

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年6月11日現在

機関番号：24403

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2012

課題番号：22360031

研究課題名（和文） 金属／誘電体ナノ周期構造による微小高感度分光プリズム

研究課題名（英文） Highly-dispersive micro prism with a metal-and-dielectric layered media

研究代表者

菊田 久雄 (KIKUTA HISAO)

大阪府立大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：10214743

研究成果の概要（和文）：銅無電解メッキ法を用いて、サブ波長の周期の金属／誘電体構造をもつ微小分光プリズムを作製し、そのプリズムが波長分離の機能をもつことを実験により確かめた。また、有効媒質理論に基づいてプリズム境界面での光反射率を見積もる式を導出し、その効果を数値シミュレーションにより確かめた。その他、金属／誘電体周期構造に上部から光を入射することで、入射角度無依存の波長選択フィルタが実現できることを示した。

研究成果の概要（英文）：A wavelength-dispersive micro prism with metal-and-dielectric periodic structure was fabricated in a silicon slab-waveguide by using a technique of the bottom-up fill electroless copper plating. The prism dispersed light waves into a spectrum. A formula for estimating a reflectance of light at the interface between isotropic medium and the metal-and-dielectric periodic structure was derived based on the effective medium theory. Moreover, we demonstrated that a transmission spectrum of the metal-and-dielectric periodic structure was independent from the angle of incidence of light.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	6,900,000	2,070,000	8,970,000
2011年度	3,600,000	1,080,000	4,680,000
2012年度	2,600,000	780,000	3,380,000
総計	13,100,000	3,930,000	17,030,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎

キーワード：サブ波長格子、分光プリズム、金属格子

## 1. 研究開始当初の背景

誘電体微細周期構造を利用した光学デバイスとしてフォトニック結晶の研究が盛んである。一方、金属微細構造は光波に対して強い波長分散特性や高い導電性を有することから、表面プラズモン共鳴素子や微小金属環による負屈折率媒質素子として盛んに研究が行われている。しかしながら、これらの光デバイスにおいては、実証研究は盛んであ

るものの、実用化に至らないケースが数多い。その原因の一つは、設計値どおりの光学性能を得るには非常に高い加工精度が求められるからである。とくに共鳴やバンドエッジ、特殊な分散面を利用するデバイスにおいては構造周期の1/100から1/1000の高い寸法精度が求められる。

本研究では、金属と誘電体の多層構造からなるサブ波長周期格子に着目している。金属

層が数 10nm 以上の厚さを持つ場合、金属層に挟まれた誘電体層は孤立導波路として機能する。一方、多層構造としては、誘電体周期構造で実現できない円筒状の分散面をもつフォトニック結晶として機能する。このような構造で光学デバイスを構成すると、孤立導波路の性質からデバイス内で光波が拡散せず、円筒分散面の性質から高い波長分解が期待でき、数マイクロメートルサイズの微小な高分解能分光デバイスが実現できる可能性がある。金属/誘電体微細周子構造を利用すると、極微小な高分散分光プリズムや集光レンズ、狭帯域波長選択フィルタなどの新しい光学デバイスが実現できる可能性がある。とくに、光通信分野やバイオ・センサの分野では超小型の高分散分光素子は開発が求められており、本研究では、金属/誘電体ナノ周期構造による微小分光器の実現を目指した。

## 2. 研究の目的

SOI(Silicon on Insulator)基板を用いて金属/誘電体ナノ周期構造による高分解微小分光プリズムを試作し、その分散能を実験により確かめる。SOI 基板のシリコン酸化膜層と基板上部の空気層をクラッドとしたシリコン導波路に溝構造を設け、無電解メッキを施すことで微小分光プリズムを実現する。機械的性質に優れたシリコン導波路の採用によって、微細構造の応力破壊の問題が解決されるとともに、光通信分野への応用展開を視野に入れた波長 1.5 $\mu\text{m}$  帯の近赤外線用微小分光素子が実現できる。角度分散 0.1 $^\circ/\text{nm}$  の実現を目標とした。

金属/誘電体ナノ周期構造は、分散面の形状が円筒形に限られているので誘電体フォトニック結晶のような極端に高い波長分解能は期待できないが、金属/誘電体の比率誤差などは分散性能にほとんど影響しないため、作製誤差や環境変化に強い性質を持つ。また、光波エネルギーの伝搬が層に平行な方向に限られるので、素子を小さくしても素子内で光波の散逸が起きないことも、微小光学素子を実現する上で有利である。さらに、金属格子であるにも関わらず、プラズモン共鳴やリング共振器を利用しない単純な仕組みのため、利用波長に制限がなく、広い範囲での利用が可能である。

一方、金属/誘電体ナノ周期構造を導波路素子として利用するのでなく、面外から光を入射すると波長選択フィルタとして機能する。ここでは、分光プリズムの作製手法を用いて、近赤外線領域で透過波長特性が光の入射角度に依存しない波長選択フィルタを設計・製作した。従来のフィルタ作製では、金属蒸着とリフトオフを組み合わせる方法や FIB を使って金属を直接加工する方法が用いられ、厚い構造を広い面積で作製することが

難しく、透過スペクトルの入射角度依存性を評価するに至っていなかった。本研究での手法を用いて広い領域に金属/誘電体ナノ周期構造を作製し、入射角度の無依存性を検証する。

## 3. 研究の方法

SOI 基板に、金属/誘電体ナノ周期構造の微小三角プリズムの他、プリズムに光を入射するための光導波路、導波路に光を入射するためのグレーティングカップラを作製した。金属/誘電体ナノ周期構造は、SiO<sub>2</sub> 基板の Si 層に電子線描画とプラズマエッチングを用いて深溝構造を作製し、無電解メッキによって溝に銅を充填し、プリズム上部の銅を研磨によって除去する方法で作製した。素子設計においては、実効屈折率による概算と時間領域差分法 (FDTD 法) を使った精密な数値計算によって波長 1.5 $\mu\text{m}$  の近赤外線に対して高い分散能をもつ微小プリズムの設計を行った。

理論的な研究としては、金属/誘電体周期構造の表面での光反射の様子を解析的に見積もるための方法として、有効媒質理論による反射率の算出方法を提案し、その有効性を数値計算によって確かめた。とくに、金属/誘電体周期構造を強い光学異方性をもつ有効媒質とみなして、周期構造外部との境界面における光反射率をフレネル反射係数のように導出した。

面外からの光に対する波長選択フィルタの作製では、紫外線干渉露光法によって 5mm 角以上の面積に金属/誘電体サブ波長周期構造を作製した。このフィルタの波長選択の原理は、厚さのある金属/誘電体ナノ周期構造内での光共鳴現象であり、厚い構造を広い面積で作製することで、透過スペクトルの入射角度依存性の評価を可能にした。

## 4. 研究成果

### (1) プリズムの波長分散

シリコン層の厚さが 250nm の SOI 基板に、金属/誘電体周期構造による分光プリズムと光導波路、グレーティングカップラを作製した。素子の概要を図 1 に示す。偏波保存ファイバから射出される波長 1.5 $\mu\text{m}$  の光をグレーティングカップラで光導波路に導入する。導波路内では、光は TE 偏光で伝搬する。導波路幅を一旦 0.3 $\mu\text{m}$  まで絞ることでモード選択フィルタとして機能し、分光プリズムには単一モードの光が入射する。プリズムで屈折された光は散乱壁で散乱され、この様子を赤外線顕微鏡で観察することで、プリズムによる屈折角度を計測する。入射光の波長を変化させたときの屈折角度の変化からプリズムによる波長分散能を評価した。

図 2 は作製した金属/誘電体三角プリズムとプリズムの断面である。三角プリズムは 1 辺 10 $\mu\text{m}$  の正三角形であり、金属周期は 300nm である。導波路からの光は、三角形の

左辺に対して素直に入射し、右辺から射出される。(b)の断面写真から、SiO<sub>2</sub>層上のSi周期構造の溝部に銅が稠密に充填されていることが分かる。

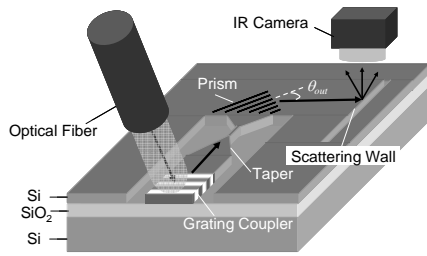


図1 金属/誘電体周期構造による三角分光プリズムと測定系

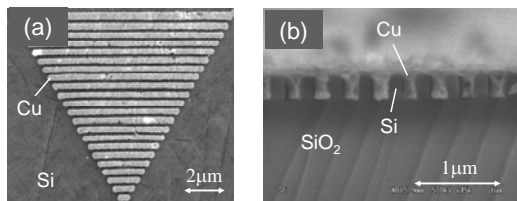


図2 三角プリズム(a)とその断面(b)

赤外線顕微鏡では、図3(a)のような様子が観測される。プリズムによる光散乱とともに散乱壁にあたる光が観測される。図3(b)は散乱壁上の光強度分布であり、この例ではプリズムによって51.5°の角度に光が屈折している。

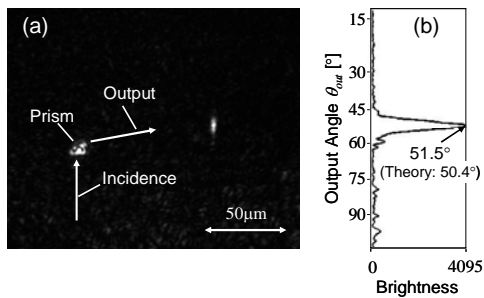


図3 プリズムによる光の屈折

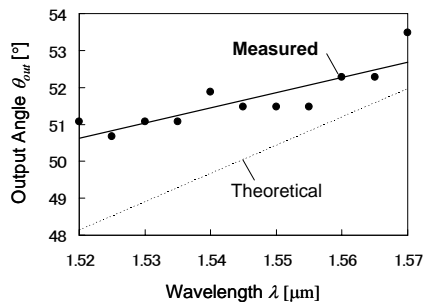


図4 波長に対するプリズムからの射出角度の変化

波長可変の半導体レーザを使って、入射光

の波長を1.52μmから1.57μmまで変化させたときの射出角度を測定した結果を図4に示す。プリズムによる屈折角度(射出角度)は、ほぼ理論値どおりの値を示している。波長変化に対する屈折角度の変化は0.033°/nmであった。数値計算による予測値は0.079°/nmであり、実測による波長分散は予測値の約半分であった。

(2) 金属/誘電体周期構造の外部境界面での光反射率

プリズム内での光の吸収係数は金属単スリットの導波路理論で概算できる。一方、三角プリズムの例のように、プリズム境界での入射と射出における光の反射損失を見積もることは容易でない。一般には電磁場解析による数値シミュレーションが行われる。ここでは、金属/誘電体周期構造を有効屈折率をもつ透過媒質とみなして、境界面での反射率を導出する方法を提案した。

図5のような誘電体媒質と金属/誘電体周期構造による境界面に光が角度θ<sub>in</sub>で入射するときの振幅反射係数ρ<sub>12</sub>を求める。金属/誘電体周期構造は強い光学異方性を持ち、その分散面は円筒になる。円筒分散面の半径から求められる実効屈折率をn<sub>eff</sub>とし、境界面に対して垂直な方向からの層構造の傾き角をαとすると、振幅反射係数ρ<sub>12</sub>は

$$\rho_{12} = \frac{n_1 \cos \alpha - n_{eff} \cos \theta_{in}}{n_1 \cos \alpha + n_{eff} \cos \theta_{in}}$$

で求められる。n<sub>1</sub>は入射側の誘電体媒質の屈折率である。この式は、等方性媒質境界面でのフレネル反射係数の式の形に似ているが、傾き角αは実質的にエネルギーの伝搬方向を示しており、関係する屈折率がn<sub>1</sub>とn<sub>eff</sub>だけであることも特徴的である。分散面の半径に相当する実効屈折率n<sub>eff</sub>は金属スリット内を伝搬する光波の実効屈折率に等しい。

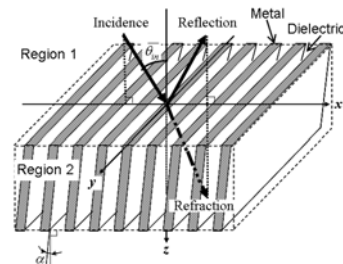


図5 波長に対するプリズムからの射出角度の変化

図6の曲線(Anisotropic EMT)は、振幅反射係数ρ<sub>12</sub>から見積もったときの反射率の計算例である。周期75nmをもつ金属層が境界面に対して30°の角度で傾いている場合を考えた。入射角度に対する反射率を求めた結果は、時間領域差分法(FDTD)によって求められた反射率と良く一致している。また、従来

の有効媒質理論 (Isotropic EMT, Quasi-anisotropic EMT)を使った結果に比べても各段に高い精度で反射率を見積もることができている。

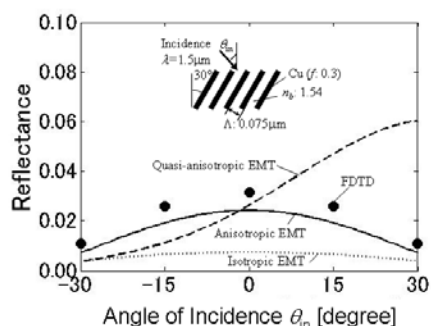


図6 波長に対するプリズムからの射出角度の変化

振幅反射係数率 $\rho_{12}$ の導出時の考えを拡張し、異方性光学薄膜の多重干渉の理論を適用することで、上下に境界のある金属/誘電体周期構造の透過率と反射率を求める式を導いた。この式を使うことで、面外から光を入射する波長選択フィルタの設計が行える。

金属層の周期が波長の1/20程度の場合、この方法によって透過率と反射率を精度よく見積ることができた。一方、構造周期が波長と同程度の場合、提案手法では精度良く透過率と反射率を算出できないことがわかった。この結果は、実効屈折率と光学異方性をより厳密に扱っても改善されなかった。このことは、マクロ的な考えに基づいて実効屈折率から反射係数を求めようとする有効媒質理論の限界を意味する。

### (3) フィルタ

無電解銅メッキを使って金属誘電体の多層構造を作製する手法で、図7のような金属スリットの周期構造を作製すると波長選択フィルタができる。とくに TM 偏光入射に対して、透過スペクトルにピークが現れる。プラズモン共鳴による異常透過でなく、スリット内での光波共鳴で現れる現象であり、一種のファブリペロ共鳴である。スリット周期が波長に比べて十分に短い場合は、スリット上下面での光反射は弱いので共鳴による透過光の強いピークは現れないが、スリット周期を光の波長に近づけるとスリット端面での光反射が強くなってファブリペロのような光共鳴現象が生じる。とくに、スリット幅が波長より狭い場合は図8のように、スリット内の光波モードは一つしか存在せず、上下界面間での共鳴条件は入射角度に依存しなくなる。これを利用して、透過スペクトルが光の入射角度 $\theta$ に依存しない性質をもつ波長選択フィルタの実現が期待されている。

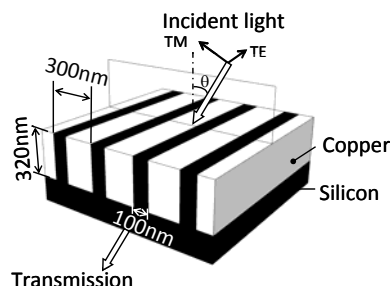


図7 金属/誘電体周期構造による波長選択フィルタ

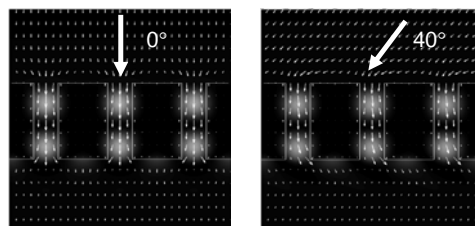


図8 入射角度を変えての透過長スペクトルの測定値

ここでは、両面研磨のシリコン基板に紫外線干渉露光法をつかって広い面積に周期構造を設け、銅無電解メッキによって図7のような構造を作製し、その透過率特性を計測した。作製された高さ200nmをもつ金属周期構造の透過スペクトルの測定結果を図9に示す。入射角度を垂直、20°、40°と変えても透過スペクトルがほとんど変化しないことが実験により確かめられた。

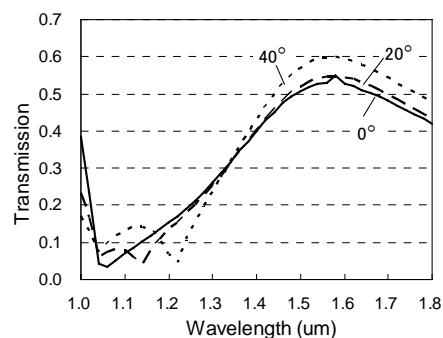


図9 入射角度を変えての透過長スペクトルの測定値

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

- ① Shinji Kameda, Akio Mizutani, and Hisao Kikuta, Effective Medium Theory of Metal-and- Dielectric Multilayered Structure, Journal of Japanese Applied Physics, 査読有り, vol.51 (2012) 042202 (9 pages)

〔学会発表〕（計 7 件）

- ① Shinji Kameda, Tomoyuki Otsuka, Takuma Morikawa, Akio Mizutani, and Hisao Kikuta, Wavelength-Dispersive Micro Prism with Periodic Metal Structure in a Silicon Slab-waveguide, 8th European Optical Society Topical Meeting on Diffractive Optics, Technical Digest, 4912 (2012.2.27) Delft, Netherlands.
- ② Tomoyuki Otsuka, Takuma Morikawa, Shinji Kameda, Akio Mizutani, Hisao Kikuta, and Shoso Shingubara, Fabrication of metallic optical elements embedded in dielectric substrates by the bottom-up fill electroless copper plating, 8th European Optical Society Topical Meeting on Diffractive Optics, Technical Digest, 4913 (2012.2.27) Delft, Netherlands
- ③ 南埜雄飛, 水谷彰夫, 浜高真伍, 菊田久雄, 角度非依存波長選択フィルタの実現に向けた埋め込み型金属微細構造, 第 73 回応用物理学学術講演会, 13p-PA8-6 (2012.9.11) 愛媛大, 松山市
- ④ 浜高真伍, 水谷彰夫, 南埜雄飛, 菊田久雄, 金属微細構造からなる角度非依存高透過率波長選択フィルタ, 第 72 回応用物理学学術講演会, 30p-P12-5 (2011.8.29) 山形大, 山形市
- ⑤ Shinji Kameda, Akio Mizutani, and Hisao Kikuta, Effective Medium Theory for Estimating Reflectance from Metal-and-Dielectric Multilayered Structure, European Optical Society 2010 Annual Meeting, Conference Digest 3381 (2010.10.26), Paris, France
- ⑥ 亀田信治, 水谷彰夫, 菊田久雄, 金属／誘電体多層構造の表面反射率導出のための有効媒質理論, 第 71 回応用物理学学術講演会 14p-ND-4 (2010.9.14) 長崎大, 長崎市
- ⑦ 森川拓真, 亀田信治, 水谷彰夫, 菊田久雄, 無電解銅めっきによる深溝埋め込み型ワイヤグリッド偏光子の作製, Optics & Photonics Japan 2010, 10aD5 (2010.11.8) 中央大学, 東京

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

菊田 久雄 (KIKUTA HISAO)

大阪府立大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：10214743

### (2) 研究分担者

水谷 彰夫 (MIZUTANI AKIO)

研究者番号：50400700