

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 3月31日現在

機関番号：32612

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2010～2012

課題番号：22656019

研究課題名（和文） ランダム・レージングを利用した革新的発光素子と新学術の創出

研究課題名（英文） Study of localized lasing modes in an innovative disordered photonic crystal

研究代表者

小原 實 (OBARA MINORU)

慶應義塾大学・理工学部・教授

研究者番号：90101998

研究成果の概要（和文）：ランダム・レージング(RL)の基礎物理に基づき、革新的レーザデバイスを先駆的に創出し、その学術基盤を創出する。RL を実証出来なかった分野で、革新的デバイス物理的応用展開し、ランダム系と周期的規則系の間を繋ぐ新学術を創出につなげる。フォトニック結晶にランダムネスを導入したランダムフォトニック結晶系で局在モードの特性について解析した。ランダムレーザ素子を開発し、光のアンダーソン局在を初めて直接的に観測した。

研究成果の概要（英文）：Transition process of optical modal properties induced by the introduction of randomness into random photonic crystals is investigated by a computational method. It is shown that the appropriate degree of random departure from a perfect crystal state gives rise to multiple scattering of low group velocity band-edge modes and supports their strong Anderson localization. The achieved confinement efficiency of light exceeds the one obtained in the perfect photonic crystal state. We experimentally demonstrated lasing of localized modes in a planar disordered photonic crystal slab, in which artificial structural randomness induces multiple scattering of Slow Bloch Mode (SBM). The randomness is introduced by nanometer-scale displacements in the positions of the elements (holes) in the triangular lattice. The transition from an extended SBM to a localized lasing mode is observed by direct near-field imaging using Near-field Scanning Optical Microscope. In experiments and FDTD calculations, the mode profile envelopes exhibit Anderson localization.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,800,000	0	1,800,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,100,000	390,000	3,490,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学、工学基礎・応用光学、量子光工学

キーワード：アンダーソン局在 マイクロ共振器 ランダム・フォトニック結晶 ランダム・レージング 光散乱

1. 研究開始当初の背景

散乱体の存在等により空間の屈折率が波長オーダーでランダム分布を持つとき、散乱光は複雑に干渉しあい、微小領域に定在波として局在する。このようなランダム系にレーザ利得媒質を導入すると、局在領域は微小レーザ共振器（光はアンダーソン局在）として機能し、コヒーレントな発光が観測される。この現象はランダム・レージング(Random Lasing; RL)と呼ばれ、

- (1)通常のレーザと比して媒質の作製が容易であること(アライメント不要)、
- (2)媒質サイズが微小であること(直径 数マイクロメートルの共振器を実現)、
- (3)発振スペクトルが媒質の屈折率分布に対して特異的であること(屈折率分布固有の局在モードを持つ)

などの特長を有する。RL は上記特長から、多彩な応用が期待できる。しかし、研究は物理的興味からの基礎研究であったため、工学研究は全く進展を見せておらず、未だデバイスは何ひとつ完成していない。本研究が終了した 2013 年 4 月に *Nature Photonics* で *Random Photonics* が特集されたことを観ても **Hot Topic** であることが理解できよう。

申請者らは、すでに FDTD 法で、レーザ利得を含まないランダムな系内のモード特性を調べ、工学上の RL 素子作製に必要なモード制御が可能である指針を示した(Takeda, Obara: *Appl. Phys. B98*, pp.267-274 (2009))。さらに、レーザ利得を含む系内のモード特性を調べることで、任意のモードを選択的に発振させるための散乱状態選択の指針を示した(Takeda, Obara: *Appl. Phys. B94*, pp.443-450, 2009)。未解明であった発振モードと屈折率分布との相関を明らかにし、工学的应用に必要な物理機構を解明する。

2. 研究の目的

本研究の目的は、新奇な物理現象として注目を集めているランダム・レージング(RL)の基礎物理に基づき、革新的デバイスを先駆的に創出し、かつその学術基盤を創出することである。比類ない可能性を有しながらもデバイスを創出出来ずにいた RL 分野で、初の革新的デバイス創出だけでなく、新学問分野(ランダム系と規則系の間を繋ぐ *Disordered Photonic Crystal* の理論など)の新学術を創出につながる。

3. 研究の方法

(1)フォトニック結晶にランダムネスを導入したランダムフォトニック結晶が、光閉じ込めの高効率化に寄与する構造体として注目されているが、その局在モードの特性は解明されていないので、ランダムネスを導入した

系の持つ局在モードの特性について解析した。具体的には 2D-FDTD (2次元有限差分時間領域)法により 2次元ランダムフォトニック結晶のインパルス応答を研究した。

(2)2次元スラブ構造のランダム・フォトニック結晶を用いたランダムレーザ素子を開発し、そのレーザ発振特性について実験的に実証し、光のアンダーソン局在を直接的に観測する。

4. 研究成果

構造体内部に光の局在を誘起する方法として、フォトニック結晶における欠陥モードを利用した方法に加えて、その対極の方法としてランダム系における多重光散乱を利用したアンダーソン局在による方法がある。近年、両者の中間状態であるフォトニック結晶にランダムネスを導入したランダムフォトニック結晶が、光閉じ込めの高効率化に寄与する構造体として注目されている。しかしその局在モードの特性は解明されていないので、ランダムネスを導入した系の持つ局在モードの特性について解析した。2D-FDTD (2次元有限差分時間領域)法により 2次元ランダムフォトニック結晶のインパルス応答を研究した。その結果、空間偏差の導入に伴い、光の局在が欠陥モードへの結合からアンダーソン局在モードへの結合へと変化することが示された。得られた Q 値は~12,000 で微小モード領域に光は局在した。

従来は微小レーザ素子実現へ向けたフォトニックバンド端における低群速度光によるレーザ発振は、欠陥モード発振と比べ均一な放射パターンを得られる利点がある。しかしシステムサイズが有限であるため、群速度が完全にゼロとはならず、水平方向への損失が発生する。本手法ではフォトニック結晶構造に空間的なランダムネスを与えることでバンド端の位置をランダムに揺らせ、アンダーソン局在を誘起する。

屈折率がランダムな多重散乱系で、Mie 散乱が極めて強く散乱平均自由行程が光波長より小さくなり、光が波長オーダーの微小領域内に局在する現象を光のアンダーソン局在という。この系で利得媒質を付与するとレーザ発振する (Random Lasing; RL)。

本研究で初めて 2次元スラブ構造のランダム・フォトニック結晶のレーザ発振特性について実験的に実証し、光のアンダーソン局在の直接的な観測に成功した。デバイスは、ガラス基板上的 InP 薄膜に、半径 185 nm の円孔を格子定数 530 nm の三角格子状に作製した構造を持つ。レーザ利得として InP/InAsP 量子井戸構造をもつ。波長 1.5 μm の TE 波がフォトニックバンドギャップ直下の最低次バンド端に位置し、全反射で垂直方向閉じ込

める構造である。円孔の位置をランダムな方向に δ nm シフトさせ、ランダムな揺らぎを導入した。805 nm の LD で光励起すると、 $\delta = 0$ nm と 10 nm から、レーザ発振が観測できた。 $\delta = 10$ nm の発振スペクトルはブルーシフトした。これはバンドギャップの乱れによりバンド端の状態密度分布が分裂しながらバンド内に引き込まれていることを示し、フォトニック結晶内のアンダーソン局在を示唆している。

同一励起条件下において、SNOM によるレーザモードの空間プロファイルを観測した。通常のフォトニック結晶では励起領域内にガウス分布状に広がった周期的なブロッホモードが観測されるが、 $\delta = 10$ nm では微小領域の局在が観測された。強度分布が空間的に指数関数的な減衰を持つことから、アンダーソン局在であることが確認された。

これまでに SNOM により光のアンダーソン局在を観測した報告は無く、局在現象の直接的な証拠を示すものとして、本成果のインパクトは大きい。アンダーソン局在モード内では新たな光子・電子間相互作用が生じるので、全く新しい光共振器概念の新学術の創出につながる。

さらに、ランダムフォトニック結晶における局在モード特性を重点に解析した。フォトニック結晶の各空気ホールが、ランダムな方向に遷移するようなランダムネスを導入し、各々の空気ホールに対し、ホールシフトする量とホールシフトするホールの数を制御し解析した。360 THz のモードは、フォトニック結晶状態で $Q \sim 6000$ に対し、60%のホールを 40 nm ホールシフトしたランダムフォトニック結晶構造では $Q \sim 14000$ を得た。そして 430 THz のモードは、フォトニック結晶状態で $Q \sim 5000$ に対し、100%のホールを 30 nm ホールシフトしたランダムフォトニック結晶構造では $Q \sim 13000$ を得た。以上からフォトニック結晶へのランダムネスの導入に伴い、バンドギャップ両端において Slow Bloch Mode がアンダーソン局在し、フォトニック結晶状態の Slow Bloch Mode よりも高い共振 Q 値を示した。しかし、ランダムネスを過度に導入することで、バンドギャップが消滅することから、アンダーソン局在は崩壊し、系全体に光が拡散したので、共振 Q 値は非常に低くなった。これにより、ランダムネスを導入する時にホールシフトさせる距離やホールの個数において適切な条件をとることでフォトニック結晶内を伝搬する Slow Bloch Mode 波を高 Q 値のアンダーソン局在モードとして閉じ込めることが可能であることを明らかにした。

将来展望としては、フォトニックバンドギャップが崩壊する過程についてより詳細に検討することで、バンドギャップを保持しつつランダムな構造揺らぎを与える新構造の

提案・実証が求められる。これにより、より光閉じ込め効率の高いアンダーソン局在を促す構造が得られれば、高い Q 値・小モード体積が要求されるマイクロ光技術へ展開が可能となる

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

(1) S. Takeda, S. Hamada, R. Peretti, P. Viktorovitch, M. Obara, "Order to disorder optical phase transition in random photonic crystals," 査読有, Applied Physics B, 106 (2012) 95-100. DOI: 10.1007/s00340-011-4595-z

(2) M. Terakawa, S. Takeda, Y. Tanaka, G. Obara, T. Miyanishi, T. Sakai, T. Sumiyoshi, H. Sekita, M. Hasegawa, P. Viktorovitch, M. Obara, "Enhanced localized near field and scattered far field for surface nanophotonics applications," 査読有 Progress in Quantum Electronics, 36 (2012), 194-271. DOI:10.1016/j.pquantelec.2012.03.006

(3) S. Hamada, S. Takeda, P. Viktorovitch, M. Terakawa, M. Obara, "Theoretical analysis of the order to disorder phase transition in random photonic crystals," 査読有 Proc. SPIE 7946, Photonic and phononic properties of engineered nanostructures, 7946 (2011) 1-9. DOI: 10.1117/12.873483

(4) S. Takeda, S. Hamada, M. Terakawa, M. Obara, "Mode control of random microresonators consisting of scattering particles," 査読有, Proc. SPIE: International Symposium on Gas Flow, Chemical Lasers, and High-Power Lasers, 7751 (2010) 1-9. DOI: 10.1117/12.880941

[学会発表] (計 12 件)

(1) 発表者: 濱田 慎平, "Theoretical analysis of the modal behavior of 2D random photonic crystals," SPIE Photonics West 2012 (OPTO), 2012 年 1 月 25 日, San Francisco, CA, USA

(2) 発表者: 武田 征士, "Anderson localized modes in random photonic crystal lasers with two-dimensional glassy perturbation," SPIE Photonics West 2012 (OPTO), 2012 年 1 月 23 日, San Francisco, CA, USA

(3) 発表者: 武田 征士, "Lasing properties of Anderson localized modes in planar random photonic crystals," International

Conference on Micro- and Nano-Engineering, MNE 2011, 2011年9月21日, Berlin, Germany

(4) 発表者：武田征士，“Lasing characteristics of Anderson localization modes in two-dimensional random photonic crystals,” IQEC/CLEO Pacific Rim, 2011年8月28日, Sydney, Australia

(5) 発表者：武田征士，“Anderson localization of light in two-dimensional random photonic crystals,” IEEE-International Symposium on Access Spaces 2011 (IEEE-ISAS 2011), 2011年6月18日, 慶應義塾大学(横浜)

(6) 発表者：武田征士，“Surface emitting laser based on random photonic crystals,” SPIE Photonics West 2011 (OPTO), 2011年1月24日, The Moscone Center, San Francisco, USA

(7) 発表者：濱田慎平，“Theoretical analysis of the order to disorder phase transition in random photonic crystals,” SPIE Photonics West 2011 (OPTO), 2011年1月24日, The Moscone Center, San Francisco, USA

(8) 発表者：武田征士，“ランダムフォトリック結晶レーザにおける光学的相転移,” レーザ学会学術講演会第31回年次大会, 2011年1月10日, 電気通信大学(調布市)

(9) 発表者：濱田慎平，“ランダムフォトリック結晶における規則 - 不規則状態相転移の数値解析,” レーザ学会学術講演会第31回年次大会, 2011年1月10日, 電気通信大学(調布市)

(10) 発表者：武田征士，“Order to disorder

optical phase transition in random photonic crystals lasers,” ECL-Keio Lyon Symposium, 2010年11月19日, Ecole Centrale Lyon, France

(11) 発表者：濱田慎平，“ランダムフォトリック結晶における局在モードの解析,” 応用物理学会学術講演会, 2010年9月17日, 長崎大学文教キャンパス

(12) 発表者：武田征士，“Mode control of random microresonators consisting of scattering particles,” GCL-HPL 2010, 2010年8月31日, Sofia, Bulgaria

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小原 實 (OBARA MINORU)
慶應義塾大学・理工学部・教授
研究者番号：90101998

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

寺川 光洋 (TERAKAWA MITSUHIRO)
慶應義塾大学・理工学部・助教
研究者番号：60580090