非エルミート・エルミート結合制御に基づく無反射・垂直放射導波路の放射電界強度分布制御

Reflectionless waveguide with controlled radiative electric-field distribution by non-Hermitian/Hermitian control

京大院工，○野口直哉，井上卓也，吉田昌宏，野田進

Kyoto Univ., ○N. Noguchi, T. Inoue, M. Yoshida, S. Noda

E-mail: noguchi@nano.kuee.kyoto-u.ac.jp, snoda@kuee.kyoto-u.ac.jp

[序] フォトニック結晶は，利得・吸収媒質を導入しなくても放射に起因する非エルミート性を発現するため，非エルミート系特有の物理現象を観測するための有用な舞台となりうる．これまで，我々は，フォトニック結晶における放射損失を伴う光結合（非エルミート結合）および伴わない結合（エルミート結合）の制御により，光の伝搬方向により完全垂直放射（無反射）と完全反射が切り替わる一方向性光放射・反射現象が実現可能であることを提案・実証した [1,2]．今回，非エルミート・エルミート結合制御に基づく垂直放射導波路において，終端部に反射境界を導入することで，無反射・垂直放射条件を満たしながら，導波路直上の放射電界強度分布自在に制御可能であることを見出したので報告する．

[理論] Fig.1 に示すように，場所により結合係数が異なる長さ L のフォトニック結晶導波路において，その終端部に完全反射境界（反射位相 0° ）を導入した場合を考える．進行波 $R_x(x)$と後退波 $S_x(x)$の間のエルミート結合係数を $R(x)$+i$I(x)$，非エルミート結合係数を $\mu(x)$とし，導波路直上の垂直放射電界強度分布を $E_{\mathrm{rad}}(x)$としたとき， Γ 点周波数の光を入射した際の光の伝搬は以下の方程式で記述される [2]．

$$\frac{\partial}{\partial x}\begin{pmatrix} R_x \\ -S_x \end{pmatrix} = \mathrm{i}\left[\begin{pmatrix} 0 & R(x)+\mathrm{i}I(x) \\ R(x)-\mathrm{i}I(x) & 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathrm{i}\mu(x) & \mathrm{i}\mu(x) \\ \mathrm{i}\mu(x) & \mathrm{i}\mu(x) \end{pmatrix}\right]\begin{pmatrix} R_x \\ S_x \end{pmatrix} \cdots (1), \quad E_{\mathrm{rad}}(x) = \sqrt{2\mu(x)}\left(R_x(x)+S_x(x)\right) \cdots (2)$$

ここで，目的の垂直放射電界強度分布を $F(x)$としたとき， $E_{\mathrm{rad}}(x) = F(x)$ かつ無反射条件（$S_x(0) = 0$）を満たすための結合係数分布の一例は, (1)(2)式を用いて以下のように導出される．

$$R(x) = 0 \cdots (3), \quad I(x) = -\frac{1}{F(x)}\frac{\partial F(x)}{\partial x} \cdots (4), \qquad \mu(x) = \frac{F^2(0)}{2\int_0^L F^2(x)dx}(\text{定数}) \cdots (5)$$

例えば, 無反射一様放射($F(x)$=定数)を実現するための条件は, $R(x)$=$I(x)$=0 かつ $\mu(x)$ =0.5/ L と導かれる．

[設計] 上述の結合係数の条件を満たすため，Fig.1 示すように， 2 つの長方形空孔からなる二重格子フォトニック結晶と，反射鏡として働く単格子フォトニック結晶を接続した導波路を 3 次元 FDTD 法にて設計した．ここでは目的の垂直放射電界強度分布の例として，① $F(x)$=定数（一様放射），および，② $F(x)$= C{2+cos(2πx/L)}の 2 つを考え，(3)式と(5)式を満たすように二重格子構造の重心間距離 d と導波路長 L を固定した後, (4)式で決まる I の値に比例して，各場所の二重格子構造の空孔バランス 2x を調整した．計した 2 つの垂直放射導波路について，導波路直上の放射電界強度分布の計算結果を Fig.2 に示す．いずれの場合も，入射端における反射率を 0.01 未満に抑制しつつ，設計とほぼ同じ形状の電界強度分布が実現出来ていることがわかる．**[謝辞]**本研究の一部は特別推進研究(22H04915)のもとで行われた．**[文献]** 1) 井上他, 2021 年秋応物 12p-N321-8. 2) 野口他, 2023 年春応物 16p-A501-5.

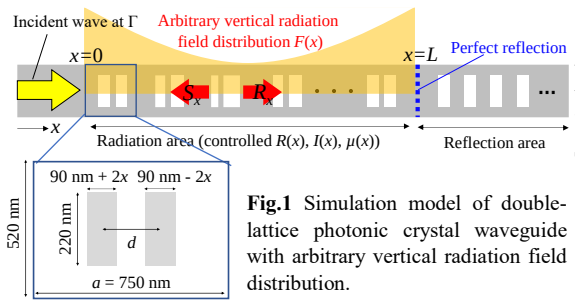

Fig.1 Simulation model of double-lattice photonic crystal waveguide with arbitrary vertical radiation field distribution.

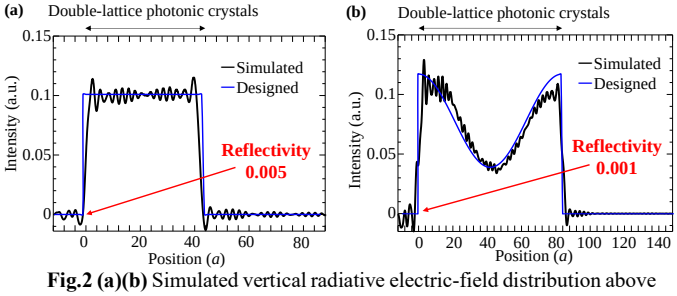

Fig.2 (a)(b) Simulated vertical radiative electric-field distribution above the designed waveguides with two different radiation patterns.

© 2023年 応用物理学会