

複合変調フォトニック結晶レーザーのナノアンテナ理論解析

Nano-Antenna Theory for Dually Modulated Photonic Crystal Laser

(京大院工) [○](D)坂田諒一, 井上卓也, 岩田錦太郎, 石崎賢司, De Zoysa Menaka, 野田進

(Kyoto Univ.) [○](D)R. Sakata, T. Inoue, K. Iwata, K. Ishizaki, M. De Zoysa, S. Noda

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

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作用を利用した、大面積コヒーレント動作可能な面発光型の半導体レーザーである。さらに、PCSEL を構成するフォトニック結晶の格子点に変調を加えることで、任意の2次元方向へビームを出射可能[1]であり、LiDAR等のセンシング応用が期待されている。前回、所望の角度に十分な放射を実現する新しい変調方式として、空孔の位置と大きさを同時に変調する複合変調[2]の提案・実証を行った。今回、複合変調 PCSEL の出射特性の詳細な解析を行うとともに、その特性が、各空孔をナノアンテナとみなしたモデルで説明可能であることを見出したので報告する。

複合変調 PCSEL の模式図を Fig. 1 に示す。角度 (θ, ϕ) 方向への斜め出射のための回折ベクトル $\mathbf{k}$ ($\mathbf{k} = \mathbf{K} - \mathbf{R}$, $\mathbf{K} = (\omega/c) \cdot (\sin \theta \cos \phi, \sin \theta \sin \phi)$, $\mathbf{R}$ は M 点の基本波ベクトル)、格子点の位置ベクトル $\mathbf{r}$ に対して、格子点空孔の位置を y 方向に $\mathbf{r} = \mathbf{r}_0 + \Delta \mathbf{d} \cdot \sin(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r})$ に従って変化させると同時に、充填率(FF)を $\text{FF} = \text{FF}_0 + \text{FF}_\Delta \cdot \sin(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r})$ に従って変調した構造である。3次元結合波理論により、各変調振幅を変化させたときの各バンド端モードの出射特性の詳細な解析を行った結果を、Fig.2 に示す。同図(a)に FF 変調振幅 FF_Δ を 2.0% に保ちつつ、位置変調振幅 Δd を変化させたときの、設計角($\phi = 0^\circ$, $\theta = 36^\circ$)への放射係数を示す。バンド端 C/D の放射係数がほぼ一定に保たれるのに対し、バンド端 A/B の放射係数は Δd の 2 乗に比例して増加することが分かる。一方、位置変調振幅 Δd を 0.06a に保ちつつ、FF 変調振幅 FF_Δ を変化させた場合(Fig.2(b))には、バンド端 A/B の放射係数がほぼ一定であるのに対し、バンド端 C/D の放射係数が FF_Δ の 2 乗に比例して増加することが分かる。さらに、出射角度 $\phi = 0$ に固定して、 θ を変化させたときの放射係数の変化を計算したところ、Fig. 3 のようにほぼ出射角度に依存しない結果が得られた。

以上の結果を説明するため、フォトニック結晶の各空孔をナノアンテナとみなし、フォトニック結晶で形成される基本波の電界分布のうち、空孔に重なった電界が外に取り出されると仮定したナノアンテナモデルを検討した。面内波数 $\mathbf{K}$ 方向に放射する遠方場 $\mathbf{E}_{far}(\mathbf{K})$ は、 $\mathbf{E}(\mathbf{r})$ をフォトニック結晶の M_1 点の共振モードの電界分布(4つの基本波の重ね合わせ)として

$$\mathbf{E}_{far}(\mathbf{K}) \propto \sum_n \sum_m \text{FF}_{m,n} \mathbf{E}(\mathbf{r}_{m,n}) \exp(i\mathbf{K} \cdot \mathbf{r}_{m,n}) \quad (1)$$

と表される。ただし、 $\mathbf{r}_{m,n}$ は各空孔の中心座標、 $\text{FF}_{m,n}$ は各空孔の FF を表す。前述の $\mathbf{r}$ と FF の変調の式を(1)に代入し、2次の微小量を無視して目的の出射角への電界振幅 $|\mathbf{E}_{far}|$ を求めると、フォトニック結晶の周期数を N 、基本波の電界ベクトルを $\mathbf{E}$ として

$$|\mathbf{E}_{far}| \propto N^2 \text{FF}_0 \cdot |\mathbf{E}| \cdot |\mathbf{R}| \cdot \Delta d \quad (\text{バンド端 A/B}) \quad (2)$$

$$|\mathbf{E}_{far}| \propto N^2 \sqrt{2} \cdot |\mathbf{E}| \cdot \text{FF}_\Delta \quad (\text{バンド端 C/D}) \quad (3)$$

が導かれる。式(2)よりバンド端 A/B の遠方場での電界は位置変調振幅のみに比例(放射係数は二乗に比例)し、バンド端 C/D の遠方場での電界は FF 変調振幅のみに比例(放射係数は二乗に比例)することが分かる。これらの結果は Fig. 2 の結果と一致する。さらに、式(2),(3)から、放射係数が出射角度(面内波数 $\mathbf{K}$)に依存せず一定値を取ることが分かり、この結果は Fig. 3 と一致する。以上、詳細は当日報告する。

【謝辞】本研究の一部は JST-CREST(JP MJCR17N3)、戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)、科研費(JP 18J22986)の援助を受けた。

【文献】[1] S. Noda *et al.*, *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.* **23**, 4900107 (2017). [2]坂田, 野田, 他, 2019 年春季応物, 12p-W631-5.

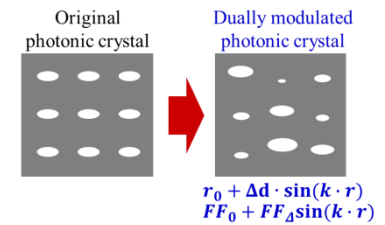


Fig.1. Schematic of dually modulated PC.

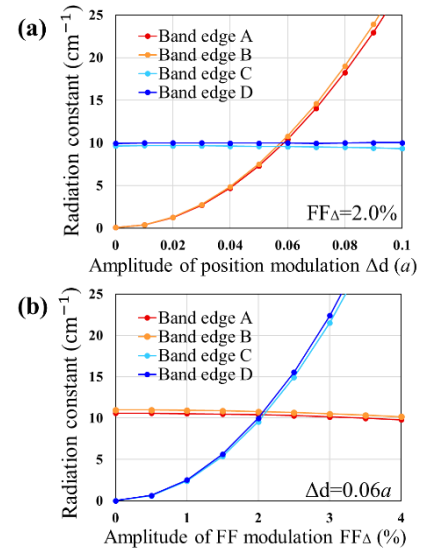


Fig.2. Calculated radiation coefficients of a dually modulated photonic crystal laser as a function of (a) Δd and (b) FF_Δ . The elliptical ratio, original FF_0 and height are 0.5, 10%, and 150nm, respectively.

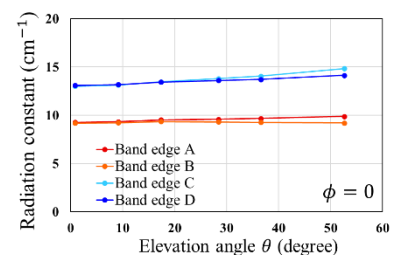


Fig.3. Calculated radiation coefficients of a dually modulated photonic crystal laser as a function of elevation angle θ .