合わせた「核スピン共鳴プローブ顕微鏡」を開発し、半導体量子構造中にある原子核スピンの共鳴信号をミクロスコピックにとらえることに成功しました。開発した顕微鏡のデモンストレーションは、半導体量子構造に閉じ込められた二次元電子に、強い磁場をかけることで生じる量子ホール状態を利用して行いました。各点で得られた核スピン共鳴信号から、信号強度だけではなく、核スピン周辺の電子偏極度を示すナイトシフトと呼ばれる共鳴周波数のずれを抽出することで、原子核と電子の両方のスピン情報を得ることができます。今回、これらの信号強度と共鳴周波数のずれをマッピングすることで、厚さ数十ナノメートルの半導体量子構造内に生じる核スピン偏極の分布 (図1) と、電子スピン偏極度の数ミクロン程度の空間変化 (図2) を明瞭に映し出すことに成功しました。図1は、異なる量子ホール状態で核スピンが偏極する位置が、ホールバー試料の一端から中央付近に大きく変わることを示しています。また、図2の電子スピン偏極度分布では、異なる電流を試料に流した際、電流が高くなるにつれて電子スピン偏極度の空間変化が激しくなることが分かりました。

本研究成果は、量子構造における電子・原子核スピンの分布を明瞭に映し出す新しい技術を提供するものであり、今後、様々な量子構造のスピンの状態、量子デバイスの MRI 診断への応用が期待されることから、核スピンを用いたスピントロニクス分野の促進につながると考えられます。

Reference: K. Hashimoto, T. Tomimatsu, K. Sato, and Y. Hirayama, “Scanning nuclear resonance imaging of a hyperfine-coupled quantum Hall system”, Nature Communications, 9, 2215. (2018). DOI : 10.1038/s41467-018-04612-y

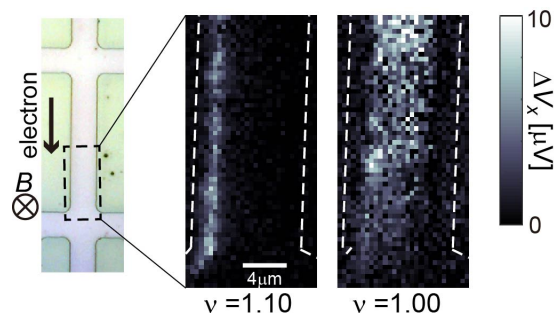


図1 ホールバー試料(左)で得られた、異なる量子ホール状態(図下に表記)における核スピン共鳴信号強度のイメージ(右)。

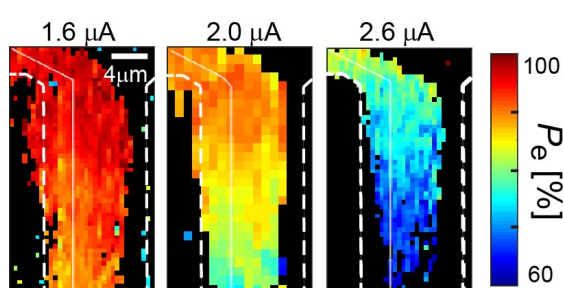


図2 異なる電流(図上に表記)を試料に流した際に得られた電子スピン偏極度 P_e のカラースケールイメージ。

7 研究業績

7-1 発表論文(査読付)

2015 年

1. A. Kaskela, K. Mustonen, P. Laiho, Y. Ohno, and E. I. Kauppinen, Toward the Limits of Uniformity of Mixed Metallicity SWCNT TFT Arrays with Spark-Synthesized and Surface-Density-Controlled Nanotube Networks, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 7, 2015, 28134, DOI: 10.1021/acsami.5b10439.
2. Y. Anno, K. Takei, S. Akita, T. Arie, Enhancing the Thermoelectric Device Performance of Graphene Using Isotopes and Isotopic Heterojunctions, *Adv. Electron. Mater.*, 1, 2015, 1500175, DOI: 10.1002/aelm.201500175.
3. S. Baba, J. Sailer, R. S. Deacon, A. Oiwa, K. Shibata, K. Hirakawa, and S. Tarucha, Superconducting transport in single and parallel double InAs quantum dot Josephson junctions with Nb-based superconducting electrodes, *Applied Physics Letters*, 107, 2015, 222602, DOI: 10.1063/1.4936888.
4. Y. Zhang, K. Shibata, N. Nagai, C. Ndebeka-Bandou, G. Bastard, and K. Hirakawa, Gate-controlled terahertz single electron photovoltaic effect in self-assembled InAs quantum dots, *Applied Physics Letters*, 107, 2015, 103103, DOI: 10.1063/1.4930023.
5. H. Wang, C. Yamada, J. Liu, B. Liu, X. Tu, M. Zheng, C. Zhou, and Y. Homma, Re-growth of single-walled carbon nanotube by hot-wall and cold-wall chemical vapor deposition, *Carbon*, 95, 2015, 497, DOI: 10.1016/j.carbon.2015.08.039.
6. H. Shirai, D. Y. Kim, K. Hasegawa, T. Takenobu, Y. Ohno, and S. Noda, Overcoming the quality–quantity tradeoff in dispersion and printing of carbon nanotubes by a repetitive dispersion–extraction process, *Carbon*, 91, 2015, 20, DOI: 10.1016/j.carbon.2015.04.033.
7. Z. Han, K. Kohno, H. Fujita, K. Hirakawa, and H. Toshiyoshi, Tunable terahertz filter and modulator based on electrostatic MEMS reconfigurable SRR array, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 21, no. 4, 2015, 1, DOI: 10.1109/JSTQE.2014.2378591.
8. H. Tanaka, Y. Ohno, and Y. Tadokoro, Angular Sensitivity of VHF-Band CNT Antenna, *IEEE Trans. Nanotechnol.*, 14, 2015, 1112, DOI: 10.1109/TNANO.2015.2477813.
9. Hiroshi Tomizawa, Tomohiro Yamaguchi, Seiji Akita, Koji Ishibashi, Fabrication and characterization of tunnel barriers in a multi-walled carbon nanotube formed by Argon atom beam irradiation, *J. Appl. Phys.*, 118, 2015, 44306, DOI: 10.1063/1.4927615.
10. M. Ito, Y. Ito, D. Nii, H. Kato, K. Umemura, and Y. Homma, The Effect of DNA Adsorption on Optical Transitions in Single Walled Carbon Nanotubes, *J. Phys. Chem. C.*, 119, 2015, 21141, DOI: 10.1021/acs.jpcc.5b05087.
11. Y. Matsuzaki, and H. Tanaka, Quantum Zeno Effect in an Unstable System with NMR, *J. Phys. Soc. Jpn*, 48, 2015, 103001, DOI: 10.7566/JPSJ.85.014001.
12. N. Mori, R. J. A. Hill, A. Patanè, and L. Eaves, Monte Carlo study on anomalous carrier diffusion in inhomogeneous semiconductors, *Journal of Physics: Conference Series*, 647, 2015, 12059, DOI: 10.1088/1742.
13. Y. Kobayashi, T. Ishida, Y. Miyata and Y. Shinoda, Highly crystalline graphene formation from graphene oxides by ultrahigh temperature process using solar furnace, *MRS Proceedings*, 1786, 2015, 31, DOI: 10.1557/opl.2015.765.
14. R.S. Deacon, A. Oiwa, J. Sailer, S. Baba, Y. Kanai, K. Shibata, K. Hirakawa, S. Tarucha, Cooper pair splitting in parallel quantum dot Josephson junctions, *Nature Communications*, 6, article no. 7446, 2015, 1, DOI: 10.1038/ncomms8446.
15. S. Souma, A. Sawada, H. Chen, Y. Sekine, M. Eto, and T. Koga, Spin Blocker Using the Interband Rashba Effect in Symmetric Double Quantum Wells, *Physical Review Applied*, 4, 2015, 34010, DOI: 10.1103/PhysRevApplied.4.034010.
16. T. Tanaka*, P. Knott*, Y. Matsuzaki*, S. Dooley, H. Yamaguchi, W. J. Munro, and S. Saito (*equally contribution), Proposed Robust Entanglement-Based Magnetic Field Sensor Beyond the Standard Quantum Limit, *Physical Review Applied*, 115, 2015, 170801, DOI: 10.1103/PhysRevLett.115.170801.
17. Y. Zhang, K. Shibata, N. Nagai, C. Ndebeka, Probing many-body quantum states in single InAs quantum dots: Terahertz and tunneling spectroscopy, *Physical Review B*, 91, 2015, 241301(R), DOI: 10.1103/PhysRevB.91.241301.
18. K. Yoshida, K. Shibata, and K. Hirakawa, Terahertz Field Enhancement and Photon-Assisted Tunneling in Single-Molecule Transistors, *Physical Review Letters*, 115, 2015, 138302, DOI: 10.1103/PhysRevLett.115.138302.
19. S. Ishida, Y. Anno, M. Takeuchi, M. Matsuoka, K. Takei, T. Arie, S. Akita, Highly photosensitive graphene field-effect transistor with optical memory function, *Sci. Rep.*, 5, 2015, 15491, DOI: 10.1038/srep15491.
20. H. Tanaka, R. Arima, M. Fukumori, D. Tanaka, R. Negishi, Y. Kobayashi, S. Kasai, T. Yamada, T. Ogawa, Method for Controlling Electrical Properties of Single-Layer Graphene Nanoribbons via Adsorbed Planar Molecular Nanoparticles, *Scientific Reports*, 5, 2015, 12341, DOI: 10.1038/srep12341.
21. Z. Han, K. Kohno, H. Fujita, K. Hirakawa, H. Toshiyoshi, Terahertz devices with reconfigurable metamaterials by surface micromachining technique, *電気学会論文誌 E (センサ・マイクロマシン部門誌)*, 135, no.11, 2015, 450, DOI: 10.1541/ieejmas.135.450.

2016 年

22. K. Hashimoto, T. Tomimatsu, S. Shirai, S. Taninaka, K. Nagase, K. Sato, and Y. Hirayama, Scanning nuclear electric resonance microscopy using quantum-Hall-effect breakdown, *AIP Advances*, 6, 2016, 75024, DOI: 10.1063/1.4960430.
23. Akira Hida, Takayuki Suzuki, and Koji Ishibashi, Detecting the formation of single-walled carbon nanotube rings by photoabsorption spectroscopy, *Appl. Phys. Express*, 9, 2016, 85102, DOI: 10.7567/APEX.9.085102.
24. M. Villiers, I. Mahboob, K. Nishiguchi, D. Hatanaka, A. Fujiwara, and H. Yamaguchi, An electromechanical displacement transducer, *Appl. Phys. Express*, 9, 2016, 86701, DOI: 10.7567/APEX.9.086701.
25. M. Nomura, J. Nakagawa, K. Sawano, J. Maire, and S. Volz, Thermal conduction in Si and SiGe phononic crystals explained by phonon mean free path spectrum, *Appl. Phys. Lett.*, 109, 2016, 173104, DOI: 10.1063/1.4966190.
26. Rui Wang, Russell S. Deacon, Diana Car, Erik P. A. M. Bakkers, and Koji Ishibashi, InSb nanowire double quantum dots coupled to a superconducting microwave cavity, *Appl. Phys. Lett.*, 108, 2016, 203502, DOI: 10.1063/1.4950764.
27. A. Naka, K. Hirakawa, and T. Unuma, Capacitive response and room-temperature terahertz gain of a Wannier–Stark ladder system in GaAs-based superlattices, *Applied Physics Express*, 9, no. 11, 2016, 112101, DOI: 10.7567/APEX.9.112101.
28. T. Ishida, Y. Miyata, Y. Shinoda and Y. Kobayashi, Anomalous restoration of graphitic layers from graphene oxide in ethanol environment at ultrahigh temperature using solar furnace, *Applied Physics Express*, 9, 2016, 25103, DOI: 10.7567/APEX.9.025103.
29. H. Toida, Y. Matsuzaki, K. Kakuyanagi, X. Zhu, W. J. Munro, K. Nemoto, H. Yamaguchi and S. Saito, Electron paramagnetic resonance spectroscopy using a direct current-SQUID magnetometer directly coupled to an electron spin ensemble, *Applied Physics Letters*, 108, 2016, 52601, DOI: 10.1063/1.4940978.
30. Hajime Okamoto, Ryan Schilling, Hendrik Schütz, Vivishek Sudhir, Dalziel J. Wilson, Hiroshi Yamaguchi, and Tobias J. Kippenberg, A strongly coupled Λ -type micromechanical system, *Applied Physics Letters*, 108, 2016, 153105, DOI: 10.1063/1.4945741.
31. Motoki Asano, Sahin Kaya Ozdemir, Weijian Chen, Rikizo Ikuta, Lan Yang, Nobuyuki Imoto, Takashi Yamamoto, Controlling slow and fast light and dynamic pulse-splitting with tunable optical gain in a whispering-gallery-mode microcavity, *Applied Physics Letters*, 108, 2016, 181105, DOI: 10.1063/1.4948922.
32. A. Kaskela, P. Laiho, N. Fukaya, K. Mustonen, T. Susi, H. Jiang, N. Houbenov, Y. Ohno, and E. I. Kauppinen, Highly individual SWCNTs for

- high performance thin film electronics, *Carbon*, 103, 2016, 228, DOI: 10.1016/j.carbon.2016.02.099.
33. M. Nomura, Heat Conduction Control by Phononic Crystals, *Chemical Engineering of Japan*, 80, 2016, 560.
 34. M. Ito, Y. Homma, M. Akiba, and T. Oya, Artifact-Metrics Using Photoluminescence Imaging of Single-Walled Carbon Nanotube Composite Paper, e-J. Surf. Sci. Nanotech., 14, 2016, 185, DOI: 10.1380/ejsnt.2016.185.
 35. H. Watanabe, H. Umezawa, T. Ishikawa, K. Kaneko, S. Shikata, J. Ishi, Formation of Nitrogen-Vacancy Centers in Homoepitaxial Diamond Thin Films Grown via Microwave Plasma-Assisted Chemical Vapor Deposition, *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 15, issue 4, 2016, 614, DOI: 10.1109/TRANANO.2016.2528678.
 36. Y. Matsuzaki, H. Morishita, T. Shimooka, T. Tashima, K. Kakuyanagi, K. Semba, W. J. Munro, H. Yamaguchi, N. Mizuochi, and S. Saito, Optically detected magnetic resonance of high-density ensemble of NV⁻ centers in diamond, *Journal of Physics:Condensed matter*, 28, 2016, 275302, DOI: 10.1088/0953.
 37. Y. Kage, H. Hagino, R. Yanagisawa, J. Maire, K. Miyazaki, and M. Nomura, Thermal phonon transport in Si thin film with dog-leg shaped asymmetric nanostructures, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 55, 2016, 85201.
 38. T. Yasunishi, Y. Takabayashi, S. Kishimoto, R. Kitaura, H. Shinohara, and Y. Ohno, Origin of residual particles on transferred graphene grown by CVD, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 55, 2016, 80305, DOI: 10.7567/JJAP.55.080305.
 39. M. Ito, H. Yajima, and Y. Homma, Strain effect of cellulose-wrapped single-walled carbon nanotubes measured by photoluminescence and Raman scattering spectroscopy, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 55, 2016, 75101, DOI: 10.7567/JJAP.55.075101.
 40. Motoki Asano, Yuki Takeuchi, Weijian Chen, Şahin Kaya Özdemir, Rikizo Ikuta, Nobuyuki Imoto, Lan Yang and Takashi Yamamoto, Observation of optomechanical coupling in a microbottle resonator, *Laser & Photonics Reviews*, 10, 2016, 603, DOI: 10.1002/lpor.201500243.
 41. M. Nomura, Control of Phonon Transport by Phononic Crystals and Application to Thermoelectric Materials, *Materials Transactions*, 57, 2016, 555, DOI: 10.2320/matertrans.MF201606.
 42. S. Miyamoto, T. Miura, S. Watanabe, K. Nagase, and Y. Hirayama, Localized NMR Mediated by Electrical-Field-Induced Domain Wall Oscillation in Quantum-Hall-Ferromagnet Nanowire, *Nano Letter*, 16, 2016, 1596, DOI: 10.1021/acs.nanolett.5b04209.
 43. F. Wang, M. Endo, S. Mouri, Y. Miyauchi, Y. Ohno, A. Wakamiya, Y. Murata, and K. Matsuda, Highly stable perovskite solar cells with an all-carbon hole transport layer, *Nanoscale*, 8, 2016, 11882, DOI: 10.1039/C6NR01152G.
 44. M. Fujiwara, K. Yoshida, T. Noda, H. Takashima, A. W. Schell, N. Mizuochi, S. Takeuchi, Manipulation of single nanodiamonds to ultrathin fiber-taper nanofibers and control of NV-spin states toward fiber-integrated λ -systems, *Nanotechnology*, 27, 2016, 455202, DOI: 10.1088/0957.
 45. J. Wiedenmann, E. Bocquillon, R.S. Deacon, S. Hartinger, O. Herrmann, T.M. Klapwijk, L. Maier, C. Ames, C. Brüne, C. Gould, A. Oiwa, K. Ishibashi, S. Tarucha, H. Buhmann & L.W. Molenkamp, 4π -periodic Josephson supercurrent in HgTe-based topological Josephson junctions, *Nature Commun*, 7, 2016, 10303, DOI: 10.1038/ncomms10303.
 46. Y. Okazaki, I. Mahboob, K. Onomitsu, S. Sasaki, and H. Yamaguchi, Gate-controlled electromechanical backaction induced by a quantum dot, *Nature Communications*, 7, 2016, 11132, DOI: 10.1038/ncomms11132.
 47. Ying, Observation of Zeeman effect in topological surface state with distinct material dependence, *Nature Communications*, 7, 2016, 10829, DOI: 10.1038/ncomms10829.
 48. Yuma Okazaki, Imran Mahboob, Koji Onomitsu, Satoshi Sasaki, and Hiroshi Yamaguchi, Gate-controlled electromechanical backaction induced by a quantum dot, *Nature Communications*, 7, 2016, 11132, DOI: 10.1038/ncomms11132.
 49. Yuhei Sekiguchi, Yusuke Komura, Shota Mishima, Touta Tanaka, Naeko Niikura and Hideo Kosaka, Geometric spin echo under zero field, *Nature Communications*, 7, 2016, 11668, DOI: 10.1038/ncomms11668.
 50. George C. Knee, Kosuke Kakuyanagi, Mao, A strict experimental test of macroscopic realism in a superconducting flux qubit, *Nature Communications*, 7, 2016, 13253, DOI: 10.1038/ncomms13253.
 51. Motoki Asano, Konstantin Y. Bliokh, Yury P. Bliokh, Abraham G. Kofman, Rikizo Ikuta, Takashi Yamamoto, Yuri S. Kivshar, Lan Yang, Nobuyuki Imoto, Sahin Kaya Ozdemir, Franco Nori, Anomalous time delays and quantum weak measurements in optical micro-resonators, *Nature Communications*, 7, 2016, 13488, DOI: 10.1038/ncomms13488.
 52. M. Nomura, Near-field radiative heat transfer: The heat through the gap, *Nature Nanotechnology*, 11, 2016, 496, DOI: 10.1038/nnano.2016.24.
 53. Erwann Bocquillon, Russell S. Deacon, Jonas Wiedenmann, Philipp Leubner, Teun M. Klapwijk, Christoph Brüne, Koji Ishibashi, H. Buhmann, Laurens W. Molenkamp, Gapless Andreev bound states in the quantum spin Hall insulator HgTe, *Nature Nanotechnology* (published online), 12, 2016, 137, DOI: 10.1038/nnano.2016.159.
 54. Y Hama, M H Fauzi, K Nemoto, Y Hirayama, and Z F Ezawa, Dicke model for quantum Hall systems, *New J. Phys.*, 18, 2016, 23027, DOI: 10.1088/1367.
 55. Y. Kondo, Y. Matsuzaki, K. Matsushima, and J. G. Filgueiras, Using the quantum Zeno effect for suppression of decoherence, *New J. Phys.*, 18, 2016, 13033, DOI: 10.1088/1367.
 56. I Mahboob, H Okamoto and H Yamaguchi, Enhanced visibility of two-mode thermal squeezed states via degenerate parametric amplification and resonance, *New Journal of Physics*, 18, 2016, 83009, DOI: 10.1088/1367.
 57. Y. Hama, M. H. Fauzi, K. Nemoto, Y. Hirayama, and Z. F. Ezawa, Dicke model for quantum Hall systems, *New Journal of Physics*, 18, 2016, 23027, DOI: 10.1088/1367.
 58. Hideki Konishi, Florian Schäfer, Shinya Ueda and Yoshiro Takahashi, Collisional stability of localized Yb(3P₂) atoms immersed in a Fermi sea of Li, *New Journal of Physics*, 18, 2016, 103009, DOI: 10.1088/1367.
 59. Motoki Asano, Yuki Takeuchi, Sahin Kaya Ozdemir, Rikizo Ikuta, Lan Yang, Nobuyuki Imoto, Takashi Yamamoto, Stimulated Brillouin scattering and Brillouin-coupled four-wave-mixing in a silica microbottle resonator, *Optics Express*, 24, 2016, 12082, DOI: 10.1364/OE.24.012082.
 60. Motoki Asano, Shoichi Komori, Rikizo Ikuta, Nobuyuki Imoto, Sahin Kaya Ozdemir, Takashi Yamamoto, Visible light emission from a silica microbottle resonator by second- and third-harmonic generation, *Optics Letter*, 41, 2016, 5793, DOI: 10.1364/OL.41.005793.
 61. Satoshi Iwamoto, Shun Takahashi, Takeyoshi Tajiri, and Yasuhiko Arakawa, Semiconductor Three-Dimensional Photonic Crystals with Novel Layer-by-Layer Structures, *Photonics*, 3, 2016, 34, DOI: 10.3390/photonics3020034.
 62. Yuichiro Matsuzaki, Takaaki Shimooka, Hirotaka Tanaka, Yasuhiro Tokura, Kouichi Semba, Norikazu Mizuochi, Hybrid quantum magnetic field sensor with an electron spin and a nuclear spin in diamond, *Phys. Rev. A*, 94, 2016, 52330, DOI: 10.1103/PhysRevA.94.052330.
 63. Neill Lambert, Yuichiro Matsuzaki, Kosuke Kakuyanagi, Natsuko Ishida, Shiro Saito, and Franco Nori, Superradiance with an ensemble of superconducting flux qubits, *Phys. Rev. B*, 94, 2016, 224510, DOI: 10.1103/PhysRevB.94.224510.
 64. Kosuke Kakuyanagi, Yuichiro Matsuzaki, Corentin Déprez, Hiraku Toida, Kouichi Semba, Hiroshi Yamaguchi, William J. Munro, and Shiro Saito, Observation of Collective Coupling between an Engineered Ensemble of Macroscopic Artificial Atoms and a Superconducting Resonator, *Phys. Rev. Lett.*, 117, 2016, 210503, DOI: 10.1103/PhysRevLett.117.210503.
 65. Yusuke Hama, William J. Munro, Kae Nemoto, Relaxation to Negative Temperatures in Double Domain Systems, *Phys. Rev. Lett.*, 120, 2016, arXiv:1612.08963 [5 pages], DOI: 10.1103/PhysRevLett.120.060403.
 66. Todd Tilma, Mark J. Everitt, John H. Samson, William J. Munro, and Kae Nemoto, Wigner Functions for Arbitrary Quantum Systems, *Phys. Rev. Lett.* 117, 180401 [5 pages], 117, 2016, 180401, DOI: 10.1103/PhysRevLett.117.180401.

67. Shane Dooley, William J. Munro, and Kae Nemoto, Quantum metrology including state preparation and readout times, *Phys. RevA.*, 94, 2016, 52320, DOI: 10.1103/PhysRevA.94.052320.
68. Y. Zhang, K. Shibata, N. Nagai, C. Ndebeka, Excited-state charging energies in quantum dots investigated by terahertz photocurrent spectroscopy, *Physical Review B*, 93, 2016, 235313, DOI: 10.1103/PhysRevB.93.235313.
69. A. Srinivasan, K. L. Hudson, D. Miserev, L. A. Yeoh, O. Klochan, K. Muraki, Y. Hirayama, O. P. Sushkov, and A. R. Hamilton, Electrical control of the sign of the g factor in a GaAs hole quantum point contact, *Physical Review B (Rapid Communications)*, B94, 2016, 41406, DOI: 10.1103/PhysRevB.94.041406.
70. Keiichirou Akiba, Katsumi Nagase, and Yoshiro Hirayama, Simultaneous measurement of resistively and optically detected nuclear magnetic resonance in the $\nu=2/3$ fractional quantum Hall regime, *Physical Review B (Rapid Communications)*, B94, 2016, 81104, DOI: 10.1103/PhysRevB.94.081104.
71. W. Izumida, R. Okuyama, A. Yamakage, R. Saito, Angular momentum and topology in semiconducting single-wall carbon nanotubes, *Physical Review B*, 93, 2016, 195442, DOI: 10.1103/PhysRevB.93.195442.
72. Tomosuke Aono, Takashi Komine, Giant thermoelectric figure of merit in a noninteracting quantum dot system with massless Dirac fermions, *Physical Review B*, 94, 2016, 165311, DOI: 10.1103/PhysRevB.94.165311.
73. K. Sasaki, Y. Monnai, S. Saijo, R. Fujita, H. Watanabe, J. Ishi, Broadband, large-area microwave antenna for optically detected magnetic resonance of nitrogen-vacancy centers in diamond, *Review of Scientific Instruments*, Vol.87, 2016, 53904, DOI: 10.1063/1.4952418.
74. M Yasuda, K. Takei, T. Arie, S. Akita, Oscillation control of carbon nanotube mechanical resonator by electrostatic interaction induced retardation, *Sci. Rep.*, 6, 2016, 22600, DOI: 10.1038/srep22600.
75. I. R. Negishi, M. Akabori, T. Ito, Y. Watanabe and Y. Kobayashi, Band-like transport in highly crystalline graphene films from defective graphene oxides, *Sci. Rep.*, 6, 2016, 28936, DOI: 10.1038/srep28936.
76. I. Mahboob, H. Okamoto, and H. Yamaguchi, An electromechanical Ising Hamiltonian, *Science Advances*, 2, 2016, e1600236, DOI: 10.1126/sciadv.1600236.
77. D. M. Di Paola, M. Kesaria, O. Makarovskiy, A. Velichko, L. Eaves, N. Mori, A. Krier, and A. Patanè, Resonant Zener tunnelling via zero-dimensional states in a narrow gap diode, *Scientific Reports*, 6, 2016, 32039, DOI: 10.1038/srep32039.
78. 山口 浩司, 機械共振器における量子スクイーズド状態の実現, *パリティ*, 31, 2016, 43.
79. 泉田 渉, カーボンナノチューブの離散準位, *個体物理*, 51, 2016, 815.

2017 年

80. Y. Anno, Y. Imakita, K. Takei, S. Akita, T. Arie, Enhancement of graphene thermoelectric performance through defect engineering, *2D Mater.*, 4, 2017, 25019, DOI: 10.1088/2053.
81. L. Turyanska, O. Makarovskiy, L. Eaves, A. Patanè, and N. Mori, Mobility enhancement of CVD graphene by spatially correlated charges, *2D Materials*, 4, 2017, 25026, DOI: 10.1088/2053.
82. L. Turyanska, O. Makarovskiy, L. Eaves, A. Patanè, and N. Mori, Mobility enhancement of CVD graphene by spatially correlated charges, *2D Materials*, 4, 2017, 25026, DOI: 10.1088/2053.
83. O. Makarovskiy, L. Turyanska, N. Mori, M. Greenaway, L. Eaves, A. Patanè, M. Fromhold, S. Lara, Enhancing optoelectronic properties of SiC-grown graphene by a surface layer of colloidal quantum dots, *2D Materials*, 4, 2017, 31001, DOI: 10.1088/2053.
84. P. Laiho, K. Mustonen, Y. Ohno, S. Maruyama, and E. I. Kauppinen, Dry and Direct Deposition of Aerosol-Synthesized Single-Walled Carbon Nanotubes by Thermophoresis, *ACS App. Mater. Interfaces*, 9, 2017, 20738, DOI: 10.1021/acsami.7b03151.
85. K. Shihomatsu, J. Takahashi, Y. Momiuchi, Y. Hoshi, H. Kato, and Y. Homma, Formation Mechanism of Secondary Electron Contrast of Graphene Layers on a Metal Substrate, *ACS Omega*, 2, 2017, 7831, DOI: 10.1021/acsomega.7b01550.
86. T. Inoue, Y. Anno, Y. Imakita, K. Takei, T. Arie, S. Akita, Resonance control of graphene drum resonator in nonlinear regime by standing wave of light, *ACS Omega*, 2, 2017, 5792, DOI: 10.1021/acsomega.7b00699.
87. 山原弘靖、足立真輝、関 宗俊、田畑 仁、酸化物クラスターガラスの磁気履歴記憶と脳型記憶素子への応用, *Annual Report 2016 Cryogenic Research Center*, 8, 2017, 16.
88. K. Kihara, A. Ishitani, T. Koyama, M. Fukasawa, T. Inaba, M. Shimizu, and Y. Homma, Raman imaging of millimeter-long carbon nanotubes grown by a gas flow method, *Appl. Phys. Express*, 10, 2017, 25103, DOI: 10.7567/APEX.DOI: 10.025103.
89. Ingi Kim, Satoshi Iwamoto and Yasuhiko Arakawa, Topologically protected elastic waves in one-dimensional phononic crystals of continuous media, *Appl. Phys. Express*, 11, 2017, 17201, DOI: 10.7567/APEX.11.017201.
90. R. Yanagisawa, J. Maire, A. Ramiere, R. Anufriev, and M. Nomura, Impact of limiting dimension on thermal conductivity of one-dimensional silicon phononic crystals, *Appl. Phys. Lett.*, 110, 2017, 133108, DOI: 10.1063/1.4979080.
91. Y. Anno, M. Takeuchi, M. Matsuoka, K. Takei, S. Akita, T. Arie, Effect of defect-induced carrier scattering on the thermoelectric power of graphene, *Appl. Phys. Lett.*, 110, 2017, 263501, DOI: 10.1063/1.4989820.
92. Takehiko Tawara, Giacomo Mariani, Kaoru Shimizu, Hiroo Omi, Satoru Adachi, Hideki Gotoh, Effect of isotopic purification on spectral hole narrowing in 167Er^{3+} hyperfine transitions, *Applied Physics Express*, 10, 2017, 42801, DOI: 10.7567/APEX.DOI: 10.042801.
93. Ryuichi Ohta, Hajime Okamoto, and Hiroshi Yamaguchi, Feedback control of multiple mechanical modes in coupled micromechanical resonators, *Applied Physics Letters*, 110, 2017, 53106, DOI: 10.1063/1.4975207.
94. Y. Zhang, S. Hosono, N. Nagai, and K. Hirakawa, Effect of buckling on the thermal response of microelectromechanical beam resonators, *Applied Physics Letters*, 111, 2017, 23504, DOI: 10.1063/1.4993740.
95. Ryota Negishi, Katsuma Yamamoto, Haruki Kitakawa, Minoru Fukumori, Hirofumi Tanaka, Takuji Ogawa and Yoshihiro Kobayashi, Synthesis of very narrow multilayer graphene nanoribbon with turbostratic stacking, *Applied Physics Letters*, Vol. 111, 2017, 201901, DOI: 10.1063/1.4983349.
96. K. Shibata, K. Yoshida, K. Daiguji, H. Sato, T. Ii, and K. Hirakawa, Electric-field control of conductance in metal quantum point contacts by electric-double-layer, *Applied Physics Letters*, 111, 2017, 153104, DOI: 10.1063/1.4995318.
97. Matou Tatsuya, Takeshima Kento, Anh Le Duc, Seki Munetoshi, Tabata Hitoshi, Tanaka Masaaki, Ohya Shinobu, Reduction of the magnetic dead layer and observation of tunneling magnetoresistance in $\text{La}_{0.67}\text{Sr}_{0.33}\text{MnO}_3$ -based heterostructures with a LaMnO_3 layer, *Applied Physics Letters*, 110, 2017, 212406, DOI: 10.1063/1.4984297.
98. Y. Yamada, S. Hiyama, H. Tabata, Studies on semiconducting gas sensors with WO_3 nanoparticles for skin-emitted acetone detection, *IEICE Technical report*, 117, 2017, 9.
99. Y. Takane, K. Yarimizu, and A. Kanda, Andreev Reflection in a Bilayer Graphene Junction: Role of Spatial Variation of the Charge Neutrality Point, *J. Phys. Soc. Jpn.*, 86, 2017, 64707, DOI: 10.7566/JPSJ.86.064707.
100. Ryota Negishi, Yuji Matsui and Yoshihiro Kobayashi, Improving sensor response using reduced graphene oxide film transistor biosensor by controlling the pyrene adsorption as an anchor molecules, *Japanese Journal of Applied Physics Special issue*, Vol. 56, 2017, 06GE04, DOI: 10.7567/JJAP.56.06GE04.
101. Minoru Fukumori, Pandey Reetu Raj, Taizo Fujiwara, Amin TermehYousefi, Ryota Negishi, Yoshihiro Kobayashi, Hirofumi Tanaka, Takuji Ogawa, Diameter dependence of longitudinal unzipping of single-walled carbon nanotube to obtain graphene nanoribbon, *Japanese Journal of Applied Physics*, 56, 2017, 06GE04, DOI: 10.7567/JJAP.56.06GE04.

- Applied Physics Special issue, Vo. 56, 2017, 06GG12, DOI: 10.7567/JJAP.56.06GG12.
102. Ryota Negishi, Yuji Matsui and Yoshihiro Kobayashi, Improving sensor response using reduced graphene oxide film transistor biosensor by controlling the pyrene adsorption as an anchor molecules, Japanese Journal of Applied Physics Special issue (2017), 56, 2017, 06GE04, DOI: 10.7567/JJAP.56.06GE04.
 103. Minoru Fukumori, Pandey Reetu Raj, Taizo Fujiwara, Chirality dependence of Longitudinal Unzipping of Single-Walled Carbon Nanotube to obtain Graphene Nanoribbon, Japanese Journal of Applied Physics Special issue (2017), 56, 2017, 06GG12, DOI: 10.7567/JJAP.56.06GG12.
 104. F. Hashimoto, N. Mori, O. Kubo, and M. Katayama, Electronic states of coupled graphene nanoribbons, Japanese Journal of Applied Physics, 56, 2017, 45001, DOI: 10.7567/JJAP.56.045001.
 105. A. Tamada, Y. Ota, K. Kuruma, J. Ho, K. Watanabe, S. Iwamoto, and Y. Arakawa, Demonstration of lasing oscillation in a plasmonic microring resonator containing quantum dots fabricated by transfer printing, Japanese Journal of Applied Physics, 56, 2017, 102001, DOI: 10.7567/JJAP.56.102001.
 106. Mikhail Patrashin, Kouichi Akahane, Norihiko Sekine, Iwao Hosako, Molecular beam epitaxy of strained-layer InAs/GaInSb superlattices for long-wavelength photodetectors, Journal of Crystal Growth, 477, 2017, 86, DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2017.02.030.
 107. Taku Matsunaga, Rui Sakano, and Mikio Eto, Spin-dependent transport in multi-terminal Aharonov-Casher ring with quantum dot, Journal of Physics: Conf. Series, 864, 2017, 12059, DOI: 10.1088/1742.
 108. Atsushi Iwasaki and Mikio Eto, Enhanced current fluctuation in Coulomb blockade regime of multilevel quantum dot, Journal of Physics: Conf. Series, 864, 2017, 12034, DOI: 10.1088/1742.
 109. Vu The Dang, Masaki Toji, Ho Thanh Huy, Shigeyuki Miyajima, Hiroaki Shishido, Mutsuo Hidaka, Masahiko Hayashi and Takekazu Ishida, Vector sensor for scanning SQUID microscopy, Journal of Physics: Conf. Series, 871, 2017, 12075, DOI: 10.1088/1742.
 110. F. Hashimoto and N. Mori, Inter-layer coupling effects on vertical electron transport in multilayer graphene nanoribbons, Journal of Physics: Conference Series, 906, 2017, 12004, DOI: 10.1088/1742.
 111. Rin Okuyama, Wataru Izumida, and Mikio Eto, Topological Phase Transition in Metallic Single-Wall Carbon Nanotube, Journal of the Physical Society of Japan, 86, 2017, 13702, DOI: 10.7566/JPSJ.86.013702.
 112. K. Wakui, Y. Yonezu, T. Aoki, M. Takeoka, and K. Semba, Simple method for fabrication of diamond nanowires by inductively coupled plasma reactive ion etching, Jpn. J. Appl. Phys., 56, 2017, 58005, DOI: 10.7567/JJAP.56.058005.
 113. 根岸 良太、小林 慶裕、酸化グラフェンからの高結晶性グラフェン薄膜の合成とバイオセンサー応用, MATERIAL STAGE, 17, 2017, 1.
 114. Bastien Bonafant, Hervé Boukari, Adeline Grenier, Isabelle Mouton, Pierre, Atomic Scale Structural Characterization of Epitaxial (Cd,Cr)Te Magnetic Semiconductor, Microscopy and Microanalysis, 23, 2017, 717, DOI: 10.1017/S1431927617000642.
 115. K. Yoshida and K. Hirakawa, Stochastic resonance in bistable atomic switches, Nanotechnology, 28, 2017, 125205, DOI: 10.1088/1361.
 116. Hiroshi Tomizawa, Katsuya Suzuki, Tomohiro Yamaguchi, Seiji Akita and Koji Ishibashi, Control of tunnel barriers in multi-wall carbon nanotubes using focused ion beam irradiation, Nanotechnology, 28, 2017, 165302, DOI: 10.1088/1361.
 117. R. Anufriev, A. Ramiere, J. Maire, and M. Nomura, Heat guiding and focusing using ballistic phonon transport in phononic nanostructures, Nature Communications, 8, 2017, 15505, DOI: 10.1038/ncomms15505.
 118. Kaifeng Yang, Katsumi Nagase, Yoshiro Hirayama, Tetsuya D. Mishima, Michael B. Santos, and Hongwu Liu, Role of chiral quantum Hall edge states in nuclear spin polarization, Nature Communications, 8, 2017, 15084, DOI: 10.1038/ncomms15084.
 119. Erwann Bocquillon, Russell S. Deacon, Jonas Wiedenmann, Philipp Leubner, Teun M. Klapwijk, Christoph Brüne, Koji Ishibashi, H. Buhmann, Laurens W. Molenkamp, Gapless Andreev bound states in the quantum spin Hall insulator HgTe, Nature Nanotechnology, 12, 2017, 137, DOI: 10.1038/nnano.2016.159.
 120. Yuhei Sekiguchi, Naeko Niikura, Ryota Kuroiwa, Hiroki Kano and Hideo Kosaka, Optical holonomic single quantum gates with a geometric spin under with a zero field, Nature Photonics, 11, 2017, 309, DOI: 10.1038/nphoton.2017.40.
 121. Florian Schäfer, Hideki Konishi, Adrien Bouscal, Tomoya Yagami and Yoshiro Takahashi, Spin dependent inelastic collisions between metastable state two-electron atoms and ground state alkali-atoms, New J. Phys., 19, 2017, 103039, DOI: 10.1088/1367.
 122. I. Mahboob, M. Villiers, K. Nishiguchi, D. Hatanaka, A. Fujiwara and H. Yamaguchi, A correlated electromechanical system, New Journal of Physics, 19, 2017, 33026, DOI: 10.1088/1367.
 123. Michael Hanks, Michael Trupke, Jörg Schmiedmayer, William J. Munro, Kae Nemoto, High-fidelity spin measurement on the nitrogen-vacancy center, New Journal of Physics, 19, 2017, 103002, DOI: 10.1088/1367.
 124. TAKEHIKO TAWARA, YOSHIHIRO KAWAKAMI, HIROO OMI, REINA KAJI, SATORU ADACHI, AND HIDEKI GOTOH, Mechanism of concentration quenching in epitaxial (ErSc_{1-x})₂O₃ thin layers, Optical Materials Express, 7, 2017, 1097, DOI: 10.1364/OME.7.001097.
 125. Kobayashi Toshiki, Yamazaki Daisuke, Matsuki Kenichiro, Ikuta Rikizo, Miki Shigehito, Yamashita Taro, Terai Hirotaka, Yamamoto Takashi, Koashi Masato, Imoto Nobuyuki, Mach-Zehnder interferometer using frequency-domain beamsplitter, Optics Express, 25, 2017, 12052, DOI: 10.1364/OE.25.012052.
 126. Kae Nemoto, Simon Devitt, William J. Munro, Noise management to achieve superiority in quantum information systems, Philosophical Transactions A, 375 (Issue 2099), 2017, 20160236, DOI: 10.1098/rsta.2016.0236.
 127. Hayata Yamasaki, Akihito Soeda, Mio Murao, Graph-associated entanglement cost of a multipartite state in exact and finite-block-length approximate constructions, Phys. Rev. A, 96, 2017, 32330, DOI: 10.1103/PhysRevA.96.032330.
 128. Mateusz Borkowski, Alexei A. Buchachenko, Roman Ciuryło, Paul S. Julienne, Hirotaka Yamada, Yuu Kikuchi, Kakeru Takahashi, Yosuke Takasu, and Yoshiro Takahashi, Beyond-Born-Oppenheimer effects in sub-kHz-precision photoassociation spectroscopy of ytterbium atoms, Phys. Rev. A, 96, 2017, 63405, DOI: 10.1103/PhysRevA.96.063405.
 129. Yuichiro Matsuzaki and Simon Benjamin, Magnetic-field sensing with quantum error detection under the effect of energy relaxation, Phys. Rev. A, 95, 2017, 32303, DOI: 10.1103/PhysRevA.95.032303.
 130. R. Anufriev and M. Nomura, Heat conduction engineering in pillar-based phononic crystals, Phys. Rev. B, 95, 2017, 155432, DOI: 10.1103/PhysRevB.95.155432.
 131. Russell Deacon, Jonas Wiedenmann, Erwann Bocquillon, Teun M. Klapwijk, Philipp Leubner, Christoph Brüne, Seigo Tarucha, Koji Ishibashi, Hartmut Buhmann, Laurens W. Molenkamp, Josephson radiation from gapless Andreev bound states in HgTe-based topological junctions, Phys. Rev. X, 7, 2017, 21011, DOI: 10.1103/PhysRevX.7.021011.
 132. M. H. Fauzi, A. Singha, M. F. Sahdan, M. Takahashi, K. Sato, K. Nagase, B. Muralidharan, and Y. Hirayama, Resistively detected NMR line shapes in a quasi-one-dimensional electron system, Physical Review B (Rapid Communications), B95, 2017, 241404, DOI: 10.1103/PhysRevB.95.241404.
 133. Yuichiro Matsuzaki, Shojun Nakayama, Akihito Soeda, Shiro Saito, and Mio Murao, Projective measurement of energy on an ensemble of qubits with unknown frequencies, Physical Review A, 95, 2017, 62106, DOI: 10.1103/PhysRevA.95.062106.
 134. F. Schäfer, H. Konishi, A. Bouscal, T. Yagami, and Y. Takahashi, Spectroscopic determination of magnetic-field-dependent interactions in an ultracold Yb(3P₂)-Li mixture, Physical Review A, 96, 2017, 32711, DOI: 10.1103/PhysRevA.96.032711.
 135. R. Yamamoto, J. Kobayashi, K. Kato, T. Kuno, Y. Sakura, and Y. Takahashi, Site-resolved imaging of single atoms with a Faraday quantum gas microscope, Physical Review A, 96, 2017, 33610, DOI: 10.1103/PhysRevA.96.033610.
 136. Y. Takasu, Y. Fukushima, Y. Nakamura, and Y. Takahashi, Magnetoassociation of a Feshbach molecule and spin-orbit interaction between the

- ground and electronically excited states, *Physical Review A*, 96, 2017, 23602, DOI: 10.1103/PhysRevA.96.023602.
137. Ai Iwakura, Yuichiro Matsuzaki, and Yasushi Kondo, Engineered noisy environment for studying decoherence, *Physical Review A*, 96, 2017, 32303, DOI: 10.1103/PhysRevA.96.032303.
 138. Sayaka Kitazawa, Yuichiro Matsuzaki, Soya Saijo, Kosuke Kakuyanagi, Shiro Saito, and Junko Ishi-Hayase, Vector-magnetic-field sensing via multifrequency control of nitrogen-vacancy centers in diamond, *Physical Review A*, 96, 2017, 42115, DOI: 10.1103/PhysRevA.96.042115.
 139. Y. Matsuzaki and S. C. Benjamin, Magnetic-field sensing with quantum error detection under the effect of energy relaxation, *Physical Review A*, 95, 2017, 32303, DOI: 10.1103/PhysRevA.95.032303.
 140. W. Izumida, L. Milz, M. Marganska, M. Grifoni, Topology and zero energy edge states in carbon nanotubes with superconducting pairing, *Physical Review B*, 96, 2017, 125414, DOI: 10.1103/PhysRevB.96.125414.
 141. S. Takahashi, Y. Ota, T. Tajiri, J. Tatebayashi, S. Iwamoto, Y. Arakawa, Circularly polarized vacuum field in three-dimensional chiral photonic crystals probed by quantum dot emission, *Physical Review B*, 96, 2017, 195404, DOI: 10.1103/PhysRevB.96.195404.
 142. Masashi Nantoh, Kengo Takashima, Takahiro Yamamoto, and Koji Ishibashi, Sublattice site dependence of local electronic states in superstructures of CO built on a Cu(111) surface, *Physical Review B*, Vol.96, No.3, 2017, 35424, DOI: 10.1103/PhysRevB.96.035424.
 143. A. Lafuente, Resonant optical control of the spin of a single Cr atom in a quantum dot, *Physical Review B*, 95, 2017, 035303, DOI: 10.1103/PhysRevB.95.035303.
 144. A. Sawada and T. Koga, Universal modeling of weak antilocalization corrections in quasi-two-dimensional electron systems using predetermined return orbitals, *Physical Review E*, 95, 2017, 23309, DOI: 10.1103/PhysRevE.95.023309.
 145. A. Sawada and T. Koga, Universal modeling of weak antilocalization corrections in quasi-two-dimensional electron systems using predetermined return orbitals, *PHYSICAL REVIEW E*, 95, 2017, 23309, DOI: 10.1103/PhysRevE.95.023309.
 146. Hideki Ozawa, Shintaro Taie, Tomohiro Ichinose, Yoshiro Takahashi, Interaction-driven shift and distortion of a flat band in an optical Lieb lattice, *Physical Review Letters*, 118, 2017, 175301, DOI: 10.1103/PhysRevLett.118.175301.
 147. M. Kawamura, R. Yoshimi, A. Tsukazaki, K. S. Takahashi, M. Kawasaki, and Y. Tokura, Current-driven instability of quantum anomalous Hall effect in ferromagnetic topological insulator thin films, *Physical Review Letters*, 119, 2017, 16803, DOI: 10.1103/PhysRevLett.119.016803.
 148. Hideki Ozawa, Shintaro Taie, Tomohiro Ichinose, Yoshiro Takahashi, Interaction-driven shift and distortion of a flat band in an optical Lieb lattice, *Physical Review Letters*, 118, 2017, 175301, DOI: 10.1103/PhysRevLett.118.175301.
 149. A. Srinivasan, D. S. Miserev, K. L. Hudson, O. Klochan, K. Muraki, Y. Hirayama, D. Reuter, A. D. Wieck, O. P. Sushkov, and A. R. Hamilton, Detection and Control of Spin-Orbit Interactions in a GaAs Hole Quantum Point Contact, *Physical Review Letters*, 118, 2017, 146801, DOI: 10.1103/PhysRevLett.118.146801.
 150. K. Kato, H. Matsui, H. Tabata, M. Takenaka, S. Takagi, Proposal and demonstration of oxide-semiconductor/(Si, SiGe, Ge) bilayer tunneling field effect transistor with type-II energy band alignment, *Proc. of 63rd IEEE Annual International Electron Devices Meeting (IEDM)*, , 2017, 377, DOI: 10.1109/IEDM.2017.8268398.
 151. Michael Hanks, Nicolò Lo Piparo, Michael Trupke, Jorg Schmiedmayer, William J. Munro and Kae Nemoto, A universal quantum module for quantum communication, computation and metrology, *Proc. of SPIE*, 10358, 2017, 103580K, DOI: 10.1117/12.2271537.
 152. Hiroaki Matsui and Hitoshi Tabata, Mechano-plasmon manipulations at internanoparticle gaps based on doped oxide semiconductors, *Proc. of the 24th Congress of International Conference*, 2017, .
 153. D. Hatanaka, T. Darras, I. Mahboob, K. Onomitsu, and H. Yamaguchi, Broadband reconfigurable logic gates in phonon waveguides, *Sci. Rep.*, 7, 2017, 12745, DOI: 10.1038/s41598.
 154. M. Yasuda, K. Takei, T. Arie, S. Akita, Direct measurement of optical trapping force gradient on polystyrene microspheres using a carbon nanotube mechanical resonator, *Sci. Rep.*, 7, 2017, 2825, DOI: 10.1038/s41598.
 155. L. D. Anh, N. Okamoto, M. Seki, H. Tabata, M. Tanaka, and S. Ohya, Hidden peculiar magnetic anisotropy at the interface in a ferromagnetic perovskite-oxide heterostructure, *Sci. Rep.*, 7, 2017, 8715, DOI: 10.1038/s41598.
 156. Y. Yonezu, K. Wakui, K. Furusawa, M. Takeoka, K. Semba, and T. Aoki, Efficient Single-Photon Coupling from a Nitrogen-Vacancy Center Embedded in a Diamond Nanowire Utilizing an Optical Nanofiber, *Sci. Rep.*, 7, 2017, 12985, DOI: 10.1038/s41598.
 157. J. Maire, R. Anufriev, R. Yanagisawa, S. Volz, and M. Nomura, Heat conduction tuning using the wave nature of phonons, *Science Advances*, 3, 2017, e1700027, DOI: 10.1126/sciadv.1700027.
 158. M. Mogi, M. Kawamura, A. Tsukazaki, R. Yoshimi, K. S. Takahashi, M. Kawasaki, and Y. Tokura, Tailoring tricolor structure of magnetic topological insulator for robust axion insulator, *Science Advances*, 3, 2017, 1669, DOI: 10.1126/sciadv.aao1669.
 159. Andreas Angerer, Stefan Putz, Dmitry O. Krimer, Thomas Astner, Matthias Zens, Ralph Glattauer, Kirill Streltsov, William J. Munro, Kae Nemoto, Stefan Rotter, Jörg Schmiedmayer and Johannes Majer, Ultralong relaxation times in bistable hybrid quantum systems, *Science Advances*, 3, 2017, e1701626, DOI: 10.1126/sciadv.1701626.
 160. Takafumi Tomita, Shuta Nakajima, Ippei Danshita, Yosuke Takasu and Yoshiro Takahashi, Observation of the Mott insulator to superfluid crossover of a driven-dissipative Bose-Hubbard system, *Science Advances*, 3, 2017, e1701513, DOI: 10.1126/sciadv.1701513.
 161. J. Maire, R. Anufriev, and M. Nomura, Ballistic thermal transport in silicon nanowires, *Scientific Reports*, 7, 2017, 41794, DOI: 10.1038/srep41794.
 162. Rui Wang, Russell Deacon, Jun Yao, Charles Lieber, and Koji Ishibashi, Electrical modulation of weak-antilocalization and spin orbit interaction in dual gated Ge/Si core/shell nanowires, *Semicond. Sci. Technol.*, 32, 2017, 94002, DOI: 10.1088/1361.
 163. H. Yamaguchi, GaAs-based micro/nanomechanical resonators, *Semicond. Sci. Technol.*, 32, 2017, 1030003, DOI: 10.1088/1361.
 164. 根岸 良太, 小林 慶裕, Synthesis of highly crystalline graphene films showing band-like transport from the defective graphene oxide, *ナノ学会会報*, 15, 2017, 39.
 165. 山口 浩司, 非線形マイクロ・ナノメカニカル共振器の物理と応用, *日本物理学会誌*, 72, 2017, 554.

2018年

166. Y. Takane and A. Kanda, Andreev reflection in a proximity junction of graphene: Influence of a naturally formed pn junction, *J. Phys. Conf. Ser.*, 969, 2018, 12155, DOI: 10.1088/1742.
167. K. Yarimizu, H. Tomori, K. Watanabe, T. Taniguchi, and A. Kanda, Electron transport in a bilayer graphene/layered superconductor NbSe₂ junction: effect of work function difference, *J. Phys. Conf. Ser.*, 969, 2018, 12147, DOI: 10.1088/1742.
168. T. Inoue, Y. Mochizuki, K. Takei, T. Arie, S. Akita, Tuning of the temperature dependence of the resonance frequency shift in atomically thin mechanical resonators with van der Waals heterojunctions, *2D Mater.*, 5, 2018, 45022, DOI: 10.1088/2053.
169. H. Matsui, T. Hasebe, N. Hasuike and H. Tabata, Plasmonic Heat Shielding in the Infrared Range Using Oxide Semiconductor Nanoparticles Based on Sn-Doped In₂O₃: Effect of Size and Interparticle Gap, *ACS Appl. Nano Materials*, 1, 2018, 1853, DOI: 10.1021/acsnano.8b00260.
170. R. Anufriev, S. Gluchko, S. Volz, and M. Nomura, Quasi-ballistic heat conduction due to levy phonon flights in silicon nanowires, *ACS Nano*, 12, 2018, 11928, DOI: 10.1021/acsnano.8b07597.
171. Kazuki Yoshino, Takashi Kato, Yuta Saito, Junpei Shitaba, Tateki Hanashima, Kazuma Nagano, Shohei Chiashi, and Yoshikazu Homma, Temperature Distribution and Thermal Conductivity Measurements of Chirality-Assigned Single-Walled Carbon Nanotubes by Photoluminescence Imaging Spectroscopy, *ACS Omega*, 3, 2018, 4352, DOI: 10.1021/acsomega.8b00607.

172. H. Sugime, T. Ushiyama, K. Nishimura, Y. Ohno, and S. Noda, An interdigitated electrode with dense carbon nanotube forests on conductive supports for electrochemical biosensors, *Analyst*, 143, 2018, 3635, DOI: 10.1039/C8AN00528A.
173. Y. Arashida, K. Murakami, I. Katayama, and J. Takeda, Ultrafast Optical Control of Multiple Coherent Phonons in Silicon Carbide Using a Pulse Shaping Technique, *Appl. Phys. Exp.*, 11, 2018, 122701, DOI: 10.7567/APEX.11.122701.
174. Y. Ota, D. Takamiya, R. Ohta, H. Takagi, N. Kumagai, S. Iwamoto and Y. Arakawa, Large vacuum Rabi splitting between a single quantum dot and an H0 photonic crystal nanocavity, *Appl. Phys. Lett.*, 112, 2018, 93191, DOI: 10.1063/1.5016615.
175. M. Shimizu, T. Makino, T. Iwasaki, K. Tahara, H. Kato, N. Mizuochi, S. Yamasaki, M. Hatano, Charge state control of ensemble nitrogen vacancy center by n-i-n diamond junction, *Applied Physics Express*, 11, 2018, 033004, DOI: 10.7567/APEX.11.033004.
176. Kazuya Niizeki, Kohei Ikeda, Mingyang Zheng, Xiuping Xie, Kotaro Okamura, Nobuyuki Takei, Naoto Namekata, Shuichiro Inoue, Hideo Kosaka, and Tomoyuki Horikiri, Ultrabright narrow - band telecom two - photon source for long - distance quantum communication, *Applied Physics Express*, 11, 2018, 42801, DOI: 10.7567/APEX.11.042801.
177. Rangga P Budoyo, Kosuke Kakuyanagi, Hiraku Toida, Yuichiro Matsuzaki, William J Munro, Hiroshi Yamaguchi, Shiro Saito, Phonon-bottlenecked spin relaxation of Er³⁺: Y₂SiO₅ at sub-kelvin temperatures, *Applied Physics Express*, 11, 2018, 43002, DOI: 10.7567/APEX.11.043002/meta.
178. T. Murai, T. Makino, H. Kato, M. Shimizu, D. E. Herbschleb, Y. Doi, H. Morishita, M. Fujiwara, M. Hatano, S. Yamasaki, N. Mizuochi, Engineering of Fermi level by n-in diamond junction for control of charge states of NV centers, *Applied Physics Letters*, 112, 2018, 111903, DOI: 10.1063/1.5010956.
179. A. Ishida, K. Naruse, S. Nakashima, Y. Takano, S. Du, and K. Hirakawa, Interband absorption in PbTe/PbSnTe-based type-II superlattices, *Applied Physics Letters*, 113, 2018, 72103, DOI: 10.1063/1.5042764.
180. R. Watanabe, R. Yoshimi, M. Shirai, T. Tanigaki, M. Kawamura, A. Tsukazaki, K. S. Takahashi, R. Arita, M. Kawasaki, and Y. Tokura, Emergence of interfacial conduction and ferromagnetism in MnTe/InP, *Applied Physics Letters*, 113, 2018, 181602, DOI: 10.1063/1.5050446.
181. M. Asano, R. Ohta, T. Yamamoto, H. Okamoto, and H. Yamaguchi, An opto-electro-mechanical system based on evanescently-coupled optical microbottle and electromechanical resonator, *Applied Physics Letters*, 112, 2018, 201103, DOI: 10.1063/1.5022115.
182. D. Hatanaka, A. Gourmelon, I. Mahboob, and H. Yamaguchi, Selective activation of localized mechanical resonators via a phonon waveguide, *Applied Physics Letters*, 113, 2018, 43104, DOI: 10.1063/1.5037484.
183. Soya Saijo, Yuichiro Matsuzaki, Shiro Saito, Tatsuma Yamaguchi, Ikuya Hanano, Hideyuki Watanabe, Norikazu Mizuochi, and Junko Ishi-Hayase, AC magnetic field sensing using continuous-wave optically detected magnetic resonance of nitrogen-vacancy centers in diamond, *Applied Physics Letters*, 113-8, 2018, 82405, DOI: 10.1063/1.5024401.
184. Ken Yahata, Yuichiro Matsuzaki, Shiro Saito, Hideyuki Watanabe and Junko Ishi-Hayase, Demonstration of simultaneous vector magnetic field sensing with nitrogen-vacancy centers in diamond via multifrequency control of microwave pulses, *Applied Physics Letters*, 114, 2018, 22404, DOI: 10.1063/1.5079925.
185. T. Masuda, K. Sekine, K. Nagase, K. S. Wickramasinghe, T. D. Mishima, M. B. Santos, Y. Hirayama, Transport characteristics of InSb trench-type in-plane gate quantum point contact, *APPLIED PHYSICS LETTERS*, 112(19), 2018, 192103, DOI: 10.1063/1.5023836.
186. Hotta Yasushi, Kawayama Iwao, Miyake Shozo, Saiki Ikuya, Nishi Shintaro, Yamahara Kota, Arafune Koji, Yoshida Haruhiko, Satoh Shin, Control of dipole properties in high-k and SiO₂ stacks on Si substrates with tricolor superstructure, *APPLIED PHYSICS LETTERS*, 113, 2018, 12103, DOI: 10.1063/1.5034494.
187. Kato Kimihiko, Matsui Hiroaki, Tabata Hitoshi, Takenaka Mitsuru, Takagi Shinichi, TiN/Al₂O₃/ZnO gate stack engineering for top-gate thin film transistors by combination of post oxidation and annealing, *APPLIED PHYSICS LETTERS*, 112, 2018, 162105, DOI: 10.1063/1.5020080.
188. J. R. Ball, Y. Yamashiro, H. Sumiya, S. Onoda, T. Ohshima, J. Isoya, D. Konstantinov, and Y. Kubo, Loop-gap microwave resonator for hybrid quantum systems, *Applied Physics Letters*, 112, 2018, 204102, DOI: 10.1063/1.5025744.
189. Satoru Adachi, Yoshihiro Kawakami, Reina Kaji, Takehiko Tawara, Hiroo Omi, Investigation of Population Dynamics in 1.54- μ m Telecom Transitions of Epitaxial (Er_xSc_{1-x})₂O₃ Thin Layers for Coherent Population Manipulation: Weak Excitation Regime, *Applied Sciences*, 8, 2018, 874, DOI: 10.3390/app8060874.
190. Y. Chen, L. M. Dai, and Y. Ohno, Carbons for wearable devices - Commentary and introduction to the virtual special issue, *Carbon*, 126, 2018, 621, DOI: 10.1016/j.carbon.2017.09.079.
191. K. Nishimura, T. Ushiyama, N. X. Viet, M. Inaba, S. Kishimoto, and Y. Ohno, Enhancement of the electron transfer rate in carbon nanotube flexible electrochemical sensors by surface functionalization, *Electrochimica Acta*, 295, 2018, 157, DOI: 10.1016/j.electacta.2018.DOI: 10.147.
192. S. Takahashi, T. Tajiri, K. Watanabe, Y. Ota, S. Iwamoto, and Y. Arakawa, High-Q nanocavities in semiconductor-based three-dimensional photonic crystals, *Electronics Letters*, 54, 2018, 305, DOI: 10.1049/el.2017.4542.
193. 加藤 公彦, 松井 裕章, 田畑 仁, 竹中 充, 高木 信一, Type-II エネルギーバンド構造を有する酸化物半導体/(Si,SiGe,Ge)積層型トンネル電界効果トランジスタの提案と動作実証 (シリコン材料・デバイス)--(先端 CMOS デバイス・プロセス技術(IEDM 特集)), *IEICE technical report*, 117, 2018, 5.
194. 加藤 公彦, 松井 裕章, 田畑 仁, 竹中 充, 高木 信一, 酸化物半導体/IV族半導体を用いた超低消費電力トンネルトランジスタの提案と素子設計 (シリコン材料・デバイス), *IEICE technical report*, 118, 2018, 11.
195. K. Hattori, R. Kobayashi, T. Numata, S. Inoue and D. Fukuda, Complex Impedance of Fast Optical Transition Edge Sensors up to 30MHz, *J. Low Temp. Phys.*, 193, 2018, 217, DOI: 10.1007/s10909.
196. Takumi Inaba, Yuichiro Tanaka, Satoru Konabe, and Yoshikazu Homma, Effects of Chirality and Defect Density on the Intermediate Frequency Raman Modes of Individually Suspended Single-Walled Carbon Nanotubes, *J. Phys. Chem. C*, 122, 2018, 9184, DOI: 10.1021/acs.jpcc.8b01017.
197. T. Hoshino and N. Mori, Electron mobility of two-dimensional electron gas in InGaN heterostructures: Effects of alloy disorder and random dipole scatterings, *Japanese Journal of Applied Physics*, 57, 2018, 04FG06, DOI: 10.7567/JJAP.57.04FG06.
198. T. Kuroda and N. Mori, Resonant enhancement of band-to-band tunneling in in-plane MoS₂/WS₂ heterojunctions, *Japanese Journal of Applied Physics*, 57, 2018, 04FP03, DOI: 10.7567/JJAP.57.04FP03.
199. Tatsuma Yamaguchi, Yuichiro Matsuzaki, Shiro Saito, Soya Saijo, Hideyuki Watanabe, Norikazu Mizuochi, Junko Ishi-Hayase, Bandwidth analysis of AC magnetic field sensing based on electronic spin double-resonance of nitrogen-vacancy centers in diamond, *Japanese Journal of Applied Physics*, 58, 2018, 100901, DOI: 10.7567/1347.
200. R. Negishi, K. Takashima and Y. Kobayashi, Investigation of surface potentials in reduced graphene oxide flake by Kelvin force microscopy, *Japanese Journal of Applied Physics*, 57, 2018, 06HD02, DOI: 10.7567/JJAP.57.06HD02.
201. T. Kuribayashi, T. Motoyama, Y. Arashida, I. Katayama, and J. Takeda, Anharmonic phonon-polariton dynamics in ferroelectric LiNbO₃ studied with single shot pump-probe imaging spectroscopy, *Journal of Applied Physics*, 123, 2018, 174103, DOI: 10.1063/1.5021379.
202. H. Kase, R. Negishi, M. Arifuku, N. Kiyoyanagi and Y. Kobayashi, Biosensor response for target molecules with inhomogeneous charge localization, *Journal of Applied Physics*, 124, 2018, 64502, DOI: 10.1063/1.5036538.
203. M. Bescond, D. Logoteta, F. Michellini, N. Cavassilas, T. Yan, A. Yangui, M. Lannoo, and K. Hirakawa, Thermionic cooling devices based on resonant-tunneling AlGaAs/GaAs heterostructure, *Journal of Physics: Condensed Matter*, 30, no. 6, 2018, 64005, DOI: 10.1088/1361.

204. Rin Okuyama, Wataru Izumida, Mikio Eto, Topology in single-wall carbon nanotube of zigzag and armchair type, *Journal of Physics: Conference Series*, 969, 2018, 12137, DOI: 10.1088/1742.
205. M. Nomura, J. Shiomi, T. Shiga, and R. Anufriev, Thermal phonon engineering by tailored nanostructures, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 57, 2018, 80101, DOI: 10.7567/JJAP.57.080101.
206. Jian Sun, Russell Deacon, Rui Wang, Jun Yao, Charles Lieber, Koji Ishibashi, Helical Hole State in Multiple Conduction Modes in Ge/Si Core/Shell Nanowire, *Nano Lett.*, 18, 2018, 6144, DOI: 10.1021/acs.nanolett.8b01799.
207. M. Jung, K. Yoshida., K. Park, X., Quantum Dots Formed in Three-dimensional Dirac Semimetal Cd3As2 Nanowires, *Nano Letters*, 18, no. 3, 2018, 1863, DOI: 10.1021/acs.nanolett.7b05165.
208. H. Kim, S. Park, R. Okuyama, K. Kyhm, M. Eto, R. A. Taylor, G. Nogues, L. S. Dang, M. Potemski, K. Je, J. Kim, J. Kyhm, and J. Song, Light Controlled Optical Aharhonorv-Bohm Oscillations in a Single Quantum Ring, *NANO Letters*, 18, 2018, 6188, DOI: 10.1021/acs.nanolett.8b02131.
209. K. Yoshioka, I. Katayama, Y. Arashida, A. Ban, Y. Kawada, H. Takahashi, and J. Takeda, Tailoring Single-Cycle Near-Field in a Tunnel Junction with Carrier-Envelope Phase-Controlled Terahertz Electric Fields, *Nano Letters*, 18, 2018, 5198, DOI: 10.1021/acs.nanolett.8b02161.
210. Q. Weng, K. Lin, K. Yoshida, H. Nema, S. Komiyama, S. Kim, K. Hirakawa, and Y. Kajihara, Near-field radiative nano-thermal imaging of non-uniform Joule heating in narrow metal wires, *Nano Letters*, 18, no. 7, 2018, 4220, DOI: 10.1021/acs.nanolett.8b01178.
211. T. Tsurugaya, K. Yoshida, F. Yajima, M. Shimizu, Y. Homma, and K. Hirakawa, Terahertz spectroscopy of individual carbon nanotube quantum dots, *Nano Letters* 2019, 19, 2018, 242, DOI: 10.1021/acs.nanolett.8b03801.
212. J. Hirotsani, S. Kishimoto, and Y. Ohno, Origins of the variability of the electrical characteristics of solution-processed carbon nanotube thin-film transistors and integrated circuits, *Nanoscale Adv.*, 1, 2018, 636, DOI: 10.1039/C8NA00184G.
213. M. Kurosu, D. Hatanaka, K. Onomitsu, and H. Yamaguchi, On-chip temporal focusing of elastic waves in a phononic crystal waveguide, *Nature Communications*, 9, 2018, 1331, DOI: 10.1038/s41467.
214. Y. Okazaki, I. Mahboob, K. Onomitsu, S. Sasaki, S. Nakamura, N. Kaneko, and H. Yamaguchi, Dynamical coupling between a nuclear spin ensemble and electromechanical phonons, *Nature Communications*, 9, 2018, 2993, DOI: 10.1038/s41467.
215. K. Hashimoto, T. Tomimatsu, K. Sato, and Y. Hirayama, Scanning nuclear resonance imaging of a hyperfine-coupled quantum Hall system, *Nature Communications*, 9, 2018, 2215, DOI: 10.1038/s41467.
216. S. Du, K. Yoshida, Y. Zhang, I. Hamada, and K. Hirakawa, Terahertz dynamics of electron-vibron coupling in single molecules with tunable electrostatic potential, *Nature Photonics*, vol.12, 2018, 608, DOI: 10.1038/s41566.
217. Andreas Angerer, Kirill Streltsov, Thomas Astner, Stefan Putz, Hitoshi Sumiya, Shinobu Onoda, Junichi Isoya, William J. Munro, Kae Nemoto, Jörg Schmiedmayer & Johannes Majer, Superradiant emission from colour centres in diamond, *Nature Physics*, 14, 2018, 1168, DOI: 10.1038/s41567.
218. Shane Dooley, Michael Hanks, Shojun Nakayama, William J. Munro, and Kae Nemoto, Robust quantum sensing with strongly interacting probe systems, *npj Quantum Information*, 4, 2018, article number 24, DOI: 10.1038/s41534.
219. Chikako Uchiyama, William J. Munro, and Kae Nemoto, Environmental engineering for quantum energy transport, *npj Quantum Information*, 4, 2018, article number 33, DOI: 10.1038/s41534.
220. Y. Kawada, K. Yoshioka, Y. Arashida, I. Katayama, J. Takeda, and H. Takahashi, Simultaneous Acquisition of Complex Transmittance and Birefringence with Two Counter-Rotating Circularly Polarized THz Pules, *Opt. Exp.*, 26, 2018, 30420, DOI: 10.1364/OE.26.030420.
221. R. Katsumi, Y. Ota, M. Kakuda, S. Iwamoto, and Y. Arakawa, Transfer-printed single-photon sources coupled to wire waveguides, *Optica*, 5, 2018, 691, DOI: 10.1364/OPTICA.5.000691.
222. Tomohiro Inaba, Takehiko Tawara, Hiroo Omi, Hideki Yamamoto, Hideki Gotoh, Epitaxial growth and optical properties of Er-doped CeO2 on Si(111), *Optical Materials Express*, 8, 2018, 2843, DOI: 10.1364/OME.8.002843.
223. Chee Fai Fong, Yasutomo Ota, Satoshi Iwamoto, and Yasuhiko Arakawa, Scheme for media conversion between electronic spin and photonic orbital angular momentum based on photonic nanocavity, *Optics Express*, 26, 2018, 21219, DOI: 10.1364/OE.26.021219.
224. H. Yamasaki, A. Pirker, M. Murao, W. Dür, B. Kraus, Multipartite entanglement outperforms bipartite entanglement under limited quantum system sizes, *Phys. Rev. A*, 98, 2018, 52313, DOI: 10.1103/PhysRevA.98.052313.
225. J. Wolfson, T. Shin, S. W. Teitelbaum, I. Katayama, T. Kawano, J. Takeda, K. A. Nelson, Long-Lived Photoinduced Response Observed under Extreme Photoexcitation Densities in a one-dimensional Peierls Insulator, *Phys. Rev. B*, 98, 2018, 54111, DOI: 10.1103/PhysRevB.98.054111.
226. H. Kamata, R. S. Deacon, S. Matsuo, K. Li, S. Jeppesen, L. Samuelson, H. Q. Xu, K. Ishibashi, and S. Tarucha., Anomalous modulation of Josephson radiation in nanowire-based Josephson junctions, *Phys. Rev. B*, 98, 2018, 41302, DOI: 10.1103/PhysRevB.98.041302.
227. I. Katayama, H. Kawakami, T. Hagiwara, Y. Arashida, Y. Minami, L., Terahertz-Field-Induced Carrier Generation in Bi1-xSbx Dirac Electron Systems, *Phys. Rev. B*, 98, 2018, 214302, DOI: 10.1103/PhysRevB.98.214302.
228. Rangga P. Budoyo, Kosuke Kakuyanagi, Hiraku Toida, Yuichiro Matsuzaki, William J. Munro, Hiroshi Yamaguchi, and Shiro Saito, Electron paramagnetic resonance spectroscopy of Er³⁺:Y₂SiO₅ using a Josephson bifurcation amplifier: Observation of hyperfine and quadrupole structures, *Phys. Rev. Materials (R)*, 2, 2018, 11403, DOI: 10.1103/PhysRevMaterials.2.011403.
229. Kouichi Akahane, Hiroyuki Yamamoto, Atsushi Matsumoto, Toshimasa Umezawa, Hideyuki Sotobayashi, Naokatsu Yamamoto, Polarization Dependence of Photoluminescence from InAs Quantum Dots Grown on InP(311)B Substrates Using Digital Embedding Method, *Physica Status Solidi A*, 215, 2018, 1700418, DOI: 10.1002/pssa.201700418.
230. Emi Yukawa, G. J. Milburn, and Kae Nemoto, Fast macroscopic-superposition-state generation by coherent driving, *Physical Review A*, 97, 2018, 13820, DOI: 10.1103/PhysRevLett.120.060403.
231. Yusuke Hama, Emi Yukawa, William J. Munro, and Kae Nemoto, Negative-temperature-state relaxation and reservoir-assisted quantum entanglement in double-spin-domain systems, *Physical Review A*, 98, 2018, 52133, DOI: 10.1103/PhysRevA.98.052133.
232. S. A. Uriri, T. Tashima, X. Zhang, M. Asano, M. Bechu, D. Ö. Güney, T. Yamamoto, Ş. K. Özdemir, M. Wegener, M. S. Tame, Active control of a plasmonic metamaterial for quantum state engineering, *Physical Review A*, 97, 2018, 53810, DOI: 10.1103/PhysRevA.97.053810.
233. K. Hayashi, Y. Matsuzaki, T. Taniguchi, T. Shimo, Optimization of Temperature Sensitivity Using the Optically Detected Magnetic-Resonance Spectrum of a Nitrogen-Vacancy Center Ensemble, *Physical Review Applied*, 10, 2018, 34009, DOI: 10.1103/PhysRevApplied.10.034009.
234. M. Marganska, L. Milz, W. Izumida, C. Strunk, M. Grifoni, Majorana quasiparticles in semiconducting carbon nanotubes, *Physical Review B*, 97, 2018, 75141, DOI: 10.1103/PhysRevB.97.075141.
235. Peter Stano, Tomosuke Aono, Minoru Kawamura, Dipolelike dynamical nuclear spin polarization around a quantum point contact, *Physical Review B*, 97, 2018, 75440, DOI: 10.1103/PhysRevB.97.075440.
236. Minoru Kawamura, Masataka Mogi, Ryutarō Yoshimi, Atsushi Tsukazaki, Yusuke Kozuka, Kei S. Takahashi, Masashi Kawasaki, and Yoshinori Tokura, Topological quantum phase transition in magnetic topological insulator upon magnetization rotation, *Physical Review B*, 98, 2018, 140404, DOI: 10.1103/PhysRevB.98.140404.
237. V. M. Bastidas, B. Renoust, Kae Nemoto, and W. J. Munro, Ergodic-localized junctions in periodically driven systems, *Physical Review B*, 98, 2018, 224307, DOI: 10.1103/PhysRevB.98.224307.
238. M. H. Fauzi, A. Noorhidayati, M. F. Sahdan, K. Sato, K. Nagase, and Y. Hirayama, Dynamic nuclear polarization at high Landau levels in a

- quantum point contact, *PHYSICAL REVIEW B*, 97(20), 2018, 201412, DOI: 10.1103/PhysRevB.97.201412.
239. Yusuke Hama, William J. Munro, Kae Nemoto, Relaxation to Negative Temperatures in Double Domain Systems, *Physical Review Letters*, 120, 2018, 60403, DOI: 10.1103/PhysRevLett.120.60403.
240. Yuichiro Matsuzaki, Simon Benjamin, Shojun Nakayama, Shiro Saito, and William J. Munro, Quantum Metrology beyond the Classical Limit under the Effect of Dephasing, *Physical review letters*, 120, 2018, 140501, DOI: 10.1103/PhysRevLett.120.140501.
241. R. Ohta, H. Okamoto, T. Tawara, H. Gotoh, and H. Yamaguchi, Dynamic Control of the Coupling between Dark and Bright Excitons with Vibrational Strain, *Physical Review Letters*, 120, 2018, 267401, DOI: 10.1103/PhysRevLett.120.267401.
242. Walker Thomas, Miyanishi Koichiro, Ikuta Rikizo, Takahashi Hiroki, Vartabi Kashanian Samir, Tsujimoto Yoshiaki, Hayasaka Kazuhiro, Yamamoto Takashi, Imoto Nobuyuki, Keller Matthias, Long-Distance Single Photon Transmission from a Trapped Ion via Quantum Frequency Conversion, *Physical Review Letters*, 120, 2018, 203601, DOI: 10.1103/PhysRevLett.120.203601.
243. Rangga P Budoyo, Kosuke Kakuyanagi, Hiraku Toida, Yuichiro Matsuzaki, William J Munro, Hiroshi Yamaguchi, Shiro Saito, Electron paramagnetic resonance spectroscopy of using a Josephson bifurcation amplifier: Observation of hyperfine and quadrupole structures, *PHYSICAL REVIEW MATERIALS*, 2, 2018, 11403, DOI: 10.1103/PhysRevMaterials.2.011403.
244. D. Kawakami, H. Tabata, THz-TDS Measurements of Hydration State of Bio Related Materials and Data Analysis by Machine Learning, *Proc. of 43rd IRMMW-THz*, -, 2018, , DOI: 10.1109/IRMMW.
245. Anthony J. Hayes, Shane Dooley, William J. Munro, Kae Nemoto, and Jacob Dunningham, Making the most of time in quantum metrology: concurrent state preparation and sensing, *Quantum Sci. Technol.*, 3, 2018, 35007, DOI: 10.1088/2058.
246. J. Maire, R. Anufriev, T. Hori, J. Shiomi, S. Volz, and M. Nomura, Thermal conductivity reduction in silicon fishbone nanowires, *Sci. Rep.*, 8, 2018, 4452, DOI: 10.1038/s41598.
247. R. Anufriev and M. Nomura, Phonon and heat transport control using pillar-based phononic crystals, *Sci. Technol. Adv. Mater.*, 19, 2018, 867, DOI: 10.1080/14686996.2018.1542524.
248. Tsujimoto Yoshiaki, Tanaka Motoki, Iwasaki Nobuo, Ikuta Rikizo, Miki Shigehito, Yamashita Taro, Terai Hirotaka, Yamamoto Takashi, Koashi Masato, Imoto Nobuyuki, High-fidelity entanglement swapping and generation of three-qubit GHZ state using asynchronous telecom photon pair sources, *Scientific Reports*, 8, 2018, 1446, DOI: 10.1038/s41598.
249. Y. Hoshi, J. Takahashi, H. Wang, H. Kato, and Y. Homma, Crossover of 2D graphene and 3D carbon island growth on Cu-In alloy surface, *Surface Science*, 670, 2018, 72, DOI: 10.1016/j.susc.2017.12.015.
250. 太田竜一・岡本創・山口浩司, 機械振動歪を用いた励起子発光及び吸収の動的制御, *光アライアンス*, 29, 2018, 40.
251. 岩本 敏, 荒川 泰彦, フォトニック構造による光の軌道角運動量の生成, *レーザー研究*, 46, 2018, 182.
252. 山本倫久, 固体の電子波の非電荷自由度, *応用物理*, 88, 2018, 96, DOI: 10.11470/oubutsu.88.2_96.

2019 年

253. N. X. Viet, S. Kishimoto, and Y. Ohno, Highly Uniform, Flexible Microelectrodes Based on Clean Single-walled Carbon Nanotube Thin Film with High Electrochemical Activity, *ACS App. Mater. Interfaces*, 11, 2019, 6389, DOI: 10.1021/acsami.8b19252.
254. A. George, R. Yanagisawa, R. Anufriev, J. He, N. Yoshie, N. Tsujii, Q. Guo, T. Mori, S. Volz, and M. Nomura, Thermoelectric enhancement of silicon membranes by ultrathin amorphous films, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 11, 2019, 12027, DOI: 10.1021/acsami.8b21003.
255. X. Huang, S. Gluchko, R. Anufriev, S. Volz, and M. Nomura, Thermal conductivity reduction in silicon thin film with nanocones, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 11, 2019, 34394, DOI: 10.1021/acsami.9b08797.
256. Matsui, Hiroaki; Tabata, Hitoshi, Assembled films of Sn-doped In2O3 plasmonic nanoparticles on high-permittivity substrates for thermal shielding, *ACS Applied Nano Materials*, 2, 2019, 2806, DOI: 10.1021/acsnanm.9b00293.
257. Shohei Chiashi, Yuta Saito, Takashi Kato, Satoru Konabe, Susumu Okada, Takahiro Yamamoto, and Yoshikazu Homma, Confinement Effect of Sub-nanometer Difference on Melting Point of Ice-Nanotubes Measured by Photoluminescence Spectroscopy, *ACS Nano*, 13, 2019, 1177, DOI: 10.1021/acsnano.8b06041.
258. M. Hada, K. Miyata, S. Ohmura, Y. Arashida, K. Ichiyana, I. Katayama, T. Suzuki, W. Chen, S. Mizote, T. Sawa, T. Yokoya, T. Seki, J. Matsuo, T. Tokunaga, C. Itoh, K. Tsuruta, R. Fukaya, S. Nozawa, S. Adachi, J. Takeda, K. Onda, S. Koshihara, Y. Hayashi, and Y. Nishina, Selective Reduction Mechanism of Graphene Oxide Driven by Photon Mode versus Thermal Mode, *ACS Nano*, 13, 2019, 10103, DOI: 10.1021/acsnano.9b03060.
259. H. Uchiyama, S. Saijo, S. Kishimoto, J. Ishi, Operando Analysis of Electron Devices Using Nanodiamond Thin Films Containing Nitrogen-Vacancy Centers, *ACS Omega* 2019, 4, 2019, 7459, DOI: 10.1021/acsomega.9b00344.
260. N. Wei, P. Laiho, A. T. Khan, A. Hussain, A. Lyuleeva, S. Ahmed, Q. Zhang, Y. Liao, Y. Tian, E. - X. Ding, Y. Ohno, and E. I. Kauppinen, Fast and Ultraclean Approach for Measuring the Transport Properties of Carbon Nanotubes, *Adv. Func. Mater.*, 30, 2019, 1907150, DOI: 10.1002/adfm.201907150.
261. Hayata Yamasaki and Mio Muraio, Distributed Encoding and Decoding of Quantum Information over Networks, *Adv. Quantum Technol.*, 2, 2019, 1800066, DOI: 10.1002/qute.201800066.
262. Takumi Inaba and Yoshikazu Homma, Chirality dependence of electron-phonon matrix elements in semiconducting single-walled carbon nanotubes, *AIP Advances*, 9, 2019, 45124, DOI: 10.1063/1.5093066.
263. Norizzawati M. Ghazali, Hiroshi Tomizawa, Noriyuki Hagiwara, Katsuya Suzuki, Abdul M. Hashim, Tomohiro Yamaguchi, Seiji Akita, and Koji Ishibashi, Fabrication of tunnel barriers and single electron transistors in suspended multi-wall carbon nanotubes, *AIP Advances*, 9, 2019, 105015, DOI: 10.1063/1.5120816.
264. Kimihiko Kato, Hiroaki Matsui, Hitoshi Tabata, Mitsuru Takenaka, and Shinichi Takagi, Bilayer tunneling field effect transistor with oxide-semiconductor and group-IV semiconductor hetero junction: Simulation analysis of electrical characteristics, *AIP Advances*, 9, 2019, 55001, DOI: 10.1063/1.5088890.
265. Y. Zhang, B. Qiu, N. Nagai, M. Nomura, S. Volz, and K. Hirakawa, Enhanced thermal sensitivity of MEMS bolometers integrated with nanometer-scale hole array structures, *AIP Advances*, 9, 2019, 85102, DOI: 10.1063/1.5113521.
266. H. Omachi, T. Komuro, K. Matsumoto, M. Nakajima, H. Watanabe, J. Hirotani, Y. Ohno, and H. Shinohara, Aqueous two-phase extraction of semiconducting single-wall carbon nanotubes with isomaltodextrin and thin-film transistor applications, *Appl. Phys. Exp.*, 12, 2019, 97003, DOI: 10.7567/1882.
267. I. Kim, Y. Arakawa, and S. Iwamoto, Design of GaAs-based valley phononic crystals with multiple complete phononic bandgaps at ultra-high frequency, *Appl. Phys. Express*, 12, 2019, 047001, DOI: 10.7567/1882.
268. Yamaguchi, Y. Ota, R. Katsumi, K. Watanabe, S. Ishida, A. Osada, Y. Arakawa and S. Iwamoto, GaAs valley photonic crystal waveguide with light-emitting InAs quantum dots, *Appl. Phys. Express*, 12, 2019, 62005, DOI: 10.7567/1882.
269. Yuichiro Tanaka, Takashi Kato, Kazuki Yoshino, Shohei Chiashi and Yoshikazu Homma, Experimental assignment of phonon symmetry of G+ and G- peaks from single-walled carbon nanotubes, *Appl. Phys. Express*, 12, 2019, 55009, DOI: 10.7567/1882.
270. N. Okamoto, R. Yanagisawa, R. Anufriev, Md. M. Alam, K. Sawano, M. Kurosawa, and M. Nomura, Semiballistic thermal conduction in polycrystalline SiGe nanowires, *Appl. Phys. Lett.*, 115, 2019, 253101, DOI: 10.1063/1.5130659.
271. M. Inaba, H. Kwarada, and Y. Ohno, Electrical property measurement of two-dimensional hole-gas layer on hydrogen-terminated diamond

- surface in vacuum-gap gate structure, *Appl. Phys. Lett.*, 114, 2019, 253504, DOI: 10.1063/1.5099395.
272. Masahide Shima, Hiroki Kato, Kota Shihomatsu, Yoshikazu Homma, Determination of absolute number of graphene layers on nickel substrate with scanning Auger microprobe, *Applied Physics Express*, 12, 2019, 55009, DOI: 10.7567/1882.
 273. A. Sathe, M. Seki, H. Zhou, J. Chen, H. Tabata, Bandgap engineering in V-substituted α -Fe₂O₃ photoelectrodes, *Applied Physics Express*, 12, 2019, 91003, DOI: 10.7567/1882.
 274. S. Hourri, D. Hatanaka, M. Asano, R. Ohta, and H. Yamaguchi, Limit cycles and bifurcations in a nonlinear MEMS resonator with a 1:3 internal resonance, *Applied Physics Letters*, 114, 2019, 103103, DOI: 10.1063/1.5085219.
 275. R. Watanabe, R. Yoshimi, M. Kawamura, M. Mogi, A. Tsukazaki, X. Z. Yu, K. Nakajima, K. S. Takahashi, M. Kawasaki, and Y. Tokura, Quantum anomalous Hall effect driven by magnetic proximity coupling in all-telluride based heterostructure, *Applied Physics Letters*, 115, 2019, 102403, DOI: 10.1063/1.5111891.
 276. K. Shibata, M. Karalic, C. Mittag, T. Tschirky, C. Reichl, H. Ito, K. Hashimoto, T. Tomimatsu, Y. Hirayama, W. Wegscheider, T. Ihn, K. Ensslin, Electric-field-induced two-dimensional hole gas in undoped GaSb quantum wells, *Applied Physics Letters*, 114, 2019, 232102, DOI: 10.1063/1.5093133.
 277. Yahata Ken, Matsuzaki Yuichiro, Saito Shiro, Watanabe Hideyuki, Ishi-Hayase Junko, Demonstration of vector magnetic field sensing by simultaneous control of nitrogen-vacancy centers in diamond using multi-frequency microwave pulses, *APPLIED PHYSICS LETTERS*, 114, 2019, 2, DOI: 10.1063/1.5079925.
 278. Sergei Studenikin, Marek Korkusinski, Motoi Takahashi, Jordan Ducatel, Aviv Padawer, Electrically tunable effective g-factor of a single hole in a lateral GaAs/AlGaAs quantum dot, *Communication Physics*, 2, 2019, 159, DOI: 10.1038/s42005.
 279. H. Toida, Y. Matsuzaki, K. Kakuyanagi, X. Zhu, W. J. Munro, H. Yamaguchi, and S. Saito, Electron paramagnetic resonance spectroscopy using a single artificial atom, *Communications Physics*, 2, 2019, 33, DOI: 10.1038/s42005.
 280. Hayata Yamasaki and Mio Muraio, Quantum state merging for arbitrarily-small-dimensional systems, *EEE Trans. Inf. Theory*, 65, 2019, 2889829, DOI: 10.1109/TIT.2018.2889829.
 281. Kazunari Hashimoto and Chikako Uchiyama, Nonadiabaticity in Quantum Pumping Phenomena under Relaxation, *Entropy*, 21, 2019, 842, DOI: 10.3390/e21090842.
 282. K. Kato, H. Matsui, H. Tabata, M. Takenaka, and S. Takagi, Fabrication and electrical characteristics of ZnSnO/Si bilayer tunneling field-effect transistors, *IEEE Journal of the Electron Devices Society*, 7, 2019, 1201, DOI: 10.1109/JEDS.2019.2933848.
 283. K. Hattori, S. Inoue, R. Kobayashi, K. Niwa, T. Numata and D. Fukuda, Optical Transition-Edge Sensors: Dependence of System Detection Efficiency on Wavelength, *IEEE Trans. Instr. Meas.*, 68, 2019, 2253, DOI: 10.1109/TIM.2018.2882217.
 284. Miki Shigehito, Miyajima Shigeyuki, Yabuno Masahiro, Yamashita Taro, Yamamoto Takashi, Imoto Nobuyuki, Ikuta Rikizo, Kirkwood Robert A., Hadfield Robert H., Terai Hirotsuka, Timing Jitter Characterization of the SFQ Coincidence Circuit by Optically Time-Controlled Signals From SSPDs, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 29, 2019, 1, DOI: 10.1109/TASC.2019.2906258.
 285. R. Kobayashi, K. Hattori, S. Inoue, and D. Fukuda, Development of fast response Titanium-Gold bilayer optical TES with optical fiber self-alignment structure, *IEEE. Trans. Appl. Supercond.*, 29, 2019, 1, DOI: 10.1109/TASC.2019.2909978.
 286. Yamamoto Takashi, Quantum Information Processing with Superconducting Nanowire Single-Photon Detectors, *IEICE Transactions on Electronics*, E102.C, 2019, 224, DOI: 10.1587/transele.2018SDI0002.
 287. K. Kato, H. Matsui, H. Tabata, ZnO/Si and ZnO/Ge bilayer tunneling field effect transistors: Experimental characterization of electrical properties, *J. Appl. Phys.*, 125, 2019, 195701, DOI: 10.1063/1.5088893.
 288. Masahiko Hayashi, Effects of Interlayer Coupling on the Magnetic Flux of Vortices in Bi-layer Superconductors, *J. Phys. Soc. Jpn.*, 88, 2019, 35002, DOI: 10.7566/JPSJ.88.035002.
 289. Masahiko Hayashi, Effects of Fluctuations on the Phase Diagram of the t-J Model, *J. Phys. Soc. Jpn.*, 88, 2019, 94703, DOI: 10.7566/JPSJ.88.094703.
 290. N. Hoshi, D. Inoue, H. Sonoda, D. Yabe, H. Tomori, A. Kanda, Response of a superconductor NbSe₂ flake to magnetic field detected with small tunnel junctions, *J. Phys.: Conf. Ser.*, 1293, 2019, 12016, DOI: 10.1088/1742.
 291. H. Tomori, N. Hoshi, D. Inoue, A. Kanda, Influence of focused-ion-beam microfabrication on superconducting transition in exfoliated thin films of layered superconductor NbSe₂, *J. Phys.: Conf. Ser.*, 1293, 2019, 12006, DOI: 10.1088/1742.
 292. H. Tomori, N. Hoshi, D. Inoue, A. Kanda, Influence of microfabrication on superconducting properties of exfoliated thin films of layered superconductor NbSe₂: reactive ion etching, *J. Phys.: Conf. Ser.*, 1293, 2019, 12005, DOI: 10.1088/1742.
 293. Masahiko Hayashi, A Model of Competing Orders and Its Application to a Novel Junction, *J. Supercond. Nov. Magn.*, 32, 2019, 3407, DOI: 10.1007/s10948.
 294. Y. Le Thi, Y. Kamakura, and N. Mori, Simulation of dark current characteristics of type-II InAs/GaSb superlattice mid-wavelength infrared p-i-n photodetector, *Japanese Journal of Applied Physics*, 58, 2019, 44002, DOI: 10.7567/1347.
 295. S. Hourri, R. Ohta, M. Asano, Y. M. Blanter, and H. Yamaguchi, Pulse-width modulated oscillations in a nonlinear resonator under two-tone driving as a means for MEMS sensor readout, *Japanese Journal of Applied Physics*, 58, 2019, SBBI05, DOI: 10.7567/1347.
 296. Y. Le Thi, Y. Kamakura, and N. Mori, Simulation of dark current characteristics of type-II InAs/GaSb superlattice mid-wavelength infrared p-i-n photodetector, *Japanese Journal of Applied Physics*, 58, 2019, 44002, DOI: 10.7567/1347.
 297. T. Hoshino and N. Mori, Electron mobility calculation for two-dimensional electron gas in InN/GaN digital alloy channel high electron mobility transistors, *Japanese Journal of Applied Physics*, 58, 2019, SCCD10, DOI: 10.7567/1347.
 298. S. Makihira and N. Mori, Intra-collisional field effect in one-dimensional GaN nanowires, *Japanese Journal of Applied Physics*, 58, 2019, SCCB26, DOI: 10.7567/1347.
 299. Y. Kajiwara and N. Mori, Nonequilibrium Green function simulation of coupled electron-phonon transport in one-dimensional nanostructures, *Japanese Journal of Applied Physics*, 58, 2019, SDDE05, DOI: 10.7567/1347.
 300. T. Yamaguchi, Y. Matsuzaki, S. Saito, S. Saijo, H. Watanabe, N. Mizuochi and J. Ishi-Hayase, Bandwidth analysis of AC magnetic field sensing based on electronic spin double-resonance of nitrogen-vacancy centers in diamond, *Japanese Journal of Applied Physics*, 58-10, 2019, 100901, DOI: 10.7567/1347.
 301. Ritsu Niimi, Ryota Negishi, Michiharu Arifuku, Noriko Kiyoyanagi, Tomohiro Yamaguchi, Koji Ishibashi, and Yoshihiro Kobayashi, Effect of a protective layer on a carbon nanotube thin film channel in a biosensor device, *Japanese Journal of Applied Physics*, 55, 2019, SIIB14, DOI: 10.7567/1347.
 302. Bruno Kenichi Saika, Ryota Negishi and Yoshihiro Kobayashi, Neuromorphic Switching Behavior in the Multi-stacking Composed of Pt/Graphene Oxide/Ag₂S/Ag, *Japanese Journal of Applied Physics*, 58, 2019, SIID08, DOI: 10.7567/1347.
 303. Chaopeng Wei, Ryota Negishi, Yui Ogawa, Masashi Akabori, Yoshitaka Taniyasu and Yoshihiro Kobayashi, Turbostratic multilayer graphene synthesis on CVD graphene template toward improving electrical performance, *Japanese Journal of Applied Physics*, 58, 2019, SIIB04, DOI: 10.7567/1347.
 304. D. Prananto, D. Kikuchi, K. Hayashi, and T. An, Imaging of stray magnetic field vectors from magnetic particle with an ensemble of nitrogen-vacancy centers in diamond, *Japanese Journal of Applied Physics*, 58, SIIB20, 2019, 2020, DOI: 10.7567/1347.
 305. Ukyo Ooe, Shinichiro Mouri, Shingo Arakawa, Faizulsalihin Bin Abas, Yasushi Nanishi, Tsutomu Araki, Metal-covered van der Waals epitaxy

- of gallium nitride films on graphitic substrates by ECR-MBE, Japanese Journal of Applied Physics, 58(SC);, 2019, SC1053, DOI: 10.7567/1347.
306. Kenta Morino, Shingo Arakawa, Takashi Fujii, Shinichiro Mouri, Tsutomu Araki, Yasushi Nanishi, Characterization of the electrical properties of an InN epilayer using terahertz time-domain spectroscopic ellipsometry, Japanese Journal of Applied Physics, 58(SC);, 2019, SCCB22, DOI: 10.7567/1347.
 307. Naofumi Nishida, Yuki Hori, Makoto Sakurai, Yuya Fujiwara, Shin, Electric characteristics of multi-walled carbon nanotubes irradiated with highly charged ions, Jpn. J. Appl. Phys., 58, 2019, SIIC01, DOI: 10.7567/1347.
 308. A. A. Shevyrin, A. K. Bakarov, A. A. Shklyayev, A. S. Arakcheev, M. Kurosu, H. Yamaguchi, and A. G. Pogosov, On-chip Piezoelectric Actuation of Nanomechanical Resonators Containing a Two-dimensional Electron Gas, JTEP Letters, 2019, 1, DOI: 10.1134/S0021364019040052.
 309. Rui Wang, Russell S. Deacon, Jian Sun, Jun Yao, Charles M. Lieber, Koji Ishibashi, Gate Tunable Hole Charge Qubit Formed in a Ge/Si Nanowire Double Quantum Dot Coupled to Microwave Photons, Nano Lett., 19, 2019, 1052, DOI: 10.1021/acs.nanolett.8b04343.
 310. R. Anufriev and M. Nomura, Coherent Thermal Conduction in Silicon Nanowires with Periodic Wings, Nanomaterials, 9, 2019, 142, DOI: 10.3390/nano9020142.
 311. Darius Dobrovolskas, Shingo Arakawa, Shinichiro Mouri, Tsutomu Araki, Yasushi Nanishi, Jūras Mickevičius and Gintautas Tamulaitis, Enhancement of InN Luminescence by Introduction of Graphene Interlayer, Nanomaterials, 3, 2019, 417, DOI: 10.3390/nano9030417.
 312. R. Anufriev, S. Gluchko, S. Volz, and M. Nomura, Probing ballistic thermal conduction in segmented silicon nanowires, Nanoscale, 11, 2019, 13407, DOI: 10.1039/C9NR03863A.
 313. S. Kato, N. Német, K. Senga, S. Mizukami, X. Huang, S. Parkins, and T. Aoki, Observation of dressed states of distant atoms with delocalized photons in coupled-cavities quantum electrodynamics, Nature Communications, 10, 2019, 1160, DOI: 10.1038/s41467.
 314. Hasegawa Yasushi, Ikuta Rikizo, Matsuda Nobuyuki, Tamaki Kiyoshi, Lo Hoi, Experimental time-reversed adaptive Bell measurement towards all-photon quantum repeaters, Nature Communications, 10, 2019, 378, DOI: 10.1038/s41467.
 315. A. Yangui, M. Bescond, T. Yan, N. Nagai & K. Hirakawa, Evaporative electron cooling in asymmetric double barrier semiconductor heterostructures, Nature Communications, 4504 (2019), 2019, 4504, DOI: 10.1038/s41467.
 316. Ho Le Bin, Matsuzaki Yuichiro, Matsuzaki Masayuki, Kondo Yasushi, Realization of controllable open system with NMR, New Journal of Physics, 93008, 2019, 21, DOI: 10.1088/1367.
 317. K. F. Yang, M. M. Uddin, K. Nagase, T. D. Mishima, M. B. Santos, Y. Hirayama, Z. N. Yang and H. W. Liu, Pump-probe nuclear spin relaxation study of the quantum Hall ferromagnet at filling factor $\nu = 2$, New Journal of Physics, 21, 2019, 83004, DOI: 10.1088/1367.
 318. W. Lin, Y. Ota, S. Iwamoto, and Y. Arakawa, Spin-dependent directional emission from a quantum dot ensemble embedded in an asymmetric waveguide, Opt. Lett., 44, 2019, 3749, DOI: 10.1364/OL.44.003749.
 319. K. Yoshioka I. Igarashi, S. Yoshida, Y. Arashida, I. Katayama, J. Takeda, and H. Shigekawa, Subcycle Mid-Infrared Coherent Transients at 4 MHz Repetition Rate Applicable to Light-Wave-Driven Scanning Tunneling Microscopy, Opt. Lett., 44, 2019, 5350, DOI: 10.1364/OL.44.005350.
 320. T. Tajiri, S. Takahashi, Y. Ota, K. Watanabe, S. Iwamoto, and Y. Arakawa, Three-dimensional photonic crystal simultaneously integrating a nanocavity laser and waveguides, Optica, 6, 2019, 296, DOI: 10.1364/OPTICA.6.000296.
 321. Y. Ota, F. Liu, R. Katsumi, K. Watanabe, K. Wakabayashi, Y. Arakawa, and S. Iwamoto, Photonic crystal nanocavity based on a topological corner state, Optica, 6, 2019, 786, DOI: 10.1364/OPTICA.6.000786.
 322. Masaya Hiraishi, Mark Ijspeert, Takehiko Tawara, Satoru Adachi, Reina Kaji, Hiroo Omi, Hideki Gotoh, Optical coherent transients in 167Er³⁺ at telecom-band wavelength, Optics letters, 44, 2019, 4933, DOI: 10.1364/OL.44.004933.
 323. J. Miyazaki, A. Soeda and M. Murao, Complex conjugation supermap of unitary quantum maps and its universal implementation protocol, Phys. Rev. Research 1, 1, 2019, 13007, DOI: 10.1103/PhysRevResearch.1.013007.
 324. Nicolò Lo Piparo, William J. Munro, and Kae Nemoto, Quantum multiplexing, Phys. Rev. A, 99, 2019, 22337, DOI: 10.1103/PhysRevA.99.022337.
 325. M. Asano, R. Ohta, T. Aihara, T. Tsuchizawa, H. Okamoto, and H. Yamaguchi, Optically probing Schwinger angular momenta in a micromechanical resonator, Phys. Rev. A, 100, 2019, 53801, DOI: 10.1103/PhysRevA.100.053801.
 326. R. Sakai, A. Soeda, M. Murao and D. Burgarth, Robust controllability of two-qubit Hamiltonian dynamics, Phys. Rev. A, 100, 2019, 42305, DOI: 10.1103/PhysRevA.100.042305.
 327. Marco Túlio Quintino, Qingxiuxiong Dong, Atsushi Shimbo, Akihito Soeda, Mio Murao, Probabilistic exact universal quantum circuits for transforming unitary operations, Phys. Rev. A, 100, 2019, 62339, DOI: 10.1103/PhysRevA.100.062339.
 328. Qingxiuxiong Dong, Marco Túlio Quintino, Akihito Soeda and Mio Murao, Implementing positive maps with multiple copies of an input state, Phys. Rev. A, 99, 2019, 52352, DOI: 10.1103/PhysRevA.99.052352.
 329. Le Duc Anh, Takashi Yamashita, Hiroki Yamasaki, Daisei Araki, Munetoshi Seki, Hitoshi Tabata, Masaaki Tanaka, and Shinobu Ohya, Ultralow-Power Orbital-Controlled Magnetization Switching Using a Ferromagnetic Oxide Interface, Phys. Rev. Applied (Letter), 12, 2019, 41001, DOI: 10.1103/PhysRevApplied.12.041001.
 330. X. Li, K. Yoshioka, M. Xie, T. Hagiwara, G. T. Noe II, W. Lee, N. Marquez Peraca, W. Gao, T. Hagiwara, H. S. Orjan, L. Terahertz Faraday and Kerr Rotation Spectroscopy of Bi1-xSbx Films in High Magnetic Fields up to 30 Tesla, Phys. Rev. B, 100, 2019, 115145, DOI: 10.1103/PhysRevB.100.115145.
 331. Marco Túlio Quintino, Qingxiuxiong Dong, Atsushi Shimbo, Akihito Soeda, Mio Murao, Reversing Unknown Quantum Transformations: Universal Quantum Circuit for Inverting General Unitary Operations, Phys. Rev. Lett., 123, 2019, 210502, DOI: 10.1103/PhysRevLett.123.210502.
 332. E. Wakakuwa, A. Soeda and M. Murao, Complexity of causal order structure in distributed quantum information processing: More rounds of classical communication reduce entanglement cost, Phys. Rev. Lett., 122, 2019, 190502, DOI: 10.1103/PhysRevLett.122.190502.
 333. J. Kenji Clark, Ya, Thresholdless behavior and linearity of the optically induced metallization of NbO₂, Phys. Rev. Research, 1, 2019, 33168, DOI: 10.1103/PhysRevResearch.1.033168.
 334. Zhang Yujie and Mikio Eto, Fano Resonance in Transport Through Double Quantum Dot in Parallel, Physica Status Solidi (b), 2019, 2019, 1800526, DOI: 10.1002/pssb.201800526.
 335. W. Tomita, S. Sasaki, K. Tateno, H. Okamoto, and H. Yamaguchi, Novel Fabrication Technique of Suspended Nanowire Devices for Nanomechanical Applications, Physica Status Solidi (b), 257, 2019, 1900401, DOI: 10.1002/pssb.201900401.
 336. Ryota Negishi, Chaopeng Wei, Yao Yao, Yui Ogawa, Masashi Akabori, Yasushi Kanai, Kazuhiko Masumoto, Yoshitaka Taniyasu and Yoshihiro Kobayashi, Turbostratic stacking effect in multilayer graphene on the electrical transport properties, Physica Status Solidi B, 257, 2019, 1900437, DOI: 10.1002/pssb.201900437.
 337. Ashhab S., Matsuzaki Y., Kakuyanagi K., Saito S., Yoshihara F., Fuse T., Semba K., Spectrum of the Dicke model in a superconducting qubit-oscillator system, Physical review A, 99, 2019, 6, DOI: 10.1103/PhysRevA.99.063822.
 338. Takeuchi Yuki, Matsuzaki Yuichiro, Miyanishi Koichiro, Sugiyama Takanori, Munro William J., Quantum remote sensing with asymmetric information gain, Physical review A, 99, 2019, 2, DOI: 10.1103/PhysRevA.99.022325.
 339. Tatsuta Mamiko, Matsuzaki Yuichiro, Shimizu Akira, Quantum metrology with generalized cat states, PHYSICAL REVIEW A, 100, 2019, 32318, DOI: 10.1103/PhysRevA.100.032318.

340. D. Hatanaka, A. Bachtold, and H. Yamaguchi, Electrostatically Induced Phononic Crystal, *Physical Review Applied*, 11, 2019, 24024, DOI: 10.1103/PhysRevApplied.11.024024.
341. P. Renault, H. Yamaguchi, and I. Mahboob, Virtual Exceptional Points in an Electromechanical System, *Physical Review Applied*, 11, 2019, 24007, DOI: 10.1103/PhysRevApplied.11.024007.
342. Patrick Zellekens, Russell Deacon, Pujitha Perla, H. Aruni Fonseka, Timm Mörstedt, Steven A. Hindmarsh, Benjamin Bennemann, Florian Lentz, Mihail I. Lepsa, Ana M. Sanchez, Detlev Grützmacher, Koji Ishibashi, and Thomas Schäpers, Hard-Gap Spectroscopy in a Self-Defined Mesoscopic InAs/Al Nanowire Josephson Junction, *Phys. Rev. Applied*, 14, 2020, 54019, DOI: 10.1103/PhysRevApplied.14.054019.
343. Rin Okuyama, Wataru Izumida, and Mikio Eto, Topological classification of the single-wall carbon nanotube, *Physical Review B*, 99, 2019, 115409, DOI: 10.1103/PhysRevB.99.115409.
344. Ryuichi Ohta, Hajime Okamoto, Takehiko Tawara, Hideki Gotoh, Hiroshi Yamaguchi, Strain-induced exciton decomposition and anisotropic lifetime modulation in a GaAs micromechanical resonator, *Physical Review B*, 99, 2019, 115315, DOI: 10.1103/PhysRevB.99.115315.
345. Lars Milz, Wataru Izumida, Milena Grifoni, Magdalena Marganska, Transverse profile and three-dimensional spin canting of a Majorana state in carbon nanotubes, *Physical Review B*, 100, 2019, 155417, DOI: 10.1103/PhysRevB.100.155417.
346. Mikio Eto and Rui Sakano, Fano-Kondo resonance versus Kondo plateau in an Aharonov-Bohm ring with an embedded quantum dot, *Phys. Rev. B*, 102, 2020, 245402, DOI: 10.1103/PhysRevB.102.245402.
347. Kazunari Hashimoto, Gen Tatara, Chikako Uchiyama, Spin backflow: A non-Markovian effect on spin pumping, *Physical Review B*, 99, 2019, 205304, DOI: 10.1103/PhysRevB.99.205304.
348. M. H. Fauzi, M. F. Sahdan, M. Takahashi, A. Basak, K. Sato, K. Nagase, B. Muralidharan, and Y. Hirayama, Probing strain modulation in a gate-defined one-dimensional electron system, *Physical Review B (RC)*, B100, 2019, 241301(R), DOI: 10.1103/PhysRevB.100.241301.
349. Masataka Mogi, Taro Nakajima, Victor Ukleev, Atsushi Tsukazaki, Ryutaro Yoshimi, Minoru Kawamura, Kei S. Takahashi, Takayasu Hanashima, Kazuhisa Kakurai, Taka, Large Anomalous Hall Effect in Topological Insulators with Proximitized Ferromagnetic Insulators, *Physical Review Letters*, 123, 2019, 16804, DOI: 10.1103/PhysRevLett.123.016804.
350. Ikuta Rikizo, Tani Ryoya, Ishizaki Masahiro, Miki Shigehito, Yabuno Masahiro, Terai Hirotsuka, Imoto Nobuyuki, Yamamoto Takashi, Frequency-Multiplexed Photon Pairs Over 1000 Modes from a Quadratic Nonlinear Optical Waveguide Resonator with a Singly Resonant Configuration, *Physical Review Letters*, 123, 2019, 193603, DOI: 10.1103/PhysRevLett.123.193603.
351. Donald H. White, Shinya Kato, Nikolett Németh, Scott Parkins, and Takao Aoki, Cavity Dark Mode of Distant Coupled Atom-Cavity Systems, *Physical Review Letters*, 122, 2019, 253603, DOI: 10.1103/PhysRevLett.122.253603.
352. K. Kato, H. Matsui, H. Tabata, M. Takenaka, and S. Takagi, Material design of oxide-semiconductor/group-IV-semiconductor bilayer tunneling field effect transistors, *Proc. of 2019 Electron Devices Technology and Manufacturing Conference (EDTM)*, -, 2019, 85, DOI: 10.1109/EDTM.2019.8731302.
353. Jessica Bavaresco, Mateus Araújo, Časlav Brukner, Marco Túlio Quintino, Semi-device-independent certification of indefinite causal order, *Quantum* 3, 176 (2019), 3, 2019, 176, DOI: 10.22331/q.
354. G. Mead, I. Katayama, J. Takeda, and G. A. Blake, An Echelon-based Single Shot Optical and Terahertz Kerr Effect Spectrometer, *Rev. Sci. Instrum.*, 90, 2019, 53107, DOI: 10.1063/1.5088377.
355. H. Morishita, T. Tashima, D. Mima, H. Kato, T. Makino, S. Yamasaki, M. Fujiwara, N. Mizuochi, Extension of the Coherence Time by Generating MW Dressed States in a Single NV Centre in Diamond, *Scientific Reports*, 9, 2019, 13318, DOI: 10.1038/s41598.
356. Fabian Könemann, Morten Vollmann, Tino Wagner, Norizzawati Mohd Ghazali, Tomohiro Yamaguchi, Andreas Stemmer, Koji Ishibashi, Gotsmann, Bernd, Thermal Conductivity of a Supported Multi-Walled Carbon Nanotube, *The Journal of Physical Chemistry C*, 123 (19), 2019, 12460, DOI: 10.1021/acs.jpcc.9b00692.
357. J. Hirotsu and Y. Ohno, [Invited Review] Carbon nanotube thin films for high-performance flexible electronics applications, *Top. Curr. Chem.*, 377, 2019, 3, DOI: 10.1007/s41061.
358. 岡本創, 浅野元紀, 太田竜一, 山口浩司, 半導体機械共振器を用いたオプトエレクトロメカニクス, *応用物理学会応用電子物性分科会誌*, 25, 2019, 137.
359. 片山郁文, 武田 淳, 南 康夫, ディラック電子系におけるテラヘルツ電場誘起現象, *固体物理*, 54, 2019, 589.
360. 平川一彦, 張亜, MEMS 共振器を用いた室温動作・高速・高感度テラヘルツポロメータの開発, *次世代センサ*, vol 28, no. 2, 2019, 6, ISSN 2188.

2020 年

361. Q. Lv, F. Yan, N. Mori, W. Zhu, C. Hu, Z. R. Kudrynskiy, Z. D. Kovalyuk, Amalia Patané, and K. Wang, Interlayer band-to-band tunneling and negative differential resistance in van der Waals BP/InSe field-effect transistors, *Advanced Functional Materials*, 30, 2020, 1910713, DOI: 10.1002/adfm.201910713.
362. Le Duc Anh, Shingo Kaneta, Masashi Tokunaga, Munetoshi Seki, Hitoshi Tabata, Masaaki Tanaka, Shinobu Ohya, High-Mobility 2D Hole Gas at a SrTiO₃ Interface, *Advanced Materials*, 2020, 1906003, DOI: 10.1002/adma.201906003.
363. Md Shamim Sarker, Hiroyasu Yamahara, and Hitoshi Tabata, Spin wave modulation by topographical perturbation in Y₃Fe₅O₁₂ thin films, *AIIP Advances*, 10, 2020, 15015, DOI: 10.1063/1.5130186.
364. Yuma Okazaki, Takehiko Oe, Minoru Kawamura, Ryutaro Yoshimi, Shuji Nakamura, Shintaro Takada, Masataka Mogi, Kei S. Takahashi, Atsushi Tsukazaki, Masashi Kawasaki, Yoshinori Tokura, and Nobu, Precise resistance measurement of quantum anomalous Hall effect in magnetic heterostructure film of topological insulator, *Applied Physics Letters*, 116, 2020, 143101, DOI: 10.1063/1.5145172.
365. H. Omachi, K. Matsumoto, K. Ueno, J. Hirotsu, and Y. Ohno, Fabrication of Carbon Nanotube Thin Films for Flexible Transistor Applications using a Cross-linked Amine Polymer, *Chem. Eur. J.*, 26, 2020, 6118, DOI: 10.1002/chem.202000228.
366. Kouichi Akahane, Atsushi Matsumoto, Toshimasa Umezawa and Naokatsu Yamamoto, Fabrication of In(P)As Quantum Dots by Interdiffusion of P and As on InP(311)B Substrate, *Crystals*, 10, 2020, 90, DOI: 10.3390/cryst10020090.
367. K. Kato, K.W. Jo, H. Matsui, H. Tabata, T. Mori, Y. Morita, T. Matsukawa, M. Takenaka, S. Takagi, P-channel TFET Operation of Bilayer Structures with Type-II Hetero Tunneling Junction of Oxide- and Group-IV-Semiconductors, *IEEE Transactions on Electron Devices*, 67, 2020, 1880, DOI: 10.1109/TED.2020.2975582.
368. Michael Hanks, William J. Munro, Kae Nemoto, Decoding Quantum Error Correction Codes with Local Variation, *IEEE Transactions on Quantum Engineering*, 1, 2020, 1, DOI: 10.1109/TQE.2020.2967890.
369. Yuimaru Kubo, Spinning Gems for Quantum Technologies, *Impact*, 1, 2020, 51, DOI: 10.21820/23987073.2020.1.51.
370. Y. Le Thi, Y. Kamakura, and N. Mori, A comparison of mechanisms for improving dark current characteristics in barrier infrared photodetectors, *Japanese Journal of Applied Physics*, 59, 2020, 44005, DOI: 10.35848/1347.
371. F. Hashimoto, H. Tanaka, and N. Mori, Material dependence of band-to-band tunneling in van der Waals heterojunctions of transition metal dichalcogenides, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 53, 2020, 255107, DOI: 10.1088/1361.
372. Yasutomo Ota, Kenta Takata, Tomoki Ozawa, Alberto Amo, Zhetao Jia, Boubacar Kante, Masaya Notomi, Yasuhiko Arakawa and Satoshi Iwamoto, Active topological photonics, *Nanophotonics*, 9, 2020, 547, DOI: 10.1515/nanoph.
373. J. R. Bayogan, K. Park, Z. B. Siu, S. J. An, C. Tang, X. Zhang, M. S. Song, J. Park, M. B. A. Jalil, N. Nagaosa, K. Hirakawa, C. Schöenberger,

- J. Seo and M. Jung, Controllable p-n junctions in three-dimensional Dirac semimetal Cd₃As₂ nanowires, *Nanotechnology*, 31 (2020), 2020, 205001, DOI: 10.1088/1361.
374. I. V. Borzenets, J. Shim, J. C. H. Chen, A. Ludwig, A. D. Wieck, S. Tarucha, H., Observation of the Kondo screening cloud, *Nature*, 579, 2020, 210, DOI: 10.1038/s41586.
375. Xuejun Xu, Viviana Fili, Wojciech Szuba, Masaya Hiraishi, Tomohiro Inaba, Takehiko Tawara, Hiroo Omi, Hideki Gotoh, Epitaxial single-crystal rare-earth oxide in horizontal slot waveguide for silicon-based integrated active photonic devices, *Optics Express*, 28, 2020, 14448, DOI: 10.1364/OE.389765.
376. M. Kurosu, D. Hatanaka, and H. Yamaguchi, Mechanical Kerr Nonlinearity of Wave Propagation in an On-Chip Nanoelectromechanical Waveguide, *Phys. Rev. Applied*, 13, 2020, 14056, DOI: 10.1103/PhysRevApplied.13.014056.
377. S. Houri, D. Hatanaka, M. Asano, and H. Yamaguchi, Demonstration of Multiple Internal Resonances in a Microelectromechanical Self-Sustained Oscillator, *Phys. Rev. Applied*, 13, 2020, 14049, DOI: 10.1103/PhysRevApplied.13.014049.
378. D. Hatanaka and H. Yamaguchi, Real-Space Characterization of Cavity-Coupled Waveguide Systems in Hypersonic Phononic Crystals, *Phys. Rev. Applied*, 13, 2020, 24005, DOI: 10.1103/PhysRevApplied.13.024005.
379. R. Anufriev, J. Ordonez, Measurement of the phonon mean free path spectrum in silicon membranes at different temperatures using arrays of nanoslits, *Phys. Rev. B*, 101, 2020, 115301, DOI: 10.1103/PhysRevB.101.115301.
380. Y. Minami, B. Ofori, Macroscopic Ionic Flow in a Superionic Conductor Na⁺ β-Alumina Driven by Single-Cycle Terahertz Pulse, *Phys. Rev. Lett.*, 124, 2020, 147401, DOI: 10.1103/PhysRevLett.124.147401.
381. Cătălin Pașcu Moca, Wataru Izumida, Balázs Dóra, Örs Legeza, János K. Asbóth, Gergely Zaránd, Topologically Protected Correlated End Spin Formation in Carbon Nanotubes, *Physical Review Letters*, 125, 2020, 56401, DOI: 10.1103/PhysRevLett.125.056401.
382. Kazunari Hashimoto, Bassano Vacchini, and Chikako Uchiyama, Lower bounds for the mean dissipated heat in an open quantum system, *Physical Review A*, 101, 2020, 52114, DOI: 10.1103/PhysRevA.101.052114.
383. Annisa Noorhidayati, Mohammad Hamzah Fauzi, Muhammad Fauzi Sahdan, Shunta Maeda, Ken Sato, Katsumi Nagase, and Yoshiro Hirayama, Resistively detected NMR in a triple-gate quantum point contact: Magnetic field dependence, *Physical Review B*, B101, 2020, 35425, DOI: 10.1103/PhysRevB.101.035425.
384. D. Terasawa, S. Norimoto, T. Arakawa, M. Ferrier, A. Fukuda, K. Kobayashi, Y. Hirayama, Conductance quantization and shot noise of a double-layer quantum point contact, *Physical Review B*, B101, 2020, 115401, DOI: 10.1103/PhysRevB.101.115401.
385. Shinobu Ohya, Daisei Araki, Le Duc Anh, Shingo Kaneta, Munetoshi Seki, Hitoshi Tabata, and Masaaki Tanak, Efficient intrinsic spin-to-charge current conversion in an all-epitaxial single-crystal perovskite-oxide heterostructure of La_{0.67}Sr_{0.33}MnO₃/LaAlO₃/SrTiO₃, *Physical Review Research*, 2, 2020, 12014, DOI: 10.1103/PhysRevResearch.2.012014.
386. T. Tomimatsu, K. Hashimoto, S. Taninaka, S. Nomura, and Y. Hirayama, Probing the breakdown of topological protection: Filling-factor-dependent evolution of robust quantum Hall incompressible phases, *Physical Review Research*, 2, 2020, 13128, DOI: 10.1103/PhysRevResearch.2.013128.
387. Giacomo Mariani, Shuhei Nomoto, Satoshi Kashiwaya, and Shintaro Nomura, System for the remote control and imaging of mw fields for spin manipulation in NV centers in diamond, *Sci. Rep.*, 10, 2020, 4813, DOI: 10.1038/s41598.
388. H. Morishita, S. Kobayashi, M. Fujiwara, H. Kato, T. Makino, S. Yamasaki, M. Fujiwara, N. Mizuochi, Room Temperature Electrically Detected Nuclear Spin Coherence of NV Centres in Diamond, *Scientific Reports*, 10, 2020, 2020, DOI: 10.1038/s41598.
389. 吳迪, 浜島功, 井上修一郎, 大貫進一郎, 複素周波数領域有限差分法によるプラズモニク導波路の設計及び特性検証, 電子情報通信学会論文誌 C, J103-C, 2020, 69.

7-2 国際・国内会議招待講演

国際会議招待講演

2015 年

- J. Hirotsu, R. Matsui, S. Kishimoto and Y. Ohno, Large-scale characterization of carbon nanotube thin-film transistors, NT15 Satellite Symposia (Third Carbon Nanotube Thin Film Electronics and Applications Satellite), 2015
- J. Ishi-Hayase, Orientation and Position-controlled Nitrogen-Vacancy Centers in CVD Diamond grown on Micropatterned (001) Substrate, Diamond Quantum Sensing Workshop 2015, 2015
- J. Ishi-Hayase, H. Watanabe, K. M. Itoh, Control of position and orientation of nitrogen-vacancy centers in CVD-grown diamond thin film, 28th International Conference on Defects in Semiconductors (ICDS 2015), 2015
- J. Ishi-Hayase, H. Watanabe, K. M. Itoh, Engineered nitrogen vacancy centers in diamond for quantum sensing, EMN Meeting on Vacuum Electronics, 2015
- J. Ishi-Hayase, H. Watanabe, K. M. Itoh, Spatially selective creation of nitrogen-vacancy centers with preferential orientation in an isotopically-purified diamond thin film, XIV International Conference on Quantum Optics and Quantum Information (ICQOQ'2015), 2015
- K. Akiba, S. Kanazugi, T. Yuge, K. Nagase, and Y. Hirayama, Optically induced nuclear spin polarization in the quantum Hall regime, International Workshop : Quantum Nanostructures and Electron-Nuclear Spin Interactions, 2015
- Y. Ohno, Carbon nanotube thin films for flexible and formable electronics, 4th International Conference and Exhibition on Materials Science and Engineering, 2015
- Y. Ohno, Carbon nanotube flexible devices for wearable healthcare electronics, 5th International Conference on Nanotech & Expo, 2015
- Y. Ohno, Electronic and optoelectronic device applications of carbon nanotube thin films, Nanotechnology-2015, 2015
- Y. Ohno, Wafer-scale investigation of electrical characteristics of carbon nanotube thin-film transistors, Pre-NT15 Workshop of Carbon Nanotubes and Graphene at U Tokyo, 2015
- Y. Ohno, Carbon nanotube thin film-based transistors and biosensors for flexible healthcare devices, The 6th A3 Symposium on Emerging Materials Nanomaterials for Electronics, Energy, and Environment, 2015
- Y. Ohno, Bio-electronics applications of carbon nanotube thin film, The International Chemical Congress of Pacific Basin Societies, PACIFICHEM, 2015
- Y. Ohno, Flexible bio-electronics applications of carbon nanotube thin films, The International Conference on Small Science, 2015
- Yoshiro Hirayama, Highly-sensitive Resistively-Detected Nuclear-Magnetic -Resonance in Compound Semiconductor Quantum Systems, 1st International conference on "Physics for sustainable development and Technology" (ICPSDT-2015), 2015
- Yoshiro Hirayama, Nuclear spin polarization and manipulation in semiconductor quantum systems, EMH HongKong Meeting, 2015
- Yoshiro Hirayama, Nuclear spin polarization and detection in quantum Hall systems, Sweden-Japan QNANO Workshop, 2015
- Yoshiro Hirayama, Nuclear spin polarization and manipulation in quantum Hall systems, The 2015 Gordon Godfrey Workshop on Spins and Strongcorrelations, 2015

2016 年

- Akihito Soeda, Universal controllization--its no-go and remedy for projective measurement of energy, Quantum Information Science Workshop,

2016

19. Daiki Hatanaka, Imran Mahboob, Koji Onomitsu, Hiroshi Yamaguchi, Electromechanical Phononic Crystal, 20th International Vacuum Congress (IVC-20), 2016
20. H. Yamaguchi, I. Mahboob, H. Okamoto, Two-mode nonlinear electromechanics, Opto- and Electro-mechanical Technologies 2016 (OET2016), 2016
21. Hiroshi Yamaguchi, Daiki Hatanaka, Yuma Okazaki, and Imran Mahboob1, Piezoelectric phonon manipulation in electromechanical resonators and waveguides, SPICE Workshop Quantum Acoustics, 2016
22. Jun Kobayashi, An ytterbium quantum gas microscope with narrow-line laser cooling, CEMS Topical Meeting on Cold Atoms, 2016
23. K. Hashimoto, T. Tomimatsu, S. Shirai, S. Taninaka, K. Nagase, K. Sato, and Y. Hirayama, Scanning nuclear electric resonance microscopy in a quantum Hall system, 33rd International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS2016), 2016
24. K. Hirakawa, Room temperature, very sensitive bolometer using doubly clamped microelectromechanical resonators, 5th Russia-Japan-USA-Europe Symposium on Fundamental & Applied Problems of Terahertz Devices & Technologies (RJUSE TeraTech-2016), 2016
25. K. Hirakawa, Terahertz spectroscopy of quantum nanostructures far beyond the diffraction limit, TERAMETANANO 2016, 2016
26. K. Hirakawa, S. Du, K. Yoshida, and Y. Zhang, Seeing single molecules with long wavelength terahertz radiation, Workshop University of Tokyo/ENS, 2016
27. Satoshi Iwamoto, Shun Takahashi, Ingi Kim, Takeyoshi Tajiri, Yasutomo Ota, and Yasuhiko Arakawa, Control of Light Polarization using Photonic and Phononic Crystals, Asia Communications and Photonics Conference (ACP) ACP2016, 2016
28. Satoshi Iwamoto, Shun Takahashi, Takeyoshi Tajiri, Yasutomo Ota, and Yasuhiko Arakawa, Control of Quantum Dot Light Emission by Chiral Photonic Crystal Structures, The 37th Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS), 2016
29. Satoshi Iwamoto, Yasutomo Ota, Shun Takahashi, Takeyoshi Tajiri, Kazuhiro Kuruma, Masahiro Kakuda, and Yasuhiko Arakawa, Quantum-Dot Cavity Quantum Electrodynamics using 2D and 3D Photonic Crystal Structures, The 12th International Symposium on Photonic and Electromagnetic Crystal structures (PECS-XII), 2016
30. Satoshi Iwamoto, Yasutomo Ota, Shun Takahashi, Takeyoshi Tajiri, Kazuhiro Kuruma, Masahito Kakuda and Yasuhiko Arakawa, Quantum-Dot Cavity Quantum Electrodynamics using Photonic Crystals, German-Japanese Meeting on the Science of Hybrid Quantum Systems, 2016
31. T. Ushiyama, N. X. Viet, S. Kishimoto and Y. Ohno, Bio-electronics applications of carbon nanotube thin film, The Seventeenth International Conference on the Science and Applications of Nanotubes and Low-dimensional Materials, 2016
32. Takaaki Koga, Electric spin generation using a double quantum well based on the interband Rashba effect, EMN Quantum Meeting 2016, 2016
33. Takaaki Koga, Quantitative determination of the Rashba parameters in the InGaAs/InAlAs quantum wells and the proposal to use the double quantum wells to enhance the Edelstein effect, International Conference on Semiconductor Nanostructures for Optoelectronics and Biosensors (IC SeNOB), 2016
34. Takaaki Koga, Spin Blocking Device Using the Inter-Band Rashba Effect in Double Quantum Well, The 6th Annual World Congress of Nano Science and Technology-2016 (Nano S&T-2016), 2016
35. Y. Ohno, Bio-electronics applications of carbon nanotube thin film, The Fifth International Workshop on Nanocarbon Photonics and Optoelectronics, 2016
36. Yoshiro Hirayama, Resistively-detected nuclear based measurements in semiconductor quantum systems, China-Japan International Workshop on Quantum Technologies (QTech 2016), 2016
37. Yoshiro Hirayama, Quantum Transport and Nuclear Related Phenomena in GaAs and InSb Systems, Recent Development in 2D Systems (RD2DS), 2016
38. Yoshiro Takahashi, A quantum gas microscope for ytterbium atoms, 47th Annual Meeting of the APS Division of Atomic, Molecular and Optical Physics, 2016
39. Yoshiro Takahashi, Quantum simulation using ultracold atoms in an optical lattice, International Symposium on New Horizons in Condensed Matter Physics, 2016
40. Yosuke Takasu, Study of Non-Equilibrium Dynamics of Isolated Quantum Systems Using Ultracold Ytterbium Atoms in an Optical Lattice, NCTS Annual Theory Meeting 2016: Quantum Simulations and Numerical studies in Many-Body Physics, 2016
41. 高橋義明, トポロジカルポソニグ現象の冷却原子を用いた新展開, 第2回「トポロジーが紡ぐ物質科学のフロンティア」領域研究会, 2016

2017年

42. Akinobu Kanda, Search for unusual Andreev reflection in a graphene/superconductor interface, Collaborative Conference on Material Science (CCMR 2017), 2017
43. D. Hatanaka, M. Kurosu, and H. Yamaguchi, Dynamic phonon propagation control in GaAs/AlGaAs phononic crystal wave guides, 6th International Workshop "Epitaxial Growth and Fundamental Properties of Semiconductor Nanostructures", 2017
44. D. Hatanaka, M. Kurosu, and H. Yamaguchi, GaAs/AlGaAs phononic crystal waveguide, Asia Pacific Society for Materials Research 2017 Annual Meeting (APSMR2017), 2017
45. D. Hatanaka, M. Kurosu, and H. Yamaguchi, GaAs/AlGaAs electromechanical phononic crystal waveguide, Physics and Applications of Nanoelectronic and Nanomechanical Systems, 2017
46. H. Tabata, Noble functionalities created by Yuragi/Fluctuation in strongly correlated electron compounds, 2017 Asia-Pacific Workshop on Fundamentals and Applications of Advanced Semiconductor Devices (AWAD 2017), 2017
47. H. Tabata, New electronic devices for low power consumption by learning from bio system, The 14th International Symposium on Sputtering and Plasma Processes (ISSP2017), 2017
48. H. Tabata, Oxide Electronics and Ferroelectrics – Their History and Relations –, The 34th Meeting on Ferroelectric Materials and Their Applications (FMA34), 2017
49. H. Tabata, Ferrite Oxide Engineering for Solar Energy Harvesting and Spin-based Electronics, The Core-to-Core Workshop, 2017
50. H. Tabata, M. Adachi, H. Yamahara, M. Seki, Spin Fluctuated Garnet Ferrites for Brain Mimetic Memory Devices, IUMRS-ICM 2017 (the 15th International Conference on Advanced Materials), 2017
51. H. Yamaguchi, Electromechanical semiconductor quantum structures, SPIE Optics & Photonics annual meeting 2017, 2017
52. H. Yamaguchi, I. Mahboob, H. Okamoto, and D. Hatanaka, Parametric coupling and correlated fluctuation in multimode electromechanical resonators, Frontiers of Nanomechanical Systems 2017 (FNS2017), 2017
53. H. Yamaguchi, M. Kurosu, and D. Hatanaka, Acoustic phonon manipulation in GaAs/AlGaAs electromechanical systems, US-Japan Joint Seminar on Nanoscale Transport Phenomena, 2017
54. H. Yamaguchi, M. Kurosu, D. Hatanaka, GaAs/AlGaAs phononic crystal waveguide, International Workshop on Quantum Technologies (QTech2017), 2017
55. Hitoshi Tabata, Phonon and Magnon Properties of Gradient Strain Introduced Garnet Ferrite Oxide Thin Films, 18th US-Japan Seminar on Dielectric and Piezoelectric Ceramics, 2017
56. Hitoshi Tabata, THz-TDS Combined with Metamaterials for Detecting Hydration State of Bio Related System, MTSA 2017&TeraNano-8, 2017

57. J. Ishi Hayase, Improvement of photon-echo generation efficiency by adiabatic rapid passages with a pair of chirped pulses in an inhomogeneous quantum dot ensemble, XV International Conference on Quantum Optics and Quantum Information (ICQOQI'2017) , 2017
58. K. Hirakawa, S. Du, K. Yoshida, and Y. Zhang, Terahertz spectroscopy of single molecules and single atoms far beyond the diffraction limit, Russia-Japan-USA-Europe Symposium on Fundamental & Applied Problems of Terahertz Devices & Technologies (RJUSE TeraTech 2017), 2017
59. K. Hirakawa, S. Du, K. Yoshida, C.Tang, and Y. Zhang, Terahertz spectroscopy of single molecules and single atoms, 4th International Symposium on Microwave/Terahertz Science and Applications (MTSA 2017), 2017
60. K. Hashimoto, Scanning-probe imaging of nuclear/electron spin polarization in a quantum Hall system, The Collaborative Conference on Materials Research (CCMR) 2017, 2017
61. K. Hirakawa, Uncooled, sensitive, high-speed bolometers using doubly clamped microelectromechanical resonators, 2017 Sweden-Japan International workshop on quantum nanophysics and nanoelectronics, 2017
62. K. Hirakawa, Uncooled, sensitive, high-speed bolometers using doubly clamped microelectromechanical resonators, 2017 Sweden-Japan International workshop on quantum nanophysics and nanoelectronics, 2017
63. K. Hirakawa, Ultrafast nanomechanical oscillation of single C60 molecules investigated by terahertz spectroscopy, Japan-China International Workshop on Quantum Technologies (QTech 2017), 2017
64. Kae Nemoto, A Universal Quantum Module For Quantum Computation And Communication, 2017 CLEO Pacific Rim Conference, 2017
65. Kouichi Akahane, Carrier dynamics of InAs quantum dot with digital embedding method grown on InP(311)B substrate, 6th International Workshop Epitaxial Growth and Fundamental Properties of Semiconductor Nanostructures (SemiconNano2017), 2017
66. M. Nomura, Thin Si thermoelectric material by phonon engineering, IUMRS-ICA2017, 2017
67. M. Nomura, Heat transfer control by Si phononic nanostructures, PHONONICS2017, 2017
68. M. Nomura, Physics of Nanoscale Heat Transfer and Applications, The 9th International Electronics Cooling Technology Workshop, 2017
69. M. Nomura, Phononic Crystal Nanopatterning in Si and SiGe Thin Films for Thermoelectric Application, TMS2017, 2017
70. M. Nomura, Thermophononic crystals, Wave Phenomena and Phonon Thermal Transport Scientific School, 2017
71. Michael Hanks, Nicolò Lo Piparo, Michael Trupke, Jörg Schmiedmayer, William J. Munro, Kae Nemoto, A universal quantum module for quantum communication, computation, and metrology, SPIE. Optics+Photonics, 2017
72. Mio Murao, Higher order quantum operations of unitaries and their implications, The 17th Asian Quantum Information Science Conference, 2017
73. R. S. Deacon, E. Bocquillon, J. Wiedenmann, F. Dominguez, T. Klapwijk, K. Ishibash, and L. W. Molenkamp, Topological States of Matter , The 20th International Conference on Electron Dynamics in Semiconductors, Optoelectronics and Nanostructures (EDISON20), 2017
74. Ryota Negishi and Yoshihiro Kobayashi, Bandlike-transport in highly crystalline graphene films from defective graphene oxide, Collaborative Conference on Materials Research, 2017
75. S. Du, Y. Zhang, K. Yoshida, and K. Hirakawa, Terahertz spectroscopy of a single atom in a fullerene cage, 42 International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2017), 2017
76. T. Tomita, S. Nakajima, I. Danshita, Y. Takasu, Y. Takahashi, Controlling quantum many-body states and dynamics of strongly correlated bosons with an engineered dissipation, The 2nd Tokyo-Beijing Workshop on Ultracold Atoms, 2017
77. Takao Aoki, Nanofiber resonator for a cavity QED network, The 3rd Australia New Zealand Conference on Optics and Photonics (ANZCOP), 2017
78. Takashi Yamamoto, Motoki Asano, Sahin Kaya Ozdemir, Controlling group delay with passive and active microresonators, SPIE Photonic West 2017, 2017
79. Y. Homma and S. Chiashi, Measurements of Thermodynamic Properties on Nano-Scale by Single Carbon Nanotube Spectroscopy, 2017 International Conference on Functional Carbons (ICFC), 2017
80. Y. Ohno, Flexible devices based on carbon nanotube thin films, 固体物理, 2017
81. Y. Ohno, Flexible thin-film transistors and biosensors based on carbon nanotubes for wearable health monitoring devices, International Symposium on Nanocarbon Materials, 2017
82. Y. Ohno, Carbon nanotube thin film devices for wearable electronics, Japan-India Joint Seminar, 2017
83. Y. Ohno, Flexible voltage generator based on movement of electrolyte droplet on carbon nanotube thin film, JSAP-KPS Joint Symposium, 2017
84. Y. Ohno, Flexible bio-electronics based on carbon nanotube thin films, Nano and Giga Challenges in Electronics, Photonics and Renewable Energy, 2017
85. Y. Ohno, Carbon nanotube-based flexible electronics: TFTs, ICs, and biosensors, Nanomaterials for biomedical applications: Magnetic nanoparticles and carbon nanotubes as enhancers for targeted RNA delivery in vivo, 2017
86. Y. Ohno, Highly-sensitive, flexible electrochemical biosensor based on carbon nanotube thin film, The 12th Asian Conference on Chemical Sensors, 2017
87. Y. Ohno, Carbon Nanotube-based Flexible/Stretchable Devices on Polymer Films for Wearable Electronics, The 25th Annual World Forum on Advanced Materials (POLYCHAR 25), 2017
88. Y. Ohno, Carbon Nanotubes for Wearable Electronics: Transistors, Circuits, Sensors, and Energy Harvesting Devices, The 8th A3 Symposium on Emerging Materials, 2017
89. Y. Zhang and K. Hirakawa, Novel bolometric THz detection by MEMS resonators, 14th International Conference on Intersubband Transitions in Quantum Wells (ITQW2017), 2017
90. Y. Zhang, S. Hosono, N. Nagai, and K. Hirakawa, Room temperature, sensitive, high-speed bolometers using doubly clamped microelectromechanical resonators, International Conference on Terahertz Emission, Metamaterials and Nanophotonics (Terametnano-2), 2017
91. Y. Zhang, S. Hosono, N. Nagai, and K. Hirakawa, Uncooled, sensitive, high-speed bolometers using doubly clamped microelectromechanical resonators, Optical Terahertz Science and Technology (OTST 2017), 2017
92. Y. Takahashi, Non-equilibrium dynamics of ultracold ytterbium atoms in optical lattices, Quantum Optics IX, 2017
93. Yoshiro Hirayama, Resistively-detected NMR in semiconductor quantum systems, Frontiers in Quantum Materials and Devices Workshop 2017, 2017
94. Yoshiro Hirayama, New Directions of Physics Studies in Semiconductor Quantum Systems, Joint Workshop "World Leading Research for Future 10 Years -For International Industry-University Collaboration based on Cooperation between NCTU and Tohoku Univ.-, 2017
95. Yoshiro Hirayama, Nuclear Spin Related Measurements for Semiconductor Quantum Systems, Nano and Giga Challenges in Electronics, Photonics, and Renewable Energy (NGC2017), 2017
96. Yoshiro Takahashi, Novel phenomena of ultracold atoms in an optical super-lattice, Fudan University Physics Department Colloquium, 2017
97. Yoshiro Takahashi, Topological physics of ultracold atoms in an optical lattice, International Workshop on Topological Structures in Quantum Matter, 2017
98. Yoshiro Takahashi, Topological Thouless pumping of ultracold fermions, YIPQS long-term and Nishinomiya-Yukawa memorial workshop Novel Quantum States in Condensed Matter 2017, 2017

2018 年

99. Satoshi Iwamoto, Advances in quantum dot cavity quantum electrodynamics using photonic crystal nanocavities, CLEO-PRThe 13th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics, 2018
100. D. Hatanaka, M. Kurosu, and H. Yamaguchi, Propagation control of acoustic waves in compound semiconductor phononic crystal waveguides, IEEE International Conference on Emerging Electronics (IEEE-ICEE) 2018, 2018
101. H. Tabata, Functional Oxide Engineering for Solar Energy Harvesting and Neuromorphic Devices based on Spintronics & Magnonics, The 2nd Electron Devices Technology and Manufacturing (EDTM) Conference 2018, 2018
102. H. Tabata, IR and THz characterization of bio related materials and analysis by machine learning, the 43rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), 2018
103. H. Tabata, Y. Kuranaga, H. Matsui, Strong light confinements coupled with surface plasmons in the hetero layers of Ga₂O₃-ZnO thin films, 4th E-MRS & MRS-J Bilateral Symposium, 2018
104. H. Yamaguchi, GaAs/AlGaAs heterostructures for micro- and nano-electromechanics, 2-days workshop "MBE technology of hetero-structures with a high-mobility Two-Dimensional Electron Gas (2DEG)", 2018
105. H. Yamaguchi, Electron-Photon-Phonon hybrid systems based on compound semiconductor mechanical resonators, 65th Annual American Vacuum Society International Symposium and Exhibition (65th AVS), 2018
106. H. Yamaguchi, D. Hatanaka, and M. Kurosu, Propagation control of acoustic waves in GaAs-based phononic crystal waveguide, 34th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS2018), 2018
107. H. Yamaguchi, R. Ohta, and H. Okamoto, Carrier mediated optomechanical coupling in a GaAs/AlGaAs heterostructure cantilever, SPIE Optics + Photonics 2018, 2018
108. H. Yamaguchi, R. Ohta, and H. Okamoto, Carrier mediated optomechanics, France-Japan Bilateral Workshop on Hybrid Quantum Systems, 2018
109. H. Tabata, Ultra-high sensitive skin gas sensing by quantum nano-devices -Application for wearable fat metabolism monitoring-, the Third Chile-Japan Academic Forum, 2018
110. Hayata Yamasaki and Mio Murao, Partial quantum information and two-way classical communication, post-AQIS18, 2018
111. Hideo Kosaka, Holonomic quantum manipulation of diamond qubits, The 2nd CEMS International Symposium on Dynamics in Artificial Quantum Systems (DAQS2018), 2018
112. I. Katayama, Y. Minami, Y. Arashida, O. S. Handegard, T. Nagao, M. Kitajima, and J. Takeda, Nonlinear Terahertz Dynamics of Dirac Electrons in Bi Thin Films, SPIE Optics + Photonics 2018, 2018
113. J. Ishi-Hayase, AC magnetic field sensing using NV centers in diamond, 14th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures (ACSIN-14), 2018
114. J. Ishi-Hayase, Highly-sensitive Quantum Sensor based on Electric Spin Manipulation in Diamond, The 13th Japan-US Joint Seminar on Quantum Electronics and Laser Spectroscopy (US-Japan QELS-13), 2018
115. J. Takeda, K. Yoshioka, Y. Arashida, and I. Katayama, Nanoscale Electron Manipulation Using Phase-controlled THz Near-fields, The Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO 2018), 2018
116. J. Takeda, K. Yoshioka, Y. Minami, Y. Arashida, and I. Katayama, THz-Field-Driven Electron Tunneling On The Nanoscale, 43rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Thertz Waves (IRMMW-THz 2018), 2018
117. K. Hashimoto, T. Tomimatsua, and Y. Hirayama, Nuclear Resonance Spectroscopic Imaging of Hyperfine-Coupled Quantum Hall System, Reimei/GPSpin/ICC-IMR Workshop on New Excitations in Spintronics, 2018
118. K. Hirakawa, Room temperature, fast, and sensitive bolometric terahertz detection by using MEMS resonators, The 6th Workshop on Physics between École Normale Supérieure and University of Tokyo, École Normale Supérieure, Paris, France, 2018
119. K. Hirakawa (keynote), High-sensitivity and fast terahertz bolometric detection by MEMS resonators, The 9th International Symposium on Ultrafast Phenomena and Terahertz Waves (ISUPTW 2018), Changsha, China, 2018
120. K. Hirakawa, Y. Zhang, B. Qiu, N. Nagai, Giant enhancement in thermomechanical terahertz detection sensitivity of GaAs MEMS resonators through coherent internal mode coupling, the 34th International Conference on the Physics of Semiconductors 2018 (ICPS2018), 2018
121. K. Hirakawa, Y. Zhang, N. Nagai, S. Hosono (invited), Fast and sensitive terahertz detection at room temperature by GaAs doubly clamped MEMS beam resonators, SPIE Nanoscience + Engineering, 2018
122. K. Ishibashi, Nanoscale Quantum Effect Devices with Nanotubes and Nanowires, Nanotech Malaysia 2018, 2018
123. K. Ishibashi, Single-wall carbon nanotubes for quantum-dot devices, The 3rd International Conference on Emerging Advanced Nanomaterials (ICEAN2018), 2018
124. Kae Nemoto, Superradiance and thermalization in hybrid quantum systems, AIP Congress 2018, 2018
125. Kae Nemoto, Scalability of quantum networks from a qubit to tomorrows quantum internet, The Quantum Internet; Charting the Critical Path, 2018
126. Kae Nemoto, Michael Hanks, Nicolò Lo Piparo, and William J. Munro, Universal Optical Modules for Quantum Network, Summer Topicals Meeting Series 2018, 2018
127. M. Bescond, A. Yanguì, T.F. Yan, F. Michellini, N. Nagai, N. Cavassilas, M. Lannoo, K. Hirakawa (invited), Evaporative cooling effect in AlGaAs/GaAs Heterostructures, GDRe Meeting on "Thermal Nanosciences and NanoEngineering", 2018
128. M. Kurosu, D. Hatanaka, and H. Yamaguchi, Nonlinear dynamics and four-wave mixing in MEMS waveguides, The 15th Nanomechanical Sensing Workshop (NMC2018), 2018
129. M. Nomura, Heat conduction control in Si membrane by phononic nanostructures, IEEE Nano 2018, 2018
130. M. Nomura, Advanced heat transfer control in Si membrane by phononic nanostructures, The 5th Micro & Nanoscale Heat Transfer and Energy Workshop, 8-2, Taipei, Taiwan, 2018
131. M. Nomura, Nanostructured Si film thermoelectrics, European Advanced Materials Congress, B41-42 21-EM-1, Stockholm, Sweden, 2018
132. M. Nomura, Advanced heat conduction engineering by phonon engineering and thermoelectric application, NAMIS Marathon Workshop, Taiwan, 2018
133. M. Nomura, Phononics learn from photonics: thermal phonon engineering by phononic crystal, Optics & Photonics Japan, 31aCJ4, Tokyo, Japan, 2018
134. Michihisa Yamamoto, A localized spin in an electron wave cavity: measurement on the Kondo cloud length, Quantum Science Symposium Europe-2018, 2018
135. Minoru Kawamura, Quantum phase transition in magnetic topological insulator studied by transport measurement, China-Japan International Workshop on Quantum Technologies, 2018
136. Minoru Kawamura, Topology: a new knob for electric switch, France-Japan Bilateral Workshop on Hybrid Quantum Systems, 2018
137. Minoru Kawamura, Metal-insulator transition in magnetic topological insulator, The 34th international conference on physics of semiconductors (ICPS2018), 2018
138. Mio Murao, Higher order quantum operations of unitaries, 4th Seefeld workshop on Quantum Information (2018), 2018
139. Mio Murao, Higher order quantum operations of unitaries, Hong Kong - Shen Zhen Workshop on Quantum Information Science, 2018

140. Mio Murao, Using quantum computers for analyzing quantum physics, Internaitonal Conference on Challenges in Quantum Information Science (CQIS 2018), 2018
141. Mio Murao, Using quantum computers for manipulating and analysing quantum systems, The Bristol Quantum Information Technologies Workshop (BQIT2018), 2018
142. N. Mori, G. Mil'nikov, J. Iwata, and A. Oshiyama, Quantum transport device simulation based on real-space density functional theory and non-equilibrium Green's function method, International Union of Materials Research Societies - International Conference on Electronic Materials 2018, 2018
143. Qingxiuxiong Dong, Marco Tulio Quintino, Akihito Soeda and Mio Murao, Implementing positive maps with multiple copies of an input state, post-AQIS18, 2018
144. R. Anufriev, R. Yanagisawa, and M. Nomura, Surface engineering of nanobeams and nanomembranes for silicon-based thermoelectrics, Collaboratie Conference on Materials Research, 2018
145. R. Negishi and Y. Kobayashi, Restoration and layer-by-layer growth of graphene structures by controlling partial pressure of ethanol vapor through high process temperature, Nanotech Malaysia (Kuala Lumpur, Malaysia), 2018
146. Russell S. Deacon, Fractional ac-Josephson effect as a signature of topological superconductivity, France-Japan Bilateral Workshop on Hybrid Quantum Systems, 2018
147. S. Du, Y. Zhang, K. Yoshida, and K. Hirakawa, Terahertz spectroscopy at the atomic-scale level, CLEO Pacific Rim 2018, 2018
148. S. Iwamoto, Topological localized states in quasi-1D photonic and phononic crystals, International workshop "Variety and universality of bulk-edge correspondence in topological phases: From solid state physics to transdisciplinary concepts" (BEC2018), 2018
149. S. Iwamoto, Photonic crystal nanocavities by topological concept, International workshop "Variety and universality of bulk-edge correspondence in topological phases: From solid state physics to transdisciplinary concepts" (BEC2018X), 2018
150. S. Mouri, Y. Nanishi, and T. Araki, Van der Waals Epitaxy of Nitride Semiconductor Towards Energy Conversion Devices, The 9th International Symposium of Advanced Energy Science, 2018
151. Satoshi Iwamoto, Takeyoshi Tajiri, Shun Takahashi, Yasutomo Ota and Yasuhiko Arakawa, Three-dimensional functional photonic crystals made by micromanipulation, Physics@Veldhoven, FT5.1, 2018
152. Satoshi Iwamoto, Yasutomo Ota, Ryota Katsumi, Katsuyuki Watanabe, Yasuhiko Arakawa, Topological Localized State in Photonic Crystal Nanobeam, 2018 Progress In Electromagnetics Research Symposium, 2018
153. Satoshi Iwamoto, Yasutomo Ota, Takuto Yamaguchi, and Yasuhiko Arakawa, Topological edge states in semiconductor-based photonic crystals, China-Japan International Workshop on Quantum Technologies, 2018
154. Shintaro Nomura, Generation of vector-shaped light pulses and its application to spin control of semiconductor two-dimensional electron system, Global Research Efforts on Energy and Nanomaterials 2018, 2018
155. Takashi Yamamoto, Quantum network with photons, atoms, and optomechanics, France-Japan Bilateral Workshop on Hybrid Quantum Systems, 2018
156. William J. Munro, Nicolò Lo Piparo, and Kae Nemoto, Quantum Multiplexing as a Resource Saver in Quantum Networks, Summer Topicals Meeting Series 2018, 2018
157. Y. Kuranaga, H. Matsui, A. Ikehata, Y.-L. Ho, J.-J. Delaunay, and H. Tabata, Surface Plasmon Excitation on Hybrid Structures of Oxide Semiconductors of (Ga₂O₃)/ZnO:Ga in Near-infrared Range, Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS) 2018, 2018
158. Y. Ohno, Carbon nanotube TFTs, ICs, energy harvester for wearable sensor devices: Device modeling, circuit design tools, and fabrication, 19th International Conference on the Science and Application of Nanotubes and Low-dimensional Materials, 2018
159. Y. Ohno, Carbon nanotube-based flexible electronics for wearable devices, 2018 International Forum on Graphene, 2018
160. Y. Ohno, Carbon Nanotube-Based Flexible Devices for Wearable Sensor System, 9th A3 Symposium on Emerging Materials: Nanomaterials for Electronics, Energy, and Environment, 2018
161. Y. Ohno, Carbon Nanotube-Based Flexible Devices for Wearable Sensor System, AsiaNano 2018, 2018
162. Y. Ohno, Carbon Nanotube-Based Flexible Electronics: Transistors, Integrated Circuits, Biosensors, and Energy harvesters for Wearable Devices, International Conference on Innovative Research in Science, Technology and Management, 2018
163. Y. Ohno, Carbon nanotube-based analog circuits for wearable sensor applications: Device modeling, circuit desing and fabrication, International Workshop on Nanocarbon Photonics and Optoelectronics, 2018
164. Y. Ohno, Flexible Carbon Nanotube ICs for Wearable Electronics: Transistor technologies, Circuit Design Tools, and Analog IC design and Fabrication, MRS Fall Meeting, 2018
165. Y. Ohno, Flexible and transparent energy harvesters with carbon nanotube thin films, The 55th Fullerenes-Nanotubes-Graphene General Symposium, 2018
166. Y. Zhang, S. Hosono, N. Nagai, and K. Hirakawa, Novel bolometric THz detection by MEMS resonators, 2018 43rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2018), Nagoya Congress Center, Aichi, Japan, 2018
167. Yoshikazu Homma and Shohei Chiashi, Single SWNT Spectroscopy for Nano-metrology, 7th Workshop on Nanotube Optics and Nanospectroscopy WONTON 2018, 2018
168. Yoshiro Hirayama, Transport and resistively-detected NMR characteristics of III-V quantum structures, 2018 Tohoku-Harvard Workshop, 2018
169. Yoshiro Hirayama, Resistively-detected nuclear resonance and its imaging, China-Japan International Workshop on Quantum Technologies (QTech2018), 2018
170. Yoshiro Hirayama, Microscopic Characterizations Based on Nuclear Resonance, France-Japan Bilateral Workshop on HQS, 2018
171. Yoshiro Hirayama, Microscopic Nuclear-Spin-Resonance in Semiconductor Quantum Systems, Frontiers in Quantum Materials & Devices Workshp (FQMD) 2018, 2018
172. Yoshiro Hirayama, Resistively - Detected Nuclear - Magnetic - Resonance in Microscopic Scale, International Symposium on Quantum Hall Effects and Related Topics, 2018
173. Yoshiro Hirayama, Nuclear Spin Resonance in Semiconductor Quantum Systems, Kick-off Symposium for World Leading Research Centers- Materials Science and Spintronics -, 2018
174. Yoshiro Takahashi, Topological physics explored by ultracold ytterbium atoms, International workshop "Variety and universality of bulk-edge correspondence in topological phases: From solid state physics to transdisciplinary concepts" (BEC2018), 2018

2019 年

175. S. Iwamoto, Semiconductor topological photonic crystal nanocavities, International Workshop on New Trends in Topological Insulators 2019 & Variety and Universality of Bulk-edge Correspondence in Topological Phases (NTTI2019 and BEC2019), 2019
176. C. Uchiyama, Non-Markovian Effect on Quantum Transport, Quantum Information Processing in Non-Markovian Complex Systems(QIPQC2019), 2019
177. D. Hatanaka, M. Kurosu and H. Yamaguchi, Dispersive and nonlinear dynamics of acoustic wave propagation in a phononic crystal waveguide, FQMD2019, 2019

178. D. Hatanaka, M. Kurosu, and H. Yamaguchi, Control of acoustic waves in an electromechanical phononic crystal, *Frontier of Nanomechanical Systems (FNS2019)*, 2019
179. H. Tabata, Magnetic, Dielectric and Optical Anomaly in Nano Structural Controlled Strain Gradient Garnet Ferrite Films, *IUMRS-ICA-2019*, 2019
180. H. Tabata, Biooptics and bioelectronics, *The 4th UTokyo-NTU Joint Conference*, 2019
181. H. Tabata, Near IR Plasmonics based on Nano Patterned Metallic Antennas and Oxide Semiconductors for Bio-Medical Sensing, *Workshop on information optics 2019(WIO2019)*, 2019
182. H. Tabata, H. Yamahara, S. Shamim, A. Katogi and M. Seki, Magnetic, dielectric and optic anomaly in strain gradient garnet films, *The 8th Indo-Japan Seminar Designing Emergent Materials*, 2019
183. H. Yamaguchi, Strain-mediated mechanical control of spin systems in semiconductor heterostructures, *Physics and Applications in Nanoelectronics and Nanomechanics*, 2019
184. Hitoshi Tabata, Design and Demonstration of Low Power Consumption Devices Based on Stochastic Resonance Learning from Fluctuation of Bio-system, *The 2nd Symposium for World Leading Research Centers*, 2019
185. J. Ishi-Hayase, Quantum Protocols for AC Magnetic Field Sensing using Nitrogen-vacancy Centers in Diamond, *Canada-Japan Workshop on Hybrid Quantum Systems*, 2019
186. J. Ishi-Hayase, Highly-sensitive AC Magnetic Field Sensing based on Electric Spin Manipulation of Nitrogen-vacancy Centers in Diamond, *XVI International Conference on Quantum Optics and Quantum Information (ICQOQI'2019)*, 2019
187. J. Takeda, K. Yoshioka, Y. Arashida, and I. Katayama, Ultrafast Electron Manipulation Using THz Scanning Tunneling Microscopy With Tailor-Made Near Fields, *International Photonics and Optoelectronics Meetings (POEM 2019)*, 2019
188. Jason ball, Petr Moroshkin, Denis Konstantinov, Yuimaru Kubo, Towards a quantum transducer with spins in diamond, *International Workshop on Hybrid Quatum Systems*, 2019
189. K. Hirakawa, Terahertz Spectroscopy of Electron-vibron Coupling in single Molecules by Using Nanogap Electrodes, *International School and Symposium on Nanoscale Transport and phoTonics 2019 (ISNTT2019)*, 2019
190. K. Hirakawa, Evaporative electron cooling in asymmetric double barrier semiconductor heterostructures, *LIMMS-Next PV Joint Energy Workshop*, 2019
191. K. Hirakawa, Room-temperature, fast and sensitive terahertz detection using MEMS resonators, *Partners for International Business (PIB) Event Nanotechnology Japan*, 2019
192. K. Hirakawa, Terahertz Spectroscopy of Electron-vibron Coupling in Single Molecules, *The 7th Workshop on Physics between Ecole Normale Superieure and University of Tokyo*, 2019
193. K. Ishibashi, Quantum structures with carbon nanotubes, *700. WE-Heraeus-Seminar on One-Dimensional Systems for Quantum Technology*, 2019
194. Kae Nemoto, New approaches to quantum computation, *Japan-Netherlands Quantum Conference*, 2019
195. Kae Nemoto, *DISTRIBUTED QUANTUM INFORMATION PROCESSING*, *SPIE. Optics + Photonics 2019*, 2019
196. Kae Nemoto, *Quantum Complex Networks*, *Workshop on Selected Topics in Quantum Computation and Quantum Information*, 2019
197. Kazuhiko Hirakawa, Fast And Sensitive Bolometric Terahertz Detection At Room Temperature Through Thermomechanical Transduction, *44th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2019)*, 2019
198. Kazuhiko Hirakawa, Terahertz dynamics of electron-vibron coupling in single molecules with tunable electrostatic potential, *Hybrid Quantum Systems Workshop in Ottawa*, 2019
199. Kazuhiko Hirakawa, Terahertz Dynamics of Single Molecules and Single Atoms Studied by Using Nanogap Electrodes, *The 21st International Conference on Electron Dynamics in Semiconductors, Optoelectronics and Nanostructures (EDISON 21)*, 2019
200. Koji Ishibashi, Topological insulator-superconductor Josephson junction -Search for Majorana fermion-, *2019 RIKEN-NCHU Joint Symposium*, 2019
201. Kouichi Akahane, Atsushi Matsumoto, Toshimasa Umezawa, and Naokatsu Yamamoto, Hybrid structure of quantum-dot and quantum-well superlattice grown by molecular beam epitaxy, *Energy, Materials, and Nanotechnology Meeting on Epitaxy (EMN Epitaxy 2019)*, 2019
202. M. Bescond, A. Yangui, C. C. Tang, T. F. Yan, N. Nagai, and K. Hirakawa, Electron cooling in asymmetric double-barrier heterostructure: the evaporative approach, *The 21st International Conference on Electron Dynamics in Semiconductors, Optoelectronics and Nanostructures (EDISON 21)*, 2019
203. M. Bescond, A. Yangui, T. Yan, N. Nagai, and K. Hirakawa, Evaporative electron cooling in asymmetric double barrier semiconductor heterostructures, *International Workshop on Computational Nanotechnology (IWCN)*, 2019
204. M. Nomura, Phonon Engineering Learns Photonics for Heat Conduction Control, *International Symposium on Numerical Methods in Heat and Mass Transfer, Plenary Talk 3, Hangzhou, China*, 2019
205. M. Nomura, Directional Heat Flux in Phononic Crystals, *Q04.12.01, MRS Spring Meeting and Exhibit, Phoenix, USA*, 2019
206. M. Nomura, Phononics learns photonics for heat transport control, *Wed-3, Conference on Nanophononics, Bridging Statistical Physics, Molecular Modeling and Experiments, Trieste, Italy*, 2019
207. M. Nomura, Phononics learns photonics, *JSIV-1.2, CLEO/EUROPE-EQEC 2019, Munich, Germany*, 2019
208. M. Nomura, Advanced heat flux control by phononic nanostructures, *LIMMS-Next PV Joint Energy Workshop*, 2019
209. M. Nomura and R. Yanagisawa, Thermoelectric Si thin film with nanostructures, *Asian Advanced Materials Congress*, 2019
210. M. Nomura and R. Yanagisawa, Power enhancement of planar-type Si thermoelectric devices by nanostructuring, *The 13th Pacific Rim Conference of Ceramic Societies*, 2019
211. Magdalena Marganska, Lars Milz, Wataru Izumida, Christoph Strunk, Milena Grifoni, Majorana states in carbon nanotubes, *DPG Spring Meeting*, 2019
212. Marco Túlio Quintino, Qingxiuxiong Dong, Atsushi Shimbo, Akihito Soeda and Mio Muraø, Reversing unknown quantum transformations: A universal quantum circuit for inverting general unitary operations, *Quantum Information Structure of Spacetime HKU workshop (QISS HKU 2020)*, 2019
213. Michael Hanks, *The Many Faces of Quantum Device Design*, *AQIS 2019 Satellite Meeting*, 2019
214. Michihisa Yamamoto, Measurement of the Kondo cloud length, *Canada-Japan Workshop on Hybrid Quantum Systems*, 2019
215. Michihisa Yamamoto, Measurement of the Kondo cloud length, *Frontiers in Quantum Information Physics and Technology*, 2019
216. Michihisa Yamamoto, Measurement of the Kondo cloud length, *Frontiers in Quantum Materials & Devices Workshop*, 2019
217. Michihisa Yamamoto, Manipulation of electron waves and solid-state flying qubits, *RIKEN-Berkeley Workshop on Quantum Information Science*, 2019
218. Michihisa Yamamoto, Observation of the Kondo Screening Cloud, *The 11th International Conference on Advanced Materials and Devices (ICAMD2019)*, 2019
219. Mikio Eto, Kondo effect and phase measurement in quantum dot embedded in mesoscopic ring, *14th Asia Pacific Physics Conference*, 2019
220. Mikio Eto, Kondo effect in quantum dot interferometer in multiterminal geometry, *5th EMN Meeting on Quantum (Barcelona, Spain)*, 2019
221. Mikio Eto, Physics in double quantum dot in parallel, *Canada-Japan Workshop on Hybrid Quantum Systems (Ottawa, Canada)*, 2019

222. Minoru Kawamura, Topological quantum phase transition in magnetic topological insulator, 2019 RIKEN-NCHU Joint Symposium, 2019
223. Minoru Kawamura, Quantum anomalous Hall effect in magnetic-proximity-coupled topological insulator, APW2019 and Tsinghua-RIKEN-KITS Joint workshop, 2019
224. Mio Murao, Higher order quantum operations of blackbox unitaries, 57th Annual Allerton Conference 2019, 2019
225. Mio Murao, Higher order quantum operations of blackbox unitaries, Quantum Information Processing in Non-Markovian Quantum Complex Systems (QIPQC 2019), 2019
226. Mio Murao, Higher order quantum operations of blackbox unitaries, Xith International Symposium on Quantum Theory and Symmetries (QTS2019), 2019
227. Mio Murao, Using quantum computers for processing quantum systems, Young Researchers Forum on Quantum Information Science, 2019
228. N. Namekata, D. Wu, S. Ohnuki, D. Fukuda, and S. Inoue, Quantum walk in a plasmonic waveguide lattice structure, International Conference on Emerging Quantum Technology, 2019
229. Nemoto Kae, Quantum device design with noise, Quantum Information Processing in Non-Markovian Quantum Complex Systems (QIPQC2019), 2019
230. R. Anufriev and M. Nomura, Ballistic thermal transport in silicon nanowires, Nanowire week, 2019
231. R. Anufriev and M. Nomura, Time-Domain Thermoreflectance for Thermal Characterization of Nanostructures, 20th International Conference on Photoacoustic and Photothermal Phenomena, Moscow, 2019
232. R. Ohta, H. Okamoto, T. Tawara, H. Gotoh, H. Yamaguchi, Mechanical control of bound excitons: strain-induced coupling of dark and bright states, Frontier of Nanomechanical Systems (FNS2019), 2019
233. R. Ohta, H. Okamoto, T. Tawara, H. Gotoh, H. Yamaguchi, Mechanical control of localized excitons: strained coupling between dark and bright states and mechanical control of exciton lifetime, HQS2019, Ottawa, 2019
234. S. Iwamoto, Confinement of light in semiconductor using topological concept, Canada-Japan Workshop on Hybrid Quantum Systems, 2019
235. S. Iwamoto, Semiconductor topological photonic crystal nanocavities, International Workshop on New Trends in Topological Insulators 2019 & Variety and Universality of Bulk-edge Correspondence in Topological Phases (NTTI2019 and BEC2019), 2019
236. S. Iwamoto, Topological Localized States in Semiconductor Photonic Crystals, International Workshop TOPOLOGY, 2019
237. Satoshi Iwamoto, Generation of Structured Light Using Spin-orbit Interaction of Light in Photonic Nanostructures, Optomagnonics 2019 Cambridge, 2019
238. Satoshi Iwamoto, Topological photonics using semiconductor photonic crystals, The 4th A3 Metamaterials Forum 2019, 2019
239. Shintaro Nomura, Wide-field imaging of microwave with nitrogen-vacancy center ensembles in diamond, Canada-Japan Workshop on Hybrid Quantum Systems, 2019
240. Shintaro Nomura, Wide-field quantum sensing using nitrogen-vacancy center ensembles in diamond, NCTU-Seminar, 2019
241. Shohei Chiashi, Yoshikazu Homma, Water Adsorption and Desorption on Single and Suspended Single-walled Carbon Nanotubes by Spectroscopy, International Conference on the Science and Application of Nanotubes and Low-Dimensional Materials, NT19, 2019
242. Takashi Yamamoto, Quantum Network with atoms and photons, International Workshop for Young Researchers on the Future of Quantum Science and Technology (FQST2020), 2019
243. Takashi Yamamoto, Quantum network with photons and diverse media, International Workshop on Hybrid Quantum Systems, 2019
244. Takashi Yamamoto, Quantum repeaters with photons, Okinawa School in Physics 2019: Coherent Quantum Dynamics (CQD 2019), 2019
245. Takashi Yamamoto, Experimental all-photonic quantum repeaters, SPIE Optics + Photonics 2019, 2019
246. Takashi Yamamoto, Optomechanical properties in a microbottle resonator, Progress In Electromagnetics Research Symposium PIERS 2019, 2019
247. Toshu An, Daisuke Kikuchi, Dwi Prananto, Yuta Kainuma, Kunitaka Hayashi, Long-distance excitation of NV centers in diamond via spin waves, the Joint 5th International Symposium on Frontiers in Materials Science & 3rd Nano-materials, Technology and Applications (FMS 2019 & NANOMATA 2019), 2019
248. X. Li, K. Yoshioka, Q. Zhang, F. Katsutani, W. Gao, N. Marquez, G. T. Noe, J. Watson, M. Manfra, I. Katayama, J. Takeda, and J. Kono, Observation of Narrow-Band Terahertz Gain in Two-Dimensional Magnetoexcitons, The Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO 2019), 2019
249. X. Li, K. Yoshioka, Q. Zhang, F. Katsutani, W. Gao, N. Marquez, T. Noe, J. Watson, M. Manfra, I. Katayama, J. Takeda, and J. Kono, Observation of Narrow-Band Terahertz Gain in Two-Dimensional Magnetoexcitons, The Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO 2019), 2019
250. Y. Ohno, Carbon nanotube thin films for wearable electronics application, 1&2DM, 2019
251. Y. Ohno, Carbon nanotubes for wearable electronics applications, 14th International Conference on Advanced Carbon Nano Structures, 2019
252. Y. Ohno, Low-voltage operable, ultra-stretchable carbon nanotube thin film transistors and integrated circuits, 2019 International Meeting on Information Display, 2019
253. Y. Ohno, Carbon Nanotube-Based Stretchable Devices for Wearable Electronics, International Conference on the Science and Application of Nanotubes and Low-Dimensional Materials, 2019
254. Yoshikazu Homma, Shohei Chiashi, Characterization of Phase of Water Confined in Nanospace, 12th International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices '19 (ALC' 19), 2019
255. Yoshiro Hirayama, Hyperfine interaction and resistively-detected NMR in semiconductor quantum systems, Frontiers in Quantum Information Physics and Technology, 2019
256. Yoshiro Hirayama, Electron Spin Characteristics Unveiled by Resistively-detected NMR, Rocky Mountain Conference : 42nd Int. EPR Symposium, 2019
257. Yoshiro Hirayama, Resistively-detected NMR and nuclear resonance imaging, Spintronics Workshop II, 2019
258. Yoshiro Hirayama, Microscopic characterization and resistively-detected NMR of semiconductor quantum systems, Workshop Spintronic Tohoku-Mainz-Lorraine 2019, 2019
259. 安東秀, 菊池大介, Dwi Prananto, 貝沼雄太, 林都隆, Long-distance excitation of NV centers in diamond via spin waves, the Joint 5th International Symposium on Frontiers in Materials Science & 3rd Nano-materials, Technology and Applications (FMS 2019 & NANOMATA 2019), 2019

2020年

260. C. Uchiyama, Non-Markovian Effect Quantum Transport, The 6th International Workshop on Statistical Physics and Mathematics for Complex Systems, 2020
261. Jason Ball, Shota Norimoto, Petr Moroshkin, Denis Konstantinov, Yuimaru Kubo, Quantum information technologies with maser, International Workshop for Young Researchers on the Future of Quantum Science and Technology, 2020
262. Jason Ball, Shota Norimoto, Petr Moroshkin, Denis Konstantinov, Yuimaru Kubo, Quantum information technologies with maser, International Workshop for Young Researchers on the Future of Quantum Science and Technology, 2020
263. K. Hirakawa, Terahertz Spectroscopy of Electron-Vibron Coupling in Single-Molecule Transistors, Colloquium "Terahertz Nanoscience",

264. N. Lo Piparo, M. Hanks, C. Gravel, W. J. Munro and K. Nemoto, Quantum multiplexing for error correction codes, Workshop on Quantum Networks and Quantum Information, 2020
265. N. Mori, G. Mil'nikov, J. Iwata, and A. Oshiyama, RSDFT-NEGF quantum transport simulation of ultra-small field-effect transistors, The 4th IEEE Electron Devices Technology and Manufacturing, 2020
266. R. Ohta, Micromechanical engineering of light-matter interaction in solid-state two-level system, FQST2020, 2020
267. Rui Wang, Jian Sun, Russell S. Deacon, Koji Ishibashi, Spin-Orbit Interaction in a Hole Nanowire and its Applications for Hybrid Quantum Systems, 2020 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2020), 2020
268. S. Iwamoto, Yasutomo Ota, Takuto Yamaguchi, Hironobu Yoshimi, and Yasuhiko Arakawa, Topological waveguides and nanoacivities using semiconductor photonic crystals, Photonics West 2020, 2020
269. Satoshi Iwamoto, Light Propagation in Semiconductor Valley Photonic Crystals, International workshop "Variety and universality of bulk-edge correspondence in topological phases: From solid state physics to transdisciplinary concepts", 2020

国内会議招待講演

2015年

1. 大野雄高、カーボンナノチューブ薄膜の電子デバイス応用、新無機膜研究会第76回研究会、2015
2. 大野雄高、カーボンナノチューブによる柔軟で透明なエレクトロニクスとその展望、新産業技術促進検討会(モノづくり日本会議主催、NEDO共催)、2015
3. 大野雄高、カーボンナノチューブの電子デバイス応用、ナノ材料応用技術セミナー、2015
4. 大野雄高、カーボンナノチューブ薄膜のエレクトロニクス応用、第5回フラーレン・ナノチューブ・グラフェン若手研究会、2015
5. 大野雄高、カーボンナノチューブ薄膜を用いた柔軟で透明なエレクトロニクス、技術情報協会セミナー「伸縮性導電材料の開発とフレキシブルデバイスへの応用」、2015

2016年

6. H. Okamoto, T. Watanabe, R. Ohta, K. Onomitsu, H. Gotoh, T. Sogawa, and H. Yamaguchi, Excitonic Optomechanics in a GaAs System, Frontiers in Quantum Materials and Devices Workshop (FQMD2016)、2016
7. Hiroshi Yamaguchi, Imran Mahboob, Hajime Okamoto, and Daiki Hatanaka, Phonon confinement, transport, and piezoelectric manipulation in nonlinear electromechanical resonators, The 11th Annual IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (IEEE-NEMS 2016)、2016
8. M. Nomura and K. Sawano, Thermal Phonon Transport in SiGe Phononic Crystal Nanostructures, 13th International Conference on Flow Dynamics, 2016
9. N. Mori, Recent progress in NEGF simulation of electron and phonon transport in nano-devices, Short Course, 2016 International Conference on Solid State Devices and Materials, 2016
10. N. Nomura, J. Maire, R. Anufriev, A. Ramiere, and R. Yanagisawa, Phonon engineering by phononic crystal nanostructures, The 28th Symposium on Phase Change Oriented Science, 2016
11. Satoshi Iwamoto, Shun Takahashi, Takeyoshi Tajiri, Yasutomo Ota, and Yasuhiko Arakawa, Chiral Three-Dimensional Photonic Crystals for Controlling Light-Matter Interactions, CIQM Frontiers in Quantum Materials and Devices Workshop, 2016
12. Y. Ohno, Enhancement in sensitivity of carbon nanotube-based electrochemical biosensors, 蔵王16研究会、2016
13. Yoshiro Hirayama, Science of Hybrid Quantum Systems: New Grant-in-Aid for Scientific Research on Innovative Areas, 第5回半導体量子効果と量子情報の夏期研修会(Nasu Spin School)、2016
14. 岩本敏、荒川泰彦、ナノ構造が拓くフォトンクス、先端ナノデバイス・材料テクノロジー第151委員会平成28年度第5回研究会/光電相互変換台125委員会 第234回研究会 合同研究会、2016
15. 岩本敏、高橋駿、太田泰友、荒川泰彦、量子ドット・フォトンニック結晶結合系によるハイブリッドアプローチ、第77回応用物理学会秋季学術講演会、2016
16. 太田竜一、岡本創、山口浩司、GaAs オンチップオプトメカニクス、第77回応用物理学会秋季学術講演会、2016
17. 高橋義朗、超低温原子気体を用いた量子シミュレーション、東邦大学理学部コロキウム、2016
18. 張亜、渡辺康行、細野優、長井奈緒美、平川一彦、テラヘルツセンシング用非冷却・高感度 MEMS ボロメータの開発、2016年電子情報通信学会ソサイエティ大会、2016
19. 根岸良太、赤堀誠志、伊藤孝寛、渡辺義夫、小林慶裕、酸化グラフェン薄膜からの高結晶性グラフェン形成とそのバンド伝導、応用物理学会、2016
20. 早瀬潤子、半導体中2準位系の量子制御ー高感度光検出磁気共鳴顕微鏡の開発ー、第77回応用物理学会秋季学術講演会、2016
21. 平川一彦、半導体量子構造・マイクロ構造を用いたテラヘルツ電磁波検出の進展、(一財)防衛技術協会 光波・ミリ波センシング研究部会第9回報告会、2016
22. 平川一彦、ナノギャップ電極とテラヘルツナノサイエンス、慶應義塾 創造クラスター 第3回 スーパーグローバルシンポジウム「量子コミュニティ」、2016
23. 平川一彦、吉田健治、張亜、杜少卿、柴田憲治、ナノギャップ金属電極とテラヘルツナノサイエンス、第140回微小光学研究会「微小光学から見る『光と電波の境界領域』」、2016
24. 平川一彦、吉田健治、杜少卿、原子スケールの加工技術と単一分子トランジスタ、日本化学会第96春季年会、2016
25. 平川一彦、吉田健治、杜少卿、張亜、原子スケールナノギャップ電極間に発生する強電界テラヘルツ電磁波とナノ構造のキャリアダイナミクス、第63回応用物理学会春季学術講演会、2016
26. 平山祥郎、新学術領域・ハイブリッド量子科学・公募研究のアナウンス、第76回応用物理学会秋季学術講演会、2016
27. 平山祥郎、GaAs 量子構造の光励起核スピン偏極の抵抗検出、平成27年度東北大学電気通信研究所共同プロジェクト研究会、2016
28. 平山祥郎、新学術領域「ハイブリッド量子科学」の紹介と核スピンの関連した物性研究、第9回物性科学領域横断研究会(領域合同研究会)、2016
29. 平山祥郎、東北大学スピントロニクス現状 II-核スピンの拓く新しいスピントロニクス、「スピントロニクス学術研究基盤と連携拠点」キックオフシンポジウム、2016
30. 村尾美緒、未知ハミルトニアンのエネルギ射影測定アルゴリズム、「量子情報と有限長理論の新展開」研究会、2016
31. 森下弘樹、水落憲和、ダイヤモンド中のスピン依存性電気特性、第77回応用物理学会秋季学術講演会、2016
32. 山口浩司、極限量子・ナノデバイス技術の進展と展望、情報社会とイノベーション (IS&I) 研究会、2016

2017年

33. 有江隆之、グラフェンのフォノンエンジニアリングと環境発電への展開、応用物理学会、2017
34. 有江隆之、グラフェンのフォノンエンジニアリングによる熱輸送制御の可能性、「非線形エネルギー輸送による新しい物性理論の探求」第7回研究会、2017
35. 岩本敏、荒川泰彦、量子ドット・フォトンニック結晶結合系の進展と展望、電子情報通信学会システムナノ技術研究会「最先端ナノ技術が拓く

次世代システム」、2017

36. 岩本敏、荒川泰彦、フォトニック結晶による光の角運動量制御とその展開、電子情報通信学会 超高速光エレクトロニクス研究会、2017
37. 岩本敏、荒川泰彦、フォトニック結晶を用いた光の角運動量制御、千葉大学分子キラリティー研究センター 第2回公開シンポ、2017
38. 岩本敏、荒川泰彦、トポロジカルフォトンクス：その動向と応用への期待、第78回応用物理学会秋季学術講演会、7p-A501-6、2017
39. 岩本敏、太田泰友、高橋駿、田尻武義、車一宏、荒川泰彦、量子ドット・フォトニック結晶結合系における発光制御、第78回応用物理学会秋季学術講演会、5p-C16-1、2017
40. 岩本敏、高橋駿、田尻武義、太田泰友、荒川泰彦、カイラルフォトニック結晶を用いた円偏光輻射場制御 ー人工光学活性と量子ドットの発光制御ー、電子情報通信学会 レーザ・量子エレクトロニクス研究会、2017
41. 大野雄高、カーボンナノチューブ薄膜によるフレキシブルデバイス、応用物理学会関西支部 平成29年度第2回講演会、2017
42. 大野雄高、カーボンナノチューブに基づくフレキシブルデバイス、「次世代デバイス実現に向けた先端二次元物質の物理と化学」第6回研究会、2017
43. 岡本創、太田竜一、後藤秀樹、寒川哲臣、山口浩司、GaAs 励起子オプトメカニクス、量子エレクトロニクス研究会「光操作の最前線」、2017
44. 川村稔、トポロジカル絶縁体の物質内磁場制御、第78回応用物理学会秋季学術講演会、2017
45. 黒子めぐみ、畑中大樹、小野満恒二、山口浩司、フォノン結晶導波路における時間領域フォノンパルス圧縮、応用物理学会春季学術講演会、2017
46. 小坂英男、ダイヤモンドへの量子テレポーテーションと量子情報通信によるカンタムウェアセキュリティ、応用物理学会 2017 年春季学術講演会、2017
47. 小坂英男、量子もつれと量子テレポーテーション、量子情報科学セミナー、2017
48. 小坂英男、量子もつれネットワークのための量子メモリー最適操作、第1回ポスト「京」萌芽的課題「基礎科学の挑戦」・「極限マテリアル」合同公開シンポジウム、2017
49. 小坂英男、ダイヤモンド NV 中心の単一電子スピンを用いた量子情報処理、強光子場科学研究懇談会、2017
50. 小坂英男、ダイヤモンドと量子情報、国立情報学研究所 市民講座 情報学最前線、2017
51. 小坂英男、ダイヤモンド NV 中心による量子中継器応用、TIA「かけはし」ワークショップ、2017
52. 小坂英男、ダイヤモンドへの量子テレポーテーション転写と万能ホロノミック量子操作～量子系の機械学習による最適量子操作の試みと量子情報通信への応用～、第37回量子情報技術研究会 (QIT37)、2017
53. 高須洋介、光格子中冷却原子の非平衡ダイナミクス、新学術領域「ゆらぎと構造」第2回冷却原子研究会、2017
54. 高須洋介、冷却原子気体を用いた量子シミュレーション、名古屋大学工学研究科マテリアル理工学専攻物性基礎工学研究グループセミナー、2017
55. 高橋駿、田尻武義、太田泰友、館林潤、岩本敏、荒川泰彦、半導体カイラルフォトニック結晶による円偏光真空場制御～カイラル構造におけるスピン-光子ハイブリッド量子系～、第78回応用物理学会秋季学術講演会、2017
56. 高橋義朗、超低温イッテルビウム原子の光会合分光：量子シミュレーションから基礎物理まで /Photo-association spectroscopy of ultracold ytterbium atoms: from quantum simulation to fundamental physics、第17回分子分光研究会 / 17th Symposium on Molecular Spectroscopy、2017
57. 田畑仁、ガーネット型酸化鉄薄膜における散逸スピン揺らぎと脳型メモリ応用、日本表面科学界 第二回関東支部講演大会、2017
58. 友利ひかり、神田晶申、グラフェンのひずみ効果、グラフェン-量子ドット研究会、2017
59. 根岸良太、単層から多層グラフェン薄膜の科学-合成とその物性-、東京理科大学・ナノカーボン研究部門ワークショップ、2017
60. 野村政宏、ナノスケールの熱制御と熱電変換応用、ENEX2017、2017
61. 野村政宏、フォノンナノ構造を用いたフォノン・熱輸送制御、量子格子相互作用研究会、2017
62. 野村政宏、フォノンエンジニアリングによるシリコン薄膜熱電材料の高性能化、日本熱電学会第14回学術講演会公募シンポジウム、2017
63. 畑中大樹、電気機械フォノン結晶導波路による超音波フォノン制御、日本学術振興会「先端ナノデバイス・材料テクノロジー第151委員会」、2017
64. 平川一彦、MEMS 技術によりテラヘルツ電磁波検出が大きく変わる！、JST 産学共創基礎基盤研究プログラム テラヘルツ 新技術説明会、2017
65. 平川一彦、張亜、細野優、長井奈緒美、邱博奇、渡辺康行、MEMS 共振器を用いた室温動作・高感度・高速テラヘルツボロメータの開発、シンポジウム「テラヘルツ科学の最先端IV」、2017
66. 水落憲和、ダイヤモンド高感度量子磁気センサ、日本磁気学会 第5回岩崎コンファレンス、2017
67. 水落憲和、ナノダイヤモンド中の NV 中心の魅力とセンサ応用、ナノ学会、2017
68. 森伸也、量子論に基づくデバイスシミュレータの開発、第30期 CAMM フォーラム 本例会、2017
69. 森伸也、美里劫夏南、岩田潤一、押山淳、極微細トランジスタの量子輸送シミュレーション、シリコン材料・デバイス研究会、2017
70. 山口浩司、量子ナノ構造と機械共振器のハイブリッドデバイス、電気学会全国大会、2017
71. 山田祐樹、檜山聡、田畑仁、皮膚アセトン測定に向けた WO₃ ナノ粒子半導体ガスセンサの研究、シリコン材料・デバイス研究会 (SDM)、2017
72. 山本俊、ボトル型光共振器によるフォトン-フォノン量子系、新学術領域研究「ハイブリッド量子科学」第3回フォノン勉強会、2017
73. Akihito Soeda, Adiabatic quantum computation and Grover search applied to higher-order quantum operations, The JSAP workshop on quantum information and related fields、2017
74. Emi Yukawa, (G. J. Milburn, C. A. Holmes, Kae Nemoto), Fast Generation of Macroscopic Superposition States by Coherent Driving, JSAP、2017
75. K. Ishibashi, Double quantum dots embedded in a superconducting coplanar waveguide resonator, 2017 Sweden-Japan International Workshop on Quantum Nanophysics and Nanoelectronics (QNANO2017)、2017
76. M. Nomura, J. Maire, R. Anufriev, A. Ramiere, R. Yanagisawa, and S. Volz, Thermal conduction control in Si membrane by phonon engineering, Phase Change Oriented Science (PCOS) 2017、2017
77. R. Anufriev, A. Ramiere, J. Maire, and M. Nomura, Heat guiding, focusing and rectification using phononic nanostructures, 第78回応用物理学会秋季学術講演会、2017
78. Russell Stewart Deacon, Jonas Wiedenmann, Erwann Bocquillon, Teun Klapwijk, Seigo Tarucha, Koji Ishibashi and Laurens Molenkamp, Signatures of 4pi periodicity in the dynamics of HgTe Josephson junctions, 第64回応用物理学会春季学術講演会、2017
79. Satoshi Iwamoto, Yasutomo Ota, Shun Takahashi, Takeyoshi Tajiri, and Yasuhiko Arakawa, Control of Light Emission by using Photonic Crystals: Recent Advances and New Trends, 第36回電子材料シンポジウム、2017

2018年

80. 浅野元紀、太田竜一、山本俊、岡本創、山口浩司、近接場光を利用した光-電気-機械結合系、第79回応用物理学会秋季学術講演会、2018
81. 有江隆之、熱マネージメントに向けたグラフェンのフォノンエンジニアリング、フラーレン・ナノチューブ・グラフェン学会、2018
82. 安東秀、ダイヤモンド NV 中心を用いた走査スピンイメージングプローブの開発、応用物理学会、薄膜・表面物理分科会、2018年度第1回研究会、2018
83. 安東秀、走査ダイヤモンド NV 中心プローブを用いた局所磁気イメージング、JASIS 2018、最先端科学・分析システム&ソリューション展、日本顕微鏡学会、走査プローブ顕微鏡分科会、2018

84. 岩本敏、【イントロダクトリー】光と物質の相互作用：波動性と粒子性、第 147 回微小光学研究会「光と××の相互作用」、2018
85. 岩本敏、フォトニック結晶構造を基礎としたトポロジカルフォトリクス、応用物理学会・応用電子物性分科会 研究例会「フォトニック結晶の応用展開」、2018
86. 岩本敏、トポロジカルフォトリクス -フォトニック結晶研究の新たな展開-、京都工芸繊維大学 電子システム工学シンポジウム、2018
87. 江藤幹雄、カーボンナノチューブにおけるトポロジカル物性、物質科学シンポジウム：半導体物理、2 次元物質科学の半世紀、2018
88. 太田竜一、岡本創、山口浩司、機械振動子を用いた GaAs 励起子の発光制御、第 147 回微小光学研究会「光と××の相互作用」、2018
89. 大野雄高、ウェアラブルセンサの実現に向けた柔軟なカーボンナノチューブアナログ集積回路の設計と試作、ATI 第 2 回ナノカーボン研究会、2018
90. 大野雄高、カーボンナノチューブ薄膜のエレクトロニクス応用、グラフェンコンソーシアム第 17 回研究講演会、2018
91. 大野雄高、CNT 薄膜による透明で柔軟な集積デバイス、学振第 186 委員会・第 27 回研究会、2018
92. 川村稔、磁性トポロジカル絶縁体の量子伝導物性、第 4 回 産総研-理研 量子技術イノベーションコア Workshop、2018
93. 川村稔、磁性トポロジカル絶縁体の量子伝導物性、第 4 回 産総研-理研 量子技術イノベーションコア Workshop、2018
94. 久保結丸、ハイブリッド系による量子情報及びテクノロジー、応用物理学会フォトリクス分科会 第 4 回フォトリクス研究会「光の可能性を追求する!!」、2018
95. 小坂英男、光子と物質の量子メディア変換に向けた幾何学的量子光学、光科学技術研究振興財団講演会、2018
96. 小坂英男、ブラインド量子コンピューティングへ向けたダイヤモンド量子中継、第 65 回 応用物理学会 春季学術講演会、2018
97. 鍾菁廣、森伸也、廣木彰、小田紳二、量子ドリフト拡散モデルによる III-V 族 FinFET の短チャネル効果解析、65 回応用物理学会春季学術講演会、2018
98. 千足昇平、本間芳和、分光計測を用いた孤立架橋単層カーボンナノチューブにおける熱物性計測、第 65 回応用物理学会春季学術講演会、2018
99. 野村政宏、フォノニック結晶ナノ構造による熱伝導制御、第 147 回微小光学研究会「光と××の相互作用」、2018
100. 野村政宏、フォノンエンジニアリングによる熱伝導制御の基礎と応用、第 120 回磁性研ゼミナール、2018
101. 野村政宏、フォノニック結晶を用いたウェハ型シリコン熱電デバイスの開発、大阪大学ナノ理工学人材育成産学コンソーシアム 2018 ナノ理工学セミナー「量子的世界とナノテクノロジー」、AM-2、大阪大学、大阪、2018
102. 野村政宏、ナノ構造化によるシリコン薄膜のフォノン輸送制御、応用物理学会シリコンテクノロジー分科会第 212 回研究集会、8、応物会館、東京、2018
103. 野村政宏、Si 表面・界面エンジニアリングによるフォノンおよび熱輸送制御とその応用、日本表面真空学会中部支部研究会、3、静岡大学、浜松、2018
104. 野村政宏、フォノニック結晶を用いたウェハ型シリコン熱電デバイスの開発、JST「微小エネ」領域公開シンポジウム、7p3、早稲田大学、東京、2018
105. 野村政宏、新しい熱制御技術～半導体中の指向性熱流と集熱の実現～、KRI クライアントコンファレンス、WS3-p2、京都、2018
106. 濱祐介、湯川英美、ウィリアム マンロー、根本香絵、[講演奨励賞受賞記念講演] 二つのドメインから成るスピン系における負温度スピン状態への緩和現象と量子エンタングルメント、第 79 回応用物理学会秋季学術講演会、2018
107. 早瀬潤子、ダイヤモンド量子センサによる高感度磁場計測、独立行政法人日本学術振興会産業計測第 36 委員会研究会、2018
108. 早瀬潤子、ダイヤモンド中空素-空孔中心を用いた高感度量子センサ、第 32 回光科学分野横断セミナー、2018
109. 早瀬潤子、ダイヤモンド NV 中心を用いた AC 磁場センシング、第 147 回微小光学研究会「光と××の相互作用」、2018
110. 早瀬潤子、ダイヤモンド中空素空孔中心を用いた量子センシング、第 10 回 文部科学省「最先端の光の創成を目指したネットワーク研究拠点プログラム」シンポジウム、2018
111. 平川一彦、MEMS 技術によりテラヘルツ電磁波検出が大きく変わる！、ナノ茶論、2018
112. 平川一彦、マイクロ・ナノ技術によるテラヘルツ検出の新展開、平成 30 年度先端 ICT デバイスラボ成果報告会、情報通信研究機構、2018
113. 平川一彦、量子マイクロ・ナノ構造によるテラヘルツ検出の新展開、長岡技術科学大学、2018
114. 平川一彦、半導体・ナノ構造を用いた新規テラヘルツセンシング技術、第 52 回センサ&アクチュエータ技術シンポジウム 未踏の周波数を開拓する：テラヘルツ波の発生・検出とその応用、2018
115. 平川一彦、張亜、邱博奇、長井奈緒美、細野優、MEMS を用いた室温動作・高速・高感度テラヘルツボロメータの開発、テラヘルツテクノロジーフォーラム 2018 年度総会・第 16 回講演会、2018
116. 平山祥郎、核スピン共鳴を用いたミクロスコピックな物性測定、「スピントロニクス学術研究基盤と連携ネットワーク」年度末シンポジウム、2018
117. 松永正広、廣谷潤、岸本茂、大野雄高、カーボンナノチューブ薄膜を電極として用いた透明で伸縮性のある 摩擦帯電型発電シート、第 79 回応用物理学会秋季学術講演会、2018
118. 森伸也、電子とフォノンのマルチフィジクスシミュレーション、第 212 回シリコンテクノロジー分科会研究集会、2018
119. 森伸也、美里劫夏南、鍾菁廣、牧平真太郎、鎌倉良成、岩田潤一、押山淳、量子効果を考慮した半導体デバイスシミュレーション、第 65 回応用物理学会春季学術講演会、2018
120. 山口浩司、共振器エレクトロメカニクスによるフォノン操作、物理学会 第 73 回年次大会、2018
121. 山本俊、超伝導検出器を用いた量子情報処理、電子情報通信学会、2018
122. 山本俊、光と量子ネットワーク、第 3 回フォトリクス分科会、2018
123. F. Valmorra, K. Yoshida, L. Contamin, T. Cubaynes, M. Dartiailh, M. Desjardins, S. Massabeau, K. Hirakawa, J. Mangeney, A. Cottet, T. Kontos, Coupling a terahertz cavity to a carbon nanotube quantum dot, 新学術領域「ハイブリッド量子科学」第六回領域会議、2018
124. Kimihiko KATO, Hiroaki MATSUI, Hitoshi TABATA, Mitsuru TAKENAKA, and Shinichi TAKAGI, 酸化半導体/IV 族半導体を用いた超低消費電力トンネルトランジスタの提案と素子設計、シリコン材料・デバイス研究会、2018
125. N. Wei, P. Laiho, S. Ahmed, A. Hussain, Q. Zhang, T. Khan, Y. Liao, Y. Tian, E.-X. Ding, Y. Ohno, E. I. Kauppinen, Fast characterization of FC-CVD nanotubes using an array of transistors, 第 54 回フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム、2018
126. Satoshi Iwamoto, Topological photonics based on semiconductor photonic crystals, 8th Summer School on Smeiconductors/Superconductor Quantum Coherence Effect and Quantum Information, 2018
127. Satoshi Iwamoto, Yasutomo Ota, and Yasuhiko Arakawa, Topological confinement of light in photonic crystals, OSJ/OSA/OSK Joint Sumposia in Optics (in Optics & Photonics Japan 2018), 2018
128. Satoshi Iwamoto, Yasutomo Ota, Chee Fai Fong, Yasuhiko Arakawa, Control of angular momentum of photons by photonic nanostructures, 第 65 回応用物理学会春季学術講演会、2018
129. Y. Matsuzaki, S. Saijo, H. Morishita, T. Shimooka, T. Tashima, K. Kakuyanagi, K. Semba, W. J. Munro, H. Yamaguchi, S. Saito, K. Hayashi, I. Hanano, H. Watanabe, N. Mizuochi, and J. Ishi-Hayase, Characterization and use of an ensemble of NV centers in diamond, 日本学術振興会「先端ナノデバイス・材料テクノロジー」151 委員会 平成 29 年度第 5 回研究会、2018

2019 年

130. 青木隆朗、量子ネットワークに向けた全ファイバー結合共振器量子電気力学系、第 80 回応用物理学会秋季学術講演会、2019
131. 有江隆之、二次元原子層のフォノンダイナミクス制御、フォノンエンジニアリング研究グループ第 3 回研究会、2019

132. 安東秀, ダイヤモンド NV 中心によるスピン波計測、日本表面真空学会学術講演会、つくば国際会議場、2019
133. 安東秀, ダイヤモンド NV 中心を用いた磁化ダイナミクスセンシング、ナノプローブテクノロジー第 167 委員会、テラヘルツ波科学技術と産業開拓第 182 委員会 合同研究会「ナノ領域の新しいセンシングとダイナミクス計測」、2019
134. 石橋幸治, Josephson Junction with Topological Insulators - Towards Majorana qubits -, 応用物理学学会量子情報グループ研究会、2019
135. 石橋幸治, トポロジカルジョセフソン接合 - マヨラナ量子ビットにむけて -, 磁気学会専門研究会第 71 回スピンエレクトロニクス専門研究会、2019
136. 岩本敏, 波動光学の基礎とその応用、学技術基礎講座「電子部品・材料の物性化学—最先端産業を支える電子・光学材料開発に必須の基礎をマスターしよう—」、2019
137. 岩本敏, 半導体トポロジカル集積フォトニクス、Optics & Photonics Japan 2019、2019
138. 岩本敏, トポロジカルフォトニクス: 数学と物理, 工学の融合で目指すフォトニクスの新展開、第 3 回電子材料若手交流会研究会、2019
139. 岩本敏, 山口拓人, 太田泰友, 荒川泰彦, 半導体フォトニック結晶を基礎としたトポロジカルフォトニクス、レーザー学会学術講演会第 39 回年次大会、2019
140. 太田泰友, 勝見亮太, 長田有登, 玉田晃均, 角田雅弘, 岩本敏, 荒川泰彦, ハイブリッド集積シリコン量子フォトニクスの可能性、第 80 回応用物理学学会秋季学術講演会, 19p-E301-5、2019
141. 太田泰友, 山口拓人, 吉見拓展, 勝見亮太, 渡邊克之, 荒川泰彦, 岩本敏, アクティブ材料を融合した集積トポロジカルフォトニクス、電子情報通信学会ソサイエティ大会、2019
142. 太田竜一, Mechanical control of light-matter interaction in solid-state two-level system、応用量子情報研究会、2019
143. 太田竜一, 岡本創, 俵毅彦, 後藤秀樹, 山口浩司, GaAs 機械振動子における束縛励起子の寿命変調、第 66 回応用物理学学会春季学術講演会、2019
144. 大野雄高, カーボンナノチューブ薄膜を用いた柔軟なエネルギーハーベスティングデバイス、化学工学会・反応工学部会・CVD 反応分科会 第 30 回シンポジウム「熱電・圧電関係エネルギーハーベスティング技術の最新動向」、2019
145. 大野雄高, カーボンナノチューブ導電膜の特徴とフレキシブルデバイス応用の可能性、新化学技術推進協会 電子情報技術部会 エレクトロニクス交流会 講演会「フレキシブルデバイスの要素技術最新動向」、2019
146. 大野雄高, カーボンナノチューブ電子デバイスの進展と将来展望、第 80 回応用物理学学会秋季学術講演会、2019
147. 岡本創, 浅野元紀, 太田竜一, 山口浩司, 半導体機械共振器を利用した光・機械変換素子、応用物理学学会応用電子物性分科会研究例会、2019
148. 片山郁文, 吉岡克将, 武田淳, テラヘルツ電場誘起電子トンネリングとナノ分光法への応用、第 29 回日本 MRS 年次大会、2019
149. 片山郁文, 吉岡克将, 武田淳, パルステラヘルツ近接場によるナノスケール・超高速トンネル電子制御、日本光学会年次学術講演会 (Optics Photonics Japan 2019)、2019
150. 神田晶申, 層状超伝導体原子層膜を用いた渦糸量子状態操作、第 11 回九大 2D 物質研究会、2019
151. 久保結丸, 超伝導とスピンによるハイブリッド量子系、第 40 回量子情報技術研究会 (QIT40)、2019
152. 久保結丸, Audrey Bienfait, Jarryd Pla, Daniel Esteve, John Morton, Patrice Bertet, 超伝導量子テクノロジーを用いた超高感度スピン共鳴、応用物理学学会春季大会、2019
153. 田畑仁, 我々の健康を見守る電子の鼻、ナノテクノロジープラットフォーム セミナー、2019
154. 田畑仁, 機能性酸化物薄膜の最近の話題 - 表面・界面を中心に -, 2019 年第 80 回応用物理学学会秋季学術講演会 シンポジウム 薄膜表面・界面評価法の新展開、2019
155. 田畑仁, 生体ゆらぎに学ぶブレインモルフィック素子、応用物理学学会 応用電子物性分科会、2019
156. 田畑仁, ナノ構造制御酸化物半導体・バイオ界面を利用したバイオセンシング、日本学術振興会 第 174 委員会 第 65 回研究会、2019
157. 樋田啓, P. Budoyo Rangka, 松崎雄一郎, 角柳孝輔, J. Munro William, 山口浩司, 齊藤志郎, 超伝導量子回路によるスピンセンシング、第 66 回応用物理学学会春季学術講演会、2019
158. 野村晋太郎, 先端光学的手法を用いたナノ構造中電子状態の制御と検出、第 17 回ナノ学会、2019
159. 野村晋太郎, ダイヤモンド NV センターを用いた広視野量子センシング、第 64 回 光波センシング技術研究会講演会、2019
160. 野村政宏, ナノ構造化による熱伝導制御と環境発電応用、2019 年第 3 回極限ナノ造形・構造物性研究会, 5, 東京工業大学、2019
161. 野村政宏, フォトニクスからフォノンニクスへ - ナノ構造を使った高度な熱流制御 -, 第 16 回 フォトニクス・イノベーションセミナー, 2, 東京大学生産技術研究所、2019
162. 野村政宏, ナノ構造を用いた高度熱流制御技術と熱電環境発電、第 18 回 宮崎大学未来エネルギープロジェクト講演会、2019
163. 野村政宏, 柳澤亮人, Paul Oliver, フォノンエンジニアリングによるシリコン薄膜熱電発電デバイス開発、第 66 回応用物理学学会春季学術講演会、2019
164. 濱祐介, 磁性トポロジカル絶縁体表面におけるスピントロニック・マルチフェロイック機能、第 3 回 CSRN-Tokyo Workshop 2019 スピントロニクス新機能物質と巨大物性応答、2019
165. 早瀬潤子, ダイヤモンド NV 中心の生成制御と超高感度量子センシング、量子センサの開発動向と高感度化技術セミナー、2019
166. 平川一彦, テラヘルツ電磁波の新展開—遠赤外線はコーヒーマグを温めるだけではない—、平成 30 年度 国立情報学研究所市民講座 情報学最前線 第 5 回、2019
167. 平川一彦, Terahertz spectroscopy of single molecules and single atoms by using nanogap electrodes、東北大学 CSRN セミナー、2019
168. 平川一彦, ナノギャップ電極を用いた単一分子・単一原子のテラヘルツ極限センシング、第 66 回応用物理学学会春季学術講演会、2019
169. 平川一彦, ナノギャップ電極を用いた単一分子・単一原子のテラヘルツ分光、テラヘルツ波科学技術と産業開拓 第 182 委員会 (第 39 回)、ナノプローブテクノロジー 第 167 委員会 (第 92 回) 合同研究会、2019
170. 平山祥郎, 半導体量子状態を用いた核スピン計測、第 66 回応用物理学学会春季学術講演会、2019
171. 平山祥郎, 半導体量子構造における抵抗検出 NMR、量子デバイス材料研究ミニワークショップ、2019
172. 本間芳和, 千足昇平, 単層カーボンナノチューブナノ空間に形成される水ナノチューブの物性、日本物理学会 2019 年秋季大会、2019
173. 増子拓紀, 小栗克弥, 千菅雄太, 片山郁文, 武田淳, 後藤秀樹, 固体電子系におけるベタヘルツ超高周波現象の時間応答特性、レーザー学会学術講演会第 39 回年次大会、2019
174. 水落憲和, 量子技術を用いた NV 中心量子センサの高感度化研究、量子生命科学会、2019
175. 水落憲和, 量子技術を用いた NV 中心量子センサの高感度化研究、量子生命科学会第 1 回大会、2019
176. 毛利真一郎, ファンデルワールスヘテロ構造の光物性、表面真空学会 2019 学術講演会、2019
177. 毛利真一郎, 原子層ファンデルワールスヘテロ構造の作製とその光物性、電気関係学会関西連合大会、2019
178. 毛利真一郎, 原子層材料との複合量構造作製に向けたファンデルワールスエピタキシによる窒化物半導体結晶成長、京都大学エネルギー理工研究所 ゼロエミッションエネルギー研究拠点 平成 30 年度共同利用・研究成果報告会、2019
179. J. Ishi-Hayase, Magnetic field sensing using NV centers in diamond, Mini-Workshop on Biological Sensing and its Application、2019
180. M. Nomura, Planar-type Si thermoelectric generators using nanopatterning、第 67 回応用物理学学会春季学術講演会、2019
181. Mikio Eto, Detector of THz light using an array of quantum dots、応用物理学学会・量子情報研究グループ研究会「ハイブリッド量子科学最前線」(Frontiers in Hybrid Quantum Science)、2019
182. S. Q. Du, Y. Hashikawa, I. Hamada, Y. Murata, K. Hirakawa, Terahertz spectroscopy of single water molecule encapsulated in a fullerene cage、第 2 回ハイドロジェノミクス研究会、2019
183. Satoshi Iwamoto, Topological photonics using semiconductor photonic crystals, The 4th A3 Metamaterials Forum 2019、2019

2020年

184. 石橋幸治、トポロジカル量子コンピューティングに向けて -材料・デバイスの立場から-、IEEE EDS 関西チャプター技術講演会、2020
185. 岩本敏、分野融合が拓くナノフォトニクスの新展開、2020年電子情報通信学会総合大会、2020
186. 大野雄高、カーボンナノチューブのフレキシブルエレクトロニクス応用、電気化学会第87回大会、2020
187. 大野雄高、低次元材料による微小エネルギーの利用と超低消費電力センサシステムの検討、ナノカーボン研究会、2020
188. 大野雄高、カーボンナノチューブ薄膜を利用したフレキシブルセンサの開発、技術情報協会セミナー「伸縮性導電材料」、2020
189. 武田淳、サブサイクル近接場による超高速電子操作、理化学研究所「物質階層原理&ヘテロ界面」研究報告会、2020
190. 田畑仁、自己組織化によるナノバイオデバイスおよびエネルギー変換デバイスの創成、東京大学国際オープンイノベーションシンポジウム〜マテリアルイノベーション〜、2020
191. 田畑仁、Shamim Sarker、山原弘靖、ブレインモルフィックに向けたスピンゆらぎ素子、日本金属学会 2020年春期講演大会、2020
192. 野村晋太郎、Nb 弱結合型ナノ SQUID・ダイヤモンド NV センターを用いた磁気プローブマッピング、日本物理学会第75回年次大会、2020

7-3 受賞

2016年

1. 廣谷 潤、名古屋大学、第49回フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム 若手奨励賞(2016)、Channel length dependence of characteristic variations in carbon nanotube thin-film transistors
2. 大野 雄高、名古屋大学、永井科学技術財団財団賞 学術賞(2016)、立体形状に成形可能な全カーボン電子デバイスの研究開発
3. 小林 悟士、京都大学、第29回ダイヤモンドシンポジウム優秀講演賞(2016)、独創的かつ学術的意義の高い研究成果と共に聴衆を魅了する優れた口頭発表を行い、その内容が当学会の発展に寄与することが大きい事が認められた為
4. 平川 一彦、東京大学、The ISCS Quantum Devices Award(2016)、Important contributions to the understanding of III-V heterostructures devices and pioneering experiments evidencing the coupling between THz light and single nano-objects
5. Takafumi Tomita、京都大学、ICAP2016, Best Student Poster Award(2016)、Dissipative Bose-Hubbard system with cold atoms in an optical lattice
6. 小林 悟士、京都大学、27th International Conference on Diamond and Carbon Materials, Young Scholar Award(2016) 金賞
7. 吉田 健治、東京大学、2016年秋季学術講演会 Poster Award(2016)、強磁性ナノ接合における近藤効果の観測
8. Masahiro Nomura, Junki Nakagawa, Jeremie Maire, and Roman Anufiev、東京大学、Certificate of Merit for Thermal Engineering Best Paper(2016)、Crystal Structure Dependent Thermal Conductivity in 2D Phononic Crystals
9. 野村 政宏、東京大学、一般財団法人生産技術研究奨励会平成28年度顕彰(2016)、ナノ構造化による高効率熱電変換デバイスの実現
10. Masahiro Nomura、東京大学、PCOS2016 Best Paper Award、Phonon engineering by phononic crystal nanostructures

2017年

11. 江藤 幹雄、慶應義塾大学、APS journals Outstanding Referees (2017)、米国物理学会 (APS) 論文誌への貢献 <http://journals.aps.org/OutstandingReferees>
12. K. Sasaki, Y. Monnai, S. Saijo, R. Fujita, H. Watanabe, J. Ishi-Hayase, K.M. Itho and E. Abe、慶應義塾大学、YEP AWARD 2016、2016年発表の論文「Broadband, large-area microwave antenna for optically detected magnetic resonance of nitrogen-vacancy centers in diamond」が、高等教育機関における電磁界シミュレーターの活用促進を目的として、電磁界シミュレーター「CST STUDIO SUITE」を使用している優秀な論文として評価された。
13. 野村 政宏、東京大学、丸文研究奨励賞(2017)、周期的ナノ構造を用いた熱フォノニクスの開拓
14. 黒子 めぐみ、NTT 物性科学基礎研究所、第77回応用物理学会秋季学術講演会 講演奨励賞(2017)、フォノン結晶導波路におけるフォノン伝搬波の非線形分散効果
15. 澤田 淳、北海道大学、第77回応用物理学会秋季学術講演会 英語講演奨励賞(2017)、応用物理学会スピントロニクス大分類において英語講演をおこなった学生講演者の中から、各中分類で最も素晴らしい発表をおこなったため。
16. 根岸 良太、赤堀 誠志、伊藤 孝寛、渡辺 義夫、小林 慶裕、大阪大学、第一回 薄膜・表面物理分科会 論文賞(2017)、本論文では、酸化グラフェン(GO)薄膜の還元・欠陥修復法として 1000℃を超える超高温でのエタノール中加熱処理法を新規に提案し、これまでの真空中/不活性ガス中の加熱、あるいはヒドラジンなどによる還元法では避けられなかった欠陥残留を低減し、結晶性を著しく向上させた。さらに、グラフェン本来の特性を反映したバンド伝導の観察に初めて成功している。同時に、X線吸収分光法、光電子分光法、透過型電子顕微鏡などの表面分析技術を駆使し、精緻な物性解析を行っている。以上のように、本研究は、薄膜表面物理の観点からナノカーボン科学の進展に大きく寄与するものであり、薄膜・表面物理分科会論文賞に値する。
17. 富田 隆文、京都大学、日本物理学会 2016年秋季大会領域1学生プレゼンテーション賞(2017)、Bose-Hubbard 系の量子転移に対する散逸の効果
18. 張 亜、東京大学、船井研究奨励賞(2017)、単一自己組織化 InAs 量子ドットにおける量子準位構造のテラヘルツ分光に関する研究
19. Masahiro Nomura、東京大学、The Young Scientist Award(2017)、For contributions to the development of thermal conduction control technology in semiconductor thin films by phonon engineering
20. 小坂 英男、横浜国立大学、外部資金獲得研究者表彰(2017)、外部資金獲得により
21. 倉見谷 航洋、横浜国立大学、第42回(2017年春季)応用物理学会講演奨励賞(2017)、「ダイヤモンド NV 中心の拓く量子認証システムの可能性」
22. 松崎 雄一郎、NTT 物性科学基礎研究所、日本物理学会若手奨励賞(2017)、「Proposed Robust Entanglement-Based Magnetic Field Sensor Beyond the Standard Quantum Limit」、T. Tanaka, P. Knott, Y. Matsuzaki et al., Phys. Rev. Lett. 115 (2015) 170801.他二件の優れた論文業績に対して
23. 芦田 貴紀、京都大学、第31回ダイヤモンドシンポジウム ポスターセッション優秀賞(2017)、NV 中心による量子センサの高感度化に向けた窒素不純物制御
24. 森下 弘樹、京都大学、第31回ダイヤモンドシンポジウム 優秀講演賞(2017)、「NV 中心の窒素核スピンコヒーレンスの制御と電氣的検出」

2018年

25. 稲葉 優文、名古屋大学、第32回ダイヤモンドシンポジウム 優秀ポスター賞(2018)、真空ギャップゲート構造による2次元正孔ガスダイヤモンドデバイスの評価
26. 中村 孝秋、横浜国立大学、第6回(2017年秋季大会)学生プレゼンテーション賞(2018)、「固体スピンシステムの量子機械学習」
27. 長田 昂大、横浜国立大学、第6回(2017年秋季大会)学生プレゼンテーション賞(2018)、「マイクロ波偏光によるユニバーサルな幾何位相量子ゲート」
28. 加納 浩輝、横浜国立大学、第6回(2017年秋季大会)学生プレゼンテーション賞(2018)、「ダイヤモンド NV 中心における光によるホロミック量子ゲート」
29. 山口 浩司、NTT 物性科学基礎研究所、International Symposium on Compound Semiconductors (ISCS) - Quantum Device Award -、

For leading contributions to the development of compound semiconductor opto/electromechanical systems

30. 野村 政宏、東京大学、ドイツ・イノベーションアワード ゴットフリート・ワグネル賞 2018、フォノンエンジニアリングによる熱伝導制御と熱電変換エネルギーハーベスティング応用
31. 武田 淳、横浜国立大学、平成 29 年度特別研究員等審査会専門委員（書面担当）表彰
32. 藤本 翔、京都大学、春季応用物理学会 英語講演奨励賞(2018)、Spin transport in p-type diamond induced by spin-pumping
33. 浅野 元紀、NTT 物性科学基礎研究所、応用物理学会 講演奨励賞、ボトル光共振器と電気機械共振器とのエバネッセント結合
34. 濱 祐介、国立情報学研究所、応用物理学会講演奨励賞（第 65 回応用物理学会春季学術講演会)(2018)、応用物理学会講演奨励賞規程 (<https://www.jsap.or.jp/young-scientist-presentation-award/regulation>)を参照
35. 松永 正広、名古屋大学、第 44 回（2018 年春季）応用物理学会講演奨励賞、カーボンナノチューブ薄膜を用いた透明でフレキシブルな摩擦帯電型発電シート
36. 吉岡 克将、横浜国立大学、第 45 回（2018 年秋季）応用物理学会講演奨励賞
37. 平川 一彦、東京大学、江崎玲於奈賞(2018)、テラヘルツ技術の開拓によるナノ構造の電子物性解明の先導的研究

2019 年

38. 魏 超鵬、大阪大学、H30 年度応用物理学会関西支部講演会 最優秀ポスター賞（2019）、H30 年度応用物理学会関西支部講演会において、最も優れたポスターとして受賞
39. 森下 弘樹、大阪大学、IFQS Poster Award(2019)、Room-Temperature Electrically Detected ^{14}N Nuclear Spins Coherence in Ensemble of NV centers
40. 山下 峻吾、京都大学、応用物理学会 講演奨励賞(2019)、ダイヤモンド中のアンサンブル NV 中心でのドレスト状態生成によるコヒーレンス時間の長時間化
41. 黒子 めぐみ、NTT 物性科学基礎研究所、青葉理学振興会賞(2019)、薄膜フォノン結晶導波路における新たな弾性波制御の開拓
42. 魏 超鵬、大阪大学、H30 年度応用物理学会関西支部奨励賞（2019）、応用物理学の発展・推進を目指した学術面での活発な活動
43. 岩本 敏、東京大学、電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ活動功労表彰(2019)、エレクトロニクスソサイエティ技術渉外幹事としての貢献
44. 鹿嶋 大雅、名古屋大学、フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム・若手奨励賞(2019)、Design and fabrication of carbon nanotube analog integrated circuits
45. 松永 正広、名古屋大学、フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム・若手奨励賞(2019)、Triboelectric generator with carbon nanotube thin film for wearable electronics
46. 太田 竜一、NTT 物性科学基礎研究所、応用物理学会 講演奨励賞(2019)、振動歪下における GaAs 束縛励起子の発光寿命測定
47. Russell S. Deacon、理化学研究所、科学技術分野の文部科学大臣表彰 若手科学者賞(2019)、超伝導体/半導体ハイブリッドナノ構造の量子輸送の研究
48. 石橋 幸治、理化学研究所、応用物理学会 フェロー表彰(2019)、量子細線、量子ドット構造における量子輸送現象の研究
49. 大野 雄高、名古屋大学、Lee Hsun Research Award (Institute of Metal Research, Chinese Academy of Science)(2019)、カーボンナノチューブのフレキシブルエレクトロニクス応用に関する研究
50. 柳澤 亮人、東京大学、第三回フォノンエンジニアリング研究会 講演奨励賞(2019)、ナノ構造化シリコン薄膜を用いたプレーナ型熱電発電デバイスの開発
51. 鈴木 俊貴、電気通信大学、SCE 学生優秀発表賞(2019)、微小 Josephson 接合列の輻射検出器としての利用性の評価、電子情報通信学会超伝導エレクトロニクス研究会、産総研、筑波
52. J. Tanarom、電気通信大学、Student Poster Award(2019)、Application of the Cooper-pair Transistor as a Supercurrent Switch for Superconducting Circuits, International School and Symposium on Nanoscale Transport and photonics, Atsugi
53. Ernst David Herbschleb、京都大学、IFQMS Poster Award(2019)、AC magnetic-field quantum-sensor with unlimited dynamic-range
54. 山下 峻吾、京都大学、IFQMS Best Poster Award(2019)、Extension of Coherence Time with the Dressed states of Ensemble of NV Centers in Diamond

2020 年

55. 野村 政宏、東京大学、第 16 回日本学術振興会賞(2020)、フォノンナノ構造を用いた熱流制御とその環境発電応用
56. 岩本 敏、東京大学、PEX/JJAP 編集貢献賞(2020)、PEX/JJAP 編集業務への貢献
57. 平山 祥郎、東北大学、江崎玲於奈賞(2020)、半導体ナノ構造における核スピンの電子的制御と量子情報技術への応用の研究

8 おわりに

新学術領域「ハイブリッド量子科学」は2020年3月末で終了しました。5年間の活動を通して、領域メンバー、特に若手のメンバーから、「この領域は本当に楽しかった、面白かった。」と言ってもらえるのが一番うれしいことでした。この新学術領域の終了は到達点ではありません。「ハイブリッド量子科学」とう新しい分野の確立に向けて、その端緒についたばかりです。新しい方向性も含めて、参加した多くのメンバーが様々なハイブリッド化を発展させてくれることを期待しています。

最後になりますが、これまでの領域会議、国際会議を支えて頂いた総括班の皆様(石橋先生、平川先生、山口先生、根本先生)、若手会議を積極的に運営して頂いた松崎さん、仲山さんなどの若手委員の皆様、富松先生、高橋さんはじめ事務をサポートして頂いた皆様に感謝します。また、パナソニックの小田川様、島津の東様をはじめとした企業委員の皆様には、大学関係者とは異なる観点からいつも励ましを頂きました。国内アドバイザーの青野先生、小谷先生、榊先生、横山先生には多忙な中、領域会議などにご参加頂き、温かい叱咤激励を頂きました。国際諮問委員の先生方、特に Bastard 先生、Kotthaus 先生、Westervelt 先生、Xu 先生には研究のみならず活動方針について世界的な視野から貴重なアドバイスを頂きました。領域会議や国際会議において、若手主体のセッションなどにも積極的に参加頂き、若い研究者に直接アドバイスをして頂いたのも大変ありがたいことでした。また、毎号インタビューの工夫を凝らした素晴らしいニュースレターを作成して頂き、市民講座でも大変なご尽力を頂いた根本先生はじめ NII の皆様にも感謝申し上げます。これらの多くのサポートなしには領域の運営、発展はあり得ませんでした。領域を代表して心より御礼申し上げます。

最後に何よりも私たちの活動を応援してくれ、学会等で厳しい議論もして頂いた国内、そして国外の多くの研究者、市民講座などに参加して下さり素朴な質問をして下さった皆様に心より御礼申し上げます。この冊子が皆様がハイブリッド量子に関心を持つ、あるいは考える機会になり、少しでも我々の熱意が伝わるものであれば幸甚です。

新学術領域「ハイブリッド量子科学」領域代表
東北大学教授
平山祥郎