

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号

特許第7264352号

(P7264352)

(45)発行日 令和5年4月25日(2023.4.25)

(24)登録日 令和5年4月17日(2023.4.17)

(51)国際特許分類

F I

H 0 1 S 3/06 (2006.01)

H 0 1 S 3/06

H 0 1 S 3/083(2006.01)

H 0 1 S 3/083

H 0 1 S 3/23 (2006.01)

H 0 1 S 3/23

H 0 1 S 3/063(2006.01)

H 0 1 S 3/063

H 0 1 S 5/10 (2021.01)

H 0 1 S 5/10

請求項の数 15 (全26頁) 最終頁に続く

(21)出願番号 特願2020-503106(P2020-503106)

(86)(22)出願日 平成30年3月29日(2018.3.29)

(65)公表番号 特表2020-516084(P2020-516084
A)

(43)公表日 令和2年5月28日(2020.5.28)

(86)国際出願番号 PCT/IL2018/050375

(87)国際公開番号 WO2018/185749

(87)国際公開日 平成30年10月11日(2018.10.11)

審査請求日 令和3年3月26日(2021.3.26)

(31)優先権主張番号 62/480,604

(32)優先日 平成29年4月3日(2017.4.3)

(33)優先権主張国・地域又は機関
米国(US)

(31)優先権主張番号 62/624,196

(32)優先日 平成30年1月31日(2018.1.31)

最終頁に続く

(73)特許権者 399042535

テクニオン・リサーチ・アンド・ディベ
ロップメント・ファウンデーション・リ
ミテッドイスラエル国, 3 2 0 0 0 0 3 ハイフ
ァ, テクニオン シティ

(73)特許権者 519356607

ザ ユニバーシティ オブ セントラル フ
ロリダ リサーチ ファウンデーション,
インコーポレイテッドアメリカ合衆国, 3 2 8 2 6, オーラ
ンド, スイート 5 0 1, 1 2 2 0 1 リ
サーチ パークウェイ

(74)代理人 100114775

弁理士 高岡 亮一

最終頁に続く

(54)【発明の名称】 トポロジカル絶縁体レーザーシステム

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

レーザーシステムであって、

ある共振範囲を有する光共振器のアレイにより形成されたある配列の単位格子を備えるアレイ構造であって、前記アレイ構造の光共振器は、前記光共振器に隣接する導波管の形態にある光リンクによりそれらの間で光学的に結合され、前記光共振器は、前記光共振器の共振範囲と重なり合う1つ以上の波長範囲内での放出による励起エネルギーに応答することができる非線形の光学ゲインを有する選択されたゲイン媒体から作られた半導性導波管として構成され、前記光共振器および前記光リンクは行をなして配列され、前記行の光リンクは、隣り合う行の光リンクに対して所定のシフト量をもって配列され、それにより、反時計回り方向に結合された光に対して時計回り方向にある光共振器間に連結された光により蓄積された位相シフトの変動を誘導し、その結果、前記励起エネルギーが、前記アレイ構造のエッジ領域の少なくとも一部の中に配列された光共振器に印加されるときに、少なくとも1つのトポロジカルに保護されたエッジモードが創出され、前記アレイ構造のエッジ領域の周りで単一方向に伝播し、前記エッジ領域の周りで均一に広がり、前記アレイ構造は、それにより、前記アレイ構造のエッジ領域内で前記光共振器の単一レージングモードを与えるトポロジカル絶縁体として構成される、アレイ構造と、

前記アレイ構造のエッジ領域の少なくとも一部の中で前記光共振器を励起するために前記励起エネルギーを与えるように構成された励起ユニットと、

レーザー出力を規定する少なくとも1つの出力カプラーであって、前記少なくとも1つ

の出力カプラーは、前記アレイ構造のエッジ領域にて前記光共振器のうち何れか 1 つ以上に光学的に結合され、それにより、前記レーザーシステムからの光強度の一部を抽出するべく、前記エッジ領域の周りで単一方向に伝播する単一レージングモードの、前記少なくとも 1 つの出力カプラーのそれぞれの中への強い結合を与える、出力カプラーと、を備える、レーザーシステム。

【請求項 2】

前記光共振器のアレイがフォトニック結晶として構成され、前記フォトニック結晶が、前記フォトニック結晶内のフォトニック状態に関連するバンド構造を有し、前記バンド構造が、前記フォトニック状態のバンド間のギャップと交差する 1 つ以上のフォトニック状態を備え、前記ギャップと交差する 1 つ以上のフォトニック状態が、前記アレイ構造のエッジ領域内の少なくとも 1 つのトポロジカルエッジモードに対応する、請求項 1 に記載のレーザーシステム。

10

【請求項 3】

前記アレイが二次元アレイである、請求項 1 または 2 に記載のレーザーシステム。

【請求項 4】

前記アレイの光共振器を結合する光リンクが、前記隣り合う行の光共振器間の結合が、選択された位相シフトを一方の方向における光結合に対して導入し、異なる位相シフトを逆方向における光結合に対して導入するように構成される、請求項 1 乃至 3 のいずれか 1 項に記載のレーザーシステム。

【請求項 5】

前記光共振器がリング共振器である、請求項 1 乃至 4 のいずれか 1 項に記載のレーザーシステム。

20

【請求項 6】

前記光共振器が、少なくとも 1 つのヘリカル部分を備える、請求項 1 乃至 5 のいずれか 1 項に記載のレーザーシステム。

【請求項 7】

前記単位格子のそれぞれが、前記光共振器間に少なくとも 2 つの光リンク結合を備え、前記光リンクが、対応する光共振器間の軸に対して選択された空間シフトをもって調節され、それにより、前記光リンクを介して前記光共振器を連結する 2 つの光路に関連する位相差を与える、請求項 1 乃至 6 のいずれか 1 項に記載のレーザーシステム。

30

【請求項 8】

前記光リンクが、対応する光共振器間の軸に対するシフトをもって配列され、前記シフトが、前記アレイ構造の別の行間で変化する、請求項 7 に記載のレーザーシステム。

【請求項 9】

前記光リンクの位置におけるシフトが、前記アレイ構造の別の行間の所定のステップレベルにより変化する、請求項 8 に記載のレーザーシステム。

【請求項 10】

前記光共振器が、複数の六角形配列を規定する六角形格子内に配列され、前記六角形配列は、前記六角形配列内の第 1 の結合定数および隣り合う六角形配列間の第 2 の結合定数を特徴とし、前記第 2 の結合定数は、前記第 1 の結合定数に比べて小さい、請求項 1 乃至 9 のいずれか 1 項に記載のレーザーシステム。

40

【請求項 11】

前記アレイの隣り合う光共振器間にそれらの間の結合を与えるように配置された光リンクが、前記光共振器の共振範囲に対して共振せず、かつ / または損失が大きいように構成される、請求項 1 乃至 10 のいずれか 1 項に記載のレーザーシステム。

【請求項 12】

前記アレイ構造が、矩形格子、六角格子、およびハニカム格子から選択されるか、または各ユニットがハニカム格子で形成されるサブアレイユニットの三角格子を有する格子形状を有する、請求項 1 乃至 11 のいずれか 1 項に記載のレーザーシステム。

【請求項 13】

50

前記ゲイン材料が、少なくとも１種の窒化物化合物を備える、請求項１乃至１２のいずれか１項に記載のレーザーシステム。

【請求項１４】

前記窒化物化合物が、少なくとも１種のガリウム含有層を備える、請求項１３に記載のレーザーシステム。

【請求項１５】

前記光共振器が、前記ゲイン媒体として機能する InGaAsP 量子井戸を備える、請求項１乃至１４のいずれか１項に記載のレーザーシステム。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

10

【０００１】

本発明は、レーザーシステムの分野に属し、ゲイン素子アレイを含むレーザーシステムに関する。本発明は、特に、選択レージングモードのための光トポロジカル状態を利用したレーザーシステムに関する。

【背景技術】

【０００２】

ダイオードレーザー（半導体レーザーとしても知られる）は、最も一般的に使用されるレーザーシステムであり、光通信からコンパクトディスクまでの用途、およびさらに多くの用途がある。半導体レーザーのゲイン（単位長さ当たりのゲイン）は高いが、単一の半導体レーザーから放出される出力は限られており、通常、数ワットを超えない。半導体レーザーアレイを開発するために、単一素子の出力の限界および重大な損傷による制限を克服する目的で、隣接するエミッターが相互に結合され、同時に、励起パワーの変動、製造欠陥および異常に対し堅牢な狭帯域および安定な放射場を維持する、広範な研究が実施され、またされて来た。原理的には、レーザーアレイ構造により、高レーザー出力を得ることができる。しかし、このようなレーザーアレイ構造は、同時に多くの空間モードおよびスペクトルモードで発光する傾向があり、レーザーアレイシステム（近接場および近接スペクトル）のモード構造は、励起強度により変動し、それにより、レーザーのコヒーレンス特性ならびに励起条件および環境条件の変動に対する安定性が大きく低下する。同様に、レーザー素子の数が増加すると、相互に遠く離れたエミッター間のコヒーレンスが大きく低下する。半導体レーザー配列の放射パターンを制御する多くの方法が提案されたにもかかわらず、現在の技術は今だ、単一の高出力コヒーレントレーザー源として動作するレーザーアレイシステムを作製できていない。したがって、レーザーアレイシステムの最もよくある用途は、固体レーザー用の励起モジュールとして（発光管ではなく）の用途である。

20

30

【０００３】

トポロジカル絶縁体は、トポロジカル状態（典型的には、エッジ状態）により特徴付けられる物質相であり、局部変化に対し安定で堅牢な空間的配置／経路を有する。過去１０年間で、トポロジカル絶縁体の原理は、フォトンクスおよびマイクロ波から音響学、機械学および冷却原子までの範囲にわたる、種々の物理的システムにおいて実証されてきた。特に、電磁波に関しては、トポロジカル絶縁体は、導波管または共振器などの結合素子のシステムで実証されてきた。一般に、科学的理解では、トポロジカルモードをシステム内で維持するために、システムは、エルミートシステム、すなわち、ゲインを含まない受動的システムとして表さすことができるものでなければならないと考えられている。トポロジカル絶縁体（全システムの）に対しゲインを付加することは、システムを非エルミートにし、これは、トポロジカル特性を壊し、特にシステム中の輸送のトポロジカルな保護を壊し、システムを欠陥および不完全性の影響を受けやすい状態にすると考えられた。

40

【０００４】

米国特許第 9, 052, 448 号は、二次元結合共振器光導波路配置およびシステム、装置、およびその方法を記載している。結合共振器光導波路のネットワークは、これらの光ネットワークのトポロジカル特性を利用するように配置されている。このような配置は

50

、光子流を妨げるまたは遮断する可能性のあるネットワーク中の異常および変動に対するトポロジカル保護を提供する。異常の結果として、アレイのエッジ状態を通して横断する光子は、異常または変動に基づいてルートが変更される。したがって、ネットワーク中を送られる光子は、異常または欠陥に対し保護される。

【発明の概要】

【0005】

コヒーレントな光照射の放出を可能とし、同時に、高励起パワーでの安定な単一モードの放射を維持する、新規レーザーアレイ配置が当該技術分野において求められている。さらに、環境、欠陥、製造の不完全性、および励起パワーの変化に対して、堅牢な放射を有するレーザーアレイ配置が必要とされている。

10

【0006】

本発明は、それらの間で結合するように配置された光学素子アレイで構成されたトポロジカル絶縁体レーザーシステムを提供する。アレイの光学素子は、選択ゲイン材料を有し、励起エネルギーにตอบสนองして1つまたは複数の波長帯で放射するように構成された光学素子を含む。アレイ中の光学素子の配置および光学素子間の結合レベルは、アレイが、アレイの空間的配置と関連する1つまたは複数のトポロジカルモードを維持するように選択される。より具体的には、空間配置および結合パラメーターは、特定の空間的経路を有する1つまたは複数のトポロジカル的に安定なモードを提供する。レーザーシステムは、トポロジカルモードの少なくとも一部の空間領域に関連する一群の光学素子に向けられた励起エネルギー（例えば、光学的および/または電気的励起）を供給するように構成された励起ユニット、および該レーザーシステムからの出力の一部を抽出するために、アレイの1つまたは複数の光学素子に光学的に結合された出力ポートをさらに含む。通常、光の効率的アウト結合を得るために、好ましくは、出力ポートは、トポロジカルモードの軌道に沿って配置される1つまたは複数の光学素子に結合される。通常、このような1つまたは複数の光学素子は、アレイのエッジに配置される。

20

【0007】

トポロジカル絶縁体は、電子固体システムにおいてよく知られている。このようなシステムでは、バルクの固体素子は、原子価電子状態と伝導状態との間にエネルギーギャップを有する絶縁体である。トポロジカル的に伝導性の表面状態は、バルクエネルギーギャップ内に入る特殊な状態であり、小さいエネルギー差異を有する状態間を、電子/ホールが移動することを可能とすることにより、バルクの表面に沿った電気伝導を可能にする。実質的に類似の効果が、一次元、二次元または三次元アレイに配置されている光学素子を結合することにより形成された、共振器、導波管などの光素子中でも起こり得る。アレイの素子間の光学的結合は、光学モードを維持する結晶様の挙動を生じ、特定のバンド構造（フォトリック結晶におけるような）を特徴付ける。空間配置およびアレイの光学素子の特性を考慮すると、システムのバンド構造および種々のフォトリック状態が決定され、種々の既知の技術を用いて計算できる。さらに、トポロジカルエッジモードを維持する光学素子の種々のアレイ構成が本明細書の下記でより詳細に記載される。

30

【0008】

いくつかの配置では、光学素子アレイは、選択した配置により配置された複数の光学素子を含む二次元アレイ（例えば、光共振器またはリング/楕円共振器）であり得る。アレイの光学素子は、それらの間で光学的に結合され、光成分の1つの素子からその隣接素子への移動が可能となる。アレイの配置は、アレイの異なる行（または列）の光学素子間の結合は、アレイ中の所与の方向（例えば、時計回り）に進行する特定の位相変化量2、および逆方向の逆の位相変化量（-2）を割り当てることを可能とし、は、非整数（例えば、 $0.1 < < 0.8$ 、および通常、 0.5 ）である。結合位相シフトにおけるこの変化量は、アレイのバンド構造に影響を与え、1つまたは複数のトポロジカルモードを生成し、バンドギャップ交差モードとして特徴付けされる。これらのトポロジカルモードは通常、非ゼロ群速度を有し、アレイのエッジに沿って伝播し、それにより、アレイのエッジに沿った光伝搬のための対応する1つまたは複数のトポロジカル経路を提供

40

50

する。

【0009】

さらに、本発明では、アレイの光学素子は、選択ゲイン材料を含み、励起エネルギーに
応答して1つまたは複数の選択波長帯の光の放出を可能とする。1つまたは複数のアレイ
のトポロジカルモードを占める光の強度は、トポロジカルモード中に誘導放出を生じさせ
る。このような光強度は、トポロジカルモードの経路に沿った1つまたは複数の選択部位
でアウト結合されて、安定でコヒーレントなレーザー放射を可能とし得る。トポロジカル
モードの安定性は、アレイの他のモードと相互作用しないように制限され、広範囲の励起
パワーに対し単一モード放射を維持する。2つ以上のトポロジカルモードがアレイにより
維持されるいくつかの配置では、レーザー放射は、アレイのトポロジカルモードに対応す
る2つ以上のレージングモードを含む。通常、このような2つ以上のレージングモードは
、実質的に類似の空間モード構造を有し、モードが単一ビームに組み合わせられることを可
能とし得る。

10

【0010】

この関連では、光学素子は、導波管共振器として構成され得る。トポロジカルモードの
空間領域中に配置された共振器を含む少なくとも一部の共振器は、希土類元素イオンがド
ープされるか、または量子ドット配列に埋め込まれており、選択波長帯の光の誘導放出/
吸収を可能とする。例えば、アレイの光学素子は、半導体ダイオードゲイン材料から形成
されたコアを含む共振導波管として形成された共振器であり得る。このようなダイオード
ゲイン材料には、リン化インジウム (InP) などのp型基板上に全て成長させて、保護
層で被覆された、 $\text{In}_x = 0.74 \text{ Ga}_{1-x} \text{As}_y = 0.57 \text{ P}_{1-y}$ のクラッド層 (例えば
、 20 nm の厚さを有する) の間に挟まれた $\text{In}_x = 0.56 \text{ Ga}_{1-x} \text{As}_y = 0.93 \text{ P}_{1-y}$ 量子井戸の層 (例えば、 10 nm の厚さを有する) を含み得る。いくつかの他の配置
では、ゲイン材料は、励起エネルギーに応答して光学的放射を生ずるように構成された、
1つまたは複数の窒化物化合物を含み得る。いくつかの配置では、窒化物化合物は、ガリ
ウム関連化合物を含む1つまたは複数の層を含み得る。

20

【0011】

通常、光学素子のゲイン材料は、物質 - 光相互作用を生成し、そこで、光子がゲイン材
料により吸収および/または放出される。光学的放射を得るために、一群の1つまたは複
数の光学素子が、励起ユニットにより提供される光学的および/または電氣的励起により
励起される。励起された一連の光学素子は、トポロジカルモードに関連する空間領域に沿
った少なくとも一部の光学素子を含むように選択される。したがって、1つまたは複数の
トポロジカルモードに沿って光伝搬に関与しないアレイの少なくとも一部の光学素子は、
より少ない励起エネルギーがそこへ適用される (または励起が全くない) ので、システム
に対する損失となる。

30

【0012】

通常、ゲイン/ロス光 - 物質相互作用は、本質的に、システムを非エルミートにするこ
とに留意されたい。上記で示したように、このような非エルミートシステムは、トポロジ
カルモードを維持しないことが想定される。しかし、本発明の発明者らは、適切な励起条
件と組み合わせた、アレイの1つまたは複数のトポロジカルモードに関連する光学素子内
のゲイン材料の導入は、他の光学モードとの混合が限定された状態から、まったく混合が
ない状態までの、トポロジカルモードと関連した、効率的で安定な光学的放射をもたらす
ことを明らかにした。これは、レージングして高出力を提供し、同時に、レーザーシステ
ムの単一モードで安定な光学的放射に寄与する複数の光学素子の使用を可能とする。

40

【0013】

さらに、本明細書に記載のトポロジカル絶縁体レーザーシステムは、単一空間的および
時間的モードの、安定で堅牢なレージングを示し、広範囲の励起パワーに対し同じモード
を持続し、システム中の欠陥、異常および製造不完全性に対し堅牢であり、複数のゲイン
素子が組み合わせられた、コヒーレントなレージングモードを共有する、安定な単一モード
レージングを可能とする。さらに、レージングモードのトポロジカルな性質のために、レ

50

ーザーシステムは、出力の高アウト結合を持続しながら、動作を維持できる。簡単に言えば、レーザーアレイシステムのトポロジカル設計は、単一の高度にコヒーレントな高出力レーザー源として、多くのレーザーエミッターと一緒に動作させる。

【 0 0 1 4 】

通常、モード間で後方散乱なしにトポロジカルモードを維持するために、システム内の時間相反則は通常、成立しない。より具体的には、システムは、時間に対して対称である場合、すなわち、システムの出力を逆方向に送出することにより、対応する入力回収がもたらされる場合、相反である。システムの相反則は、種々の配置および技術を利用して破られ得る。従来法では、外部磁界のシステムへの導入は、異なる位相シフトを蓄積した、力線に沿ったまたは力線に逆方向の光路として相反則を破壊するために使用される。しかし、前述のように、本発明の発明者らは、光学素子のレージング作用に関連するゲイン飽和により形成される非線形性に加えて、アレイ内の光結合の対称性を可能とする好適なアレイ構造の形成により（例えば、結合方向の位相シフトの差異を設ける）、相反則が破られ、システムのトポロジカルモードが持続されるシステム状態が維持されることを明らかにした。これは、欠陥、異常、および製造不完全性の存在下であっても、後方散乱なしに、アレイに、主に一方方向にレージング出力を供給させる。

10

【 0 0 1 5 】

上記で示したように、システムのトポロジカルレージングモードの使用は、複数の光学素子（例えば、ゲイン材料を有する共振器）により共有され、同時に、安定でコヒーレントなモードを維持する、能動的レージングモードを可能とする。さらに、このモードのトポロジカル性質は、アレイ中の欠陥、または特定の異常レベル、例えば、製造または動作条件に起因するアレイの光共振器の特性の変動、などの局所的な不完全性に対し堅牢なレージングを可能とする。さらに、トポロジカルレージングモードは、アレイ内に明確な経路を有し、トポロジカルモードの経路に沿って出力ポートを設けることにより、出力ポートに対する強力な結合を維持することを可能とする。これは、過抽出が抽出モードの損失を生じ、レーザーの放射が停止する場合もある従来のレーザーシステムと比較して、高照射強度の抽出を可能とする。本技術では、トポロジカルモード内の光学的放射は、他のアレイモードから効率的に遮断され、それにより、光学的放射を他の非トポロジカルモードに向けることなく、高アウト結合損失を可能とする。複数のゲイン素子の使用と組み合わせで、これは、異常および不完全性に対し堅牢な、高効率で安定なモードのコヒーレント放射をもたらす高出力レーザーシステムを可能とする。

20

30

【 0 0 1 6 】

さらに、本明細書で記載のレーザーシステムは、トポロジカルモードの空間領域中に位置しない光学素子を有する複数のゲインを含み、したがって、このような光学素子は受動的であり得る（ゲインも損失もない）、部分的に励起され得る、または高損失を生成し得る。これは、光学的放射におけるトポロジカルモードに関連しないアレイ領域の関与を低減し、それにより、トポロジカルモードのみのレージングが確実に起こることを支援する。本発明の発明者らは、このような光学素子は通常、トポロジカルレージングモードの維持のために必要であり、アレイのトポロジカルレージングモードからバルクへの結合した光強度の一過性の結合の減衰（例えば、アレイのエッジからバルクへの結合した光強度の指数関数的減衰）の領域を提供し、それにより、レーザーシステムの安定性を維持すると理解した。したがって、以降でさらに詳細に記載されるように、バルク領域は、トポロジカルモード内の光伝搬を制限するエッジ欠陥の場合には、トポロジカルモードにより、トポロジカルモードの経路を維持するために使用され得る。これは、エッジ関連経路が遮断される場合に、トポロジカルモードにより生成され得る追加の経路選択肢を提供する。

40

【 0 0 1 7 】

この目的のために、本発明のいくつかの実施形態では、トポロジカル絶縁体レーザーシステムは、アレイの異なる行（または列）の間で一方方向に結合された光成分が、反対側（後方）方向に結合した光成分の反対方向の特定の位相シフトを蓄積するように配置された、光学素子の二次元アレイ、例えば、リングまたはヘリカル共振器により形成され得る。

50

共振器アレイは、共振器内への量子井戸またはドット、希土類元素イオンまたは任意の他のゲイン材料の添加により、選択されたゲイン材料で含浸され、それにより、それぞれの共振器が少なくとも1つのレージングモードを維持することが可能となる。さらに、トポロジカル絶縁体レーザーシステムは、励起パワーを、少なくともアレイの一部に沿って配置された少なくとも一群の光学素子に対し提供し、システムの1つまたは複数のトポロジカルモードのレージングを可能とするように構成された励起ユニットを含む。励起エネルギーは、ゲイン材料の飽和励起を与えるように選択され、少なくとも局所的な（当該光学素子内で）レージング活性を可能とするのが好ましい。通常、トポロジカル絶縁体レーザーシステムはまた、アレイのエッジ領域に沿って1つまたは複数の光学素子に光学的に結合された出力ポートも含む。出力ポートは、レーザーアレイ内の光の一部のアウト結合を可能とし、それにより、レーザーシステムからの出力照射を提供するように構成される。

10

【0018】

通常、ゲイン材料およびそれぞれの光学素子局所的構成が、ゲイン材料の発光スペクトルの少なくとも一部と、光学素子の対応スペクトルとの間の一定の重なり合いを与えるように選択される。例えば、共振器（リング、ヘリカルなどの任意の他の共振器）の場合では、ゲイン材料は、共振器の共振範囲に対応する波長帯で放射するように選択される。このような共振器の共振範囲は、材料組成（例えば、屈折率）およびその物理的寸法に従って選択される。励起パワーは、閾値ゲインレベル（アレイの損失により決定される）に等しいゲインを与える励起レベルを超えるように選択されるのが好ましい。このような条件下では、アレイはレーザーを発振し、これは、すべてのレージングモードでゲインが閾値ゲインで固定され（ゲイン飽和の非線形作用により）、閾値を超える励起パワーがレージングモードの光パワーに変換されることを意味する。トポロジカルアレイシステムでは、トポロジカルレージングモードは、アレイ中を動き回り（分散曲線により決定される一定の群速度で）、そうすることにより、ゲイン素子を同じ頻度でレーザーの方に追いやる。励起領域は、好ましくは、トポロジカルモードと関連する領域と重なり合うように選択されることは重要である。しかし、トポロジカルレージングモードの安定性は、トポロジカルモードと関連する一部の領域のみが励起を受ける場合、システムの能動的レージングを可能とすることに留意されたい。

20

【0019】

本明細書に記載のトポロジカル絶縁レーザーのトポロジカルモードは通常、アレイの周辺エッジに沿って時計回りおよび/または反時計方向に伝播するエッジモードである。通常、このようなトポロジカルモードは、エッジに対し内部であるアレイの1つまたは複数のライン（行および列）の光学素子内で照射強度に対応する一定の幅を有する。したがって、トポロジカルモードに関連する領域は、アレイのトポロジカルモードのバルクへの一過性の光強度の減衰に対応する一定の幅（本明細書では、トポロジカルモードの幅と呼ばれる）を有し得る。このような幅は、アレイの1～4単位格子の範囲であり得る。いくつかの配置では、励起のための選択領域は、トポロジカルモードの幅に相当する。

30

【0020】

したがって、広義の一態様では、本発明は、レーザーシステムを提供し、該システムは、ゲイン材料を含む光学素子を含む光学素子アレイであって、アレイの光学素子が、それらの間で光学的に結合され、アレイの特定の空間領域に関連する少なくとも1つのトポロジカルモードを維持するように空間的に配置された光学素子アレイ；

40

該トポロジカルモードに対応する空間領域の少なくとも一部内のアレイの一群の光学素子の励起を可能とするように構成された励起ユニット；および

該トポロジカルモードに関連する1つまたは複数の光学素子に光学的に結合された少なくとも1つの出力ポートであって、該レーザーシステムからの光強度の一部を抽出するように構成された出力ポートを備える。

【0021】

いくつかの実施形態では、光学素子アレイは、フォトリック結晶内のフォトリック状態

50

に関連するバンド構造を有するフォトリック結晶として構成されてよく、該バンド構造は、フォトリック状態のバンド間のギャップと交差する１つまたは複数のフォトリック状態を含み；該ギャップと交差する該１つまたは複数のフォトリック状態が、アレイ内の少なくとも１つのトポロジカルモードに対応する。

【００２２】

アレイは、二次元アレイであってよく、該少なくとも１つのトポロジカルモードは、該アレイの周辺部に沿って移動する少なくとも１つのエッジ状態に関連する。

【００２３】

いくつかの実施形態では、光学素子は、それらの間で、逆方向に対して異なる一方向のアレイの行間で結合された光成分に位相シフトを与える空間的变化量を有するように配置され得る。

10

【００２４】

いくつかの実施形態では、該アレイの光学素子間の結合は、異なる行の光学素子間の結合が、選択された位相シフトを一方向の光結合に対し導入し、異なる位相シフトを逆方向の光結合に対し導入するように構成され得る。

【００２５】

いくつかの実施形態では、光学素子は光共振器である。例えば、光学素子は、リング共振器、Ｓ型共振器であってよく、また、１つまたは複数のヘリカル部を含んでもよい。

【００２６】

いくつかの実施形態では、アレイは、該アレイの光共振器間に少なくとも２つの光リンク結合を含んでよく、該光リンクは、対応する共振器間の軸に対して選択された空間シフトを収容し、それにより、該共振器をリンクを介して連結する２つの光路に関連する位相差を与える。

20

【００２７】

光リンクは、対応する共振器間の軸に対してシフトを含むように配置されてよく、該シフトは、アレイの別の行間で変化する。光リンクの位置のシフトは、アレイの別の行間の所定のステップレベルにより変わってよい。

【００２８】

いくつかの実施形態では、アレイは、二次元アレイとして構成されてよく、該アレイは、隣接する光共振器間で結合した複数の光リンクを含み、アレイの異なる行の光リンクを、隣接行の光リンクに対し所定のシフト量だけ変位させて、それにより、時計回りまたは反時計方向に該リンクを通過する光の位相蓄積中に所定のシフトを与える。

30

【００２９】

いくつかの実施形態では、光共振器は、それらの間で直接に結合されてよく、隣接共振器間の内部共振器形状と結合の少なくとも一方が、該光学的トポロジカルモードを与えるアレイに沿って変化する。

【００３０】

いくつかの実施形態では、光共振器は、六角形配置内の第１の結合定数および隣接六角形配置間の、第１の結合定数に比べて小さい、第２の結合定数を特徴とする第１の六角形配置を形成する六角形のアレイで配置されてよい。

40

【００３１】

いくつかの実施形態では、光共振器は、第１の共振周波数を特徴としてよく、該アレイは、アレイの隣接共振器間にそれらの間の結合を可能とするために配置された複数のリンクカプラーを含み、該リンクカプラーは、該第１の共振周波数とは異なる第２の共振周波数を有する。リンクカプラーは、該第１の共振周波数で隣接共振器に強く結合されるように配置される。

【００３２】

いくつかの実施形態では、アレイは、矩形格子、六角格子、ハニカム格子から選択される格子形状、または各ユニットがハニカム格子で形成されるサブアレイユニットの三角格子を有する形状であってよい。

50

【 0 0 3 3 】

少なくとも 1 つのトポロジカルモードは、非ゼロ状態速度を有し得る。

【 0 0 3 4 】

いくつかの実施形態では、ゲイン材料は、少なくとも 1 種の窒化物化合物を含み得る。窒化物化合物は、少なくとも 1 つのガリウム含有層を含み得る。

【 0 0 3 5 】

いくつかの実施形態では、少なくとも 1 つの出力ポートは、選択された領域に沿って配置された少なくとも 1 つの光ファイバーを含み得、該光ファイバーの領域が、アレイのエッジに配置された少なくとも 1 つの光学素子に近接して配置され、それにより、アレイの 1 つまたは複数のトポロジカルモードからの光学的放射のアウト結合を可能とする。

10

【 0 0 3 6 】

レーザーシステムは通常、ゼロ磁界条件下で動作するように構成され得る。より具体的には、トポロジカルモードは、アレイの配置により持続され、一定のまたは部分的に変化する外部磁界を必要としない。

【 0 0 3 7 】

さらに別の広義の態様では、本発明は、トポロジカルレーザーシステムを提供し、該システムは、所定の配置で配置され、特定の波長帯での光照射に関して選択されたゲイン材料で構成される光共振器アレイ；光共振器間で光強度の結合を可能とする隣接する光共振器間に配置された複数の光リンクカプラー；アレイのエッジに沿って 1 つまたは複数の光共振器に隣接して配置され、レーザーシステムからの選択部分の光に結合するように構成された出力結合ユニット；およびアレイのエッジに沿った選択領域を励起するように構成された励起ユニットを備え；該複数の光リンクカプラーは、アレイの行を規定する軸に対して選択されたシフトで配置され、該選択されたシフトはアレイの行間で変化する。

20

【 0 0 3 8 】

さらに別の広義の態様では、本発明は、トポロジカルレーザーシステムを提供し、該システムは、

六角形格子に配置され、複数の六角形配置を規定し、該六角形配置内の第 1 の結合比および第 1 の結合比より小さい隣接六角形配置間の第 2 の結合比を特徴とする光共振器アレイであって、該共振器の共振周波数に関連する波長帯で光学的放射を行うように構成されたゲイン材料を有する光共振器含む光共振器アレイ；

30

該アレイのエッジに沿って、少なくとも一部に励起エネルギーを供給するように構成された励起ユニット；ならびに

該アレイのエッジに沿って 1 つまたは複数の共振器に結合した光学的導波管を含む少なくとも 1 つの出力ポート

を備える。

【 0 0 3 9 】

さらに別の広義の態様では、本発明は、トポロジカルレーザーシステムを提供し、該システムは、

第 1 の共振周波数を特徴とする光共振器アレイ、および第 1 の共振周波数とは異なる第 2 の共振周波数を有する複数のリンクカプラーであって、該リンク共振器がアレイにより規定される格子ベクトルに沿って隣接共振器間に配置され、該リンクカプラーが該第 1 の共振周波数で隣接共振器に強く結合され、該光共振器が、該第 1 の共振周波数に対応する波長で光を放出するように構成されたゲイン材料を有する光共振器を含む、光共振器アレイおよびリンクカプラー；

40

該アレイのエッジに沿って、少なくとも一部に励起エネルギーを供給するように構成された励起ユニット；ならびに

該アレイのエッジに沿って 1 つまたは複数の共振器に結合した光学的導波管を含む少なくとも 1 つの出力ポート

を備える。

【 0 0 4 0 】

50

さらに別の広義の態様では、本発明は、レーザーシステムを提供し、該システムは、ゲイン材料を有する光学素子を含む光学素子アレイであって、アレイの光学素子がそれらの間で光学的に結合され、アレイがアレイの特定の空間領域に関連する少なくとも1つのトポロジカルモードを維持するように空間的に収容された光学素子アレイ；

該トポロジカルモードに対応する空間領域の少なくとも一部内のアレイの一群の光学素子の励起を可能とするように構成された励起ユニット；および

該トポロジカルモードに関連する1つまたは複数の光学素子に光学的に結合された少なくとも1つの出力ポートであって、該レーザーシステムからの光強度の一部を抽出するように構成された出力ポート

を備える。

10

【0041】

光学素子は、共振器、リング共振器、ヘリカル共振器、およびSリング共振器などの半導体レーザー空洞として構成され得る。

【0042】

いくつかの実施形態では、光学素子アレイは、フォトリック結晶内のフォトリック状態に関連するバンド構造を有するフォトリック結晶を与えるように構成されてよく、該バンド構造は、フォトリック状態のバンド間のギャップと交差する1つまたは複数のフォトリック状態を含み；該ギャップと交差する該1つまたは複数のフォトリック状態が、アレイ内の少なくとも1つのトポロジカルモードに対応する。

【0043】

20

いくつかの実施形態では、アレイは、二次元アレイであり、該少なくとも1つのトポロジカルモードは、該アレイの周辺部に沿って移動する少なくとも1つのエッジ状態に関連する。

【0044】

いくつかの実施形態では、該アレイの光学素子間の結合は、異なる行の光学素子間の結合が、選択された位相シフトを一方向の光結合に対し導入し、異なる位相シフトを逆方向の光結合に対し導入するように構成される。

【0045】

いくつかの実施形態では、光学素子は光共振器である。

【0046】

30

いくつかの実施形態では、光共振器はリング共振器である。

【0047】

いくつかの実施形態では、光共振器は少なくとも1つのヘリカル部分を含む。

【0048】

いくつかの実施形態では、アレイは、該アレイの光共振器間に少なくとも2つの光リンク結合を含み、該光リンクは、対応する共振器間の軸に対して選択されたシフトを収容し、それにより、該共振器を、リンクを介して連結する2つの光路に関連する位相差を与える。

【0049】

いくつかの実施形態では、アレイは、二次元アレイとして構成され、隣接する光共振器間で結合した複数の光リンクを含み、アレイの異なる行の光リンクを、隣接行の光リンクに対し所定のシフト量だけ変位させて、それにより、時計回りまたは反時計方向に該リンクを通過する光の位相蓄積中に所定のシフトを与える。

40

【0050】

いくつかの実施形態では、光共振器は、それらの間で直接に結合され、隣接共振器間の内部共振器形状と結合の少なくとも一方が、該光学的トポロジカルモードを与えるアレイに沿って変化する。

【0051】

いくつかの実施形態では、アレイは、矩形格子、六角格子、ハニカム格子から選択される格子形状、または各ユニットがハニカム格子で形成されるサブアレイユニットの三角格

50

子を有する。

【0052】

いくつかの実施形態では、少なくとも1つのトポロジカルモードは、非ゼロ状態速度を有する。

【0053】

いくつかの実施形態では、ゲイン材料は、少なくとも1種の窒化物化合物を含む。

【0054】

いくつかの実施形態では、窒化物化合物は、少なくとも1つのガリウム含有層を含む。

【0055】

本明細書で開示されている主題をよりよく理解するために、また、本発明をどのようにして実際に実施し得るかを例示するために、以降で単なる非限定的な例として添付の図面を参照しながら実施形態を説明する。

【図面の簡単な説明】

【0056】

【図1】本発明のいくつかの実施形態によるトポロジカル絶縁体レーザーシステムの概略図を示す。

【図2】外部場の存在下でトポロジカルモードを維持でき、本発明のいくつかの実施形態によるレーザーシステムに好適な光共振器アレイを図示する。

【図3A - 3F】図2で例示したトポロジカルアレイおよびトリビアルアレイ (trivial array) の計算バンド構造 (それぞれ、図3Aおよび3B)、トポロジカルアレイおよびトリビアルアレイの励起エネルギーの存在下におけるモードの変化 (それぞれ、図3Cおよび3D)、およびトポロジカルアレイおよびトリビアルアレイのレーシングモードの変化 (それぞれ、図3Eおよび3F) を示す。

【図4】アレイ配置のみを利用してトポロジカルモードを維持でき、本発明のいくつかの実施形態によるレーザーシステムに好適な光共振器アレイの概略図を示す。

【図5A - 5C】図4で例示したアレイ配置の計算バンド構造を示す。図5Aおよび5Cは、トポロジカルアレイ配置の時計回りおよび反時計方向のバンド構造を示し、図5Bは、対称性非トポロジカルアレイ配置のバンド構造を示す。

【図6A - 6D】本発明のいくつかの実施形態による、顕微鏡像およびトポロジカルレーザーアレイのコンピューター生成図である。図6Aは、アレイ配置の顕微鏡像を示し、図6Bは、出力格子の電子顕微鏡像を示し、図6Cは、アレイの領域の拡大部分の電子顕微鏡像を示し、図6Dは、いくつかの例によるレーザーシステムの傾斜図を示し、動作および放射を例示する。

【図7A - 7D】トポロジカルアレイおよび対称性非トポロジカルアレイのレーザー動作の測定値を示す。図7Aは、放射対励起強度のグラフを示し、図7Bは、発光スペクトルを示し、図7Cおよび7Dは、種々の励起レベルに対する発光スペクトルの変化を示す。

【図8A - 8H】非トポロジカルレーザーアレイに対するトポロジカル保護の比較を示す。図8Aおよび8Eは、アレイのエッジに沿った発光スペクトルの変化を示し、図8Bおよび8Fは、全外周部励起に対応する放射を示し、図8Cおよび8Gは、半外周部励起に対応する放射を示し、図8Dおよび8Hは、アレイの1つの側の励起に対応する放射および放射の欠如を示す。

【図9A - 9B】本発明のいくつかの実施形態による、アレイ中のエッジ欠陥の存在に関する、トポロジカルレーザーアレイと、非トポロジカルアレイの間の実験比較を示す。

【図10A - 10D】時計回りおよび反時計回りモードの間で差別化するように構成されたSリング共振器を利用したアレイ配置を示す。図10Aは、アレイの電子顕微鏡像を示し、図10Bは、Sリング共振器の例示的アレイ配置の拡大領域を示し、図10Cは、Sリング共振器内の光伝搬を示し、図10Dは、本発明のいくつかの実施形態によるアレイからの方向性のある放射を例示する。

【図11】アレイ配置のみを利用してトポロジカルモードを維持するために好適な、および本発明のいくつかの実施形態によるレーザーシステムでの使用に好適な光共振器のアレ

10

20

30

40

50

イを示す。

【図 1 2】アレイ配置のみを利用してトポロジカルモードを維持するために好適な、および本発明のいくつかの実施形態によるレーザーシステムでの使用に好適な追加のアレイ配置を示す。

【発明を実施するための形態】

【0057】

上記で示したように、トポロジカル絶縁体の現象は、凝縮系物理学で出現し、絶縁バルクおよび量子化された堅牢なエッジコンダクタンスを有する新規物質相を構成する。このようなトポロジカルな効果は、非電子系、特に、光格子（フォトリック結晶）中で観察された。光学システムにおけるトポロジカル絶縁体の従来の配置は、システムのエルミート表現（例えば、光子のゲイン/ロスがない）および/または外部磁界またはトポロジカルエッジ状態を促進する人工ゲージ場の導入の必要性に関連する。本発明は、トポロジカル絶縁体レーザーシステムの新規配置を提供し、その配置では、空間配置および励起特性により、選択モードのトポロジカル特性を用いて、1つまたは複数のレーシングモードを維持する。レーザーシステムは、安定でコヒーレントであるのみならず、アレイ中の欠陥または異常などの局所的変化に対して堅牢な、ゲインを有する光学素子アレイからの放射を可能とする。

【0058】

本発明のいくつかの実施形態によるトポロジカル絶縁体レーザーシステム 100 を例示する図 1 について説明する。レーザーシステム 100 は、アレイ 200 を形成する所定の空間的配置で配置された光学素子 50 のアレイ 200 を含む。光学素子 50 は、以下でさらに詳細に記載されるゲイン材料を有する複数の光学素子を含む。光学素子 50 の配置および光学素子間の結合は、アレイが、特定の空間領域 150 に関連する 1つまたは複数のトポロジカルモード 70 を有するように選択される。通常、トポロジカルモードはエッジモードであり、すなわち、トポロジカルモードは、アレイのエッジに沿った空間領域と関連し、以降でより詳細に記載のようにアレイ 160 のバルク中への限られた侵入深度を有する。レーザーシステム 100 はまた、空間領域 150 の少なくとも一部に沿った少なくとも一群の光学素子 50 に励起を与えるように構成された励起ユニット 300；および 1つまたは複数の光学素子に結合され、それからの少なくとも一部の電磁放射線を抽出し、レーザーシステム 100 の出力放射を可能とするように構成された少なくとも 1つの出力ポート/カプラー 60 を含む。通常、光学素子 50 は、光共振器などのレーザー空洞であってよい。光学素子 50 は、リング共振器、ヘリカル共振器、および S リング共振器などであってよい。簡単にするために、本明細書では、光学素子を共振器と呼ぶこともある。

【0059】

通常、アレイ 150 のエッジに沿った空間領域に配置され、アレイのトポロジカルモードに関連する光学素子 50 は、レーザーシステムの光学的放射に関与するゲイン材料で構成される。いくつかの配置では、アレイの光学素子、例えば、アレイのバルク 160 内の素子もまた、ゲイン材料で構成される。いくつかの他の配置では、アレイの光学素子は、全てゲイン材料で構成される。

【0060】

レーザーシステム 100 は、トポロジカル絶縁体レーザーシステムとして構成される。より具体的には、レーザーシステム 100 のレーシングモードは、トポロジカルに保護された輸送を示し、例えば、このモードでは、光がアレイのエッジに沿って単一方向に伝播し、散乱および異常に不感受性で、エッジの形状に影響を受けない。アレイ 200 のトポロジカル特性は、製造および動作異常および欠陥（例えば、光学素子 55 および 57 により例示される）に堅牢で、高度に効率的なレーザーを形成し、レーザー閾値を超える高いゲイン値でも単一モードレーシングを提供し得る。これは、トポロジカルモードの全体的な性質の結果であり、このモードは、他のモードとの光相互作用を減らし、従って、トポロジカルモードに沿って光を伝播させる。例えば、トポロジカルモードは通常、シフトした光学素子 57 により例示されるようなアレイ構造の異常に起因する局所効果により影響

を受けない。トポロジカルモード 70 の伝播経路に沿った光学素子 55 のさらになる欠陥は、モードがアレイのバルク中に僅かに侵入して伝播を続けるようにトポロジカルモードのシフトを生じさせ、欠陥位置 55 を効果的にスキップする。

【0061】

結合光学素子のトポロジカル絶縁体モードを発生させる種々の空間的配置（例えば、共振器）が存在する。通常、アレイ内での光照射の伝播のための特定の相反則または時間対称性の破壊は、このようなトポロジカルモードを発生させる場合がある。トポロジカルモードを発生させ得る結合共振器の平面アレイに関連するいくつかのアレイモデルが既知である。上記で示したように、発明者らは、ゲイン材料の導入が、相反則の条件を変え、それに対応してトポロジカルモードの条件を変え得ることを見出した。しかし、飽和ゲイン材料の存在が（好適な励起条件下で）、アレイに対する非線形性を導入し、このようなトポロジカルモードを維持する場合がある。相反則破壊の条件は、アレイ配置間で異なり得ることに留意されたい。外部場（例えば、磁界）の使用は、この条件を種々のアレイ配置において可能とする。本発明のいくつかの実施形態では、外部場に対する要件とは矛盾して、特定のアレイ配置が、空間的アレイ配置を利用して、トポロジカルレージングモードの持続を可能とし、種々の用途に使用可能なレーザーシステムを生じ得る。

【0062】

通常、いくつかの配置では、アレイ 200 の光学素子 50 は、隣接する光学素子 50（例えば、共振器）間の結合において、特定の位相シフト非対称性をもたらすように配置される。このような位相シフト非対称性は、他の方向の同じ光学素子間の結合に対して、光学素子間で一方向に結合した光成分により蓄積される位相の変化と関連し得る。いくつかの配置では、このような結合は、光学素子間の直接的結合であり得、例えば、強く結合した共振器のアレイを形成し得る。いくつかの他の配置では、複数のリンクカプラーが各光学素子対間に配置され得る。リンクは、アレイの軸に対し適切に整列させることにより、目的の位相変化量を導入するように配置され得る。

【0063】

六角形の単位格子当たりゼロの正味の流束を有する不均一な外部場の存在下で、トポロジカルエッジモードを持続させるように構成されたハニカム格子を例示した図 2 について説明する。格子は、ハニカム格子中に配置された複数の共振器 50 を含む。各共振器は、実数ホッピングパラメーター t_1 により最近接共振器と結合し、複素パラメーター $t_2 e^{i\phi}$ によりその第 2 の隣接共振器と結合する。ハニカム構造の 2 つの副格子は、同一のオンサイトポテンシャル（例えば、屈折率および共振器の寸法で測定して）を有する。通常、格子が受動的な場合、すなわち、なんらのゲイン材料または損失を含まない場合、アレイ配置は、2 相：（Haldane フラックスパラメーター）が 0 または π の場合にはトリビアル相、および $\pi/2$ の場合にはトポロジカル相、を示す。トポロジカル相では、エッジ状態のエネルギーの範囲は、トポロジカルギャップを越えて広がり、このアレイ配置では、通常、 $t_2 \sin(\phi/2)$ に比例する。通常、トポロジカル相の変化は、外部場、例えば、アレイに印加された不均一磁界により与えられる。

【0064】

本発明のいくつかの実施形態では、ハニカムアレイは、アレイのバルク中への小さい侵入深度を有するジグザグ型エッジ（これは、図 2 の Z ラインで示される）を有するように設計される。このエッジプロファイルは、アレイのエッジに沿った光路が、直接的な、最隣接物と次の隣接物との相互作用を示すので、トポロジカルエッジモードの促進を可能とし、アレイの解析を単純化する。しかし、エッジモードのトポロジカルな性質は通常、以降で例示されるような欠陥エッジを含む、アレイの異なるエッジで維持されることに留意されたい。このレーザーシステムの場の変化は、下記式により記載でき、

【数 1】

$$i \frac{\partial \vec{\psi}}{\partial t} = H_{\text{Haldane}} \vec{\psi} - i\gamma \vec{\psi} + \frac{ig\mathbb{P}}{1+|\vec{\psi}|^2/I_{\text{sat}}} \vec{\psi} + H_{\text{output}} \vec{\psi}, \quad (\text{式 1})$$

10

20

30

40

50

式中、

【数 2】

$$\vec{\psi}$$

は、アレイ素子のモード振幅を包含する列ベクトルであり、 H_{Haldane} は、標準的 H_{aldane} ハミルトニアンであり、これは、単一共振器の共振周波数 ω_0 、ホッピング
 常数、 $T_1, 2$ 、および H_{aldane} フラックスパラメーター に依存し、アレイの共振
 器間の結合を記述する運動方程式に基づいて駆動され得る。さらに、 γ は、各共振器の損
 失であり、線形損失（すべての連続波レーザーの場合のように）であると考えられている
 。しかし、発明者らは、飽和可能損失はまた、トポロジカル効果を与え得、アレイの能動
 的レージング動作を可能とすることを見出したことに留意されたい。式 1 の第 3 の項は、
 本質的に飽和可能な I_{sat} である誘導放出による光学ゲイン g を表し；式中、

10

【数 3】

$$\mathbb{P}$$

は、励起されておらず、従って損失を誘導するバルク領域 160 とは対照的に、トポロジ
 カルモード 150 に関連するエッジ領域に沿った励起の空間的プロファイルを意味する。
 式 1 の右側の第 4 の項では、 H_{output} は、出力カブラー 60（例えば、共振器の半無
 限鎖により表される）を表し、レーザーパワーを出力できる解放系として機能するシステ
 ムを提供する。

20

【0065】

エッジモードのレージングを促進するために、励起が外周部 150 上の共振器のみに与
 えられ、これらの共振器は通常、トポロジカルモードの空間領域と関連し、好ましくは、
 ゲイン材料を有する複数の光学素子を含む。より好ましくは、エッジ領域に沿った全ての
 光学素子がゲイン材料を有する。種々の配置では、ゲイン材料は、アレイの全ての共振器
 中にあるが、しかし、このような材料は、十分な（飽和可能な）励起下でのみ効力
 のあるゲインを与え、一方で、損失として作用する励起をしない。

【0066】

30

図 3 A ~ 3 F は、図 2 で例示された、トポロジカル配置（例えば、 $\theta = \pi/2$ ）および
 $\theta = 0$ の場合の「垂直」配置に対する、レーザーアレイシステム中のレージングプロセス
 の解析を示す。図 3 A および 3 B は、ゲイン材料のない、それぞれトポロジカルおよび垂
 直配置に対する計算バンド図を示し；図 3 C および 3 D は、ゲイン材料 NG のゼロ励起の
 場合およびレーザー活性 G に対する閾値励起の場合、ならびにレージングモードの場合の
 、トポロジカルおよび垂直配置における実数および虚数スペクトル部分の計算による変化
 を示し；および図 3 E および 3 F は、それぞれ、トポロジカルおよび垂直配置に対するレ
 ージング閾値を超える励起の増加に伴うレーザースペクトルの変化を比較している。レー
 ジングモードの変化は、図 3 E のトポロジカル配置における単一レージングモードおよび
 図 3 F の非トポロジカル配置における 3 つのレージングモード（1、2 および 3 と標識）
 を示す。

40

【0067】

図 3 A に示すように、トポロジカルアレイ配置は、トポロジカルに保護されたバンド間
 でギャップと交差する一方向エッジ状態 TS を伴うバンドギャップを有する。図 3 B の非
 トポロジカル（本明細書ではトリビアルまたは垂直とも呼ばれる）アレイのバンド構造は
 、バンドギャップを示さず、従って、保護状態を示さず、エッジ状態は縮退している。図
 3 C および 3 D のスペクトルの実数および虚数部分を示すスペクトルの変化は、ゼロ励起
 NG と、発振閾値励起 G との間でスペクトルの変化を示し、加えて、図 3 E および 3 F の
 スペクトルの変化は、トポロジカル配置で単一レージングモードの生成を示し、一方、非
 トポロジカルアレイでは予測されたマルチモード動作の生成を示す。図 3 E に示すように

50

、図2のアレイ配置を利用するトポロジカル絶縁体レーザーは、閾値ゲイン励起の少なくとも10倍までの励起エネルギーに対する単一モードレージングを維持し得る。これは、非トポロジカルアレイが、閾値ゲインのちょうど2倍のゲインレベルで、3つまたはそれを超えるレージングモードを有するマルチモードになるためである。

【0068】

別の選択肢の、および場合によっては、有利なアレイ配置は、図4に例示されている。この実施例では、アレイは、非周期パラメーターに従って、1つまたは複数のトポロジカルモードを与える非周期的共振器配置に基づいている。この実施例のアレイは、矩形アレイ格子中に配置された複数の共振器50を含むが、種々の他の対称性も用い得る。共振器は、対応する複数の結合リンク52および54を介してそれらの間で結合される。図4の拡大領域に示すように、アレイの異なる行に配置されたリンク54Aおよび54Bは、アレイ共振器の一般軸、異なる行の軸A1およびA2に対してシフトされて、共振器間で一方向（時計回りCW）に光結合により蓄積される位相シフトの、他の方向（反時計回りCCW）での光結合に対し、変化を与える。

【0069】

通常、結合リンク52および54は類似であり、結合軸により変化する、すなわち、この実施例では、リンク54は、水平結合を与え、リンク52は、垂直結合を与える。少なくとも1つの選択軸の結合リンクが対応する軸に垂直の方向に沿った種々のシフトで構成される、他の格子配置（六角形格子などの）のために、追加の軸を使用し得ることに留意されたい。また、通常、目的のトポロジカルアレイ挙動を得るために、結合リンク54は、行間でシフトされ、一方、結合リンク52は、アレイ構造に従って、周期的に配置され得ることに留意されたい。また、用語の水平および垂直、ならびに行および列は、本明細書では、単純化のために使用されるが、アレイの回転により、観察者の視点に従って、軸間で切り替え得ることに留意されたい。

【0070】

図4のアレイ配置は、マイクロリング共振器の非周期的トポロジカルアレイを例示する。示したように、この配列は、結合リンク52および54を有する結合共振器50の格子に基づいており、リンク54は、アレイ構造に対して、非周期的配置で構成され、本明細書では、非周期的カプラーと呼ばれる場合もある。このようなアレイ配置は、トポロジカルモードを発生させ得、同時に、外部場の使用を必要とせず、従って、従来の材料および現在の半導体レーザー（ゲイン材料配置）技術を利用して、使用可能なレーザーシステムを提供する。

【0071】

結合リンク52および54の配置は、時計回りおよび反時計回りフォトリック状態の間を区別する、効果的（人工の）ゲージ場を提供する。このようなアレイ配置は、ゲインを含まない受動的／線形光共振器で提供されてきた。しかし、飽和ゲイン材料により表される非線形性のシステムへの導入が、相反則に対する条件を変えると考えられることに留意すべきであり、これは上記されている。より具体的には、共振器の線形配置において、各共振器50における時計回り（CW）および反時計回り（CCW）モードの両方は、異符号を有するゲージ場を有する。これは、アレイの縮退状態を生じる、すなわち、CWモードで維持される任意の周波数に対し、対応するCCWモードが存在する。本技術に従って、ゲイン材料が共振器50中に導入されると、ゲイン／ロス特性が加わり、ゲイン飽和の非線形効果により、CWとCCWモード間で必然的相互作用がもたらされ、CWとCCWモード間でモード競合が生じ、1つのモードが他のモードに対し優位になると、効果的な相反則の破壊が起こる。

【0072】

通常、本発明のいくつかの実施形態によるトポロジカル絶縁体レーザーシステムは、従って、選択形状（例えば、矩形、六角形八ニカムなど）の格子に配置された結合半導体レーザー空洞（例えば、共振器50）のアレイにより構成され得る。レーザー空洞は、複数の結合リンク52および54により結合され、結合リンク54は、アレイ構造の少なくとも

10

20

30

40

50

も 1 つの軸に沿った格子配置に対してシフトされるように構成される。光が空洞をほとんど抑制する場合には、リンクは通常、共振器 5 0 と非共振であるように構成され得る。

【 0 0 7 3 】

非周期的 / シフトしたリンク配置は、1 つの軸に沿った、例えば、水平軸に沿った光結合で蓄積される、軸依存性（例えば、垂直方向に依存性の）位相シフトを与える。上記に示すように、このような位相シフトは、隣接行（または列）の光リンクに対するアレイの異なる行（または列）に関連する光リンクの位置の所定のシフトにより与えられ得る。結合リンク 5 4 A および 5 4 B のこの位置のシフトは、時計回りまたは反時計方向の光結合のための光路の変化、従って、異なる位相シフトを蓄積した光を与える。

【 0 0 7 4 】

トポロジカルエッジモードのレージングを促進するために、励起ユニット（図 1 の 3 0 0 ）は、励起エネルギーを、トポロジカルモードにより占有される空間領域に関連するアレイの外周部に供給するように構成される。この励起は、対応する共振器 5 0 中のゲインの励起をもたらし、一方で、内部共振器 5 0 は、ゲインをもたらさないか、または損失が大きい。光は、出力カプラー（図 1 の 6 0 ）を介して、空洞から出て、レーザーシステムから出力放射をもたらす。通常、結合リンク 5 4 および 5 2 は、透過性（ゲインも損失もない）であるが、いくつかの配置では、リンク 5 4 および 5 2 は、ゲイン材料を含み、それにより、レージングに関与し得るか、または損失をもたらし得る。リンクが共振器 5 0 から非共振である場合、リンク 5 4 および 5 2 は、ゲイン材料を導入した場合でも、限られたレージング活性をもたらすことに留意されたい。

【 0 0 7 5 】

図 4 に例示した非周期的アレイ配置のバンド図を示す 5 A ~ 5 C について説明する。図 5 A は、 $\pi/2$ 位相フラックスを有する時計回りモードのバンド図を示し；図 5 B は、異なる行（周期的アレイ）のリンク間のシフトのない類似のアレイ配置のバンド図を示し；図 5 C は、図 5 A の鏡像を与える反時計回りモードに対する非周期的アレイのバンド図を示す。図 5 A の矢印 D 1 および D 2 は、全体アレイに対して、各共振器内で時計回り経路を有しながら、反時計回りおよび時計方向に伝播するモードを図示する。図 5 C の類似の矢印は、共振器内で反時計方向を有しながら、アレイに沿ったモード伝播の方向を示す。図示するように、トポロジカル相は、 $\pi/2$ 位相フラックスと組み合わせられ得るので、共振器内の C W および C C W の両方の周回に対する 2 つのトポロジカルモードが維持され得る。したがって、図 5 A に示すトポロジカルモードは通常、図 5 C のモードと結合され、類似のエネルギーを有し得る。さらに、C W および C C W モード間の相互作用をもたらすゲイン材料の存在下では、一方向に移動するトポロジカルモードは通常、逆方向のトポロジカルモードにエネルギーを移し、両方向でのエッジモードの周回を与え得る。したがって、図 5 A および 5 C は、このアレイ配置トポロジカルモードが形成され、これらのトポロジカルモードは、各共振器内、ならびにアレイのエッジ周辺の伝播とは異なる全体の時計回りおよび反時計回りモード内で、C W および C C W の両方向に関連するモードを含み得ることを示す。いくつかの配置では、S 型共振器を使用し得、このような共振器は、共振器内で一方向のみを維持するように、例えば、図 5 A に例示されるバンド構造のみを与えるように構成されることに留意されたい。さらに、バルクバンドに対応する周波数を有するエッジ状態 B E が生じ得る。図 5 C は、C C W モードのみのアレイの励起から得られた類似のバンド構造を示す。

【 0 0 7 6 】

本発明のいくつかの実施形態によるレーザーシステムの実験的配置を示す図 6 A ~ 6 D について説明する。図 6 A に示すように、10 X 10 結合リング共振器の配置を含むアレイを有効なプラットフォーム上に作製した。このプラットフォームは、ダイオードレーザーゲイン材料として機能する、垂直に積層した 30 nm 厚さの InGaAsP 量子井戸を含む。アレイの共振器 5 0 は、上述のようなリンクを介してそれらの間で結合され、アウト結合回折格子を用いてアレイを導波管に結合する出力カプラー 6 0 が設けられる。アレイの上面像が図 6 A で示され、1 つの共振器の周辺の拡大領域が図 6 C で示される。出力

10

20

30

40

50

波長を選択するアウト結合回折格子配置が図 6 B で示され、導波管の末端で標識された図 6 A 中の領域に対応する。図 6 D は、励起領域をマーキングし、回折格子からの出力放射を示す、レーザーシステムの三次元図を示す。

【 0 0 7 7 】

上述のように、この実施例でのアレイは、リンクリングを介して相互に結合されるリング共振器の正方形格子により構成される。リンクリングは、主リング共振器に対し反共振となるように設計される。この全誘電性実施例では、仲介リンクは、Y 軸に沿って、リング共振器に対して空間的にシフトされ、非対称セットのホッピング相を導入する。リンクの空間シフトは、Y 軸に沿って連続的に位相シフトを増加させるように選択される。位相シフトは、 ± 2 の整数倍で増加し、ここで $= 0.25$ であり、通常は $0.1 \sim 0.4$ の間になるように選択され得る。この配置は、任意のブラケット (4 リングおよび 4 リングからなる) に沿った周回が ± 2 の合計蓄積位相を生じ、符号はこの単位格子に沿った経路の方向に依存する。これは、合成磁界を有する格子を提供し、図 5 A および 5 C に示すような、2 つのトポロジカル的に非トリビアルなバンドギャップを形成する。

【 0 0 7 8 】

この実施例の共振器 5 0 は、動作波長で単一横モード条件を保証する断面を有するように選択される。より具体的には、この実施例では、レーザーシステムは、近赤外から中間赤外波長の間で操作され、さらに、この特殊配置では、 1550 nm の波長まで操作される。したがって、共振器寸法は、 500 nm 幅で 210 nm 高さである。リング共振器と非共振リンク間の名目上の分離は、 150 nm であり、従って、2 つの周波数バンドギャップになり、それぞれが 80 GHz (0.64 nm) の幅を有する。2 つのバンドギャップのスペクトルサイズは、仲介リンク (この実施例では、リンクは楕円形のレーストラッキングとして構成された) を介した二元系の一次共振器の周波数スプリッティング (0.8 nm) の測定を実験的に用いることにより得られた。

【 0 0 7 9 】

上述のように、レーザーシステム 1 0 0 は、少なくともアレイの一群の光学素子の励起を可能とするように構成された励起ユニット 3 0 0 を含む。この実施例では、アレイの共振器 5 0 は、光学的に励起されて、トポロジカル (保護された) エッジモードのレージングを促進する。光学的励起は、 10 ナノ秒 のパルス出力を用いて 1064 nm の波長の光照射を利用し、周辺共振器に向けられる。通常、励起条件下にある一群の光学素子 / 共振器は、少なくとも一部のアレイの周辺部に沿った素子を含み得、アレイのバルク中へ侵入した $1 \sim 4$ 光学素子の幅を有し得る。しかし、いくつかの配置では、最も外側の共振器のみが励起を受ける。光学的励起の場合には、光学的励起は、アレイ構造および選択励起領域に応じて選択された空間的配置を有する 1 つまたは複数の振幅マスクを利用し得る。

【 0 0 8 0 】

上述のように、レージング活性を得るために、本発明のレーザーシステムは、通常はトポロジカルモードの空間配置に応じて選択されたアレイの領域、より具体的には、トポロジカルアレイの周辺部 / 境界を励起するように構成された励起ユニットを利用する。図 7 A ~ 7 D を含む図 7 は、 $= 0.25$ を有する 10×10 トポロジカルアレイおよび $= 0$ の対応するトリビアル対応物に対する、出力強度対励起密度に関連する測定されたデータを示し、リンク間でシフトがないこと (図 7 A) ; 23.5 kW/cm^2 で励起した場合のトリビアルおよびトポロジカルアレイからの発光スペクトル (図 7 B) ; およびトポロジカル (図 7 C) およびトリビアル (図 7 D) アレイに対する励起強度の関数としてのスペクトルの変化を示す。図 7 A の結果は、トリビアルアレイに比べて、トポロジカルアレイのスローブ効率の 3 倍の増強を示す。さらに、図 7 C の結果は、レーザーシステムのアレイからの単一モード、狭線幅レージングを明確に示す。

【 0 0 8 1 】

測定されたトポロジカルおよびトリビアルアレイに対する図 7 A の光 - 光曲線は、トポロジカルシステムがそのトリビアル相当物より高い効率でレーザーを発振することを示す。図 7 B ~ 7 D の測定スペクトルは、トポロジカルアレイを利用したレーザーシステムは

10

20

30

40

50

、図 7 C に示すように、広範囲の励起密度にわたり単一モードを有する光学的放射を与えることを示す。これは、トリピアルアレイが、図 7 D に示すような、かなり広い線幅を有する複数の波長で発光するためである。通常、主要な（長手方向）レージングモードで放出される出力を比較すると、トポロジカルアレイは、トリピアルアレイに比べて、桁違いの良好な性能をもたらす。この性能の差異は、トポロジカルエッジモードの物理的特性が原因である。これは、レージングならびに異常および欠陥などの不完全性に対する堅牢さに関与する単一（または、ダブル）モードを与えるトポロジカルモードのモードの選択によりもたらされる。これは、トリピアルアレイにおいて、レージングモードが損失の大きいバルク（周辺部励起配置と仮定して）中に広がり、抑制された放射を起こすことによる。さらに、出力カプラーの使用は、隣接するモードに対する損失を誘導するので、トリピアルレージングモードにカプラーに関連する領域を回避させる。加えて、ゲイン材料によりもたらされるモード間の相互作用が、トリピアルアレイのモードの間に光を送信し、それにより、トリピアルアレイのマルチモード挙動を生ずる。

10

【 0 0 8 2 】

通常、トポロジカルモードは、特定の指数関数的なバルク中への侵入を有することに留意されたい。しかし、本発明により構成された光学素子アレイ（空洞、共振器 5 0 ）は、アレイの周辺境界に強く限定されたトポロジカルエッジ状態をもたらし、飽和可能ゲイン材料によりもたらされる非線形相互作用の存在下で、これらの状態のトポロジカルな性質を維持する。さらに、トポロジカルモードは本来エッジ束縛であるので、レージングモードは常に、出力カプラー 6 0 と接触しており、従来のレーザーシステムに比べて、より大きい出力比を可能とする。また、上述のように、トポロジカルモードは非局在性で外周部のまわりに均一に広がるので（単一モードでは）、トポロジカルレージングモードは、異常および欠陥に対し不感受性のレーザーシステムを可能とする。これは、任意の他の寄生モードを抑制することにより、システムにおいて全ての利用可能なゲインを使用可能にする。

20

【 0 0 8 3 】

トポロジカルレージングモードのこれらの特徴は、本発明のいくつかの実施形態に従って、トリピアルアレイ配置に対して、トポロジカルアレイの放射を比較した実験結果を示す図 8 および 9 に例示される。図 8 は、トリピアルアレイ（図 8 A ）およびトポロジカル（図 8 E ）アレイにおけるアレイ周辺部の異なる位置のスペクトル成分の変化；ならびに全体（図 8 B および 8 F ）および部分的（トリピアルアレイに対し図 8 C および 8 D 、トポロジカルアレイに対し図 8 G および 8 H ）励起プロファイルに対する放射の変化を示す。図 9 A および 9 B は、エッジ欠陥に応答した、トポロジカルモード（図 9 A ）およびトリピアルアレイの境界モード（図 9 B ）の変化を示す。

30

【 0 0 8 4 】

これらの結果は、アレイのトポロジカルな特徴を示し、従って、本発明のいくつかの実施形態によるレーザーシステムに対し効率的なレージング動作を提供する。図 8 A および 8 E に示されるアレイの異なる領域から放出された光のスペクトルの変化は、アレイの周辺部近傍のレージングモードの局在化または全体的な性質に対する指標を与える。トリピアルアレイに対しては、スペクトルは格子の周りで変化し、図 8 A に示すように、放射は、1 5 4 3 n m ~ 1 5 7 0 n m に及ぶ広い波長帯にわたり発生する。これは、一般的なアレイで予測される局在化領域でのレージング活性を示す。しかし、図 8 E は、アレイの周辺部に沿った一定の発光スペクトルを示す。より具体的には、アレイの周辺部に沿ったそれぞれの位置で、類似の波長を有する放射が得られる。これは、単一の拡張トポロジカルエッジモードに対応する単一モードレージングを示し、トポロジカルに保護された輸送の直接発現を与える。

40

【 0 0 8 5 】

図 8 B ~ 8 D および 8 F ~ 8 H に示される部分的励起は、追加のトポロジカル輸送特性を例示する。図で示すように、トポロジカル配置では、レーザー活性は、部分的な励起（外周部の領域のみの励起）下で維持される。より具体的には、図 8 B および 8 F では、励

50

起されているアレイの全体周辺部は、トポロジカル配置では高レーザー効率をもたらす、トリビアルアレイ配置では一定のレーザー活性をもたらす。図 9 C および図 9 G は、外周部の半分のみの励起を示す。このような部分的な励起は、図 8 C のトリビアルアレイにおける任意のレーザー動作を停止させるが、トポロジカルアレイのレーザー動作は、図 8 G に示すように維持される。この挙動は、ただ 1 つのアレイエッジ（好ましい励起領域の 1 / 4 に相当）の励起でも維持される。レーザーアレイの一部分的励起では、バルク中ならびに外周部に沿った放射の両方は大きく抑制され、外周部に沿った光の強度を低下させる。しかし、トポロジカルアレイは、外周部に沿った光伝搬を維持し、光学的放射をもたらすが、それは幾分低減され、出力カプラーの回折格子の 1 つのみが強力な放射を与える。これは、トポロジカルレージングモードが外周部の周りに広がり、出力ポートまで移動することを示す。発明者らは、多くの試料の実験的試験において、類似の結果を見出し、これらの結果は、製造不完全性により影響されず、アレイ配置および励起配置により与えられるトポロジカルモードに関係していることを示している。

10

【 0 0 8 6 】

欠陥に対する堅牢さが、図 9 A および 9 B の実験結果で示される。2 つの選択された共振器がトポロジカルアレイ（図 9 A ）およびトリビアルアレイ（図 9 B ）の周辺部から除去された。アレイからの放射が励起下で測定された。トポロジカル配置の発光から示されるように、トポロジカルレージングモードは、欠陥を迂回し、レージング動作を維持するが、一方、トリビアルアレイでは、放射光の強度は、かなり低下する。

【 0 0 8 7 】

20

上記で示したように、本発明によるレーザーシステムのアレイ中を伝播する光との飽和ゲイン相互作用に関連する非線形性は、C W と C C W トポロジカルモードとの間の相互作用を生じさせ得る。これに関連して、S リングリング共振器の、本発明のいくつかの実施例によるレーザーシステムのアレイ中の能動的共振器 5 0 としての使用を示す図 1 0 について説明する。この実施例では、アレイの共振器（5 0 ）は、内部「S」形状導波管をさらに含み、それにより、C W と C C W モードとの間で区別することにより、相反則を破る。

【 0 0 8 8 】

全体のアレイ配置は、図 4 で例示したものと類似であり、主共振器が S リングリング共振器で置換され、仲介リンクが類似のままである（異なる行のリンク間でシフトを有し、目的の位相シフトをもたらす）。S リング共振器は、選択的単スピン様方式を提供する、すなわち、C W または C C W 方向において、共振器により維持され、他のモードが抑制される。図 1 0 A は、S リング共振器を利用したアレイの顕微鏡像を示し；図 1 0 B は、アレイの拡大領域を示し；図 1 0 C は、単一 S リング共振器を示し；図 1 0 D は、上述の外周部励起スキームによるレーザー放射の実験的測定を示す。図 1 0 D に示すように、S リング共振器の C W と C C W モード間の選択性は、出力格子の 1 つのみからの放射をもたらす。これは、一方向で移動し、S リング共振器にキラリティーにより選択されたトポロジカルモードでレージング活性を可能とする、トポロジカルモードの抑制に起因する。

30

【 0 0 8 9 】

通常、S リング共振器は、ゲイン飽和に関連する非線形性の存在下で、輸送のトポロジカル保護に対し単方向性を可能にするキラル素子である。実験で観察された抑制は、共振器内の C W と C C W モード（しばしば、各共振器における右手スピンおよび左手スピンと呼ばれる）間の 1 2 d B の抑制より大きい。S リング共振器内の界分布は、図 1 0 C に示され、これは、通常スピン様モード識別を与える S 構造による高度の出力再循環を示す。

40

【 0 0 9 0 】

本発明のいくつかの実施形態によるレーザーシステムで使用可能な追加のアレイ配置を例示する図 1 1 について説明する。この実施例では、レーザーシステムは、隣接共振器間で 2 つの異なる結合定数を有するハニカム格子に配置された光共振器 5 0 （光学空洞またはリング共振器）のアレイ 2 0 0 を含む。例えば、共振器 5 0 は、六角形配置 H 1 の共振器間の距離 D 1 および六角形配置 H 2 の距離 D 1 より長い距離 D 2 で配置される。このアレイ配置は、配置 H 1 内の隣接共振器 5 0 間でより強力な結合を形成し、一方、異なる H

50

1 配置間でより弱い結合を形成する。共振器 50 は、ゲイン材料を有する複数の共振器を含む。より具体的には、いくつかの配置では、アレイ 200 の全ての、またはほぼ全ての共振器 50 は、ゲイン材料で構成される。いくつかの他の配置では、アレイ 200 のエッジに沿って位置する共振器 50、またはアレイ 200 のエッジから、2 ~ 5 の共振器（または 1 ~ 2 六角形格子ユニット H1）の幅のバンドを形成する共振器 50 は、ゲイン材料で構成される。

【0091】

レーザーシステムは、図 1 で例示される励起ユニットおよび少なくとも 1 つの出力ポートをさらに含む。励起ユニットは、アレイ 200 のエッジに沿った領域に励起エネルギーを供給するように構成され、それにより、アレイ配置により形成された 1 つまたは複数のトポロジカルモードに対し励起をもたらす。出力ポートは、アレイ 200 のエッジに沿って配置された 1 つまたは複数の共振器 50 に結合され、アレイからレーザー放射の出力を形成する。上述のように、この実施例のアレイ 200 は、六角形配置 H1 の第 2 の格子に加えて、共振器ユニット 50 の第 1 の格子を規定する種々の距離 D1 および D2 で構成される。この場合、六角形配置 H1 間の結合定数は、各六角形配置 H1 内の結合よりも小さい。このアレイ配置の共振器 50 は、それらの間で強くまたは弱く結合し得ることに留意されたい。さらに、共振器 50 間の結合は、直接であり得るか、または上記図 4 で例示のように、光結合リンクを利用し得る（しかし、リンク間で何らかのシフトを必要とすることに留意されたい）。

【0092】

本発明のいくつかの実施形態によるレーザーシステムのアレイ配置 200 の追加の実施例が図 12 に例示されている。アレイ 200 は、共振器 50 の矩形アレイとして構成され、それらの間で光リンクカプラー 58 により結合されている。リンクカプラー 58 は、形状および/または共振器 50 の共振周波数に対し、共振しない有効な屈折率で選択される。共振器 50 は、それらの隣接リンクカプラー 58 と、共振器 50 の共振周波数に近い範囲の周波数で強力に結合され、それにより、光は共振器間で高速に送信され、リンクカプラー 58 内の光の強度は、共振器 50 中の光の強度に比べて低い。前述のアレイ配置と同様に、図 12 のアレイ 200 は、トポロジカルエッジモードを生ずる。したがって、複数の共振器 50、および可能性として、いくつかのリンクカプラー 58 は、共振器 50 の共振周波数に対応する波長の光を放出するゲイン材料で構成される。レーザーシステムは、励起エネルギーをアレイ 200 のエッジ（例えば、アレイの 2 ~ 4 単位格子の幅を有する）に励起エネルギーを供給するように構成された励起ユニット、およびアレイからの光を結合し、レーザーシステムの出力を与えるように構成された 1 つまたは複数の出力ポート 60 をさらに含む。

【0093】

したがって、本発明は、1 つまたは複数のトポロジカル的に保護されたレージングモードを利用するように構成されたレーザーシステムを提供する。レーザーシステムは、共振器または空洞などの、選択ゲイン材料を有する結合光学素子のアレイ、励起エネルギーを少なくとも一群の光学素子に供給（通常、アレイの外周部に沿って）するように構成された励起ユニット、および 1 つまたは複数の光学素子に結合し、レーザーシステムからの出力放射を可能とする出力ポートをベースにしている。光学素子アレイは、形状および素子間の結合配置により、一方向（例えば、時計回り）の所与の経路に沿って結合した光成分間で、他の方向（例えば、反時計回り）に対して、種々の位相シフトをもたらすように構成され、それにより、1 つまたは複数のトポロジカルエッジモードを持続させる。

【0094】

トポロジカル絶縁体レーザーシステムは、トポロジカルモードのレージング性能を高める特徴を利用する。本発明のレーザー配置は、マイクロ共振器の 2D アレイの使用を可能とし、トポロジカルに保護された散乱のないエッジモードを拡張することにより、異常および欠陥に対し堅牢な、単一モードレーザー動作を提供する。レーザーの単一縦モード動作は、従来のレーザーアレイ配置と比較して、より高いスローブ効率をもたらす。通常、い

10

20

30

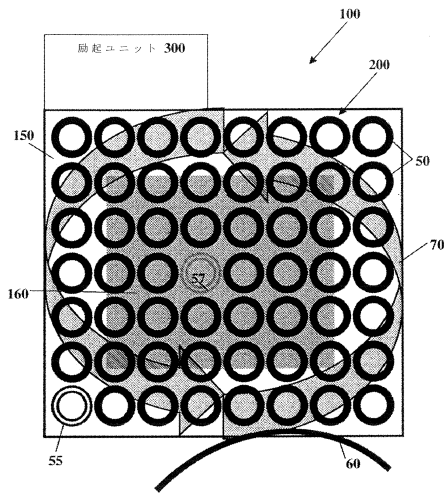
40

50

くつかの実施形態では、レーザーシステムは、新材料の磁気ユニットを必要とすることなく、半導体レーザーの最新製造技術により構成され得る。

【図面】

【図 1】



【図 2】

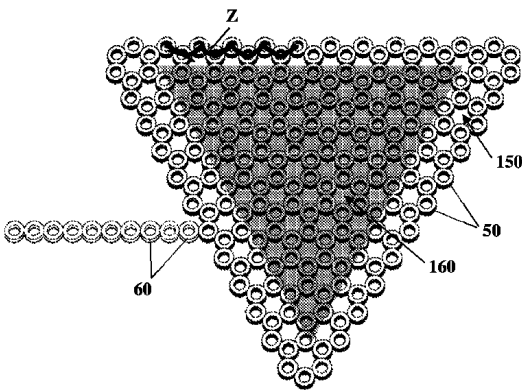
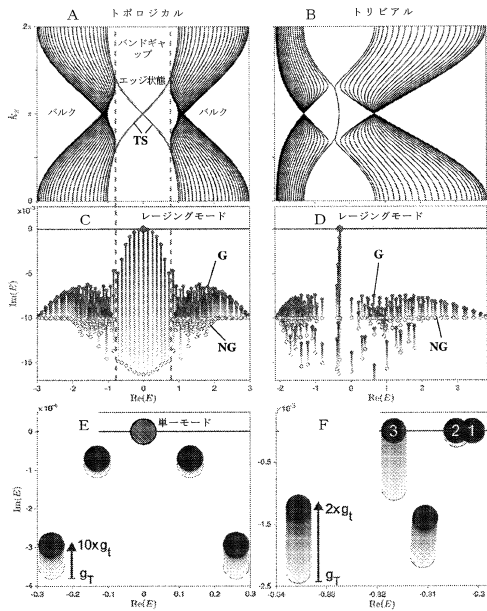


FIG. 2

【図 3 A - 3 F】



【図 4】

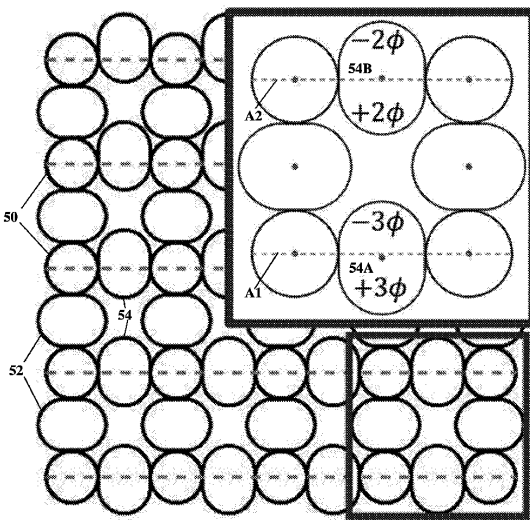


FIG. 4

【 図 5 A 】

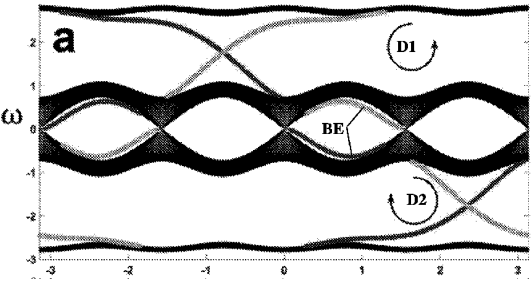


FIG. 5A

【 図 5 B 】

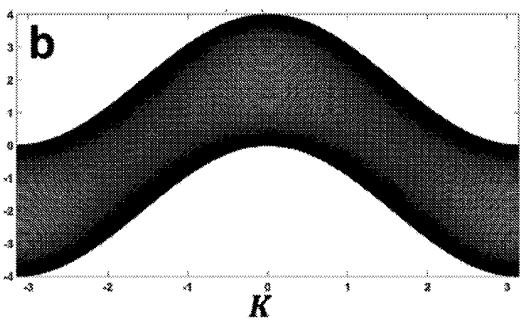


FIG. 5B

10

【 図 5 C 】

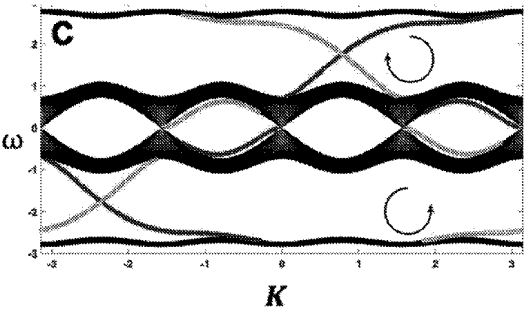


FIG. 5C

【 図 6 A 】

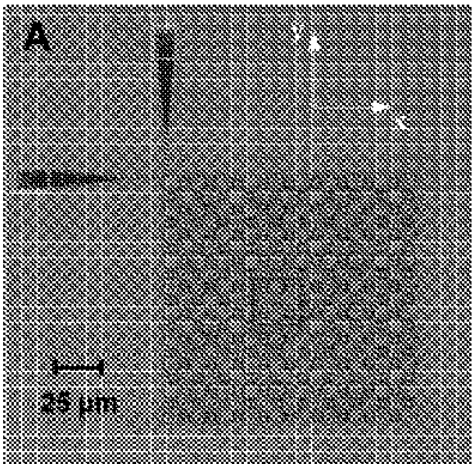


FIG. 6A

20

30

40

50

【図 6 B】

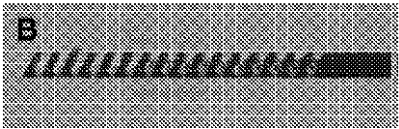


FIG. 6B

【図 6 C】

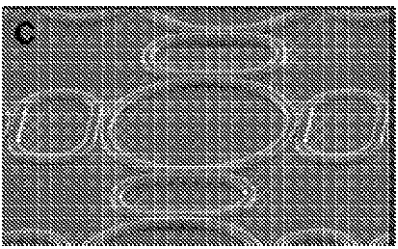
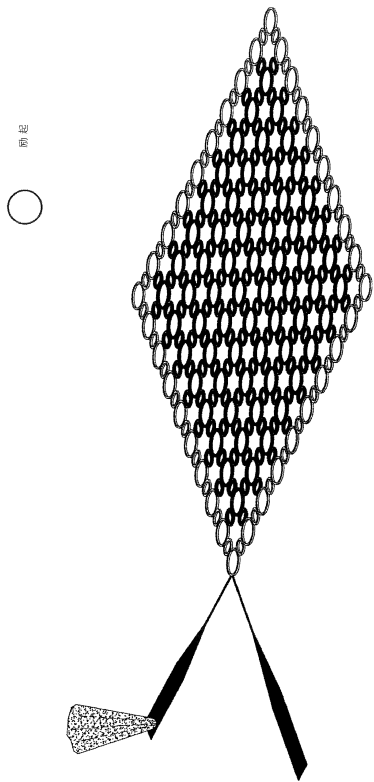


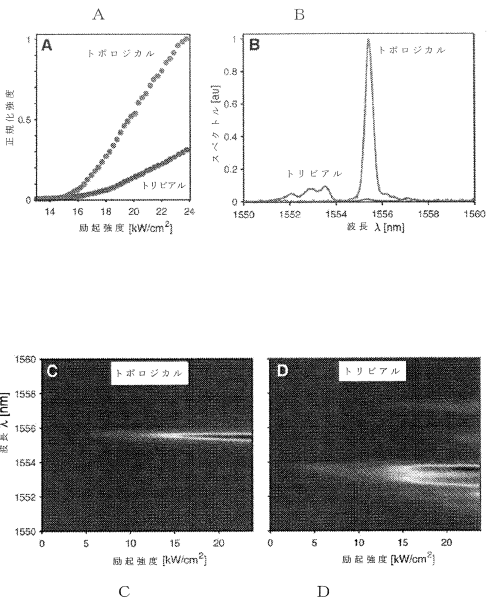
FIG. 6C

10

【図 6 D】



【図 7 A - 7 D】



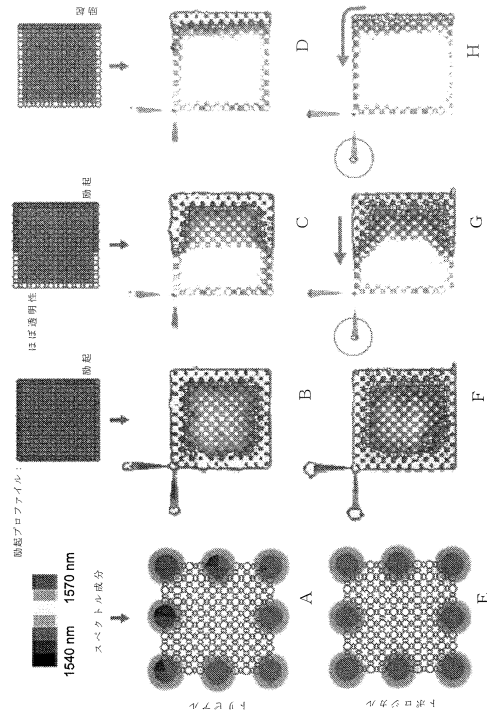
20

30

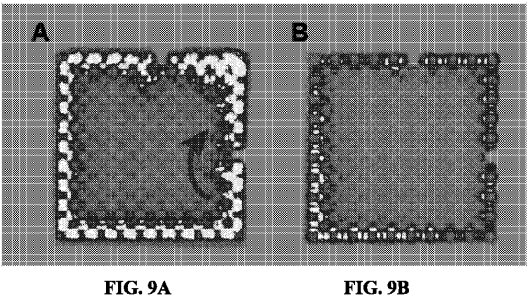
40

50

【図 8 A - 8 H】



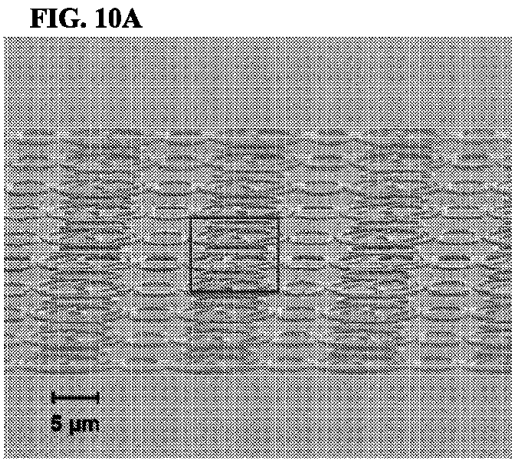
【図 9 A - 9 B】



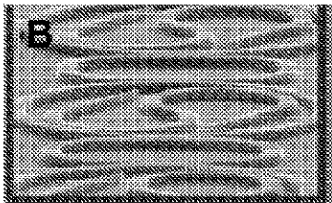
10

20

【図 10 A】



【図 10 B】



30

40

50

【 図 1 0 C 】

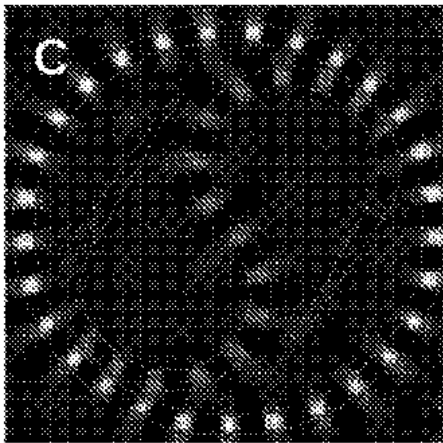


FIG. 10C

【 図 1 0 D 】

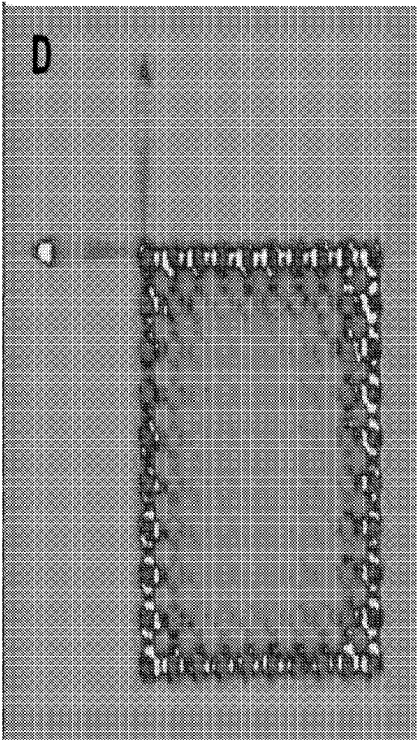
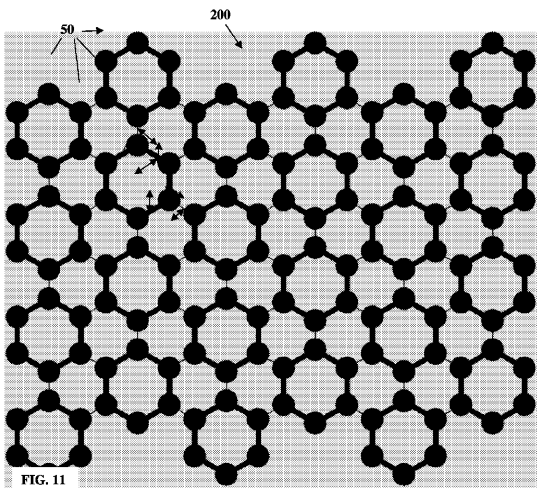
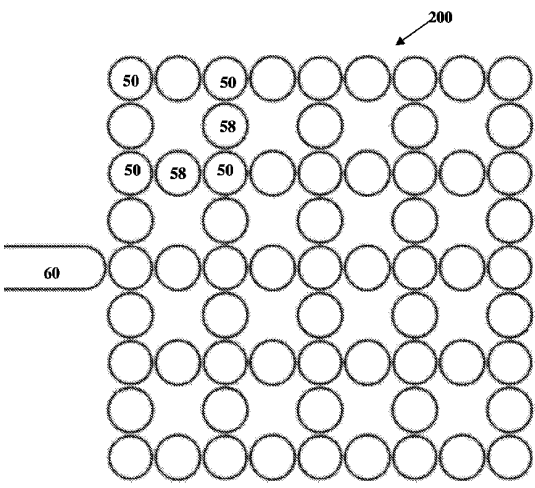


FIG. 10D

【 図 1 1 】



【 図 1 2 】



10

20

30

40

50

フロントページの続き

(51)国際特許分類

F I

H 0 1 S 5/40 (2006.01)

H 0 1 S 5/40

G 0 2 B 6/122(2006.01)

G 0 2 B 6/122 3 0 1

H 0 1 S 3/16 (2006.01)

H 0 1 S 3/16

(33)優先権主張国・地域又は機関

米国(US)

(74)代理人 100121511

弁理士 小田 直

(74)代理人 100202751

弁理士 岩堀 明代

(74)代理人 100191086

弁理士 高橋 香元

(72)発明者 セゲヴ, モルデチャイ

イスラエル国, 3 2 9 8 5 1 9 ハイファ, ハシデイ ウモット ハオラム ストリート, 7 シー

(72)発明者 ハラリ, ガル

イスラエル国, 6 2 6 6 5 1 6 テル アヴィヴ ヤフォ, 1 8 / 6 ミリヤム ハハスモナイト ストリート

(72)発明者 クリストドゥリデス, デメトリオス エヌ.

アメリカ合衆国, フロリダ州 3 2 7 0 7, カッセルベリー, 2 4 0 ブルーストーン プレイス

(72)発明者 バンドレス モトーラ, ミゲル エンジェル

イスラエル国, 3 6 7 0 0 4 1 ハイファ, ネシエル, 6 4, アモス 1 8 エー

審査官 百瀬 正之

(56)参考文献 米国特許出願公開第 2 0 1 2 / 0 3 0 8 1 8 1 (U S , A 1)

HARARI, G., et al., Topological Lasers, 2016 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), OSA, 米国, 米国光学学会(OSA), 2016年06月15日, XP033024649, 1-2

HAFEZI, M., et al, Imaging topological edge states in silicon photonics, Nature Photonics, 2013年, Vol. 7, 1001-1005, <http://www.nature.com/naturephotonics>, DOI: 10.1038/nphoton.2013.274

LIANG, G.Q., et al., Optical Resonator Analog of a Two-Dimensional Topological Insulator, PHYSICAL REVIEW LETTERS, 米国, American Physical Society, 2013年05月17日, Vol.110, pp.203904-1 - 203904-5

RECHTSMAN, M. C., et al., Photonic Floquet topological insulators, NATURE, 2013年04月11日, VOL.496, pp.196-200

(58)調査した分野 (Int.Cl., D B 名)

H 0 1 S 3 / 0 0 - 3 / 3 0

H 0 1 S 5 / 0 0 - 5 / 5 0

G 0 2 B 6 / 1 2 - 6 / 1 4

I E E E X p l o r e

n a t u r e . C o m

S c i t a t i o n

A P S J o u r n a l s