

フォトニック結晶レーザーの面内相互引き込み現象の理論解析

Theoretical analysis of in-plane mutual-locking behavior in photonic-crystal lasers

◎深谷昌弘, De Zoysa Menaka, 井上卓也, 吉田昌宏, 石崎賢司, 初田蘭子, 野田進 (京大院工)

○Masahiro Fukaya, Menaka De Zoysa, Takuya Inoue, Masahiro Yoshida, Kenji Ishizaki, Ranko Hatsuta, Susumu Noda (Kyoto Univ.)

E-mail: fukaya_masahiro@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は、2次元フォトニック結晶の大面积バンド端共振効果を用いた面発光型の半導体レーザーである。これまで、我々は、本レーザーにおいて、発振波長などが異なる近接した領域を同時に駆動させると、駆動領域全体が同期して発振する面内相互引き込み現象を観測し、初期的な実験評価を行って来た^{1,2)}。このような引き込み現象を活用することによって、レーザーの発振状態の制御が可能となり、ビーム形状などのオンデマンドな制御が期待される³⁾。そこで、今回は、フォトニック結晶レーザーの時間依存3次元結合波理論と、キャリアのレート方程式による、過渡応答の解析⁴⁾により、フォトニック結晶レーザーにおける面内相互引き込み現象の詳細な解析を行ったので報告する。

[結果] 図1に、理論解析に用いたフォトニック結晶レーザーの模式図を示す。ここで、

レーザー共振器としては、大面积(>500 μm^2)で動作可能な2重格子フォトニック結晶を採用した⁵⁾。本構造において、p側に、電極サイズ125 μm 角からなる2つの注入領域を設けている。それぞれの領域の発振波長が異なるように(波長差 $\sim 10\text{pm}$)、フォトニック結晶層の屈折率に変化を与えた。また、各領域における電流拡がり

は、30 μm とした。各領域に、閾値電流($I_{th} = 195\text{mA}$)をこえる210mAの電流を注入し、個別に駆動させたときの発振スペクトルおよび遠視野像を図2に示す。スペクトルより、それぞれの領域から、異なる波長で、単一モードの発振が得られていることが分かる。また、それぞれの遠視野像は、単峰であることも見て取れる。次に、発振波長差は上記と同様とし、領域間距離 d を変化(0~200 μm)させ、同時に駆動させたときの、発振振る舞いを解析した。代表的に d は30、60、200 μm とし、総電流を420mAと注入したときの、近視野、遠視野、およびスペクトルを図3に示す。図3(a)のように、近距離(30 μm)において、2領域は同期して、単一モードで発振している様子が分かる。また、近視野像に対応して、遠視野像は横方向に狭くなっており、両者は同位相で発振していると言える。これは、近距離において、電流拡がりの強い重なりにより、2領域の間にもゲインが得られ、全体が一体として発振しているためだと考えられる。次に、図3(b)のように距離が60 μm の場合、近視野像より、領域間の光強度が弱くなり、かつ、遠視野像も2つに分裂している様子が見て取れる。スペクトル図には、2つのピークが観測されるが、挿入図に示すように、短波長側のピークは同位相発振状態に対応し、長波長側のピークは逆位相発振状態に対応していることが分かった。すなわち、2領域は、依然結合して発振していることが伺える。一方、図3(c)のように極端に離れた($d \sim 200\mu\text{m}$)場合は、2領域間の結合が完全に失われ、独立した振る舞いとなる。相互引き込みにおける閾値電流の依存性、時間軸上での振る舞い、波長差依存性など、詳細は当日報告する。なお、本研究の一部は、戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)およびJST-CRESTの援助を受けた。

また、それぞれの遠視野像は、単峰であることも見て取れる。次に、発振波長差は上記と同様とし、領域間距離 d を変化(0~200 μm)させ、同時に駆動させたときの、発振振る舞いを解析した。代表的に d は30、60、200 μm とし、総電流を420mAと注入したときの、近視野、遠視野、およびスペクトルを図3に示す。図3(a)のように、近距離(30 μm)において、2領域は同期して、単一モードで発振している様子が分かる。また、近視野像に対応して、遠視野像は横方向に狭くなっており、両者は同位相で発振していると言える。これは、近距離において、電流拡がりの強い重なりにより、2領域の間にもゲインが得られ、全体が一体として発振しているためだと考えられる。次に、図3(b)のように距離が60 μm の場合、近視野像より、領域間の光強度が弱くなり、かつ、遠視野像も2つに分裂している様子が見て取れる。スペクトル図には、2つのピークが観測されるが、挿入図に示すように、短波長側のピークは同位相発振状態に対応し、長波長側のピークは逆位相発振状態に対応していることが分かった。すなわち、2領域は、依然結合して発振していることが伺える。一方、図3(c)のように極端に離れた($d \sim 200\mu\text{m}$)場合は、2領域間の結合が完全に失われ、独立した振る舞いとなる。相互引き込みにおける閾値電流の依存性、時間軸上での振る舞い、波長差依存性など、詳細は当日報告する。なお、本研究の一部は、戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)およびJST-CRESTの援助を受けた。

次に、図3(b)のように距離が60 μm の場合、近視野像より、領域間の光強度が弱くなり、かつ、遠視野像も2つに分裂している様子が見て取れる。スペクトル図には、2つのピークが観測されるが、挿入図に示すように、短波長側のピークは同位相発振状態に対応し、長波長側のピークは逆位相発振状態に対応していることが分かった。すなわち、2領域は、依然結合して発振していることが伺える。一方、図3(c)のように極端に離れた($d \sim 200\mu\text{m}$)場合は、2領域間の結合が完全に失われ、独立した振る舞いとなる。相互引き込みにおける閾値電流の依存性、時間軸上での振る舞い、波長差依存性など、詳細は当日報告する。なお、本研究の一部は、戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)およびJST-CRESTの援助を受けた。

[文献] [1] 小林他, 2016年秋応物, 14p-P14-6 [2] 福原他, 2018年秋季応物, 19p-225B-9. [3] 深谷他, 2019年春季応物, 10p-PB3-7. [4] 井上他, 2017年春季応物, 15a-E205-6. [5] M. Yoshida et al., *Nature Materials* **18**, 121–128 (2019).

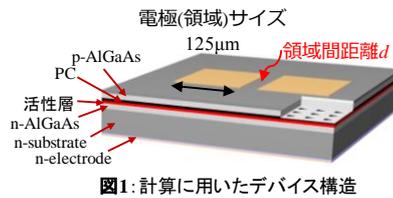


図1: 計算に用いたデバイス構造

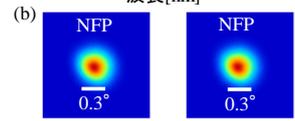
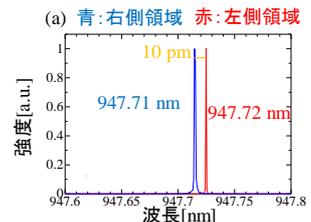


図2: 単一領域駆動時の計算結果
(a)スペクトル (b)遠視野像

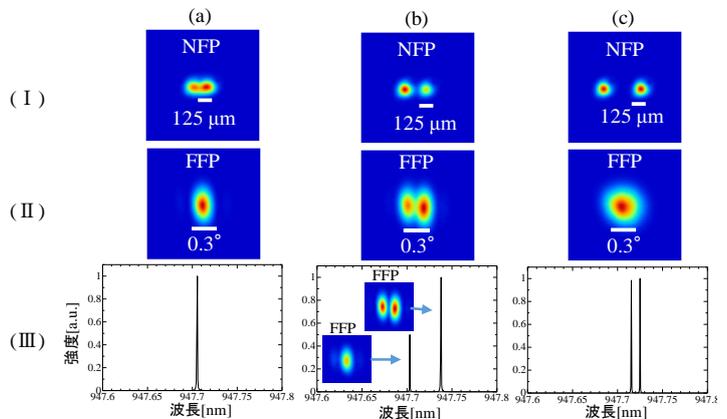


図3: 領域間距離 d を変えたときの
(I)近視野像(II)遠視野像(III)スペクトルの計算結果
(a)30 μm (b)60 μm (c)200 μm