3次元結合波理論によるフォトニック結晶レーザの過渡応答解析

Transient response analysis of photonic-crystal lasers via three-dimensional coupled-wave theory

京大工¹, K-CONNEX², ^O井上卓也^{1,2}, 森田遼平¹, 田中良典¹, 野田進¹ Kyoto Univ.¹, K-CONNEX², ^oT. Inoue^{1,2}, R. Morita¹, Y. Tanaka¹, S. Noda¹ 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(PCSEL)は、2 次元フォトニック結晶のバンド端共振作用を利用した、 大面積コヒーレント発振が可能な半導体レーザである^{1,2)}。我々はこれまで、定常状態での PCSEL にお ける光結合を記述する 3 次元結合波理論 ³⁾を構築し、CW 動作時の発振閾値や発振モードの選択性に関 する解析を行ってきた。今回、フォトニック結晶レーザの過渡応答特性の解析を行うべく、PCSEL に おける光結合を時間領域で記述する新たな 3 次元結合波理論を確立したので報告する。

[解析手法] PCSEL 内を伝搬する基本波の振幅を *R_x*, *S_x*, *R_y*, *S_y* とし、これらが空間的・時間的に緩やかに 変化すると仮定すると、以下の時間依存結合波方程式が得られる。

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} R_x \\ S_x \\ R_y \\ S_y \end{pmatrix} = v_g \left[\frac{g(N) - \alpha_{in}}{2} \right] \begin{pmatrix} R_x \\ S_x \\ R_y \\ S_y \end{pmatrix} - iv_g \left[\delta \begin{pmatrix} R_x \\ S_x \\ R_y \\ S_y \end{pmatrix} - C \begin{pmatrix} R_x \\ S_x \\ R_y \\ S_y \end{pmatrix} - i \begin{pmatrix} \partial R_x / \partial x \\ -\partial S_x / \partial x \\ \partial R_y / \partial y \\ -\partial S_y / \partial y \end{pmatrix} \right] - \gamma \begin{pmatrix} R_x \\ S_x \\ R_y \\ S_y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{pmatrix}$$

ここで、 v_g は群速度、g(N)は利得係数、Nはキャリア密度、 a_{in} は内部損失、 δ は屈折率の時間変化による初期状態からの波数変化量、Cは結合波行列³、yは屈折率の時間変化速度、fは自然放出光によるノイズを表す。上式とキャリア密度の時間変化を表すレート方程式を連立することで、基本波振幅の空間分布の時間発展が得られ、そのフーリエ変換を行うことで発振スペクトルの解析も可能となる。

【解析結果】上記の手法を用いて、発光面積 300 µm 角の楕円ダブルホール PCSEL⁴に閾値電流(0.6 A) の1.7倍の電流を注入した場合の過渡応答特性の計算結果を Fig.1 に示す。同図において、黒線は PCSEL の光出力を、赤線は PCSEL 中央部のキャリア密度を表す。レーザ発振の立ち上がりにおいて過剰なキャリアが注入されて緩和振動が生じる様子が確認できる。緩和振動が減衰し CW 発振に移行した後の 発振スペクトルは挿入図のようになり、本デバイスは上記の注入電流で単一モード発振することがわ かる。このときの光子密度およびキャリア密度の空間分布を図 2(a)(b)に示す。光子密度の大きい電極 中央部は、電極端部と比較してキャリア密度が減少しており、空間ホールバーニング効果が生じてい ることが確認できる。詳細は当日報告する。なお、本研究の一部は、NEDOの支援を受けた。

[文献] 1) M. Imada, et al., Appl. Phys. Lett. **75**, 316 (1999). 2) K. Hirose, et al., Nature Photon. **8**, 406 (2014). 3) Y. Liang, et al, Phys. Rev. B **84**, 195119 (2011). 4) 吉田, 他, 本応物.



Fig. 1. Temporal response of PCSEL (300 μ m) at *I*=1.7*I*_{th}. Inset shows the lasing spectrum of the device.



Fig. 2. Spatial distribution of (a) photon density and (b) carrier density in the PCSEL.