

埋込ヘテロ構造共振器を用いたフォトニック結晶 PT 対称結合共振器導波路の解析 Analysis of a photonic-crystal PT-symmetric coupled resonator waveguide based on buried heterostructure nanocavities

○高田 健太^{1,2}、納富 雅也^{1,2} (1. NTT 物性研、2. NTT NPC)

○Kenta Takata^{1,2}, Masaya Notomi^{1,2} (1. NTT BRL, 2. NTT NPC)

E-mail: takata.kenta@lab.ntt.co.jp

近年、時間空間反転対称性 (Parity-time symmetry: PT 対称性) を持つ光学系[1]の特異な性質が注目されている。PT 対称な光学系とは、利得及び損失を含んだ複素屈折率 $n(\mathbf{r})$ の周期構造であり、屈折率実部の空間分布が偶関数、虚部が奇関数となる ($n(\mathbf{r}) = n^*(-\mathbf{r})$)。このような系では、系の固有モード周波数離調 $\Delta\omega$ が、利得及び損失の大きさに応じて実数から純虚数へと急峻な相転移を示す (PT 相転移)。PT 相転移点付近では、一方向トンネル遷移や二重回折[1]、一方向反射性[2]等の非相対的な光伝搬特性が理論的、実験的に示されている。一方で、伝搬方向に PT 対称性を持つ大規模な導波路は実現されておらず、集積面[3]、又は利得制御性[2]に課題が残っている。

我々は前回、PT 対称結合共振器光導波路(CROW)の群速度制御性を結合モード理論により検討した[4]。結果として、利得と損失の外部制御により、10 倍以上の群速度変化が可能であるとする見積を得た。今回、上記の課題に対し有利と考えられる、埋込ヘテロ構造によるモードギャップ閉込型共振器を用いたフォトニック結晶 PT 対称 CROW について、有限要素法による電磁界シミュレーションを行った。その結果、実際に PT 相転移を観測出来る事が分かったので報告する。図(a)に用いた二次元構造の例を示す。ここで、スラブ (灰色) の材料に InP、埋込共振器 (青、赤色) には InGaAsP を想定する。格子定数は 420 nm、空気孔半

径は 100 nm である。デバイス上下端には完全整合層を接続し、左右には周期境界条件を課している。左右の共振器には、屈折率虚部 ($\text{Im } n_{\text{cav}}$) を通じそれぞれ損失及び利得を導入した。これらは 100 cm^{-1} から 1000 cm^{-1} オーダーの利得、吸収係数に相当する。まず、ブロッホ波数をバンド中心に固定し、共振器の利得及び損失を増加させる事で PT 相転移を観測した。図(b)に、相転移後の二つの固有状態を持つ磁場のノルム ($|\mathbf{H}|$) の例を示す。空の CROW ($\text{Im } n_{\text{cav}} = 0$) では全ての共振器が等しい場の強度を持つが、PT 相転移後の系の固有モードは片方の共振器に局在し、損失 ($\text{Im } \Delta\omega > 0$) 又は利得 ($\text{Im } \Delta\omega < 0$) を受ける。次に、PT 対称 CROW の複素バンド構造の例を図(c)に示す。黒点は固有波長、赤点は利得、損失レートを表す。ここで、先の計算から、バンド中心付近で PT 相転移が起こる屈折率虚部を選んだ。特に共振器間結合が比較的小さい場合、第二近接までの結合を含む理論モデル (Rice-Mele モデル[5]、図点線、破線) に複素結合成分を導入すると、データを良く説明出来る事が分かった (図(c)は高次結合の寄与を想定した、3%の第一近接結合の補正を含む)。当日は、結合レートの構造依存性や三次元構造の結果についても議論する予定である。

本研究は、JST、CREST の支援を受けたものである。

[1] K. G. Makris *et al*, *PRL* **100**, 103904 (2008).

[2] L. Feng *et al*, *Nat. Mater.* **12**, 108 (2013).

[3] B. Peng *et al*, *Nat. Phys.* **10**, 394 (2014).

[4] 高田, 納富. 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会, 16a-2A-4 (2015).

[5] S. Longhi, *PRA* **88**, 052102 (2013).

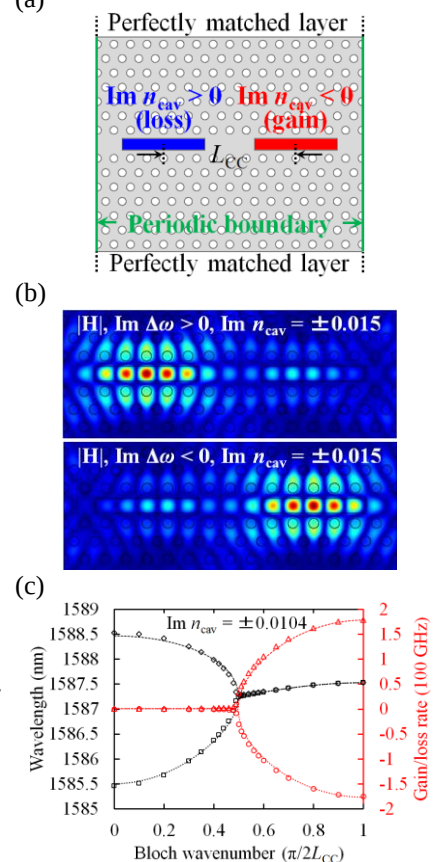


Fig. (a) Simulated structure. (b) Eigenmodes ($|\mathbf{H}|$) after PT phase transition. (c) Complex band structure of a 2D PT-symmetric CROW.