

二重格子フォトニック結晶レーザーにおける例外点近傍のバンド構造の制御—理論—

Band-structure control around exceptional points in double-lattice photonic crystal lasers – Theory –

京大院工, °井上卓也, 吉田溪介, 吉田昌宏, Gellela John, 野田進

Kyoto Univ., °T. Inoue, K. Yoshida, M. Yoshida, J. Gellela, S. Noda

E-mail: t_inoue@qoe.kuee.kyoto-u.ac.jp, snoda@kuee.kyoto-u.ac.jp

[序] フォトニック結晶レーザー(PCSEL)は、2次元フォトニック結晶のバンド端共振効果を利用した面発光型半導体レーザーである。我々は、PCSELの大面积・高輝度化の実現に向けて、二重格子フォトニック結晶¹⁾の格子点設計の深化・最適化を進めており、面内180度回折と90度回折の完全な打ち消し合いを利用することで、1mm Φ での単一モード動作の実証に成功している²⁾。さらに、上記の設計により例外点が形成されるなど、非エルミート系の物理とも関連が深いことを数値計算により見出している^{2,3)}。今回、 Γ 点からの波数ずれ、および非エルミート成分を考慮した理論解析を行い、二重格子PCSELにおける例外点形成条件を定式化するとともに、裏面反射位相の調整により例外点近傍のバンド構造の制御が可能であることを見出したので報告する。

[理論] $y=x$ に対して対称なフォトニック結晶を考える

(Fig.1)。180度方向および90度方向への回折を表す結合係数を κ_{1D} および $\kappa_{2D\pm}$ 、放射波および高次波を介した自分自身への結合の実部を κ_{11} 、放射波を介した自分自身への結合の虚部(非エルミート成分)を μ 、放射波を介して180度方向へ伝搬する波に結合する際の付加位相を θ_{pc} とする。 Γ -M方向へ波数 Δk だけずれたモードA,C(直線 $y=x$ に直交する直線偏光のモード)の複素固有値は以下の式で表される。

$$\delta_{A,C} + i \frac{\alpha_{A,C}}{2} = \kappa_{11} + i\mu + \kappa_{2D+} \mp \sqrt{(\kappa_{1D} + \kappa_{2D-} + i\mu e^{i\theta_{pc}})(\kappa_{1D}^* + \kappa_{2D-}^* + i\mu e^{-i\theta_{pc}}) + \left(\frac{\Delta k}{\sqrt{2}}\right)^2}$$

上式で、180度回折と90度回折が完全に打ち消す場合($\kappa_{1D} + \kappa_{2D-} = 0$)を考えると、モードA,Cの複素固有値は θ_{pc} の値によらずFig.2のように変化し、実部と虚部がともに縮退した例外点が波数 $\Delta k = \sqrt{2}\mu$ に形成されることがわかる。

[数値解析] 実デバイス構造を考慮して、厳密結合波解析によりバンド解析を行った。解析では、 $\kappa_{1D} + \kappa_{2D-} = 0$ がほぼ満たされるように空孔の大きさと重心間距離を調整するとともに、 μ の大きさを決定するPCSEL裏面の多層反射膜の干渉位相 θ_{DBR} を変化させた。また、作製空孔形状の $y=x$ に対する非対称性に起因するバンドCとDの相互作用や、TMバンドとの結合(B/TM, 非発振バンド)も考慮した。3通りの干渉位相で Γ -M方向のバンド構造および放射係数を計算した結果をFig.3に示す。Fig.2と同様に、AとCの周波数と放射係数の縮退が確認出来、干渉位相が $\pm\pi$ に近づく(μ が小さい)ほど、バンドが線形に近づくことが確認出来た。なお、大面积発振に最適なバンド構造に関する詳細な議論は、別途報告する⁴⁾。

[謝辞] 本研究の一部は戦略的イノベーション創造プログラムのもとで行われた。**[文献]** 1) Yoshida *et al.*, Nat. Mater.

18, 121 (2019). 2) 吉田他, 2020 秋季応物 10p-Z18-2. 3) ゲレタ他, 2020 秋季応物 10p-Z18-3. 4) 井上他, 本応物.

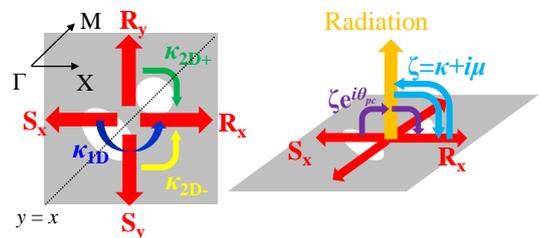


Fig.1. Schematic of wave-couplings in PCSELS.

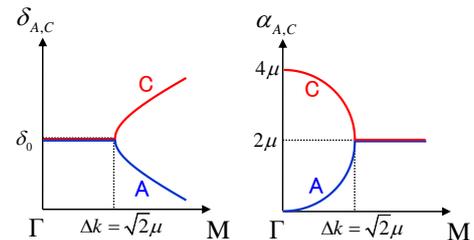


Fig.2. k -dependence of frequencies and radiation constants near an exceptional point.

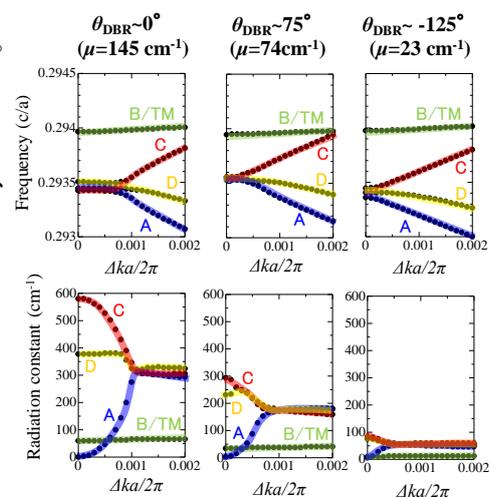


Fig.3. Band structures and radiation constants of double-lattice PCSELS with different θ_{DBR} , calculated by the rigorous coupled wave analysis.