フォトントラップ表面分光法:外部光共振器への固体基板挿入効果\*

(豊田工大・(株)コンポン研) 寺嵜 亨・江頭和宏・近藤 保

【序】キャビティリングダウン(CRD)法は気相試料の光吸収を超高感度に測定する手段として幅広く応用されているが、固体表面上に担持したクラスターのように極微量の表面吸着物質を検出する手法としても優れていることを報告する。

極めて低損失の光共振器を利用する CRD 法は、表面反射で数%以上もの光損失を生じる固体試料への適用が困難と考えられてきた。ところが、Fabry-Perot 型共振器に光学的に平坦で透明な固体基板を光軸と垂直に挿入し、反射光が共振器モードに復帰するように精密調整した結果、基板挿入による光損失を 0.01%以下に低減することに我々はこれまでに成功した。本研究では、この光共振器について光結合効率と光閉じ込め寿命とを理論的に考察し、基板挿入効果を明らかにした。さらに、光閉じ込め寿命が固体基板の挿入位置に依存して変化するという理論予測を実験的にも確かめた。

なお、以下に述べる共振器特性の解析では、光パルスが共振器中を往復しながら減衰するという単純な描像は不十分であり、特に連続光源を用いる場合には、共振器の周波数特性で決まる Q 値に比例する寿命で蓄えられた光が減衰すると考えるのが妥当である。その意味で、低損失の光共振器を利用する測定手法を包括的に「フォトントラップ法」と呼ぶことを提案する。

【理論解析】固体基板を挿入した光共振器は、図1のように3つの部分共振器(C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>)が結合した光学系と見なせる。固体基板自身が形成する付加的な共振器 C<sub>2</sub>により新たな干渉効果が生じ、光透過率(信号強度)や光閉じ込め寿命が光吸収以外の要因(基板の厚さと挿入位置)で変化する。コヒーレントな連続光源を用いる場合につ

いて光の伝播を波動光学的に解析し、これらの特性量を各部分共振器の光学長  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_3$  の関数として求めた。

(1) 光結合効率:実際の測定手順に従って、波長を選ぶと基板の厚さにより  $d_2$  が決まる。さらに基板を入力共振器鏡から距離  $d_1$  に置く。そして出力共振器鏡を掃引して信号強度が最大になる  $d_3$  を探す ( $d_3$  掃引モード)。このときの最大信号強度(最大透過率) $T_c^{max}$  を光結合効率と呼ぶ。光学長  $d_i$  が異なってもその位相 $\phi_i$  ( $=2\pi n_i d_i/\lambda$ )が同じであれば  $T_c^{max}$  は等しい。図 2 に Si 基板( $n_2=3.5$ )を挿入した場合の  $T_c^{max}$  を $\phi_1$ ,  $\phi_2$  の関数として描いた。このように、基板の厚さが波長の整数倍( $\phi_2=m\pi$ )の場合には、常に  $T_c^{max}=1$  である。任意の波長では、これは必ずしも成り立たず、 $T_c^{max}=1$  となる $\phi_1$  が 2 点だけ存在する。

(2)光閉じ込め寿命:類似して、光閉じ込め寿命τもφι

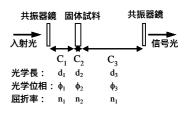


図 1 共振器構成図

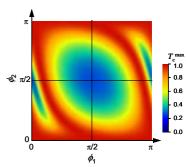


図 2 光結合効率。Si 基板挿 入時

と $\phi_2$  の関数となる。 但し、図3のように 基板の挿入位置によって挙動が異なり、 中央に挿入した場合  $(r_1=0.50)$  には寿命は  $\phi_1$ ,  $\phi_2$  に依存しない が、端に行くにした

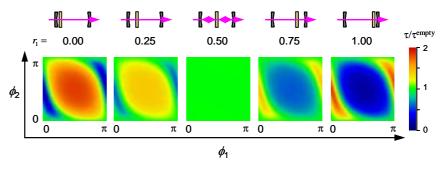


図3 光閉じ込め寿命。r<sub>1</sub>はSi基板挿入位置を示す変数

がって依存性が大きくなる。後者の条件では、寿命が光 吸収以外の要因で変化するため、光吸収スペクトルに人 為的な構造を与える可能性がある。

 $T_c^{max}$   $E_{\tau}$  が $\phi_1$  によって変化する上述の挙動が、固体基板が一方の共振器鏡をコーティングすると考えることにより直感的に理解できることを述べる。

【検証実験】実験装置を図 4 に示す。連続発振中赤外レーザーの出力光を音響光学素子(AOM)で強度変調し、外部光共振器へ導入した。共振器内には、中赤外域で透明な Si 基板(厚さ約  $700~\mu m$ )を光路に垂直に挿入した。出力光強度を観察しながら鏡 M2 を掃引し、共振器が共鳴条件に達し信号が最大となった時点で AOM により入射光を遮断した。波長を $\phi_2=\pi/2$  を満たす  $3.61043~\mu m$  に設定し、鏡 M1 を動かして $\phi_1$  を調整し、光減衰時定数(閉じ込め寿命) $\tau$ が変化する様子を測定した。実際に $\phi_1$  を測定することは難しいが、M2 を掃引した際の共鳴幅(フィネス、 $F_{\phi3}$ )が $\phi_1$  と関係していることを利用して、共鳴の立ち上がり部分で  $F_{\phi3}$  を、入射光遮断後の信号減衰部分で $\tau$  を、それぞれ求めた。

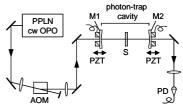


図 4 フォトントラップ表面 分光装置

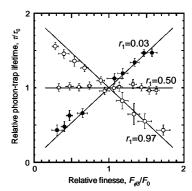


図5 光閉じ込め寿命のフィネス依存性。基板がない場合の値で規格化されている。 r<sub>1</sub>は Si 基板挿入位置を示す

得られた $\tau$ と  $F_{\phi 3}$  の関係を図 5 に示す。Si 基板が共振器中央に置かれた場合 $(r_1=0.50)$  には $\tau$ は  $F_{\phi 3}$ (即ち $\phi_1$ )によらず一定だが、入力側に近い場合 $(r_1=0.97)$ には、理論的に予測される実線のように、比例関係が現れた。

【結論】(1)光共振器中に低損失条件を損なわずに固体基板を導入することが可能である。(2)固体基板を共振器の中央に置くと、基板位置の揺らぎの影響を受けずに光閉じ込め寿命を精密に測定できる。(3)両方の共振器鏡を位置制御して波長毎に $d_1$ ,  $d_3$ を最適化することにより、任意の波長(もしくは基板厚さ $d_2$ )で最大信号強度( $T_c^{max}=1$ )を得られる。(4)この手法を利用して透明基板上の微量な吸着種の光吸収を測定することが可能であり、従来の表面分析法を凌ぐ感度が期待できる。

<sup>\*</sup>本研究は(株)コンポン研究所の研究プロジェクトの一環として行われた。