

称号及び氏名	博士（工学） 亀田 信治
学位授与の日付	平成 23 年 3 月 31 日
論文名	金属／誘電体多層周期構造を用いた波長分散素子に関する研究
論文審査委員	主査 菊田 久雄 副査 井前 讓 副査 伊藤 智博

論文要旨

分光器は、光を波長ごとに分解し、それぞれの波長における光強度を検出する機器である。その用途には、吸収スペクトルや発光スペクトルによる物質同定の他、バイオや医療の分野における分析、天文分野の分光観測等がある。機械工学の分野では、燃料の燃焼時における発光スペクトル、排ガスや温室効果ガスの吸収スペクトルの測定等に利用されており、情報機器や光通信の分野では、波長多重における光波分岐のための分光素子として用いられている。

近年の科学技術の発展に伴い、より高分解能な分光器が求められる一方、各応用においては、より小型の分光器が求められている。例えば、バイオ・医療の分野では、小型の分光器を組み込んだ μ -TASが求められ、情報・通信の分野では、通信データの大容量化のために、小型で多チャンネルな波長分岐素子が求められている。

分光器には分散型のものと干渉型のものがあるが、小型化には分散型が適している。分散型の分光器は、回折格子による波長分散素子、凹面鏡による集光素子、および光検出器で構成されている。小型化のために分散素子と集光素子を単純に小さくすると、集光点での光強度の半値幅が大きくなるため、波長分解能が低下する。そのため、分散素子の波長に対する高感度化（高分散化）が分光器の小型化における一つの課題になっている。

波長感度の高い小型の分散素子を得るために、フォトニック結晶と呼ばれる厚みのある周期構造を利用する研究が行われている。フォトニック結晶による高分散な素子はスーパープリズムと呼ばれており、通常の回折格子より1桁高い波長感度（ $2.0^\circ/\text{nm}$ 程度）をもつ素子が試作されている。スーパープリズムでは、周期構造を構成する2つの媒質の屈折率差を大きくとることで、強い光学異方性を発現させて高い波長感度を実現している。ただし、スーパープリズムの射出角度は、フォトニック結晶を構成する媒質の占有比に強く影響されるので、デバイスの作製誤差のために設計通りの性能を得ることが難しく、実用化に至っていない。

一方、金属と誘電体の周期構造による光学素子についての研究がある。金属の屈折率は複素数であるが、実部の値は小さいものの虚部は大きな値をもつので、金属と誘電体によって屈折率差の大きい周期構造が実現できる。金属と誘電体による一次元周期の構造はワイヤグリッド偏光子として広く利用されている。また、二次元周期の構造によって高NAの集光レンズを実現しようとする研究もある。

本研究では、金属と誘電体の大きな屈折率差を利用して、金属/誘電体の一次元多層周期構造による小型で高感度な波長分散素子を提案する。ここでは金属と誘電体による多層周期構造をMetal Dielectric Multilayered Structureの略としてMDMSと呼ぶ。

MDMSについては、入射光の偏光によって反射率および透過率が大きく異なることはよく知られているが、MDMS内部での光の伝搬など、光波の基本的な振舞いについては十分に解明されていない。本研究では、MDMSの強い光学異方性を扱うために、分散面に基づく有効媒質理論を確立し、MDMSの内部を伝搬する光波の振舞いや、表面における屈折と反射を扱う理論を構築した。有効媒質理論とは、微細構造を実効屈折率や実効誘電率をもつ一様な光学媒質とみなして、反射や屈折を扱う理論である。この理論を使って、MDMSによる高分散な波長分散素子や小型の集光素子を提案し、その機能を数値シミュレーションによって検証した。また、有効媒質理論に基づいてMDMSの表面反射率を求める式を導出し、ワイヤグリッド偏光子の透過率と反射率を概算する方法を提案した。

本論文の構成は以下の通りである。

第1章では、分光器および分散素子における現在の課題について述べ、とくに分散素子の小型化についての問題を明らかにすることで、本研究の目的と意義を示した。

第2章では、MDMS内部での光の振舞いを分散面に基づいて調べた。金属層が完全導体で構造周期が波長に比べて十分に短い理想的な場合、MDMSの分散面は完全な円筒になり、実際の金属材料においても分散面はほぼ円筒になることを示した。また、光波エネルギーの伝搬は、波面の伝搬方向と異なり、MDMSの層に沿って進むことが分かった。これは、MDMSを独立した金属単スリット導波路の集まりとして簡素化して扱えることを意味するが、このように扱えるのは金属層が60nmより厚い場合である。その他、MDMSデバイスの具現化作製工程を考え、MDMSをスラブ型の導波路内に作りこむ方法を検討し、MDMSがスラブ導波路として機能することを数値シミュレーションによって確かめた。導波路での光波伝搬距離から、MDMSで実現できる素子の大きさは20 μm 以下であることが分かった。

第3章では、MDMSのデバイス応用として、三角プリズムと曲面プリズムによる波長分散素子を提案した。波長に対する射出角度の関係式を分散面から導出し、数値シミュレーションによりプリズムが波長分散の機能をもつことを示した。また、導出した射出角度の式から、波長に対する射出角度の感度（角度分散）を求め、MDMSプリズムが平面回折格子に比べて広い波長範囲で高い角度分散を保つことを示した。角度分散は、最も低い場合でもMDMS三角プリズム

について $0.055^\circ/\text{nm}$ 、MDMS曲面プリズムについて $0.060^\circ/\text{nm}$ であった。分光可能な波長範囲は、 $1\mu\text{m}$ 周期のMDMS 三角プリズムについて $0.6\mu\text{m}\sim 3.5\mu\text{m}$ である。プリズムの設計においては、構造周期を調節することで角度分散を変化させずに使用する波長帯を選ぶことができ、プリズム頂角によって角度分散を調節できることを示した。MDMSプリズムの角度分散は、フォトニック結晶によるスーパープリズムより低い値であるが、同じ周期をもつ回折格子の角度分散 $0.030^\circ/\text{nm}$ より高い。また、MDMSは、金属層の占有比が変わっても分散面の形状は変わらないので作製誤差が光学性質に大きな影響を与えないという利点がある。角度分散の観点からは、MDMSプリズムは回折格子とスーパープリズムの中間的な性能をもつ分散素子として位置づけることができる。

第4章では、MDMSを用いた集光レンズを提案した。平凸型MDMSレンズの凸面形状を設計し、入射面を単純な楕円形状にすることで光波を集光できることを示した。電磁場シミュレーションによって、MDMSレンズが集光機能をもつことを確かめ、設計値通りの焦点距離が得られることを示した。また、矩形のMDMSで構造周期を変化させて屈折率分布を与えたレンズを提案した。この屈折率分布型MDMSレンズでは、射出面での振幅分布をより一様に保つことができるため、理論限界に近い集光幅を得ることができる。MDMSによるレンズは位相素子であり、表面での光波の屈折を考慮する必要がなく、素子設計は非常に容易である。これは、光波エネルギーの伝搬方向が、波面の向きと関係なくMDMSの各層に沿った方向に限定されることに由来する。その他、MDMS曲面プリズムと平凸型MDMSレンズを組合せた一体型の分散集光素子を提案し、数値シミュレーションによって分散機能と集光機能を併せもつことを示した。この分光素子の素子サイズが $10\mu\text{m}$ 程度の場合、波長分解能は約 55 [nm] になった。

第5章では、有効媒質理論に基づいてMDMSの表面における反射率を見積もる手法を提案し、この手法の妥当性を数値シミュレーションによって検証した。従来の有効媒質理論では、周期構造を等方性媒質に置き換えているため、光学異方性を表現できないという問題があった。本研究では、MDMSの実効誘電率の定義に円筒分散面を用いることにより、光学異方性を考慮した有効媒質理論を確立し、MDMSの表面反射率を求める式を導出した。この反射率を与える式は、等方性媒質の境界面での反射率の式と形が似ているが、屈折角の代わりにMDMS構造の傾斜角をとり、媒質の屈折率の代わりにMDMSの実効屈折率を適用する形になっている。導出した式に具体例をあてはめた反射率は、電磁場シミュレーションによる結果と1%程度の差でよく一致することが分かった。また、構造が境界面に対して傾斜している場合は、導出した式での反射率の値と電磁場シミュレーションによる値がわずかに異なった。これは、分散面を完全な円筒に近似したためであり、正しい分散面を用いて反射率を求めることで数値シミュレーションの結果に近い値が得られることを示した。その他、光学異方性を考慮した有効媒質理論を光学薄膜理論に適用することで、ワイヤグリッド偏光子の反射率と透過率を求める方法を提案した。電磁場解析シミュレーションとの比較では、透過率および反射率は10%程度の差で一致し、MDMSの有効媒質理論が素子を設計する上で概略を知る有用な方法であることを示した。

第6章では、本研究で得られた結果について総括するとともに、MDMSを波長

分散素子として利用するための今後の課題について述べた。

本研究を通して、MDMSの内部での光波の振舞いと、MDMSの表面での屈折と反射における光波の変化を明らかにし、MDMSを取り扱う有効媒質理論を構築することができた。

審査結果の要旨

本論文は、小型で高感度な分光素子の実現を目標として、金属と誘電体による大きな屈折率差を利用した金属／誘電体多層構造による高波長分散素子について研究したものであり、以下の成果を得ている。

- (1) 金属と誘電体による多層周期構造の分散面がほぼ円筒になること、実効屈折率が誘電体部の屈折率よりも高いことを明らかにした。また、有限な厚さをもつ構造がスラブ導波路として機能し、20 μm 程度の大きさでは金属による光吸収の影響が小さいことを示した。
- (2) 金属／誘電体多層周期構造で三角プリズムや曲面プリズムを構成すると、強い波長分散を持つ分光プリズムとして機能することを示した。この波長分散は、フォトニック結晶スーパープリズムより小さいが、通常の回折格子より大きく、作製誤差によって分散特性が変わらない利点があることを明らかにした。また、プリズムの設計指針として、構造周期によって利用する波長帯を設定することができ、プリズム頂角によって波長分散の強さを調節できることを明らかにした。
- (3) 金属／誘電体多層周期構造によって集光レンズを構成できることを示した。とくに、平凸型の形状を持つレンズ、および構造周期を変調した矩形形状のレンズは、単純な位相素子として機能し、屈折の影響を考慮せずにレンズを設計できることを明らかにした。また、金属／誘電体多層周期構造による曲面プリズムと平凸型レンズを組合せた一体型の素子が、分散機能と集リズムと平凸型レンズを組合せた一体型の素子が、分散機能と集光機能を併せもつことを示した。
- (4) 金属／誘電体多層周期構造の表面光反射を見積もるための手法として、有効媒質理論に基づいた反射率の概算手法を示した。とくに、金属／誘電体多層周期構造がもつ強い光学異方性を考慮することで、斜めに入射する光の反射率をより正確に見積もれることを明らかにした。また、この理論を光学薄膜理論に適用することで、有限な厚さを持つ金属／誘電体多層周期構造の反射率と透過率を求める方法を示した。

以上の諸成果は、高分散な微小分光素子を実現するための新たな手法を提供したものであり、また、光学異方性に基づく有効媒質理論は光学素子の設計に広く適用できることから、本分野の学術的・産業的発展に大きく貢献するところである。また、申請者が自立して研究活動を行うのに必要な能力と学識を有することを証したものである。