

金属ナノ微粒子を用いたプリズム型波長合分波器の 理論的光学特性

菅 野 良 太*・馬 場 一 隆

Theoretical optical characteristics of prism-type add-drop filters using metal nanoclusters

KANNO Ryota* and BABA Kazutaka

Synopsis

Add-drop optical filters are important devices for wavelength-division multiplexing in optical communications. In this study, we theoretically investigated a prism-type add-drop filter using metal nanoclusters. The filter consists of periodic multilayers of glass layers and metal island layers composed of the metal nanoclusters sandwiched between two 45° glass prisms. Results show that the proposed filter is insensitive to polarization and incident angle in comparison with conventional filters using dielectric multilayers.

Keywords : Metal nanocluster, Metal island film, Dielectric multilayers, Add-drop optical filter, Wavelength-division multiplexing

1. はじめに

光通信システムや光応用計測などの光技術の発展に伴い、通信、情報処理、計測、記録などの分野において、光の果たす役割はますます重要になってきている。こうした技術の発展に伴い、各種のより優れた特性のデバイスの開発が求められている[1]。波長合分波器はそのようなデバイスのひとつである[2-4]。波長合分波器は、光導波路内や空間を伝送している光波に対して、特定の波長域の光を取り出したり（分波）、外部から加えたり（合波）する光デバイスである。波長合分波器は波長多重を行う際に必要不可欠な素子であり、光エレクトロニクスの分野において重要な素子のひとつである。本研究では、図1に示すようなプリズム型波長合分波器について理論的な検討を行う。プリズム型波長合分波器は2種類の薄膜からなる交互多層膜を2つのガラス製の直角プリズムの間に挟んだ構造からなり、光の伝送方向と直角の方向に分波し、また、直角方向から光の合波を行うものである。従って、光検出器や光源の配置が容易であり、実用上の利点が多いデバイスである。従って、プリズム型波長合分波器の多層膜の構造や材料によって素子の特性がどのように変化するかを理論的に調べ、様々な用途に適したプリズム型波長合分波器の設計

を行うことは、重要なことである。

本稿では、そのうち特に透明誘電体と金属ナノ微粒子からなる島状金属薄膜の交互多層膜を利用したものについて理論的検討を行った結果を述べる。このような素子については、以前筆者らの1人(B. K.)のグループにより、波長800nm帯の素子について検討され、特に偏光依存性が小さい利点があることが報告されている[5, 6]。本報告では、より短波長帯の400nm帯用の素子を設計して島状金属薄膜の構造と素子特性の関係を示し、また、入射角依存性についても検討した結果を示す。

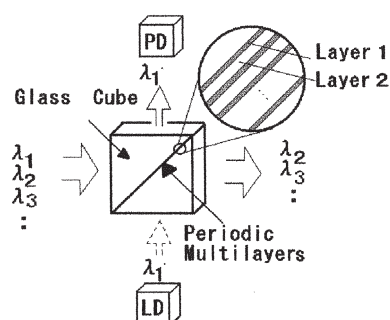
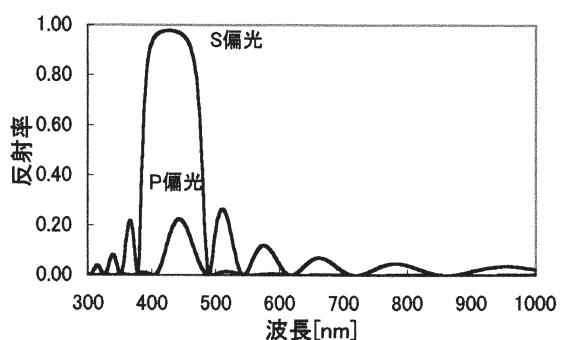


図1 プリズム型波長合分波器の基本構造

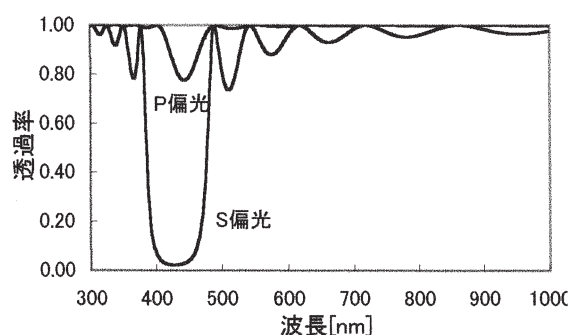
* 本校専攻科情報システム工学専攻2年

2. 透明誘電体多層膜の光学特性

プリズム型波長合分波器の交互多層膜の材料で最も一般的に用いられるものは透明誘電体多層膜である。そこで、まず本研究で検討する素子との比較のため、アルミナと石英をそれぞれ10層に積層した交互多層膜を使用したプリズム型波長合分波器のS偏光とP偏光における、波長200～1100nmまでの光学特性について計算を行った。石英の厚さは90nm、屈折率は1.453、アルミナの厚さは90nm、屈折率は1.759としている。S偏光は多層膜の面に平行な電界成分のみを持つ光で、P偏光は垂直な成分を含む光である。図2に示すように、S偏光は波長約450nm付近で反射率、透過率共にピークが現れていることが分かる。一方、P偏光は波長約450nm付近で特性が変化しているが、S偏光ほど変化が大きくないことが分かる。従って、透明誘電体多層膜を使用した場合、偏光依存性が大きくなることが問題となる。これは、透明誘電体多層膜では周辺媒質との屈折率差が得られず、ブリュースター角が 50° 付近に存在するためである。また、使用波長の周辺に干渉による多数の変動が見られるのも問題である。



(a) 反射率



(b) 透過率

図2 アルミナと石英の交互多層膜の分光反射・透過特性

3. 島状金属薄膜の光学特性

島状金属薄膜とは、図3のように直径数十nm程度の金属微粒子が基板上に2次元的に分布した薄膜であり、薄膜を構成する金属島内部で自由電子が調和振動する為、可視から近赤外の特定の波長帯で、共鳴吸収特性を示す。共鳴吸収波長近傍では、薄膜の反射率と吸収率が高くなり、島状金属薄膜の実効屈折率が高くなる。その結果ブリュースター角が大きくなり、透明誘電体を用いた場合に比べS偏光とP偏光の偏光依存性が小さくなることが期待できる。ただし、実験的に得られる島状金属薄膜は粒子の大きさや形状にばらつきがありブロードな共鳴吸収特性になってしまう。しかし、将来のナノテクノロジーや薄膜形成技術の進歩を見込み、本研究では島状銀薄膜を島の形状が均一で、島の構造パラメータを制御することが可能な薄膜とした場合、どのような光学特性が期待できるのか理論的な検討を行う。

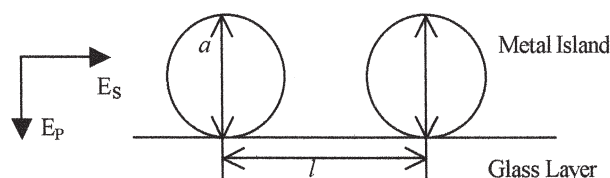


図3 島状金属薄膜の構造

3.1 島状銀薄膜の実効屈折率

金属材料として共鳴吸収ピークの鋭い銀を用い、形状は球を仮定して、島の間隔 l が25nm、島の直径 a が18nmのときの、波長300nm～1000nmまでの範囲における島状銀薄膜の実効屈折率について理論的な計算を行った。

図4に示すように島状銀薄膜に対して水平偏光(E_s)の実効屈折率 $n_{\parallel}$ では波長500nm付近でピークが現れていることが分かる。このため、周辺媒質(ガラス、屈折率=1.5)との屈折率差が大きくなり、素子の偏光依存性が小さくなると期待される。

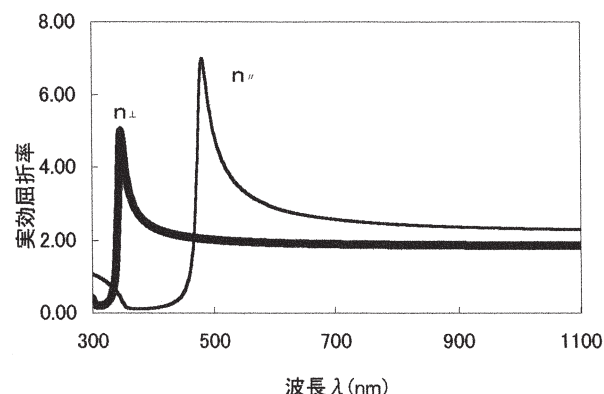


図4 島状銀薄膜の実効屈折率の計算例

3.2 島状銀薄膜の光学特性

島状銀薄膜を屈折率が1.5のガラスの中に埋め、入射角を 45° としたときの素子の分光反射特性について理論的な計算を行った。島のパラメータは島の間隔 l が25nm、島の直径 a が15nmで、島の形状は球とする。図5に示すように波長450nm付近で両偏光共にピークがみられる。また、透明誘電体多層膜に比べて偏光依存性が小さいことが分かる。従って、この構造の薄膜を用いることにより波長450nm付近の光を取り出し、他の波長帯はそのまま透過させることが可能なプリズム型波長合分波器の実現が期待できる。

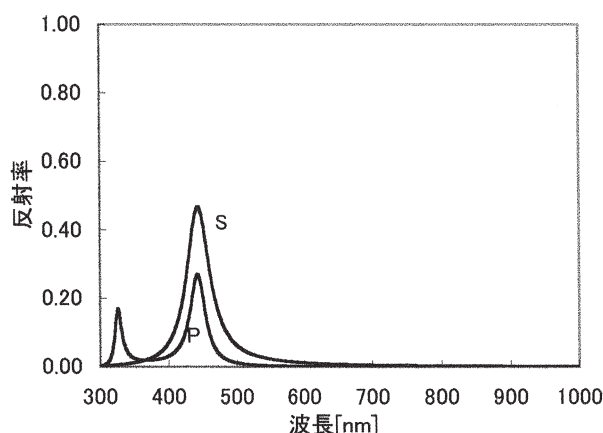


図5 島状銀薄膜の分光反射特性

4. 島状銀多層膜の光学特性

3.2で島状銀薄膜を偏光依存性の小さなプリズム型波長合分波器に用いることが可能であることを示した。しかし、S偏光、P偏光共に島状銀薄膜1層では分光特性において反射率が0.5程しかないので、クロストークを十分に低下させることは困難である。そこで、より高性能な素子を得るために、島状銀多層膜を用い、島の層数や島の間隔 l 、島の直径 a を変化させたときの分光特性について理論的な計算を行う。そして、これらのパラメータとの特性の関係について検討を行う。

4.1 島状銀多層膜の構造と光学特性

島状銀多層膜は島状銀薄膜とガラス層を交互に積層した多層膜である。島状銀薄膜の間のガラス層（スペーサ層）の膜厚が変化すると素子の特性も変化する。従って、計算を行う際に分光特性が最も良くなるスペーサ層の膜厚を求め、その結果、最適な膜厚は200nm付近と得られた。

島状銀薄膜を4層積層し、島の間隔 l が25nm、島の直径 a が15nmの分光特性の計算例を示す。図6に示したように波長400帯においてS偏光、P偏光共に島状銀薄膜1層のときに比べて高い反射率を示し、また、期待通り偏光依存性もあまり大きくないことが分かる。

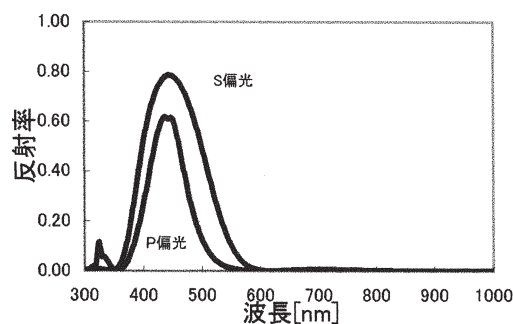


図6 島状銀多層膜の分光反射特性

4.2 島状銀薄膜の層数の影響

島の間隔 l を25nm、島の直径 a を15nmで固定し、島の層数を1層～8層まで変化させたときの分光特性について理論的な計算を行い、反射率のピーク値の変化を検討した。

図7に示すように島状銀薄膜の層数が増えるとS偏光、P偏光共に反射率のピーク値が大きくなることが分かる。また、変化の割合は層数が増えるに従って小さくなる傾向がみられる。また、図には示さないが、層数を増やすことにより、膜同士の干渉の影響が大きくなり波長帯域が広がることが分かった。従って、ここで用いた構造の薄膜では高い反射率を得ていると思われる4層程度の積層で十分であることが分かる。

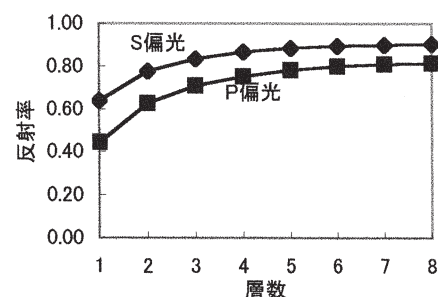


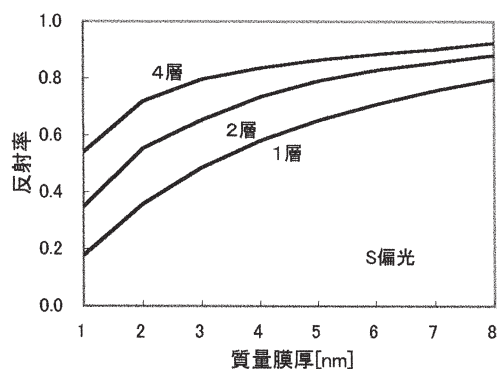
図7 層数と反射率のピーク値の関係

4.3 島状銀薄膜の質量膜厚の影響

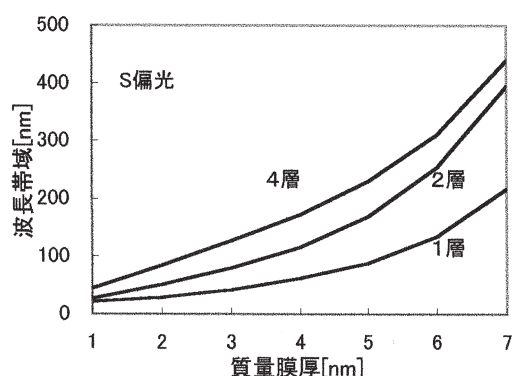
島状銀薄膜の質量膜厚の変化が素子の分光特性にどのような影響があるか計算を行う。質量膜厚とは金属粒子を潰して平坦にしたときの膜厚で、スペーサ層と同様に質量膜厚が変化するとS偏光、P偏光の特性が変化する。島の直径 l を25nmで固定し、質量膜厚を1～8nmまで変化させたときの分光特性を計算し、1層、2層、4層における反射率のピーク値の変化と波長帯域の変化を検討した。尚、波長帯域はピーク波長の半値幅とした。

図8に示すように、質量膜厚が厚くなるにつれてS偏光、P偏光共に反射率のピーク値が大きくなり、波長帯域は広がるが分かる。また、反射率の変化の割合は質量膜厚が厚くなるにつれて小さくなる傾向がみられた。従って、

質量膜厚は反射率が高く、波長帯域もあまり広がっていないと思われる 5 nm が最適であると考えた。



(a) 反射率のピーク値の関係

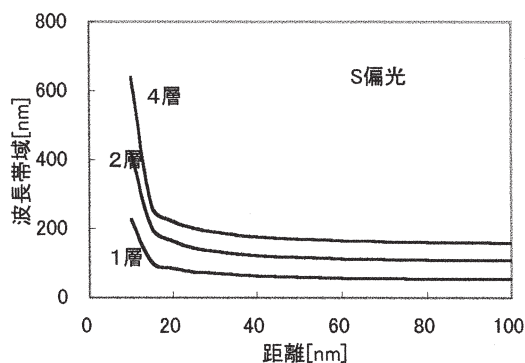


(b) 波長帯域の関係

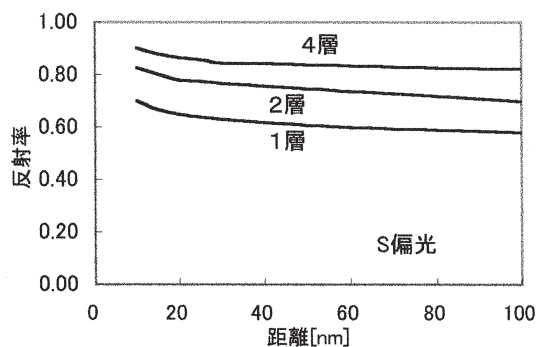
図8 質量膜厚と反射率、波長帯域の関係

4.4 島状銀薄膜の間隔の影響

島状銀薄膜の島の間隔の変化が分光特性にどのような影響があるか計算を行った。島の質量膜厚を 5 nm で固定し、島の間隔を 10 nm ~ 100 nm の範囲で変化させたときの分光特性を計算し、1 層、2 層、4 層における反射率のピーク値と波長帯域の関係について検討を行う。



(a) 波長帯域との関係



(b) 反射率のピーク値との関係

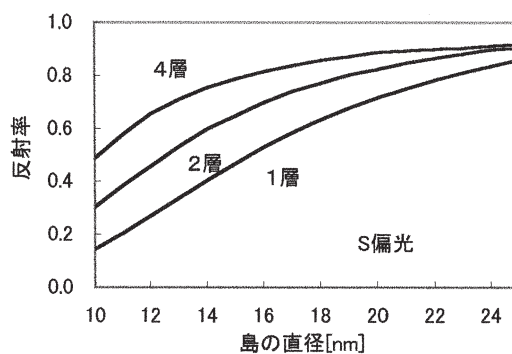
図9 島の間隔と波長帯域、反射率との関係

図9に示すように島の間隔が長くなると S 偏光, P 偏光共に波長帯域が狭くなることが分かる。また、反射率は島の間隔が変化してもあまり変化しないことが分かる。これは、質量膜厚の値を固定することで、島の間隔が長くなるにつれて島の直径が大きくなるからだと思われる。従って、島の間隔は波長帯域が十分狭い 25 nm が最適だと考えた。

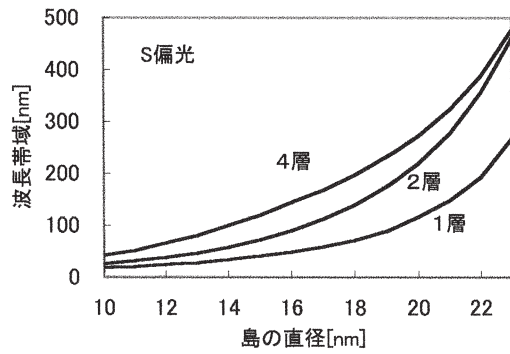
4.5 島状銀薄膜の直径の影響

島状銀薄膜の島の直径の変化が分光特性にどのような影響があるか計算を行った。島の間隔を 25 nm で固定し、島の直径を 10 nm ~ 25 nm の範囲で変化させたときの分光特性を計算し、1 層、2 層、4 層における反射率のピーク値と波長帯域の関係について検討を行う。

図10に示すように島の直径が大きくなると S 偏光, P 偏光共に反射率が高くなり、波長帯域が広がることが分かる。これは、島の直径が大きくなることにより島状膜が厚くなったことによると考えられる。また、反射率の変化の割合は島の直径が大きくなるにつれて小さくなり、波長帯域の変化の割合は大きくなることが分かる。



(a) 反射率のピーク値との関係



(b) 波長帯域との関係

図10 島の直径と反射率、波長帯域との関係

5. 入射角度の変化による角度依存性

次に、交互多層膜への入射角度が最適入射角の 45° からずれた場合の光学特性を計算し、角度依存性について検討した。入射角度を変化させたときの光学特性の変化が大きいと、配置等、素子の使用上の制限が生じるので角度依存性は小さい方が有利である。

本研究では、先に述べたアルミナと石英を8層に積層した透明誘電体多層膜と島状銀多層膜について入射角度を $15^\circ \sim 75^\circ$ の範囲で変化させたときの波長 $300\text{nm} \sim 1000\text{nm}$ における光学特性を計算し、入射角度が 45° のときに反射率がピークになる波長を基準にし、その波長における各角度の反射率を測定することで角度依存性について検討を行う。

5.1 透明誘電体多層膜の角度依存性

アルミナと石英を8層に積層した透明誘電体多層膜の入射角度を変化させたときの光学特性を計算し、角度依存性について検討した。なお、入射角度が 45° のときに、比較しやすくするため、透明誘電体多層膜のピーク波長を島状銀多層膜と同じになるように設定した。

図11に示すように、透明誘電体多層膜の場合、入射角度が 10° 変化すると、反射率が0になってしまうなど角度依存性が大きく、また、偏光依存性も大きいことが分かる。

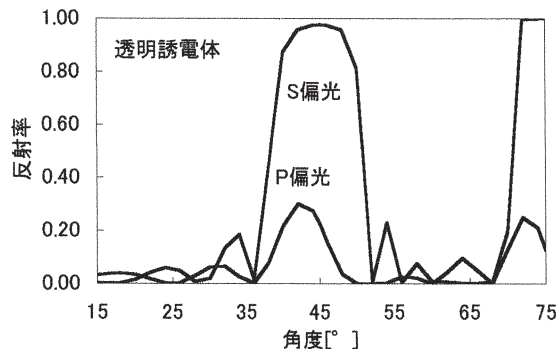


図11 アルミナと石英の多層膜（8層）の角度依存性

5.2 島状銀多層膜の角度依存性

次に4層で島の間隔 l が 25nm 、島の直径 a が 18nm の島状銀多層膜の入射角度を変化させたときの光学特性を計算し、角度依存性について検討する。

図12に示すように、島状銀多層膜の場合、入射角度が 45° より小さいときは特性の変化があまり無く、偏光依存性が小さいことが分かる。また、 45° より大きくなるとP偏光の反射率が極端に小さくなった。これは、入射角度が大きくなることで、水平偏光の成分が少なくなったためであると考えられる。従って、角度依存性の面から見ると、透明誘電体多層膜に比べて島状銀多層膜の方は角度依存性が小さいので、有利であると考えられる。

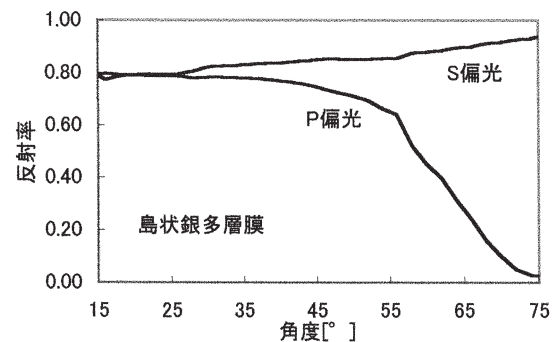


図12 島状銀多層膜（4層）の角度依存性

6. まとめ

島状銀薄膜を用いたプリズム型波長合分波器について薄膜の構造パラメータを自由に変わると仮定したときの光学特性の変化について以下のことが明らかとなった。

- 1) 島状銀薄膜の層数は数層程度で十分である
- 2) 島状銀薄膜の島の間隔が長くなると、波長帯域が狭くなり、反射率はあまり変化しない
- 3) 島状銀薄膜の島の直径が大きくなると、反射率が上昇し、波長帯域は広がってしまう

また、透明誘電体多層膜に比べて島状銀多層膜は偏光依存性や角度依存性が小さいという利点を持つことが分かった。

参考文献

- [1] レーザー技術総合研究所：レーザーと現代社会（コロナ社、2002）、pp.70-91.
- [2] S. M. Garner, V. Chuyanov, S. Lee, A. Chen and W. H. Steier, "Vertically Integrated Waveguide Polarization Splitters Using Polymers," IEEE Photo. Tech. Lett., 11, pp.842-844 (1999).
- [3] M. Oh, "Polymeric Waveguide Polarization Splitter with a Buried Birefringent Polymer,"

“IEEE Photo. Tech. Lett., 11, pp.1144-1146 (1999) .

- [4] J. A. Dobrowolski, Li Li and J. N. Hilfiker, “Long-Wave-length cutoff filters of a new type,” Appl. Opt., 38, pp.4891-4903 (1999) .
- [5] K. Baba, T. Hasegawa and M. Miyagi, “Cube add/drop optical filter with low polarization sensitivity using a metal island multilayer filter,” Electron. Lett., 34, pp.1510-1512 (1998).
- [6] 太田：島状金属薄膜を用いたプリズム型波長合分波器に関する研究，仙台電波高専卒業研究論文（2003）.

付録1 島状金属薄膜の実効比誘電率

島状銀薄膜の実効比誘電率は，入射光の電界，金属粒子の分極，周囲の粒子による影響を考慮し，金属粒子内の自由電子の運動方程式から次のように導かれる。

$$\varepsilon^* = A \varepsilon_s + \frac{\frac{d_w}{d_l} \left(\frac{\varepsilon_s}{B} \right)^2 \omega_p^2}{\omega_r^2 - \omega^2 + j \frac{\omega}{\tau}}$$

ここで，各パラメータの値は以下ようになる。

$$A = 1 + \frac{d_w}{d_l} \frac{\varepsilon_L - \varepsilon_s}{B}$$

$$B = \varepsilon_s + H (\varepsilon_L - \varepsilon_s)$$

$$H = L - \frac{d_w}{l} F$$

$$\omega_r = \sqrt{\frac{H}{B}} \omega_p$$

また，島状金属薄膜は光学異方性を持ち，島状薄膜に対して水平方向と垂直方向で異なる実行比誘電率を持つ。偏光方向（ $\parallel$ ， $\perp$ ）を X で示すと屈折率は

$$n_X = \sqrt{\varepsilon^*}$$

により求められる。島の直径は質量膜厚と島の体積の関係より次のように求められる。

$$a = \left(\frac{6 d_w l^2}{\pi p^2} \right)^{\frac{1}{3}}$$

各パラメータの意味は表1に示す。

また，本研究では島状金属薄膜の材料として銀，基板としてガラスを仮定して計算を行った。これらの材料の基本的なパラメータを表2にまとめた。

表1 理論式に用いている各パラメータの意味
各パラメータの意味

ε_L	金属格子振動による比誘電率成分
ε_s	周辺媒質（ガラス）の比誘電率
τ	金属内の自由電子の緩和時間
ω_P	金属のプラズマ各周波数
d_w	島の質量膜厚
l	島の間隔
a	島の直径
L_X	反分極因子
F_X	分布状態因子

表2 理論式における各パラメータの基本的な値

パラメータ	パラメータの値
ε_L	4
ε_s	2.17
τ	$8.3 \times 10^{-16} [\text{sec}]$
ω_P	$1.33 \times 10^{16} [\text{rad/s}]$
l	25[nm]
a	15[nm]

付録2 島状金属多層膜の反射率，透過率の導出

今回，島状金属多層膜の反射率と透過率を計算する手法として4端子行列法を用いた。まず，両偏光の島状金属薄膜層とガラス層における光学アドミタンスと位相成分 δ を求め，多層膜の反射率，透過率の導出を行う。各層を X で示すと，4端子行列 $[M_X]$ は

$$[M_X] = \begin{bmatrix} \cos(\delta_x) & j \frac{\sin(\delta_x)}{Y_x} \\ j Y_x \sin(\delta_x) & \cos(\delta_x) \end{bmatrix}$$

となり，島状銀薄膜が N 層あるので，多層膜の特性行列は

$$\begin{pmatrix} B \\ C \end{pmatrix} = \{ [M_i] [M_g] \}^{N-1} [M_i] \begin{pmatrix} 1 \\ Y_g \end{pmatrix}$$

となる。反射率及び透過率は B, C を用いて

$$T_N = \frac{4 Y_g Y_g^*}{(Y_g B + C)(Y_g B + C)^*}$$

$$R_N = \frac{(Y_g B - C)(Y_g B - C)^*}{(Y_g B + C)(Y_g B + C)^*}$$

となる（*は複素共役を表す）。

（平成17年8月18日原稿受理）