

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の観測

Observation of exceptional point degeneracy with electrically pumped photonic crystal lasers

NTT ナノフォトニクスセンタ¹, NTT 物性基礎研², NTT 先端集積デバイス研³

○高田 健太^{1,2}, 野崎 謙悟^{1,2}, 倉持 栄一^{1,2}, 松尾 慎治^{1,3}, 武田 浩司^{1,3}, 藤井 拓郎^{1,3},
北 翔太^{1,2}, 新家 昭彦^{1,2}, 納富 雅也^{1,2}

NTT Nanophotonics Center¹, NTT Basic Research Labs.², NTT Device Technology Labs.³

○Kenta Takata^{1,2}, Kengo Nozaki^{1,2}, Eiichi Kuramochi^{1,2}, Shinji Matsuo^{1,3}, Koji Takeda^{1,3},

Takuro Fujii^{1,3}, Shota Kita^{1,2}, Akihiko Shinya^{1,2}, Masaya Notomi^{1,2}

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

結合光共振器における例外点とは、主に共振器毎に分布した利得及び損失のコントラストによる、複数の固有モードの縮退を指す[1]。これは、系の実効ハミルトニアン行列の非エルミート性に起因しており、例外点では固有周波数のみならず固有状態も縮退する。例外点は複素多価関数となる固有スペクトルの特異点（分岐点）でもあり、その周りでは遍歴状態から局在状態へと急激な相転移が起こる。また、複数のリーマン面を伴い一種のトポロジカルチャージとしても働く。そのため、例外点の周りでは方向性応答、損失誘起発振、モード変換等の現象が報告されている。一方で、パッシブデバイスでは利得・損失を連続的、系統的に制御できないという制約、アクティブデバイスでは熱やキャリアの効果による共振器間の共鳴周波数のずれ（デチューニング）が生じる問題から、例外点縮退そのものを観測することは非常に困難な課題であった。

我々は、利得・損失の制御性、利得媒質の高い励起効率及び熱伝導性を兼ね備えた光例外点デバイスとして、埋込媒質型電流注入フォトニック結晶レーザの結合系を提案していた[2,3]。また、結合二レーザ素子による実証実験にて、発振状態の例外点相転移、及び損失誘起発振を報告したが[4]、例外点縮退は未確認であった。今回、このような結合レーザ一般の問題として、強い非対称励起下において系に共振器間デチューニングがあると、結合モードの内いずれかの発振が例外点付近到達前に必ず停止してしまうことを理論的に明らかにした。そして、非発振下（自然放出領域）で実験を行うことで、例外点縮退を示す特異な発光応答の観測に成功したので報告する。

図(a)は以前報告した結合フォトニックレーザ素子である[4]。二つの埋込媒質型ナノ共振器（赤色）への電流注入を左右のPIN接合を介し独立に制御できる（右：ch1、左：ch2）。図(b)は、ch2の金属パッド間電流を $I_2=100\ \mu\text{A}$ に固定し、ch1への電流 I_1 を減少させたときの、結合基底モードの自然放出スペクトル変化である。ch1側の共振器の吸収損失の増加により、二つの結合モードスペクトルピークが明瞭に合体することを示す。ここで、周波数領域結合モード理論(CMT)を用いた測定データの包括的なフィッティングにより、 $I_1=1.4\ \mu\text{A}$ が最も例外点条件に近いことを見出した。この時のスペクトル[図(c)、片対数]は理論予測の通りローレンツ関数の二乗型[5]となり、二つのモードの縮退によりピーク光局所状態密度が増強している事を示す。詳細は当日議論する。

本研究は、JST CREST (JPMJCR15N4)により一部援助を受けた。参考文献: [1] Feng, El-Ganainy, and Ge, *Nat. Photonics* **11**, 752 (2017). [2] 高田, 納富. 第76回秋季応物, 16a-2A-4 (2015). [3] 高田, 納富. 第63回春季応物, 21p-S621-18 (2016). [4] 高田ら. 第79回秋季応物, 19p-225B-12 (2018). [5] Pick *et al.*, *Opt. Exp.* **25**, 12325 (2017).

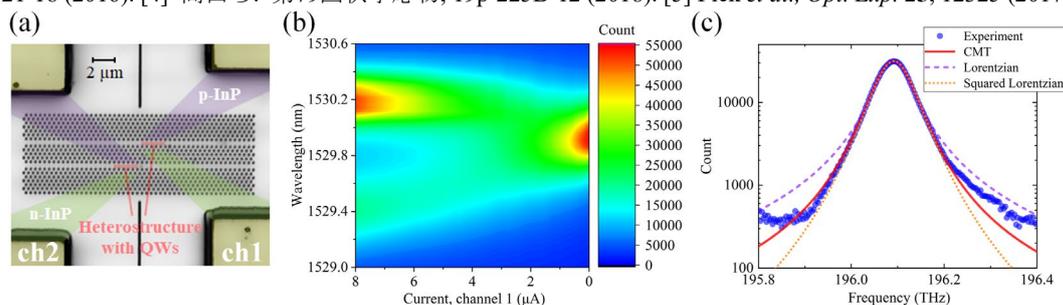


Fig. (a) False-color image of the two nanolaser system. (b) Spontaneous emission spectra of the device, which depend on the current for channel 1 (I_1). $I_2=100\ \mu\text{A}$. (c) Semi-log plot of the spontaneous emission spectrum for $I_1=1.4\ \mu\text{A}$, $I_2=100\ \mu\text{A}$.