様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９　（共通）

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

令和　６ 年　５ 月 １６ 日現在

機関番号：１５４０１
研究種目：基盤研究(C)（一般）
研究期間：2021～2023
課題番号：２１Ｋ０４９２７

研究課題名（和文）非エルミート光学系の物理と応用のための導波路デバイス

研究課題名（英文）Waveguide devices for the physics and applications of non-Hermitian Photonic systems

研究代表者

角屋　豊（Kadoya, Yutaka）

広島大学・先進理工系科学研究科（先）・教授

研究者番号：９０２６３７３０

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では，実用上も重要なグレーティング具備導波路において，非エルミート物理の特徴である連続準位中束縛状態と例外点が生じ，これらが構造パラメーターによって制御可能であることの実証を目的とした．波長域をテラヘルツ帯と選定し，上記を実現可能なグレーティングとして非対称２層金属グレーティングを考案し，連続準位中束縛状態が容易に制御可能であること理論的に確認した．また２層グレーティングの簡便な作製方法を確立し，全反射波取り出し実験により，その動作を確認した．さらに，例外点と伝搬方向選択的なカプラーの関係に関する研究展開の着想を得た．また考案した構造はテラヘルツ波光源の高出力化にも資する．

研究成果の学術的意義や社会的意義
近年注目を集める非エルミート物理は物理学的な興味にとどまらず，実デバイスにおける影響・利用の観点からも重要である．光学系においては，従来はほとんど認識されていなかったが，本研究で対象としたように導波路＋カプラーという，いわばありふれた構造でも発現するため，その理解や制御方法の確立は工学的にも極めて重要である．本研究では実証には至らなかったが，容易な構造で制御ができることを示し，また構造の作製と動作検証までを行っており，光学デバイスにおける非エルミート物理の理解と応用に資する結果を得た．また，考案した構造はテラヘルツ波光源の高出力化にも資するものであり，社会的意義も大きい．

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to realize an optical device in which a bound state in the continuum (BIC) and an exceptional point (ExP) coexist, which are the features of non-Hermitian physics, in the structure of a waveguide equipped with a grating, and to demonstrate the theoretical prediction that these points can be controlled by the structural parameters of the device. We selected the terahertz band as the wavelength range and invented an asymmetric double-layer metal grating (DMG) structure that can realize the predictions, and theoretically confirmed that the BIC can be easily controlled. We also established a simple fabrication method of DMGs and demonstrated experimentally the operation by an efficient extraction of a totally-reflected wave. In addition, we obtained an idea of research on the relationship between ExP and propagation direction-selective couplers. The invented DMG structure is useful also for improving output of terahertz generators.

研究分野：光デバイス工学

キーワード：non-Hermite　Photonics　Waveguide　Grating　Meta-surface

※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。

様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９（共通）

１．研究開始当初の背景

非エルミートなハミルトニアンや散乱行列で記述される物理系に関する研究が注目を集めている．この系はロス（内部，放射）やゲインを含む系であり，その特徴的な物理現象は連続準位中束縛状態（Bound states in the continue; BIC と記す）と例外点（Exceptional point; ExP と記す）の出現である．BIC はエネルギー（周波数）的には放射場との結合があり得るにも関わらず，系の対称性や放射場干渉により，実際のエネルギー損失が消失した束縛状態である．放射場干渉の場合の BIC は偶発的 BIC と呼ばれ，分散関係図上では対称性のない非Γ点でも実現できるため，進行波状態が可能となる．一方，ExP は損失やゲインのある複数の擬束縛状態が結合した系において，複数の固有値のみならず，固有状態が縮退した（数が減少した）特異点であり，結合で生じる新たな束縛状態の実部と虚部の分裂が入れ替わる点でもある．パリティ(P)･時間(T)対称性と合わせて研究が進められてきた．いずれも最初は電子系に対して研究されたが，ロスやゲインが必要であるため，実験的に，あるいは応用的観点からもフォトニクスが極めて有用である．BIC はその高い Q 値から主にセンサーや非線形増強に，ExP はレーザーの単一モード発振，センサー，非対称光伝搬などへの応用展開が注目されている．最近では，これらのパラメータ空間（波数空間が多いが限定はされない）のトポロジカルな性質も注目され，BIC 点周りでの偏光渦や，ExP 周りの非断熱的状態発展などが議論されている．後者は，運動の非ユニタリ性を見ることにもつながり，2状態から1状態への動的な状態変化も起こることが示されている．非エルミート系は，従来のエルミート（ユニタリ）＋散逸という考え方とは異なる，新しいデバイス原理につながる可能性がある．　ところで，外部との放射結合をもつ系では，この放射損失に起因する ExP が考えられるので，BIC と ExP の両者が同じパラメータ空間に存在する可能性がある．このような系の具体例は少数ながら報告されていたが，実現性の低い設定のため，理論とシミュレーションのみにとどまっていた．BIC-ExP 共存系は，パラメータ空間内の運動に及ぼす影響やトポロジカルな性質など，物理学的にも興味深く，また光技術としても極めて重要であるが，全く未開拓な状態である．特に実デバイスを対象にしたもので，BIC と ExP の両者を含めた研究は端緒についたところである．導波路構造における BIC と ExP に関しても同様で，BIC と ExP の両者を含めた研究はない．さらに，ほとんどの研究ではパラメータ空間は固定されており，オンデマンドな変化に触れたものは，ごく僅かであった．

2．研究の目的

本研究は，請者が近年，完全な理解を得るべく研究を行ってきた半導体基板上の金属グレーティングの光学応答の研究がベースにある．申請者らは有限厚さの半導体基板に金属グレーティングを設置した構造を理論的に調べ，①2モードの反交差点で非Γ点 BIC（以下，非Γ点に限定）が生じ，そのブランチが偏光によってスイッチすること，②グレーティング厚さによっても BIC ブランチがスイッチすること，③ExP が発生するグレーティング厚さが存在することなどを発見した．さらに，④これらのメカニズムを理論的に明らかにすると同時に，⑤グレーティング厚さ依存性がグレーティング内のスリットにおけるファブリペロー（FP）共振で理解できること，等を発見した．本研究の目的は，BIC と ExP が共存する光デバイスを実現し，申請者らの理論予測を実証することとした．

3．研究の方法

素子構造の設計には，結合モード法（自作）を用いた高速な探索とともに，有限要素法（市販ソフトウェア）を用いた高精度なシミュレーションを行った．また素子作製に関しては，想定する波長域（下記のようにテラヘルツ帯）を決定した後に，研究室保有，および本学の共同研究設備（薄膜形成，リソグラフィー等）を用いて実施した．測定に関しても同様に，想定する波長域決定後に，研究室保有の装置等を用いて測定系を構築した．なお，測定においては，理化学研究所との共同研究も実施した．結果の分析には時間的結合モード法解析（自作）も行い，非エルミート系の性質を抽出した．

4．研究成果

(1)　分散制御を可能にする2層金属グレーティング構造の考案

研究の実施にあたり，想定する波長域を決定する必要があった．本研究のきっかけとなった理論研究では，BIC や ExP 出現ポイントが金属グレーティング内のファブリーペロー（FP）共鳴によって可変であることが一つのポイントとなっていたが，可視域を想定すると，1 nm の寸法精度が求められる．そこで，本研究では素子作製における寸法精度などを重視して，テラヘルツ領域を想定することとした．一方で，この場合にはグレーティング厚さが 100 μm となって，デバイスとしては扱いにくい．そこで，調整可能な FP 共鳴を実現でき，かつ作製が容易な構造として，図 1 に示すような 2 層金属グレーティング(DMG)を考案した．　この構造においては，2 層間の間隔（膜厚）や各層の金属幅によって特性を変えることができ，さらに，2 層の相対横方向位置（非対称化）によっても，特性が変わる．下記の方法で作製した場合には，横方向位置をアセンブリ段階で連続的に変えることができるので，実質上オンデマンドな調整が可能である．この点を確認するため，数値計算を行った例を図2に示す．導波路(WG)伝搬モードの分散が，上下グレーティングの相対位置（Xs）によって変化し，BIC の出現ポイントが移り変わることが見て取れる．

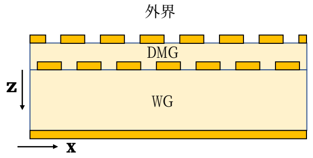

図１　DMG **付導波路**(WG)

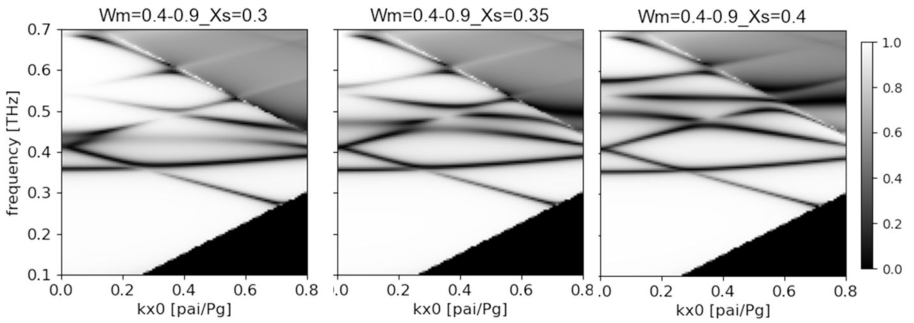

図２　DMG を構成する上下グレーティングの相対位置(Xs）による分散制御(BIC 点が動く)の例．データは反射スペクトル．

(2) 2 層グレーティング構造作製方法の確立と動作検証

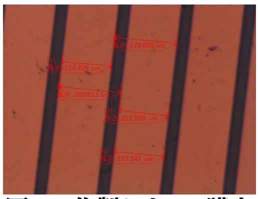

図３：作製した PI 膜上の Cu グレーティング

上記 DMG の作製方法を検討した結果，銅薄膜がコーティングされたポリイミド(PI）の市販品を用いることが有効と判断し，試供品の提供を受けて，銅へのグレーティング形成を行った．方法を最適化し，図３に示すようなグレーティングの作製が可能になった．DMG の動作を検証する方法として，図４(a)に示すように，Si 基板表面で全反射しているテラヘルツ波を取り出すことを考え，測定系を構築し実証を行った．測定には理化学研究所・南出氏の協力を得た．光源としてバックワードテラヘルツパラメトリック発振器，検出器にはショットキーバリアダイオードを用いた．測定系と結果の例を，それぞれ図４(b)，図４(c)に示す．理論予想効率 24%に対して実測値約 18%を得た．この差は Si と DMG の空隙によるものと考えられ，導波路と一体的に形成する場合は問題にならないと考えられ

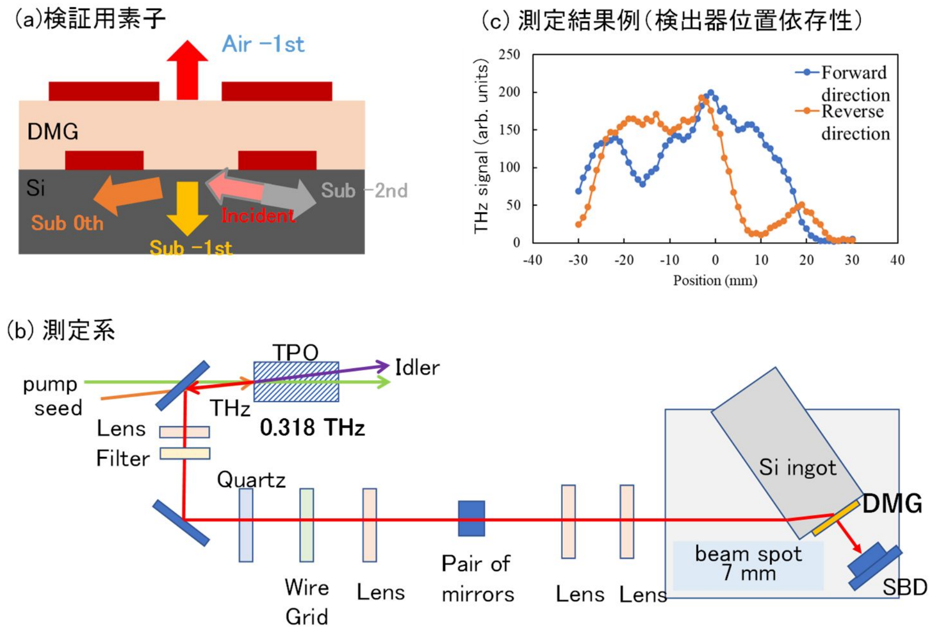

図４：(a) **DMG 動作検証素子概念図，**(b)**測定系，**(c)**測定結果例**

る．一方，測定系に関しては，角度依存性を取得する必要があり，上記の測定系とは別にテラヘルツ時間領域反射測定系を構築した．以上により，本研究の目的であるカプラ付き導波路における BIC や ExP の制御実証に関する準備は整ったが，本研究遂行に際し，次項で述べるような，本研究とも密接に関係する，方向選択的なカプラーと ExP の関係に関する着想を得たため，両者をまとめて実証することとした．なお，半導体表面で全反射しているテラヘルツ波を取り出すことは，開発が遅れている連続波テラヘルツ光源の高出力化にも大きく資するため，並行してシミュレーション等を行い，例えば量子カスケードレーザー構造からで 100%近い取り出し効率が可能であることを見出している（学会，論文投稿準備中）．

(3) 計画外の成果（伝搬方向選択的な導波路カプラーと ExP の関係）と展望

上記の全反射テラヘルツ波取り出しカプラーは，高効率化において，左右からの入射に関する強い非対称性が必要である．この系は相反性が成り立っているので，外部（上部）からの入射した場合，左右が選択的に出射する．これを本研究で目的とした導波路に適用すると，導波路伝搬方向選択的なカプラーが実現できることになる．一方， 非エルミート光学系の研究で ExP においてこのような結合が起

こり得ることが示されている．ということは，両者になにがしかの関係があることが推測される．そこで(2)で行った設計をベースに強い左右非対称を持つカプラーによる導波路への結合を調べたが，図5(a)に示すように，方向選択性は見いだせなかった．時間的結合モード法に基づいて検討した結果，無限周期系とすることに問題があるのではないかと考えられた．そこで，有限系，即ち端のあるカプラーにしたところ，図5(b)に示すように左右で明瞭な差が生まれた．現時点では推測に過ぎないが，次のように考察している．ExP では2モードが1モードになる，したがってモード反交差が消失する．逆に反交差が生じる状態で無限周期とすると，反交差，即ち2モード間の結合により，定常状態では差が消失すると考えられる．この点を考慮すると，ExP では無限周期でも方向選択的結合が可能で，ExP でない場合は有限周期（または損失）が必須となっている可能性がある．従って，有限周期系でも反交差を消し，無限系に拡張した場合に ExP となるような構造であれば，より強い方向選択性が生じることが期待される．このようなカプラーは光配線，光回路において極めて有用な部品となりえるため，理工学的に重要であるが，その設計論，特に非エルミート性（ここでは ExP）との関係は全く分かっておらず，今後の研究課題である．

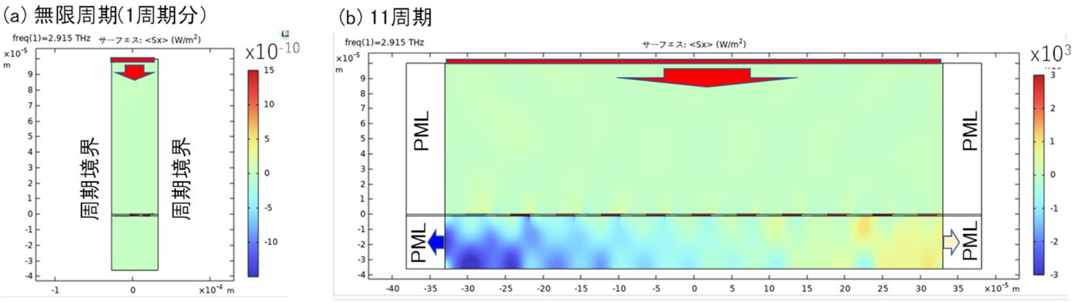

図５：非対称カプラーによる導波路への結合．(a)無限周期，(b)有限(11)周期．データはポインティングベクトルの右方向成分．

５．主な発表論文等

〔雑誌論文〕　計0件

〔学会発表〕　計5件（うち招待講演　2件／うち国際学会　2件）

１．発表者名 Yutaka Kadoya
２．発表標題 Metal-capped high-contrast-grating for efficient surface-extraction of THz waves generated by difference-frequency generation in quantum cascade lasers
３．学会等名 SPIE Defense + Commercial Sensing, Next-Generation Spectroscopic Technologies XIII（招待講演）（国際学会）
４．発表年 2021年

１．発表者名 竹安隼哉，橋内優輝，西田宗弘，角屋豊
２．発表標題 半導体表面で全反射している　THz 波を取り出すための高効率グレーティング
３．学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
４．発表年 2021年

１．発表者名 小田京華，竹安隼哉，宮田滉平，西田宗弘，角屋豊
２．発表標題 非対称2層金属グレーティングによる全反射THz波の高効率取り出し
３．学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
４．発表年 2021年

１．発表者名 竹安隼哉，西田宗弘，角屋豊
２．発表標題 全反射光取り出し2層金属グレーティングの特性を支配する機構の分析
３．学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
４．発表年 2022年

１．発表者名 Yutaka Kadoya
２．発表標題 Efficient extraction of terahertz wave totally reflected at semiconductor surface by double metal gratings
３．学会等名 24th International Conference on Applied Electromagnetics and Communications（招待講演）（国際学会）
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

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