

技術報告

Fabry-Perot 形超短共振器の共振器長測定

蝦名 和仁・氏原紀公雄

電気通信大学電子工学科 〒182 調布市調布ヶ丘 1-5-1

(1994年3月31日受付, 1994年5月25日受理)

Measurement of the Length of a Fabry-Perot Type Microcavity

Kazuhito EBINA and Kikuo UJIHARA

Department of Electronic Engineering, University of Electro-Communications,
1-5-1, Chofugaoka, Chofu 182

(Received March 31, 1994; Accepted May 25, 1994)

A method of measuring the length of a Fabry-Perot type microcavity is described. The length is estimated by fitting the calculated and measured transmittance versus wavelength data.

1. はじめに

従来のレーザーにおいてレーザーの効率と波長安定性を制約する究極的なものは自然放出とされ、自然放出は人為的に制御できない現象と考えられてきた。しかし共振器長を光の波長程度にすることにより、自然放出の速度や放射パターンを制御し得ることが理論的に指摘されている¹⁻³⁾。

そこで、超短共振器レーザーからの放射特性を実験的に調べるために2枚の誘電体多層膜ミラーを近接対向させたファブリー・ペロー (F・P) 形超短共振器を試作したが、ミラーの洗浄にもかかわらず共振器内部にダスト等が混入するため、共振器長が設計通り波長程度になっているか確認する必要があった。そこで共振器の波長透過特性の測定結果と、伝達マトリクス法⁴⁾を用いて特定の長さを与えた共振器の波長透過特性の数値計算結果とのフィッティングを行うことにより共振器長の推定を行うことを試みたが、多層膜ミラーの設計波長と層数が入力側と出力側では異なるミラーで構成した共振器の場合、数値計算からは共振ピーク波長が得られなかったため共振器長の推定はできなかった。そのため新たにF・P干渉計の原理⁵⁾を用い、ミラー単体に光が垂直入射した際の反射波の位相跳びを数値計算から求め、入射波長を変化させた時に共振器内部に定在波ができる条件を満

足する共振器長を求めてマップを作り、これを実測される共振器の波長透過特性と比較して共振器長を推定した。この方法はミラーの反射による位相跳びの波長特性がわかれば、波の干渉現象を用いた共鳴条件式が利用できるという点で測定原理としては簡便なものであり、干渉パターンの入射角依存性を測定する方法に比べると十分な測定精度が得られると考えられる。

2. 測定原理

F・P干渉計の原理図をFig. 1に示す。この干渉計の原理は、共振器に垂直入射した光が共振器を構成するミラー M1 および M2 で多重反射を受け位相が揃うと互いに強め合い、その結果透過率が大きくなるというものである。

F・P干渉計では m 次の透過光は $(m-1)$ 次の透過光より二回多く内部反射を受けている。そのため対称ミラーで構成される共振器の場合、一回の内部反射で $\phi(\lambda)$ だけ位相が変化するなら m 次の透過光と $(m-1)$ 次の透過光の位相差 $\alpha(\lambda)$ は

$$\alpha(\lambda) = 2\pi \frac{2nd}{\lambda} + 2\phi(\lambda) \quad (1)$$

となる。ここで nd は共振器の光学長、 λ は入射波長で $\phi(\lambda)$ はミラーの位相跳びである。また非対称ミラーの場合、位相跳びをそれぞれ $\phi_1(\lambda)$, $\phi_2(\lambda)$ とすれば(1)

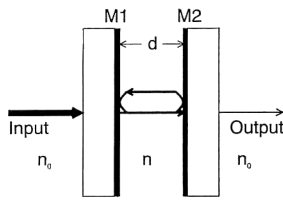


Fig. 1 Fabry-Perot interferometer. M 1, M 2: dielectric mirrors, d : cavity length, n, n_0 : refractive indices.

式の右辺第2項を $\phi_1(\lambda) + \phi_2(\lambda)$ とすればよく、(1)式において位相差 $\alpha(\lambda)$ が 2π の整数倍に等しくなれば強め合いの条件を満足する。

光がミラーに垂直入射した時の入射波長対位相跳びは、前述のように、光学膜の特性行列から伝達マトリクス法を用いて求められる。ある層の屈折率が n で、その層が $z=0$ から始まるときその層を記述する特性行列 $\mathbf{M}(z)$ は TE 波の場合、

$$\mathbf{M}(z) = \begin{bmatrix} a & -ib/p \\ ipb & a \end{bmatrix} \quad (2)$$

となる。ここで $a = \cos(\beta)$, $b = \sin(\beta)$, $k = 2\pi/\lambda$, $n^2 = \epsilon\mu$ であり、 ϵ および μ はそれぞれその層の誘電率および透磁率であり、 $\beta = knz \cos \theta$, $p = (\epsilon/\mu)^{1/2} \cos \theta$ で θ は波面の法線と z 軸の成す角である。i は虚数単位である。TM 波の場合は、 p の代わりに $q = (\mu/\epsilon)^{1/2} \cos \theta$ を用いれば全く同じ式が成立する。

今、 $z=0$ から $z=z_1$ までの層状媒質がありその両側に均質な半無限媒質があるとすると、この層状媒質に平面波が入射する際の反射波および透過波の振幅と強度を表す式を求める。A, R および T を入射、反射および透過波の電気ベクトルの振幅とし、 ϵ_1, μ_1 および ϵ_t, μ_t を第1および最終媒質の誘電率と透磁率とする。さらに θ_1, θ_t を入射および透過波の波面の法線が z 軸となす角とすれば、 $z=z_1$ として計算された媒質の特性行列の要素を m_{ij} として膜の反射および透過係数は次式で与えられる。

$$r = \frac{R}{A} = \frac{(m_{11} + m_{12}p_t)p_1 - (m_{21} + m_{22}p_t)}{(m_{11} + m_{12}p_t)p_1 + (m_{21} + m_{22}p_t)} \quad (3)$$

$$t = \frac{T}{A} = \frac{2p_1}{(m_{11} + m_{12}p_t)p_1 + (m_{21} + m_{22}p_t)} \quad (4)$$

ただし、 $p_1 = (\epsilon_1/\mu_1)^{1/2} \cos \theta_1$, $p_t = (\epsilon_t/\mu_t)^{1/2} \cos \theta_t$ である。この r と t を用いれば反射率 \mathcal{R} と透過率 \mathcal{C} は

$$\mathcal{R} = |r|^2, \quad \mathcal{C} = \frac{p_t}{p_1} |t|^2 \quad (5)$$

と書くことができる。さらに反射の際の位相変化 δ_r は

$$\tan(\delta_r) = \tan\{\arg(r)\} \quad (6)$$

で与えられる。

次に第1番目の媒質が $z=0$ から $z=z_1$ を占め、第 N 番目の媒質が $z=z_{N-1}$ から $z=z_N$ に及ぶ、 N 層からなる層状媒質を考える。今、それぞれの媒質の特性行列を $\mathbf{M}_1(z), \dots, \mathbf{M}_N(z)$ とすると、伝達マトリクス法によれば、 N 層の特性マトリクス $\mathbf{M}(z_N)$ は、

$$\mathbf{M}(z_N) = \mathbf{M}_1(z_1)\mathbf{M}_2(z_2 - z_1)\dots\mathbf{M}_N(z_N - z_{N-1}) \quad (7)$$

となる。

N 層ミラーの特性行列 $\mathbf{M}(z_N)$ の行列要素を(5)および(6)式に代入すれば、 N 層ミラーの反射率および反射による位相跳びが求められる。

3. 共振器長の測定

共振器モデルを Fig. 2 に、共振器を構成する入力側と出力側の垂直入射時の誘電体多層膜ミラーの波長特性をそれぞれ Fig. 3 (a) および (b) に示す。

ミラーの光学膜の屈折率は $n_l = 1.46$, $n_h = 2.3$ であり、一層の光学膜厚が (625/4) nm である 31 層ミラーを入力側に、一層の光学膜厚が (550/4) nm である 74 層ミラーを出力側に用い、レーザー媒質として用いる Eu (bfa)₄ 溶液の蛍光ピーク波長が $\lambda_0 = 612$ nm であるから、共振器長が光学長換算で $0.5\lambda_0$ になるように一方のミラーの外周には数個のスペーサを施した。なお、測定に際して共振器内部は空気層としている。

共振器長測定の実験配置を Fig. 4 に示す。光源にはタングステンランプを用い、集光レンズ L を通った光は分光器に入射し、分光された光はビームスプリッターで更に二分される。二分された光の一方は入力光として光電子増倍管 1 に入射し、他方の光は共振器に垂直入射する。共振器面上の一定箇所だけに生じる明点を検出できれば特定の位置での共振器長を測定することができるので、共振器の出力光側にピンホール板を取り付けてお

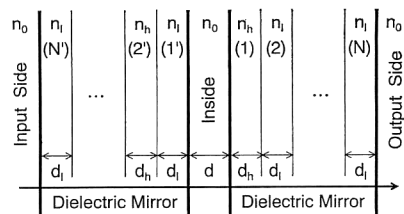


Fig. 2 Cavity Model. The input mirror has N' layers and the output mirror has N layers. Suffices h and l denote high index layer and low index layer, respectively.

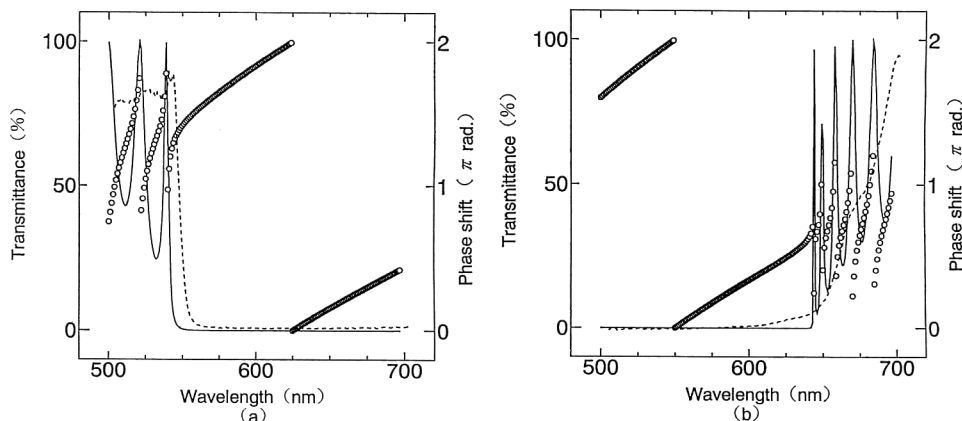


Fig. 3 Calculated transmittance vs. wavelength (dashed line), phase shift vs. wavelength (open circles), and measured transmittance vs. wavelength (solid line). (a) Input mirror. $N=31$, $n_h=2.3$, $n_l=1.46$. (b) Output mirror. $N=74$, $n_h=2.3$, $n_l=1.46$.

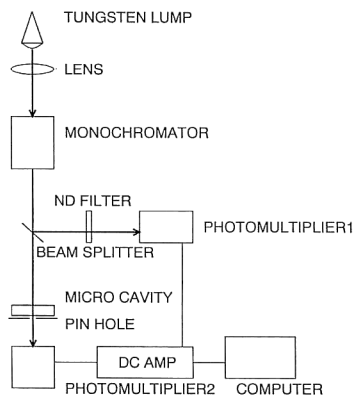


Fig. 4 Schematic arrangement to measure the cavity length.

く。光電子増倍管 2 で検出された透過光の信号は、入力光と共にアンプで増幅され分光器の波長走査を行うコンピュータに取り込まれる。

Fig. 5 に数値計算より求めた $m=3\sim 6$ 次の共鳴条件を満たすミラー間隔の波長依存性を上部に、共振器の波長透過特性の測定結果の例を下部に示す。

透過ピーク波長はそれぞれ 510 nm, 560 nm, 670 nm であり、その透過スペクトル幅は 1.5 nm (FWHM) 程度である。Fig. 5 の下部に示される三つの共鳴波長が同一共振器長に対して短波長のものから順次、 m 次、 $(m-1)$ 次、 $(m-2)$ 次の共鳴曲線上に並ぶかどうかを調べると、Fig. 5 の上部の共鳴曲線で $m=6$ 次としたとき、実験値と理論値は最も良く一致し、その時共振器長は $2.25 \lambda_0$ と決定される。ここで誤差を考えると Fig. 4 に示す実験配置からわかるとおり、この測定での波長分

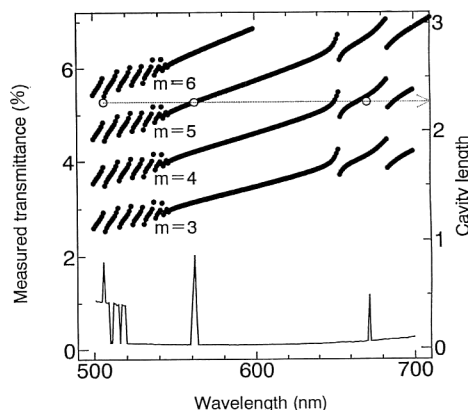


Fig. 5 Measured transmittance vs. wavelength and calculated resonant cavity length vs. wavelength. The cavity length is scaled to $\lambda_0=612$ nm. $n=1.00$. Closed circles: calculated cavity length which maintains resonant condition for given m and wavelength, solid line: measured transmittance vs. resonant wavelength, open circles: fitting points.

解能は分光器のスリット幅と共振器の出力側に配置したピンホール板のホール径に依存するため、測定された波長の誤差は透過スペクトル幅程度であると考えられ、波長誤差 $\delta\lambda$ はおよそ 1.5 nm となる。つまり測定結果より得られた透過ピーク波長 λ_p を中心に 1.5 nm 程度の波長誤差を含むということは、 m 次の共鳴曲線から算定される共振器長では $m(\delta\lambda/2)[\{2\phi(\lambda_p)-\alpha(\lambda_p)\}/2\pi]$ (nm), すなわち $m(\delta\lambda/2\lambda_0)[\{2\phi(\lambda_p)-\alpha(\lambda_p)\}/2\pi]$ 波長程度の誤差を含むことに相当し、4.5 nm または 0.01 波長が共振器長の測定誤差である。

上に決定した共振器長は、単一波長の光が共振器に入射した際に共振器を構成するミラーに生じる干渉パターンの入射角依存性の測定により算定される共振器長と良く一致する。

共振器長が設計波長の半整数倍に等しくならない原因は、共振器を構成する多層膜ミラーの反射の際の位相跳びが 2π に等しくならないためである。

4. む す び

ファブリー・ペロー形超短共振器の共振器長測定法について述べ、測定の一例について示した。実測した共振器長は設計共振波長 $\lambda_0=612\text{ nm}$ の 2.25 倍であることがわかった。

文 献

- 1) S. D. Brorson, H. Yokoyama and E. P. Ippen: "Spontaneous emission rate alteration in optical waveguide structures," IEEE J. Quantum Electron., **26** (1990) 1492-1499.
- 2) H. Yokoyama and S. D. Brorson: "Rate equation analysis of microcavity lasers," J. Appl. Phys., **66** (1989) 4801-4805.
- 3) K. Ujihara, A. Nakamura, O. Manba and X. P. Feng: "Spontaneous emission in a very short optical cavity with plane-parallel dielectric mirrors," Jpn. J. Appl. Phys., **30** (1991) 3388-3398.
- 4) M. Born and E. Wolf: *Principles of Optics*, 1st ed. (Pergamon Press, New York, 1959) pp. 78-100.
- 5) 例えば, 中井祥夫, 福田国彌, 加藤利三 共訳, ロッシ: 物理学叢書 光学 (吉岡書店, 1967) 3章.