フォトニック結晶レーザーの発振線幅の解析

Analysis of laser linewidth of photonic-crystal lasers

京大院工,⁰井上卓也, Kim Taejoon, 勝野峻平, 野田進

Kyoto Univ., °**T. Inoue, T. Kim, S. Katsuno, S. Noda** E-mail: t_inoue@qoe.kuee.kyoto-u.ac.jp, snoda@kuee.kyoto-u.ac.jp

[序] FMCW-LiDAR やコヒーレント光通信等の応用においては、信号対雑音比の向上のために半導体 レーザーの狭線幅化が重要である。一般に、半導体レーザーの発振線幅は共振器内の光子数に反比例 して減少するが、従来の半導体レーザーでは、光子数増大のために面積拡大や高電流注入を行うと多 モード発振が生じるため、光源単体での線幅の狭窄化には限界がある。一方、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により大面積での単一モード動作が実現可 能^{1,2)}であるため、原理的に極めて狭い発振線幅の実現が期待される。今回、PCSELの連続波(CW) 動作時の発振線幅の解析を行い、1 kHz 未満の発振線幅の実現可能性を見出したので報告する。

[手法] PCSEL 内部の電界に対するレート方程式(時間依存3次元結合波方程式)³⁾を以下に示す。

 $\frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \\ E_4 \end{pmatrix} = v_g \left[\frac{g_N - \alpha_{in}}{2} - i \frac{2\pi}{\lambda} (\Delta n_N + \Delta n_T) \right] \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \\ E_4 \end{pmatrix} + i v_g \mathbf{C} \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \\ E_4 \end{pmatrix} - v_g \begin{pmatrix} \frac{\partial E_1 / \partial x}{\partial E_2 / \partial y} \\ \frac{\partial E_2 / \partial y}{\partial E_4 / \partial y} + \begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \end{pmatrix} \cdots (1), \quad \langle F_i^*(\mathbf{r}, t) F_j(\mathbf{r}', t') \rangle = R_N \delta_{ij} \delta(t - t') \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}') \cdots (2)$

ただし、 $E_i(i=1\sim4)$ は4つの基本波の規格化複素振幅、 v_g は群速度、 g_N 、 Δn_N 、 R_N はキャリア密度に依存 する利得、屈折率変化、自然放出レート、 α_{in} は内部損失、 Δn_T は温度による屈折率変化、Cは結合波行 列を表す。 $F_i(i=1\sim4)$ は発振線幅を決める自然放出雑音項を表し、その相関係数は(2)式で与えられる⁴。 (1)式及びキャリアに対するレート方程式を、PCSEL 面内の発熱分布(温度分布)を考慮しながら自己 無撞着に解く⁵⁾ことで、CW 動作時の過渡応答解析および発振線幅の解析が可能になる。

[結果] 一例として、直径 500 µm の二重格子 PCSEL において、フォトニック結晶の共振器損失 atotal を 変化させて、CW 動作時の発振線幅の解析を行った。面内で一様なフォトニック結晶を有する PCSEL について、発振線幅の注入電流依存性を計算した結果を Fig. 1(a)に示す。共振器損失が小さな構造ほど 少ない注入電流で狭線幅が得られているが、これは共振器の内部に、より多くの光子が蓄積されるた めである。また、高注入電流時に、線幅が減少から増大に転じているが、これは、電流の増加に伴うデ バイス中央部の温度上昇により、バンド端周波数の面内分布が生じ、面内損失が増加するとともに、多 モード発振も生じやすくなるためと考えられる。上記の温度分布の影響を補償するため、予めバンド 端周波数を逆向きに変化させた構造(温度補償構造) 5)について、発振線幅を計算した結果を Fig. 1(b) に示す。補償構造の導入により、高電流注入時にも安定した単一モード動作が得られ、最小で 1 kHz 未 満の線幅が得られる可能性があることが判明した。[謝辞] 本研究の一部は SIP のもとで行われた。[文献] 1) Yoshida *et al.*, Nat. Mater. 18, 121 (2019). 2) 井上他, 2021 年春応物 17p-Z31-7. 3) Inoue *et al.*, Phys. Rev. B 99, 035308 (2019). 4) Schunk *et al.*, IEEE J. Quant. Electron. QE-22, 642 (1986). 5) 勝野他, 2020 年秋応物 11p-Z18-8.



Fig.1. (a) Band-edge frequency distribution (left panel) and calculated linewidths (right panel) of CW-PCSELs without temperature compensation. (b) Band-edge frequency distribution (left panel) and calculated linewidths of CW-PCSELs (right panel) with temperature compensation of $\Delta T=6$ K. Three different cavity losses (α_{total}) were assumed in both calculations.