

Title	半導体光ツイストロニクスの開拓
Sub Title	Semiconductor photonic twistronics
Author	太田, 泰友(Ota, Yasutomo) 岩本, 敏(Iwamoto, Satoshi)
Publisher	
Publication year	2025
Jtitle	科学研究費補助金研究成果報告書 (2024.)
JaLC DOI	
Abstract	半導体を母材としたフォトニック結晶を舞台として光ツイストロニクスの開拓を行った。特に、周期や角度ずれを有する二つのフォトニック結晶の空間干渉に起因するモアレ構造の影響を調べた。重畳や積層で誘起される 1 次元や 2 次元のモアレ構造を電磁界計算により調べたところ、それぞれに特徴あるフラットバンド光局在が発現することが分かった。また、同局在モードは高Q値微小光共振器として動作可能であることを見出した。 We have explored optical twistronics using photonic crystals based on semiconductor membranes. In particular, we examined the influence of moire structures formed by the spatial interference of two photonic crystals with differ periodicities and/or angular misalignments. Through numerical analysis, we investigated the one-dimensional and two-dimensional moire structures induced by superposition and stacking of two photonic crystals, revealing various flat-band light localization phenomena. Notably, these flatband localized modes demonstrate the ability to function as high-Q microcavities.
Notes	研究種目：基盤研究 (B) (一般) 研究期間：2022～2024 課題番号：22H01994・ 23K23262 研究分野：ナノフォトニクス
Genre	Research Paper
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KAKEN_23K23262seika

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

令和 7 年 5 月 30 日現在

機関番号：32612

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2022～2024

課題番号：22H01994・23K23262

研究課題名（和文）半導体光ツイストロニクスの開拓

研究課題名（英文）Semiconductor photonic twistronics

研究代表者

太田 泰友 (Yasutomo, Ota)

慶應義塾大学・理工学部（矢上）・准教授

研究者番号：90624528

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,500,000 円

研究成果の概要（和文）：半導体を母材としたフォトリック結晶を舞台として光ツイストロニクスの開拓を行った。特に、周期や角度ずれを有する二つのフォトリック結晶の空間干渉に起因するモアレ構造の影響を調べた。重畳や積層で誘起される1次元や2次元のモアレ構造を電磁界計算により調べたところ、それぞれに特徴あるフラットバンド光局在が発現することが分かった。また、同局在モードは高Q値微小光共振器として動作可能であることを見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

物性物理の分野で高い注目を集めるツイストロニクスのプラットフォームを半導体フォトリック結晶を用いて実現した意義は非常に大きい。電子系では導入の難しい非エルミート性・ゲインやロス・非線形光学効果とモアレ構造との相互作用の探求が可能となる。そのような新しい物理の探求のみならず、半導体レーザーや非線形光学素子をはじめとする様々な光デバイスに対しても興味深い知見を与えることが期待される。

研究成果の概要（英文）：We have explored optical twistronics using photonic crystals based on semiconductor membranes. In particular, we examined the influence of moire structures formed by the spatial interference of two photonic crystals with different periodicities and/or angular misalignments. Through numerical analysis, we investigated the one-dimensional and two-dimensional moire structures induced by superposition and stacking of two photonic crystals, revealing various flat-band light localization phenomena. Notably, these flatband localized modes demonstrate the ability to function as high-Q microcavities.

研究分野：ナノフォトニクス

キーワード：フォトリック結晶 微小共振器 モアレ現象 ツイストロニクス

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

1. 研究開始当初の背景

2次元原子層材料の科学において、原子層を回転しつつ積層することで電子・フォノン状態を制御するツイストロニクスが急速に進展し新たな物性探索の場として盛んに研究されている[1]。研究開始当初、同様の研究がフォトニクス分野で萌芽期を迎えつつあり、初期的な研究報告がなされ始めていた。しかし、その多くは理論研究もしくはマイクロ波での原理実証実験に留まっており、工学的な応用もほとんど議論されていなかった。特に、光周波数で動作する2次元フォトニック結晶をツイスト積層した構造を舞台とした光ツイストロニクスの研究は、理論・実験の両面においてほとんど議論がなされていない状況であった[2]。

2. 研究の目的

本研究では、高品質な半導体2次元フォトニック結晶をベースに光ツイストロニクスを開拓し、新しい光閉じ込め機構および光系特有のツイスト物理を探索した。一般に困難とされる積層ナノ光構造の作製には申請者が開発を続ける転写プリント法[3]を用い、高品質な半導体ツイスト積層フォトニック結晶の実現を目指した。同構造の工学的有用性にも着目し、ハイブリッド集積ツイスト微小共振器レーザーへの応用を検討した。本研究を通じ、半導体光ツイストロニクスと呼ぶべき新分野の開拓を進めた。

3. 研究の方法

本研究では、(1)電磁界数値計算を用いた積層フォトニック結晶の解析、(2)微細加工技術を用いた積層フォトニック結晶の作製と光学評価を中心に検討を行った。

(1)電磁界数値計算を用いた積層フォトニック結晶の解析では、有限要素法(FEM)、平面波展開法(PWE)、有限差分時間領域法(FDTD)を用いてバンド計算を行い、積層に伴うフラットバンドの形成を探索した。1・2次元のフォトニック結晶についてそれらのモアレ積層構造を検討し、フラットバンド局在の発現を調べた。1次元構造では、ナノビームフォトニック結晶も調べた。フラットバンド局在に起因する光学モードについて、そのQ値やモード体積を調べ局在の強さを評価した。

(2)微細加工技術を用いた積層フォトニック結晶の作製と光学評価では、電子線リソグラフィ、ドライエッチング、選択的ウェットエッチングによりエアブリッジ構造の1・2次元フォトニック結晶を形成し、それらを転写プリント法で積層し所望の構造を作製した。また、同じナノ加工技術を用いて単層へパターンを重畳したモアレフォトニック結晶の作製も行った。微細加工は、量子井戸あるいは量子ドットを発光体として含むGaAsおよびInP基板に対して進めた。作製後の試料を冷却し、顕微フォトルミネッセンス測定を行うことで局在モードの有無及び光閉じ込めを評価した。

4. 研究成果

本研究では、半導体モアレ/ツイストフォトニック結晶に対する幅広い研究を行い、様々な系でフラットバンド局在を観測し、フォトニック結晶における光閉じ込めについて知見を深めた。以下に中心的な成果についてその内容を報告する。

(1) 重畳ナノビームフォトニック結晶における高Q値フラットバンド局在

単層ナノビーム構造に空孔を基礎とした二つのフォトニック結晶(周期 a_1 、 a_2)を重畳しつつパターンニングすることでモアレフォトニック結晶を形成し、同系におけるフラットバンド光局在を調べた。検討構造を図1に示す。 $a_1N=a_2(N+1)$ と設定することでモアレフォトニック結晶はCommensurate条件を満たしている。同系に対してFEMを用いてバンド計算を行ったところ、単層構造のバンドギャップ近傍に複数のフラットバンドが出現することが分かった。これらのフラットバンドを調べると、図1のように強

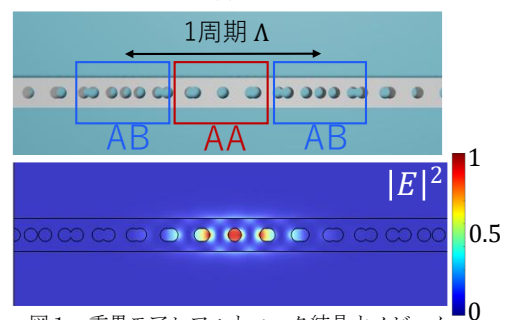


図1 重畳モアレフォトニック結晶ナノビーム

く局在した光モードが見つかった($N=13$)。次に N を増やしたところ Q 値が指数関数的に増大し $Q>10^7$ となることが分かった。またその際もモード体積は $(\lambda/n)^3$ 程度であり、空間的にも強く局在を保つことが分かった。設計構造は GaAs 薄膜を用いて作製し、期待通り高 Q 値共振モードを観測することに成功した。

(2) 積層ナノビームフォトニック結晶における高 Q 値フラットバンド局在

二つのナノビームフォトニック結晶(周期 a_1 、 a_2)を積層することでモアレフォトニック結晶を形成し、同系におけるフラットバンド光局在を調べた。ここでは特に GaAs と Si からなるヘテロ積層構造(図2)を検討した結果を示す。作製の容易さを考慮し層間距離ゼロで設計を行ったところ、GaAs 層厚みを薄くすることで高 Q 値共振が得られることが分かった。検討したフラットバンド局在モードを図2に示す。本構造でも $a_1N=a_2(N+1)$ とした。 N を増大することで Q 値が指数関数的に増大し $N=35$ で $Q>10^5$ となることが分かった。モード体積も $(\lambda/n)^3$ 程度であった。積層位置がずれても局在中心が連続的に変化するのみで、 Q 値やモード体積に大きな影響がないことが分かった。設計構造は転写プリント法を用いて作製を行った。光学顕微鏡下の操作でも十分に高い精度で積層できることが分かった。結果、フラットバンド局在モードと推定される光学モードからの発光を観測することに成功した。

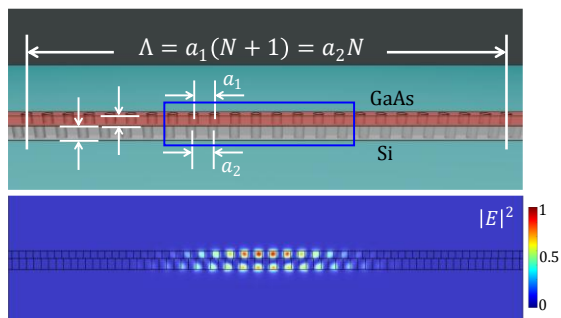


図2 積層ナノビーム構造によるモアレフォトニック結晶

(3) 周期穴径変調を加えた積層1次元モアレフォトニック結晶におけるフラットバンド局在

空孔径に二重周期変調を加えた1次元フォトニック結晶を積層したモアレフォトニック結晶を検討した(図3)。各層は異なる周期を有しているものの、空孔充填率は一定とした。同系で $N=13$ と固定し、周波数 220THz 近傍のフラットバンドに注目し、そのバンド幅 $\Delta\nu$ と層間距離 d の間の関係について詳細に調べた。結果、空孔変調度 r を増大することでバンド幅大域的に減少できることが分かった。またマジック距離と呼ばれる急峻に $\Delta\nu$ が減少する層間距離の数が増えることも分かった。さらに、 r を調整することでマジック距離を $d=0$ とすることも可能なことを見出した。これらは、パラメータ変化に対してロバストにフラットバンド光局在を得る上で重要な知見である。

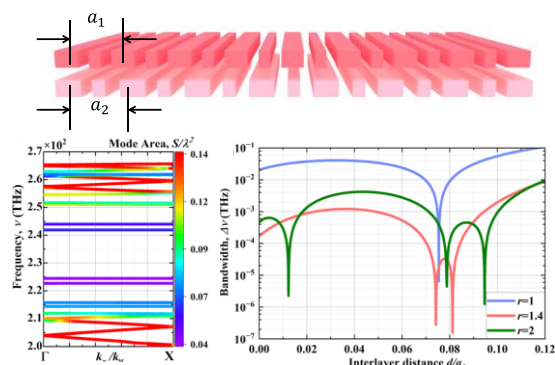


図3 周期穴径変調を加えた積層1次元モアレフォトニック結晶

(4) ツイスト積層二次元フォトニック結晶における高 Q 値フラットバンド局在

同一格子定数とスラブ厚みを有する三角格子フォトニック結晶二枚をツイスト積層し、フラットバンド光局在の有無を調べた(図4)。三角格子を採用したため同フォトニック結晶はバンドギャップを有しており、従来の Dirac バンドを示すフォトニック結晶のツイスト積層とは異なる振る舞いを示す。特に、ギャップ近傍において Bloch 型フラットバンド光局在を発現する。図4に検討構造において見出したフラットバンドの分散関係および付随する光局在モードの空間分布を示す。同モードは、ツイスト角 6° 、層間距離 60nm で3万を超える Q 値と $(\lambda/n)^3$ 程度のモード体積を示す。また、 $4^\circ \sim 8^\circ$ の幅広いツイスト角や $0 \sim 200$ nm の様々な層間距離で強い光局在を示すことが明らかとなった。また、微小な位置ずれに対して Q 値やモード体積が大きく変化せずロバストに振舞うことも確認された。これらの性質は、実験的にフラットバンド光局在を実現する上で優れた利点となる。設計構造は、スラブ二次元フォトニック結晶を転写プリント法により積層し作製した。層間距離は、ガラス薄膜を層間に挿入することで制御した。

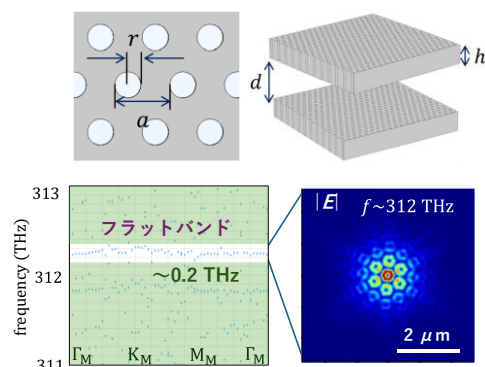


図4 ツイスト積層二次元モアレフォトニック結晶

<引用文献>

[1] L. Du et al., Science 379, 1313 (2023) [2] G. Hu, C-W. Qiu and A. Alù, Opt. Mat. Express 11, 1377 (2021) [3] R. Katsumi, Y. Ota et al., Optica 5, 691 (2018)

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 Maeda Yoshiho, Nishi Hidetaka, Diamantopoulos Nikolaos-Panteleimon, Fujii Takuro, Aihara Takuma, Yamaoka Suguru, Hiraki Tatsuro, Takeda Koji, Segawa Toru, Ota Yasutomo, Iwamoto Satoshi, Arakawa Yasuhiko, Matsuo Shinji	4. 巻 42
2. 論文標題 Micro-transfer-printed InP-based Membrane Photonic Devices on Thin-film Lithium Niobate Platform	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of Lightwave Technology	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） 10.1109/JLT.2024.3366579	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 Trushin Stepan M., Ito Takahiro, Ishii Yuki, Iwamoto Satoshi, Ota Yasutomo	4. 巻 50
2. 論文標題 Flatband localization in 1D moire bilayer photonic crystals with staggered potential	5. 発行年 2025年
3. 雑誌名 Optics Letters	6. 最初と最後の頁 2405～2405
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/OL.558564	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 Ishida Natsuko, Ezawa Motohiko, Lu Guangtai, Lin Wenbo, Ota Yasutomo, Arakawa Yasuhiko, Iwamoto Satoshi	4. 巻 111
2. 論文標題 Topological corner states in bilayer and trilayer systems with vertically stacked topological heterostructures	5. 発行年 2025年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 115418
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.111.115418	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 —

〔学会発表〕 計18件（うち招待講演 2件／うち国際学会 2件）

1. 発表者名 A. Fujita, N. Pholsen, R. Kawata, S. Ji, T. Kamei, M. Okano, S. Iwamoto and Y. Ota
2. 発表標題 Two dimensional photonic crystal nanocavity with quantum dots integrated on a glass clad Si waveguide using transfer printing
3. 学会等名 1st International Workshop on Quantum Information Engineering (QIE2023), P13, Okinawa Institute of Science and Technology (OIST), Okinawa, Japan. Oct. 2023""
4. 発表年 2023年

1. 発表者名	N. Ishida, M. Ezawa, G. Lu, W. Lin, Y. Ota, and S. Iwamoto
2. 発表標題	Topological corner states in photonic bilayer square lattice with π flux
3. 学会等名	13th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics (META2023), Session 1P2, P17, Paris, France, July 2023.
4. 発表年	2023年

1. 発表者名	G. Lu, Y. Ota, and S. Iwamoto
2. 発表標題	Lasing oscillation in twisted quadrupole topological photonic crystals
3. 学会等名	EP2DS-25&MSS-21, Grenoble, France, July 2023.
4. 発表年	2023年

1. 発表者名	太田 泰友
2. 発表標題	転写プリント法を用いたアジャイルなハイブリッド光集積
3. 学会等名	電子情報通信学会 ソサイエティ大会, C-3/4-41, 名古屋大学東山キャンパス(2023.9) (招待講演)
4. 発表年	2023年

1. 発表者名	藤田 晃成、N. PholSen、川田 琉生、ジサンミン、亀井利浩、岡野誠、岩本敏、太田泰友
2. 発表標題	シリコン細線導波路と結合したガラス薄膜装荷 2 次元フォトニック結晶ナノ共振器の作製
3. 学会等名	第84回応用物理学会秋季学術講演会, 21p-P19-1, 熊本城ホール(2023.9)
4. 発表年	2023年

1. 発表者名 川田 琉生、藤田 晃成、N. Pholsen、岩本 敏、 太田 泰友
2. 発表標題 ガラス薄膜装荷ガラス上 2 次元フォトニック結晶ナノ共振器の設計(II)
3. 学会等名 第84回応用物理学会秋季学術講演会, 21p-A308-3, 熊本城ホール(2023.9)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐藤 拓未、赤星颯麻、藤田晃成、岩本 敏、太田 泰友
2. 発表標題 ポリ塩化ビニルを用いた半導体薄膜の高速な転写プリント集積の検討
3. 学会等名 第84回応用物理学会秋季学術講演会, 22a-C402-6, 熊本市国際交流会館(2023.9)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 石井佑樹、G. Lu、岩本敏、太田泰友
2. 発表標題 モアレ超格子バレーフォトニック結晶の数値解析
3. 学会等名 第84回応用物理学会秋季学術講演会, 22p-A308-13, 熊本城ホール(2023.9)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Satoshi Iwamoto, Yasutomo Ota
2. 発表標題 Exploiting Photonic Topology in Semiconductor Nanophotonics
3. 学会等名 第84回応用物理学会秋季学術講演会, 19p-A602-1, 熊本 (2023.9) (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 伊藤 貴裕, 石井 佑樹, Stepan Trushin, 陸 広泰, 岩本 敏, 太田 泰友
2. 発表標題 重畳型一次元モアレフォトニック結晶に基づくナノビーム光共振器の検討
3. 学会等名 第71回応用物理学会春季学術講演会, 24p-11E-9, 東京都市大学 世田谷キャンパス (2024.03)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 N. Pholsen, A. Fujita, M. Kakuda, Y. Arakawa, K. Ikeda, N. Kobayashi, Y. Ota, S. Iwamoto
2. 発表標題 Quantum confined Stark effect of InAs/GaAs QDs on silica with ITO electrodes fabricated by transfer printing
3. 学会等名 第71回応用物理学会春季学術講演会, 24p-11E-2, 東京都市大学 世田谷キャンパス (2024.03)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 N. Pholsen, A. Fujita, M. Okano, N. Bart, A. Ludwig, A. Wieck, Y. Ota, S. Iwamoto
2. 発表標題 Transfer printing of GaAs nanobeam cavity embedding InAs QDs on SiN waveguide
3. 学会等名 第71回応用物理学会春季学術講演会, 24p-11E-1, 東京都市大学 世田谷キャンパス (2024.03)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 S. M. Trushin, Y. Ishii, T. Ito, S. Iwamoto, Y. Ota
2. 発表標題 Investigation of flat bands in bilayer onedimensional moire photonic crystals with staggered potential
3. 学会等名 第71回応用物理学会春季学術講演会, 24a-11E-1, 東京都市大学 世田谷キャンパス (2024.03)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Y. Ishii, S. Trushin, G. Lu, S. Iwamoto and Y. Ota
2. 発表標題 Analysis of photonic band structure for InP/Si hetero twist-stacked photonic crystal slabs
3. 学会等名 PECS (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 R. Kawata, A. Fujita, P. Natthajuks, S. Iwamoto and Y. Ota
2. 発表標題 High-Q Two-dimensional Photonic Crystal Nanocavity on Glass with a Top Glass Plate
3. 学会等名 PECS (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 川田 琉生、藤田 晃成、Pholsen N.、岩本 敏、太田 泰友
2. 発表標題 ガラス薄膜を装荷したガラス上2次元フォトリック結晶ナノ共振器の設計
3. 学会等名 応用物理学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 藤田 晃成、N. Pholsen、ジサンミン、川田 琉生、佐藤 拓未、岩本 敏、太田 泰友
2. 発表標題 ガラス薄膜を装荷したガラス上2次元フォトリック結晶ナノ共振器の作製
3. 学会等名 応用物理学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 石井 佑樹、S. Trushin、G. Lu、岩本 敏、太田 泰友
2. 発表標題 InP/Siヘテロツイスト積層フォトニック結晶の数値解析
3. 学会等名 応用物理学会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

—

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	岩本 敏	東京大学・先端科学技術研究センター・教授	
	(Iwamoto Satoshi)		
	(40359667)	(12601)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------