

光学位相を制御した光共振器による薄膜吸収体の透明化

(コンボン研*、豊田工大**)

江頭和宏*、寺寄 亨**、近藤 保**

【序】固体表面吸着種の光吸収を超高感度に検出する原理的に新しい手法として、フォントラップ法の開発を進めている[1]。これは、高反射率の鏡で構成された光共振器中に定在波状に閉じ込めた光と試料とを相互作用させ、試料の光吸収によって光閉じ込め寿命が短縮されることを測定原理とする計測法であり、光源の強度変動の影響を受けないために極めて高い感度を得られることが特長である。実際に、本手法を用いてシリコン表面上に吸着した長鎖アルキル分子の微弱な赤外吸収を捉え、振動スペクトルの測定に成功した[2]。その過程で、表面吸着種のように波長に比べて十分に薄い試料が定在波と相互作用する際に、光学位相の条件によって、本来検出されるべき光吸収が消失する「透明化」が起きることを見出した[3]。つまり、吸収体が定在波の節に位置する場合、光と吸収体との相互作用が抑制される。この現象をさらに定量的に理解するために、薄膜吸収体を挿入した共振器の特性を波動光学的に数値解析し、このような透明化現象を引き起こす最適な共振器条件を調べた。

【理論解析】コヒーレントな光源を用いた場合について光の伝播を波動光学理論に基づいて解析した[1]。薄膜吸収体を挿入した光共振器は、図1のように5つの領域から成る光学系と見なせる。領域2(厚さ d_2)が薄膜吸収体に相当し、吸収の効果を複素屈折率 $\hat{n}_2 = n_2 - ik_2$ で取り入れた。ここで n_2 は屈折率、 k_2 は消衰係数である。光がこの媒質中を距離 d_2 だけ伝播すると、強度が $\exp(-4\pi k_2 d_2/\lambda)$ 倍に減衰する(λ は真空中での波長)。領域1と3は真空である($n_1 = n_3 = 1$)。領域0と4は共振器鏡に相当し、これらの間で光共振器が構成される。共振器鏡は仮想的に屈折率の大きな光学媒質と考えることができ、その反射率 R は、 $n_0 = n_4 = n_{\text{mirror}}$ と仮定して、 $R = (n_{\text{mirror}} - 1)^2 / (n_{\text{mirror}} + 1)^2$ で与えられる。

(1) 定常状態の解析: 薄膜の厚さ(d_2/λ)と消衰係数(k_2)を種々に仮定して、薄膜吸収体固有の透過率 $T_{\text{single}} = \exp(-4\pi k_2 d_2/\lambda)$ 、共振器入出力比の最大値 T_{max} 、そのときの共振器鏡の反射率 R_{opt} を計算した結果を表1に示す。いずれの場合にも、共振器鏡の反射率と位相条

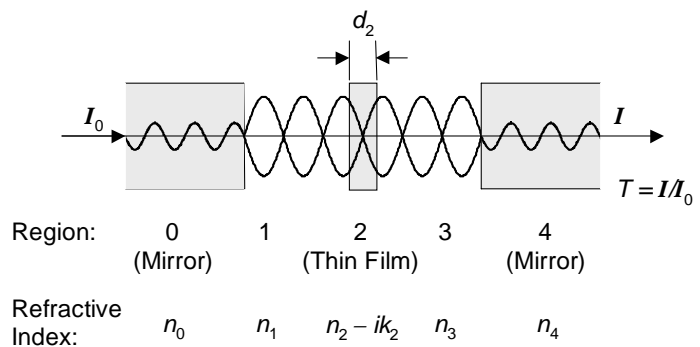


図1 モデル共振器の構成図

件とを最適化することにより、吸収体固有の透過率よりも高い共振器透過率が得られる($T_{\max} > T_{\text{single}}$)ことが分かる。さらに、 T_{\max} を最大にするための最適反射率 R_{opt} は、数値解析の結果から $R_{\text{opt}} \approx [(1 - 1.8d_2/\lambda)/(1 + 1.8d_2/\lambda)]^2$ と近似できることが分かった。

このように R_{opt} が存在する理由は共振器中の電場分布から定性的に理解できる。つまり、共振器鏡の反射率が大きいほど、進行波成分が減少する一方で、定在波の電場強度が増大する。吸収体の厚さが無限小の場合には、吸収体をちょうど節の位置に置くことができ、進行波成分が小さくなるような高い反射率のときほど共振器出力は大きい。しかしながら吸収体が有限の厚さを持つ場合、増強された節近傍の光の吸収量がむしろ増大する。これら2つの効果の妥協点として R_{opt} が決まるものと考えられる。

具体的な例として、400 nm 周辺に表面プラズモン共鳴吸収 (吸収断面積: $1 \times 10^{-15} \text{ cm}^2$) を持つ、直径 1 nm の銀ナノ粒子の単層膜を考える。薄膜自体は 400 nm の光を $T_{\text{single}} = 90\%$ しか透過しないが、反射率 $R_{\text{opt}} = 98.2\%$ の鏡で構成した共振器中に、薄膜厚さ方向の中心が定在波の節に来るように挿入すると、共振器入出力比は最大で $T_{\max} = 99.6\%$ に達する。

(2) ビルドアップ過程の解析: 以上の解析は共振器中に定在波が形成されることを前提としたが、光を入射後に定在波が形成されて上記の定常状態に到達するか否かは自明ではない。このようなビルドアップの過程を時間領域差分 (FDTD) 法で解析し、実際に吸収体の透過率を上回る共振器出力が達成されることを確認した。

【結論】(1) 波長に比べて十分に薄い光吸収体について、吸収体を共振器内に挿入することにより、吸収体固有の透過率よりも高い透過出力を共振器から得ることができること、(2) 吸収体の厚さに依存して、透過出力を最大にする最適な共振器鏡の反射率が存在すること、を明らかにした。

表 1 種々の条件下での吸収体固有の透過率(T_{single})、共振器入出力比の最大値(T_{\max})と共振器鏡の最適反射率(R_{opt})

k_2	d_2/λ	T_{single}	T_{\max}	R_{opt}
0.1	1/10	0.8819	0.9211	37.15%
1	1/100	0.8819	0.9909	92.99%
0.1	1/100	0.9875	0.9991	92.98%
1	1/1000	0.9875	0.9999	92.98%

[1] A. Terasaki, T. Kondow, and K. Egashira, J. Opt. Soc. Am. B, **22**, 675–686 (2005).

[2] 江頭、寺寄、近藤 分子構造総合討論会 3P040 (2005).

[3] 寺寄、江頭、近藤 分子構造総合討論会 3B13 (2005).