

利得・損失を有する結合共振器の非エルミート結合モード理論

Non-Hermitian coupled mode theory for cavity arrays with gain and loss

NTT ナノフォトニクスセンタ¹, NTT 物性基礎研², バース大³, 東工大⁴

○高田 健太^{1,2}, Nathan Roberts^{2,3}, 新家 昭彦^{1,2}, 納富 雅也^{1,2,4}

NTT Nanophotonics Center¹, NTT Basic Research Labs.², Univ. Bath³, Tokyo Inst. Tech.⁴

○Kenta Takata^{1,2}, Nathan Roberts^{2,3}, Akihiko Shinya^{1,2}, Masaya Notomi^{1,2,4}

E-mail: kenta.takata.ke@hco.ntt.co.jp

結合光共振器に利得と損失を分布させると、系の光学ポテンシャルの虚部にコントラストが生じ、例外点と呼ばれる固有状態の縮退が起こる[1]。この例外点は、結合モード理論により系を実効ハミルトニアンとして記述した時の非エルミート性及びPT対称性に由来し、固有周波数だけでなく固有状態の縮退も示す。例外点の周りでは、固有周波数がシンギュラリティを伴う累乗根型のパラメータ依存性を示し、また遍歴状態から局在状態への急激な相転移が起こる。これまでに、このような性質に起因した様々な新奇現象が報告されている。近年我々も、電流注入結合フォトニック結晶レーザにおける例外点縮退による自然放出増強を観測している[2]。

しかしながら、吸収、放射損失、材料分散等が大きい系においては、例外点縮退が解け、その周りの微分周波数の発散特性も平滑化してしまうことが報告されている[3,4]。この効果は、エルミート系では実数として表される要素間結合に虚部が生じるという描像により説明されてきた。だが、このような理論検討は専ら結合導波路における現象論[5]ないし摂動論[4]の範囲内で行われていた。そのため、この影響がモデル中にどのような形で現れ、屈折率や放射損失にどのように依存し、例外点にどう影響を与えるか、といった点で、統一的な理解が得られないままであった。

そこで今回、利得・損失を持つ結合共振器の非エルミート結合モード方程式を導出し、系の応答をシミュレーションと合わせ詳細に調べたので報告する。ここでは、異なる誘電率虚部を持つ二共振器を単位胞とした等間隔の一次元周期系を考える。また、図(a)に示す、埋込媒質型高Qフォトニック結晶共振器のジグザグ配置による実効的一次元結合鎖のシミュレーションにより、理論の妥当性を確かめる。まず、理論モデルの導出過程において、確かに共振器間結合の虚部[図(a), κ_i]が結合係数の二次の項として現れ、その値に異方性が無いことが分かった。またその大きさは、結合をなす二共振器の誘電率虚部の和に比例することが分かった。これを検証するため、単位胞中の二つの埋込媒質の屈折率虚部が等しい条件でシミュレーションを行った。この場合、吸収損失に起因した結合虚部により、理論上、系のバンド構造の虚部は二つ折りのコサイン型変調を受ける。そこで、シミュレーション結果から放射損失の寄与を除いた部分(屈折率寄与分)を調べたところ、図(b)のように確かにコサイン型となった。またバンド幅から見積もられる結合虚部の大きさも、媒質屈折率虚部の和に比例することが分かった。さらに、吸収損失のコントラストをつけた系では結合虚部により例外点が消失し、近傍の群速度発散特性の平滑化が起こるが[図(c)]、利得と損失が釣り合う系では結合虚部が相殺され、例外点特性が復活することも分かった[図(d)]。可能なら、当日は放射損失の影響や放射損失のみによる例外点の実現についても議論する。

本研究は、科研費(20H05641)による助成を受けたものである。参考文献: [1] Feng, El-Ganainy, and Ge, *Nat. Photonics* **11**, 752 (2017). [2] Takata *et al.*, arXiv:2007.02638 (2020). [3] Takata, Notomi, *Phys. Rev. Appl.* **7**, 054023 (2017). [4] Nguyen *et al.*, *New J. Phys.* **18**, 125012 (2016). [5] Benisty *et al.*, *J. Lightwave Technol.* **30**, 2675 (2012).

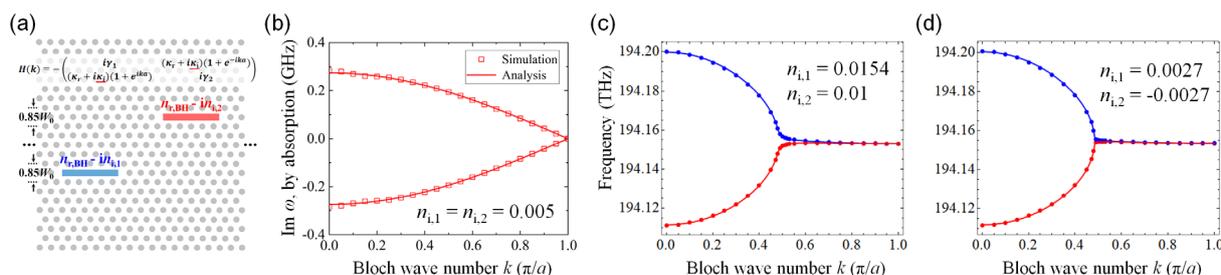


Fig. (a) Simulated photonic crystal cavity array and its effective Hamiltonian $H(k)$. $n_{i,1}$, $n_{i,2}$: Imaginary refractive indices of the heterostructures. (b) Contribution of absorption to the system imaginary band structure $\text{Im } \omega(k)$ for $n_{i,1} = n_{i,2} = 0.005$. (c), (d) Real band structures $\text{Re } \omega(k)$ for (c) $n_{i,1} = 0.0154$, $n_{i,2} = 0.01$ and (d) $n_{i,1} = 0.0027$, $n_{i,2} = -0.0027$.