

スタジアム形微小共振器のモード損失

Modal loss of micro-stadium cavities

岡山県立大情報工 ○福嶋 丈浩, (B)中原 蒔

Okayama Pref. Univ. ○Takehiro Fukushima and Fuki Nakahara

E-mail: fuku@c.oka-pu.ac.jp

【はじめに】 2次元の光共振器に閉じ込められた光線と波動の対応関係を調べることは学術的に興味深い研究課題である[1,2]。一般的に、共振器のサイズが波長に比べて十分大きい場合には、光線軌道とモードの間に対応関係が成り立つ。例えば、円形の共振器に閉じ込められた光線は一定の入射角を保ちながら規則的に反射を繰り返す。入射角が大きいとき光線は共振器の周辺に分布する。このような光線軌道に対応するモードとして共振器周辺に光が局在したウイスパリングギャラリー (WG) モードが現れる。一方、正方形に2つの半円を繋げたスタジアム形の共振器に閉じ込められた光線は全く不規則な振る舞いを示す。このような光線軌道に対応するモードとして共振器全体にわたって複雑に光が分布する波動カオスモードが現れることが知られている[3]。ここで、スタジアム形共振器の直線部分の長さを調整すると共振器の形状を円形からスタジアム形に連続的に変形することが可能である。そこで、我々は共振器の変形によるモード形状の変化を調べた[4]。今回、変形によるモード損失の変化を調べたので、その結果について報告する。

【解析モデル】 モード解析には有限要素法に基づく汎用ソフト COMSOL Multiphysics®を用いた。図1に解析モデルを示す。半円部分の半径 R を $0.5\ \mu\text{m}$ に設定し、直線部分の長さ d を 0 から $1\ \mu\text{m}$ まで変化させた。半導体を想定して共振器内部の屈折率 n を 3.3 、外部の屈折率を 1.0 に設定した。解析領域の大きさは $2.8\ \mu\text{m} \times 2.8\ \mu\text{m}$ とし、反射を抑えるために計算領域の4隅を散乱境界条件に設定した。損失のあるモードの共振周波数は複素数になり、実部 f_r が共振周波数、虚部 f_i が損失係数に比例した量を表す。そこで、虚部 f_i の大きさをモード損失の変化を調べた。

【解析結果】 図2に直線部分の長さ d に対する共振周波数の実部 f_r と虚部 f_i の変化を示す。この周波数帯には他にも共振器モードが存在するが、簡単のため注目するモードのみを表示している。 d がゼロ (円形) のとき、半径方向の腹の数 l が 1 、円周方向の腹の数 m が 16 の WG モードと $l=3$, $m=4$ の高次モードが存在する。 d が増加すると、これらのモードはそれぞれ対称性が異なる2つのモードに分離する。一つは直線部分の中央が節になるモードであり (Mode1, Mode3), もう一つは直線部分の中央が腹になるモード (Mode2, Mode4) である。 d の増加とともにこれらのモードの共振周波数が変化し、接近したモードと相互作用を起こす。具体的には、 $d=0.43\ \mu\text{m}$ 付近において、Mode1 と Mode3 の間で f_r は交差、 f_i は反交差を起こす。一方、 $d=0.7\ \mu\text{m}$ 付近において、Mode2 と Mode4 の間で f_r は反交差、 f_i は交差を起こす。これらの相互作用は、それぞれ弱結合と強結合と呼ばれている[5]。共振器のサイズが大きくなるとモード密度が増大してモード相互作用の頻度が高くなると考えられる。モード損失を表す虚部 f_i は、これらのモード相互作用によって複雑な変化を示すが、光線の入射角が全反射条件を満足する閉じ込めが強い WG モードから変形した Mode1 と Mode2 は d の増加にともなって f_i が全体的に増加する傾向を示した。これは、変形が大きくなると入射角が変化する速さが加速され、全反射条件を破って共振器の外部に光が放射される頻度が高くなるためと考えられる。一方、全反射条件を満足しない損失の高い高次モードから変形した Mode3 と Mode4 は d の増加にともなって f_i が減少する傾向を示した。これは入射角の変化が加速することで全反射条件を満足する頻度が高くなるためであると考えられる。閉じ込めの強いモードと弱いモードで異なった損失の変化を示すことが明らかになった。

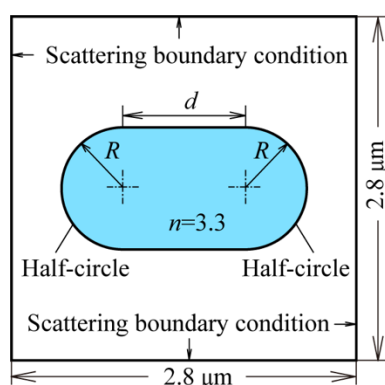
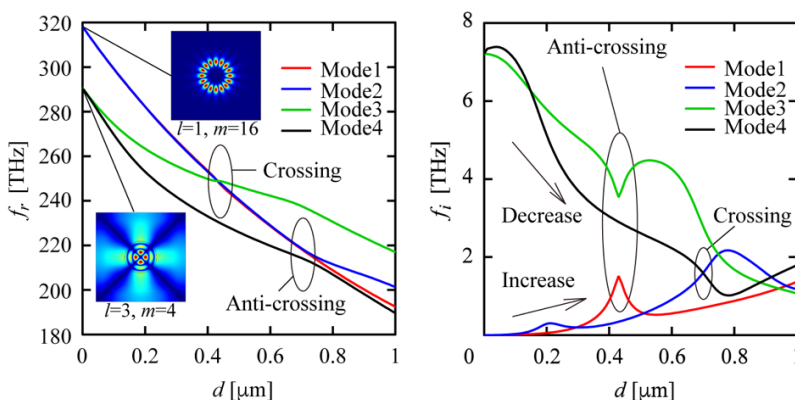


Fig.1 Calculation model.

Fig. 2 Dependence of resonance frequency on the length d .

[1] T. Fukushima and T. Harayama, "Stadium and quasi-stadium laser diodes (invited paper)," IEEE J. Select. Topics Quantum Electron., vol. 10, pp. 1039-1051, 2004. [2] 福嶋丈浩, 二次元共振器半導体レーザ (解説), 電子情報通信学会誌, vol. 94, pp. 323-328, 2011. [3] T. Harayama and S. Shinohara, "Two-dimensional microcavity lasers," Laser & Photonics Reviews, vol. 5, pp. 247-271, 2011. [4] T. Fukushima, "Modal interactions in microstadium optical cavities (invited talk)," Proceedings of ICTON 2018, paper We.D4.2, 2018. [5] H. Cao and J. Wiersig, "Dielectric microcavities: Model systems for wave chaos and non-Hermitian physics," Rev. Modern Phys., vol. 87, pp. 61-111, 2015.