

フォトリック結晶レーザーの超大面積単一モード動作条件の解析解の導出

Analytical solution of conditions for ultra-broad-area single-mode operation in photonic crystal lasers

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】 フォトリック結晶レーザー(PCSEL)は、2次元フォトリ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、二重格子フォトリック結晶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、1mmΦでの単一モード動作の実証に成功している²⁾。今回、有限系における二重格子フォトリック結晶の基本モードおよび高次モードの放射係数に関して、Γ点からの波数ずれ、および非エルミート成分を考慮して解析解を導出し、超大面積単一モード動作を実現するための二重格子PCSELの設計指針を明らかにしたので報告する。

【理論】 発振バンド端(A)において、電界分布の節と空孔の重心がほぼ一致する場合(放射係数が小さい場合)を考える。複素固有値の理論式³⁾によれば、Γ点からΓ-M方向へ微小波数Δkだけずれたモードの放射係数は、裏面反射光の干渉位相で決まる非エルミート成分μと、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θ_{pc}を用いて、以下のように近似される。

$$\alpha_v \simeq \frac{\mu}{\mu^2 + R^2} \left[I^2 + \left(\frac{\Delta k}{\sqrt{2}} \right)^2 \right] \quad \cdots (1)$$

$R = \text{Re} \left[(\kappa_{1D} + \kappa_{2D-}) e^{-i\theta_{pc}} \right]$: 実効結合係数(実部)、AとCの周波数差に比例
 $I = \text{Im} \left[(\kappa_{1D} + \kappa_{2D-}) e^{-i\theta_{pc}} \right]$: 実効結合係数(虚部)、基本波の位相を決定

(1)式の右辺の括弧内の第1項は、2つの空孔の非対称性による放射を表し、第2項は非Γ点において電界の位相がずれることによる放射を表す。ここで、直径Lの有限系を考えると、基本モードと高次モードの電界の包絡線分布(Fig. 1の挿入図)は、それぞれ波数Δk=π/L及びΔk=2π/Lの正弦波で近似出来るため、両者の放射係数およびその差は、以下のように表される。

$$\alpha_{v,0th} \simeq \frac{\mu}{\mu^2 + R^2} \left(I^2 + \frac{\pi^2}{2L^2} \right), \quad \alpha_{v,1st} \simeq \frac{\mu}{\mu^2 + R^2} \left(I^2 + \frac{2\pi^2}{L^2} \right), \quad \Delta\alpha_v \simeq \frac{\mu}{\mu^2 + R^2} \left(\frac{3\pi^2}{2L^2} \right) \quad \cdots (2)$$

(2)式より、高次モードとの放射係数差を増大するためには、R(∝AとCの周波数差)を0に近づけるだけでなく、非エルミート成分μを小さくする必要があることがわかる。これは、μが小さくなるほど例外点がΓ点に近づき、Γ点近傍で放射係数が急峻に変化するためと理解出来る^{3,4)}。

【数値解析】 理想な場合として、面内180度回折と90度回折がほぼ完全に打ち消す場合(R~0, I~0)を考え、μの大きさを変えて、直径L=3mmのPCSELにおける基本モードと高次モードの放射係数差Δα_vを計算した結果をFig. 1に示す。有限系の3次元結合波理論による数値計算結果は、(2)式の解析解と良く一致しており、μ=20cm⁻¹のとき、直径3mmという超大面積素子においても、単一モード動作を実現するのに十分な放射係数差7cm⁻¹を確保出来ることがわかる。180度回折と90度回折の打ち消し合いの不完全性等を考慮した詳細な計算結果は当日報告する。

【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) 井上他, 本応物. 4) 吉田他, 本応物.

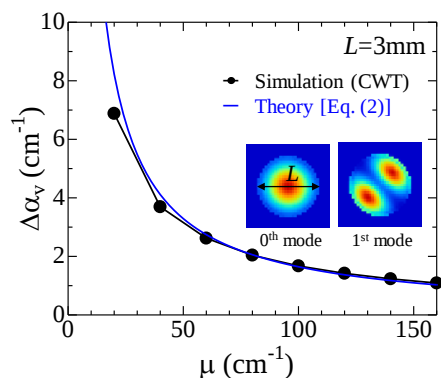


Fig. 1. Radiation constant difference between the 0th and 1st modes as a function of μ.