

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 7 月 6 日現在

機関番号：82108

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17H02913

研究課題名（和文）実空間操作によるトポロジカル状態発現の摂理探索と新規機能の創成

研究課題名（英文）Exploring mechanism of emergent topological states associated with real-space manipulation and innovative functions

研究代表者

胡 曉 (HU, Xiao)

国立研究開発法人物質・材料研究機構・国際ナノアーキテクトニクス研究拠点・MANA主任研究者

研究者番号：90238428

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,700,000 円

研究成果の概要（和文）：蜂の巣格子の局所的変形によるトポロジカル状態創成の理論を展開し、トポロジカルフォトニック結晶の作製及び単一方向電磁伝搬の観測、トポロジカルLC回路の設計及びマイクロストリップによる実装、トポロジカルフォトニック結晶をベースにした高品質な垂直共振器面発光レーザー（VCSEL）の創成に成功した。これによって、実空間操作に基づくトポロジカル電磁状態創成のアプローチが、マイクロ波から光通信帯域・可視光域に至るまで、革新的フォトニクス機能とデバイスの開発に非常に有利であることを実証した。また、外部磁場やスピン軌道結合に頼ることなく、半導体ナノ加工技術によるトポロジカル電子特性創成の可能性を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

実空間操作に基づくトポロジカル状態創成に関する独創的な研究成果が世界的に注目され、トポロジカル可視光伝搬や、トポロジカルフォノンニクス、量子トポロジカルオプティクスの実現等、多くの後続研究を触発している。実空間操作によるトポロジカル電磁状態創成のアプローチは、既成の二次元集積光学テクノロジーとの融合性に優れ、マイクロ波から可視光に至るまで、革新的フォトニクス機能とデバイスの開発に非常に有利である。本研究で発見された蜂の巣構造における新しいレーザー発振原理は、優れた固体レーザー光源開発の新たな指針になり、近接場光学顕微鏡や光ピンセットの開発等、マイクロレーザー技術の革新への寄与が期待される。

研究成果の概要（英文）：We have advanced the scheme of creating topological states based on locally deformed honeycomb structure, and succeeded in fabricating topological photonic crystal and observing unidirectional electromagnetic transportations, designing topological LC circuit and implementing in microstrip, realizing high-performance vertical cavity surface emitting laser (VCSEL) based on topological photonic crystal. Through these activities, we have demonstrated that the approach of realizing topological electromagnetic states based on real-space local manipulation is superior in achieving novel photonic functions and device development ranging from microwaves to visible lights. We also clarified the possibility to realize topological electronic property by nano semiconductor fabrication technologies, without resorting to external magnetic field and spin-orbit coupling.

研究分野：物性I

キーワード：topology honeycomb lattice Dirac cone photonic crystal LC circuit dielectrics laser VCSEL

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

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

トポロジカル物性の研究は von Klitzing による強磁場下の 2 次元電子系における量子ホール効果の実験観測、及びその電子波動関数の Berry 位相に由来するチャーン数の存在に関する理論解明から始まる [K. von Klitzing et al., Phys. Rev. Lett. vol. 45, 494 (1980); D. J. Thouless et al., Phys. Rev. Lett. vol. 49, 405 (1982)]. その後、外部磁場の代わりに電子のブロッホ波動関数のトポロジーによってカイラルエッジ状態が生まれる量子異常ホール効果も解明された [F. D. M. Haldane, Phys. Rev. Lett. vol. 61, 2015 (1988)]. これらの優れた研究業績がノーベル物理学賞に輝いたことは周知のところである。2005 年にスピン軌道結合が働く電子系における時間反転対称な量子スピンホール効果(以下 QSHE と略す)が提案された [C. L. Kane and E. J. Mele, Phys. Rev. Lett. vol. 95, 226801 (2005); ibid. 146802 (2005)]. これがきっかけとなって、トポロジカル物性研究が急速に発展し、今日に至っている。この分野の歴史及び最新成果は本研究の代表者(以下代表者と略す)が共著で記したレビュー論文で紹介されている [H.-M. Weng, R. Yu, X. Hu, X. Dai and Z. Fang, Adv. Phys. vol. 64, 227 (2015)].

QSHE では、時間反転対称性を反映して、サンプルのエッジにおいてスピン上向き電子と下向き電子が逆向きに流れ、スピントロニクス等のデバイスでの幅広い応用が期待されている。しかし、現状では QSHE は非常に低い温度でしか観測されていない。高温でも動作できる強靱なトポロジカル電子物質の開発が喫緊な研究課題である。一方で、応用上非常に重要な可視光やマイクロ波等の電磁波が電子等のフェルミオンの示すクラマース対を持っていないため、電磁システムにおける時間反転対称なトポロジカル状態の創成も挑戦的な研究課題である。

最近、研究代表者が時間反転対称な誘電体トポロジカルフォトリック結晶創成の新原理を提案した [L.-H. Wu and X. Hu: PRL vol. 114, 223901 (2015); 胡曉、「応用物理」解説、85 巻、474 ページ (2016 年)]。シリコンや GaN の円柱が空気の中で蜂の巣格子に並べられた場合、周波数分散関係にディラック・コーンが現れる。6 本の最近接円柱を基本単位として全ての円柱をグループ分けし、六員環の形状とサイズを一定にしてまま六員環同士の間隔を調整すれば、フォトリックバンドギャップが開く。特に、六員環同士の間隔が蜂の巣格子の場合より小さい場合、トポロジカル電磁状態が実現され、鋭角・直角経路や欠陥に散乱されにくいヘリカルエッジ電磁波伝播が現れる。上述のフォトリック結晶では、六員環は人工原子として振る舞い、6 回回転対称 C_{6v} の点群の二次元表現に対応して、p 波と d 波電磁モードを持っている。それぞれの電磁モードに正と負の軌道角運動量を持つ 2 重縮退があり、電子系に見られるクラマース対に対応する。このため、六員環同士が近づき、軌道間の相互作用が大きくなると、 Γ 点付近で起きる p/d 軌道間のバンド反転に伴って、時間反転対称なトポロジカル電磁状態が発現する。研究代表者が提案したメカニズムは大きく注目され、既にフォノン系で実験的に確認され、その結果がトップジャーナル Nature Physics に報告されている [C. He et al., DOI:10.1038/NPHYS3867 (2016)].

研究代表者の理論は電子系に拡張できる [L.-H. Wu and X. Hu, Sci. Rep. vol. 6, 24347 (2016)]. 蜂の巣格子に定義される強束縛モデルの最近接格子点間ホッピングエネルギーに空間的なテクスチャーを導入すれば、 C_{6v} 結晶対称性から生まれる電子の擬スピン自由度を利用して、時間反転対称なトポロジカル電子状態を発生させることが可能である。注目すべきこととして、この場合のトポロジカル特性を持つエネルギーバンドギャップの大きさは、ホッピングエネルギーの差に等しい。このため、スピン軌道相互作用に頼ることなく、強靱なトポロジカル電子状態の創成が可能になる。

2. 研究の目的

本研究は研究代表者らの今までの研究成果を発展させ、(1) シリコンや GaN 等の単純誘電体におけるトポロジカルマイクロ波・可視光伝搬の実現、(2) 該当理論を表面・界面での電子系に拡張し、今までのトポロジカル絶縁体と比べて、格段に強靱なトポロジカル物質の探索、(3) 実空間における局所的な操作によるトポロジカル状態・物質創成の一般論の確立と新規機能の開拓を目指す。

研究代表者が提案した新しい原理によれば、シリコン等のありふれた半導体のフォトリック結晶でトポロジカル電磁波状態が実現できる。金属やジャイロ電気・磁気物質を利用する方法と比べて、半導体トポロジカルフォトリック結晶は可視光までカバーできる大きな利点を持っている。また、半導体トポロジカルフォトリックと半導体エレクトロニクスデバイスの集積性も優れ、希有物質を使用しないで高度な光情報処理・伝搬が可能になる。

実空間操作による時間反転対称なトポロジカル状態発現の新しい原理は電子等のフェルミン系にも利用できる。この場合、電子の持っている固有なスピンの代わりに、空間対称性から生まれる擬スピン自由度がトポロジカル特性を司る。今までに電子系の QSHE は極低温度でしか観測されていない。本研究の遂行によって、局所的実空間操作による非自明な電子トポロジー発現の摂理解明が進み、スピン軌道結合に頼ることなく、大きなエネルギーギャップに守られるトポロジカル物質・状態が実現されれば、室温以上に動作する強靱なトポロジカル電子デバイスの開発に新しい道が開かれる。

3. 研究の方法

本研究は局所的空間操作方法等を含む具体的なレシピの考案を通じて、ボソン系、フェルミオン系、古典波動系等の物理システムにおける擬スピン等の新規量子自由度の創成、強靱なトポ

ロジカル状態の実現、新規量子特性の開拓を行う。具体的には、(1) 誘電体トポロジカルフォトニック結晶とトポロジカル電磁波伝搬の実現、(2) 新規摂理に基づく強靱な表面・界面トポロジカル電子物質の探索、(3) 三次元トポロジカルフォトニック結晶及び電子系物質の探索、(4) 様々な波動物理現象におけるトポロジカル特性発現の探索、(5) 空間操作によるトポロジカル状態発現の一般論の確立等、解析理論、計算機シミュレーション及び実験研究の密接な連携を図りながら、推進する予定である。

4. 研究成果

(1) 蜂の巣構造に基づく誘電体トポロジカルフォトニック結晶 (PhC) 創成理論の原理実証実験に成功した。具体的には、アルミナ円柱でできた蜂の巣型トポロジカル PhC とトポロジカル特性を持たない自明な PhC の境界に沿ったトポロジカル電磁伝搬様式を測定することによって、代表者の理論で予言された擬スピン単方向伝播特性、欠陥や鋭角経路による散乱を受けない強靱さを示した。これにより、半導体ナノフォトニクスにトポロジカル特性を新たに付与し、革新的光機能とデバイス開発への道を切り拓いた。研究論文は *Physical Review Letters* 誌に掲載された。

(2) トポロジカル LC 回路を設計し、マイクロストリップ導波路における実装を通じてトポロジカル電磁伝播を実現した。具体的には、金属細線/誘電体薄膜/金属基板の三層構造において、蜂の巣模様の金属細線に C_{6v} 対称性をもつ線幅パターンを導入し、電磁渦を伴うトポロジカルマイクロ波伝搬の観測に初めて成功した。マイクロストリップは高周波導波路として携帯電話等多くの電子デバイスに使用されているので、本研究成果は高度情報化社会におけるマイクロ波・光伝搬の優れた制御方法の開発に繋がると期待される。研究論文は *Nature Communications* 誌に掲載された。

(3) 蜂の巣型 PhC に由来する新規光な閉じ込め現象を発見し、微小で高品質な垂直共振面発光レーザー (VCSEL) の製作に成功した。具体的には、発光性半導体 InGaAsP でできた蜂の巣型トポロジカル PhC の周辺を、同じ物質で、構造が僅かに違うトポロジカル特性を示さない自明な PhC で囲み、その境界で光が反射され、中心部に閉じ込められた光モードが増幅する現象を発見した。このデバイスを用いた室温下での光照射レーザー発振は、微小なデバイスにもかかわらず、優れた垂直指向性を示す。さらに発光閾値やサイドモード抑制比などのレーザー特性の指標が、IEEE や VCSEL 等の応用規格を満たすことを確認した。本研究で見出された新しいレーザー発振原理は、優れた固体レーザー光源開発の新たな指針になり、近接場光学顕微鏡や光ピンセットの開発等、マイクロレーザー技術の革新への寄与が期待される。該当研究論文は *Nature Nanotechnology* 誌に掲載された。

(4) 中心軸が蜂の巣格子を組む誘電体長方体でできた PhC におけるトポロジカルフォトニクス現象を解明した。具体的には、有効強束縛模型で得られたバンド構造の Wilson loop の解析から、長方体の長辺が蜂の巣格子六角形単位胞の中心に指している場合、fragile topology と呼ばれるトポロジカル状態が現れることを明らかにした。また、長方体をそれぞれの中心軸周りに 90 度回転した場合、トポロジカル的に自明なフォトニック結晶が得られることも確認できた。この特性を利用して、誘電体長方体の回転による書き換え可能なトポロジカル導波路を設計し、COMSOL による数値計算によってトポロジカル光導波路に沿う電磁伝搬を確認した。該当研究論文は *Nanophotonics* 誌での掲載が決まった。

(5) トポロジカルノーダルラインの理論設計に成功した。具体的には、3次元 fcc 格子の鏡映対称性がディラック型線形分散関係をもたらし、ディラック点がブリルアンゾーンの中でループを作ることを明らかにした。誘電体球の fcc 格子とダイヤモンド格子の界面において、ほぼ平坦な表面状態が存在することを、マクスウェル方程式の数値計算を用いて示した。該当研究論文は *Physical Review B* に掲載された。

(6) 蜂の巣格子最近接格子点間のホッピングエネルギーを持つ強束縛模型において、 C_{6v} 対称性を満たす強弱テクスチャの導入によって誘起されるトポロジカル電子状態を、鏡映巻き付き数を用いて特徴づけることに成功した。また、トポロジカルエッジ状態と、単位胞の取り方及びそれに連動するエッジ形状との関連も解明した。該当研究論文は *Physical Review B* に掲載され、理論予言は最近分子グラフェンを用いた概念検証実験によって証明された。

(7) グラフェンナノ空孔アレーのパッチワークによるトポロジカルエッジ状態形成を理論的に解明した。具体的には、グラフェンから 6 個の C 原子を取り除いて得られる空孔の三角格子配列と蜂の巣格子配列では、電子バンドが異なるトポロジエを示すことを判明した。このため、両者の境界に沿って伝搬するトポロジカル電子状態が現れる。研究論文は *Physical Review B* 誌に掲載された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計16件（うち査読付論文 16件 / うち国際共著 10件 / うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Sun Xiao-Chen, He Cheng, Liu Xiao-Ping, Zou Yi, Lu Ming-Hui, Hu Xiao, Chen Yan-Feng	4. 巻 9
2. 論文標題 Photonic Topological States in a Two-Dimensional Gyrotropic Photonic Crystal	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Crystals	6. 最初と最後の頁 137 ~ 137
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/cryst9030137	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Shao Zeng-Kai, Chen Hua-Zhou, Wang Suo, Mao Xin-Rui, Yang Zhen-Qian, Wang Shao-Lei, Wang Xing-Xiang, Hu Xiao, Ma Ren-Min	4. 巻 15
2. 論文標題 A high-performance topological bulk laser based on band-inversion-induced reflection	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nature Nanotechnology	6. 最初と最後の頁 67 ~ 72
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41565-019-0584-x	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Zhang Xiaolong, Jevasuwan Wipakorn, Sugimoto Yoshimasa, Fukata Naoki	4. 巻 13
2. 論文標題 Controlling Catalyst-Free Formation and Hole Gas Accumulation by Fabricating Si/Ge Core-Shell and Si/Ge/Si Core-Double Shell Nanowires	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ACS Nano	6. 最初と最後の頁 13403 ~ 13412
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsnano.9b06821	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Sun Yong-Lie, Matsumura Ryo, Jevasuwan Wipakorn, Fukata Naoki	4. 巻 19
2. 論文標題 Au-Sn Catalyzed Growth of Ge _(1-x) Sn _x Nanowires: Growth Direction, Crystallinity, and Sn Incorporation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nano Letters	6. 最初と最後の頁 6270 ~ 6277
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) DOI: 10.1021/acs.nanolett.9b02395	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Matsumura Ryo, Wang Yunfan, Jevasuwan Wipakorn, Fukata Naoki	4. 巻 252
2. 論文標題 Single grain growth of Si thin film on insulating substrate by limited region aluminum induced crystallization	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Materials Letters	6. 最初と最後の頁 100 ~ 102
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.matlet.2019.05.113	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 胡曉	4. 巻 47
2. 論文標題 フォトニックトポロジーが拓く光の新しい地平線	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 レーザー研究	6. 最初と最後の頁 346 ~ 350
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 胡曉	4. 巻 102
2. 論文標題 フォトニックトポロジー：グラフェンと電磁波の邂逅	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 電子情報通信学会誌	6. 最初と最後の頁 889 ~ 896
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 苅宿俊風、胡曉	4. 巻 -
2. 論文標題 ハニカム格子を利用したトポロジカル状態創成	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 固体物理	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Wang Xing-Xiang, Hu Xiao	4. 巻 -
2. 論文標題 Reconfigurable Topological Waveguide Based on Honeycomb Lattice of Dielectric Cuboids	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nanophotonics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yang Yuting, Xu Yun Fei, Xu Tao, Wang Hai-Xiao, Jiang Jian-Hua, Hu Xiao, Hang Zhi?Hong	4. 巻 120
2. 論文標題 Visualization of a Unidirectional Electromagnetic Waveguide Using Topological Photonic Crystals Made of Dielectric Materials	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 217401 - 1~7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.120.217401	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Wang Zhi, Huang Wen-Chao, Liang Qi-Feng, Hu Xiao	4. 巻 8
2. 論文標題 Landau-Zener-Stueckelberg Interferometry for Majorana Qubit	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 1~8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-018-26324-5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Li Yuan, Sun Yong, Zhu Weiwei, Guo Zhiwei, Jiang Jun, Kariyado Toshikaze, Chen Hong, Hu Xiao	4. 巻 9
2. 論文標題 Topological LC-circuits based on microstrips and observation of electromagnetic modes with orbital angular momentum	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 1~7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-018-07084-2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Kariyado Toshikaze, Jiang Yong-Cheng, Yang Hongxin, Hu Xiao	4. 巻 98
2. 論文標題 Counterpropagating topological interface states in graphene patchwork structures with regular arrays of nanoholes	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 195416-1~9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.98.195416	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Zhang Xiaolong, Jevasuwan Wipakorn, Pradel Ken C., Subramani Thiyagu, Takei Toshiaki, Fukata Naoki	4. 巻 10
2. 論文標題 Hole gas accumulation in Si/Ge core-shell and Si/Ge/Si core-double shell nanowires	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nanoscale	6. 最初と最後の頁 21062~21068
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/c8nr05590d	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Kariyado Toshikaze, Hu Xiao	4. 巻 7
2. 論文標題 Topological States Characterized by Mirror Winding Numbers in Graphene with Bond Modulation	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 16515-1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-017-16334-0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 T. Kawakami and X. Hu	4. 巻 96
2. 論文標題 Symmetry-Guaranteed Nodal-Line Semimetals in FCC Lattice	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 PHYSICAL REVIEW B	6. 最初と最後の頁 235307-1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1103/PhysRevB.96.235307	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

[学会発表] 計41件(うち招待講演 41件/うち国際学会 38件)

1. 発表者名 Xiao Hu
2. 発表標題 Artificial Graphene and Synthetic Topology for Photons and Electrons
3. 学会等名 CECAM Workshop on "Condensed Matter Analogies in Mechanics, Optics and Cold Atoms" (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Xiao Hu
2. 発表標題 Topological Josephson Plasma in Honeycomb Josephson Junction Array
3. 学会等名 17th International Workshop on Vortex Matter in Superconductors (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Xiao Hu
2. 発表標題 Topological LC Circuit (Keynote)
3. 学会等名 PIERS 2019 (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Xiao Hu
2. 発表標題 Topological LC Circuit and its Realization in Microstrip Transmission Lines
3. 学会等名 International Workshop on Topological Photonics and Beyond (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Xiao Hu
2. 発表標題 Topological Photonic States in Artificial Graphenes
3. 学会等名 4th International Conference on Metamaterials and Nanophotonics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Xiao Hu
2. 発表標題 Topological Photonic Metamaterials with Honeycomb Structure
3. 学会等名 10th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics (META2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Xiao Hu
2. 発表標題 Topological microstrip and microwaves with OAM
3. 学会等名 SPIE Optics and Photonics: Active Photonic Platforms XI (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Xiao Hu
2. 発表標題 Topological nodal-line state in silicon fcc photonic crystal
3. 学会等名 SPIE Optics and Photonics: Plasmonics: Design, Materials, Fabrication, Characterization, and Applications XVII (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Xiao Hu
2. 発表標題 Superstructured Graphene towards Topological Orbitronics (Keynote)
3. 学会等名 SPIE Quantum Science and Technology: Spintronics XII (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Xiao Hu
2. 発表標題 Topology and Functionality in Graphene and Artificial Graphenes
3. 学会等名 International Workshop "Topology: the new horizon of materials science and nanophotonics" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Naoki Fukata
2. 発表標題 Control of impurity doping in core-shell nanowires using Si and Ge radial heterostructures
3. 学会等名 ICDS-30 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Xiao Hu
2. 発表標題 Topological Bulk Laser
3. 学会等名 International Workshop "Variety and universality of bulk-edge correspondence in topological phases" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Xiao Hu
2. 発表標題 Topological Metamaterials towards Robust Quantum Computation
3. 学会等名 KITS Workshop on “Topological Matter & Quantum Computation (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Xiao Hu
2. 発表標題 Topological States Derived from Artificial Graphenes (Keynote)
3. 学会等名 EMN Conference 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Xiao Hu
2. 発表標題 Artificial Graphene and Synthetic Topological States (Keynote)
3. 学会等名 Frontiers in Topological States in Physics, 4th WHU Summer Theory Institute (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Xiao Hu
2. 発表標題 Towards All-Dielectric Topological Photonics
3. 学会等名 Summer Topicals Meeting Series 2018 of IEEE Photonics Society (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Xiao Hu
2. 発表標題 Topological Electromagnetics with Time-Reversal Symmetry (Keynote)
3. 学会等名 PIERS 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Xiao Hu
2. 発表標題 Manipulation of Chiral Edge States in Photonic Chern Insulators with Pseudospin
3. 学会等名 PIERS 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Xiao Hu
2. 発表標題 Topological Circuitry and Novel Microwave Transportation
3. 学会等名 A3 Forum for Metamaterials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Xiao Hu
2. 発表標題 Topological photonic insulator and related phenomena
3. 学会等名 JSAP-OSA Joint Symposia at 79th JSAP Annual Meetings (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Xiao Hu
2. 発表標題 Topological Photonics: a New Horizon of Light (Keynote)
3. 学会等名 International Conference on Emerging Advanced Nanomaterials (ICEAN) 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Xiao Hu
2. 発表標題 Artificial Graphene and Synthetic Topology
3. 学会等名 KITS-AWP-Tsinghua-Riken Workshop "Highlights of Condensed Matter Physics" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Xiao Hu
2. 発表標題 Topological Orbitronics in Superstructured Graphene
3. 学会等名 KITS Workshop on Dilute Magnetic Semiconductor: Chance and Challenge (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Xiao Hu
2. 発表標題 Quest for Majorana Bound States in Topological Superconductors
3. 学会等名 KITS International Workshop on Majorana Modes in Topological Superconductors (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 胡曉
2. 発表標題 Photonic Topology as a New Horizon of Light
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第39回年次大会シンポジウム「人工構造による光機能制御の新展開」(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 胡曉
2. 発表標題 Theory and Outlook of Topological Photonics
3. 学会等名 電磁メタマテリアル講演会(学振メタマテリアル第187委員会主催)(招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Naoki Fukata
2. 発表標題 Si-Ge radial core-shell nanowires for high speed transistor channels
3. 学会等名 E-MRS 2018 SPRING MEETING (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Naoki Fukata
2. 発表標題 Selective doping and hole gas accumulation in core-shell nanowires using Si and Ge radial heterostructures
3. 学会等名 TVS-2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 胡曉
2. 発表標題 フォトリック結晶のトポロジー：ナノテクノロジーによるトポロジカル物質の創成
3. 学会等名 東北大学理学部物理主催講座 ” 物理学の最前線 ” (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Xiao Hu
2. 発表標題 Landau-Zener-Stuckelberg interferometry for Majorana qubits
3. 学会等名 16th International workshop on vortex matter (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Xiao Hu
2. 発表標題 Symmetry-Guaranteed Topological Nodal Line in FCC Photonic Crystal
3. 学会等名 ICMAT of Singapore (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Xiao Hu
2. 発表標題 Topological Metamaterials Derived from Honeycomb Structure
3. 学会等名 International Workshop on The World of Topological Matter (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Xiao Hu
2. 発表標題 A generic way for creating topological electromagnetic states
3. 学会等名 META2017 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Xiao Hu
2. 発表標題 Topology Emerging from Photonic Graphene
3. 学会等名 Symposium on Active Photonic Materials IX (SPIE-2017) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Xiao Hu
2. 発表標題 Topological Optic Phenomena in Nano Photonic Crystals
3. 学会等名 24th Congress of the of International Commission of Optics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Xiao Hu
2. 発表標題 Topological Phenomena Emerging from Honeycomb Structure
3. 学会等名 orkshop on Photonic Topological Insulator (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Xiao Hu
2. 発表標題 Towards Nano Topological Photonics
3. 学会等名 ISNTT2017 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 胡曉
2. 発表標題 トポロジカルナノオプティクス
3. 学会等名 日本光学会ナノオプティクス研究グループ第24回討論会 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Xiao Hu
2. 発表標題 Topological Phases Induced by p-d Band Inversion in Honeycomb Metamaterials
3. 学会等名 International workshop on BEC (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Xiao Hu
2. 発表標題 Derive Topological States with Honeycomb Structure
3. 学会等名 International conference on low-dimensional quantum materials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Xiao Hu
2. 発表標題 Topological Nodal-Line States in FCC Photonic Crystal and Slow Light
3. 学会等名 Second A3 Conference on Metamaterials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 トポロジカル光回路	発明者 雨宮智宏、齋藤孝一、各務響、岡田祥、古月暁	権利者 物質・材料研究機構/東京工業大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2019-151863	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

研究代表者が2019年6月12日と13日に、物質・材料研究機構並木キャンパスにて、国際ワークショップ"Topology: the New Horizon of Materials Science and Nanophotonics"を主催した。2016年ノーベル物理学賞を受賞したプリンストン大学ダンカン・ホールデン博士を始め、27人の招待講演者(内海外16名)によるトポロジカル材料科学とナノフォトニクスに関する最先端の研究成果の発表や、これらの研究分野の今後の発展方向に関する活発な討論と意見交換が行われた。参加者数は2日間で計141人(内外部参加者80人)を数え、本研究分野への関心の高さがうかがえる。

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	宮崎 英樹 (Miyazaki Hideki) (10262114)	国立研究開発法人物質・材料研究機構・機能性材料研究拠点・グループリーダー (82108)	
研究分担者	苅宿 俊風 (Kariyado Toshikaze) (60711281)	国立研究開発法人物質・材料研究機構・国際ナノアーキテクトニクス研究拠点・主任研究員 (82108)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	深田 直樹 (Fukata Naoki) (90302207)	国立研究開発法人物質・材料研究機構・国際ナノアーキテク トニクス研究拠点・MANA主任研究者 (82108)	
研究 協力者	石原 照也 (Ishihara Teruya)		
研究 協力者	大槻 東巳 (Ohtsuki Tomi)		
研究 協力者	菊池 昭彦 (Kikuchi Akihiko)		
研究 協力者	南任 真史 (Nanto Masashi)		