太陽エネルギー制御多層膜の最適設計

(薄膜材料の選定に関する検討)

Optimum Design of Optical Multilayer Coatings for Solar Energy Control

(Study on Selection of Coating Materials)

○正 中村 正行 (信州大学)
近 久 慎一郎 (信州大学)

大石 大典 (信州大院)

Masayuki NAKAMURA, Faculty of Engineering, Shinshu University, 4-17-1 Wakasato, Nagano, 380-8553

Daisuke OISHI, Graduate School of Science and Technology, Shinshu University, ditto

Shinichiro CHIKAHISA, Faculty of Engineering, Shinshu University, ditto

Key Words: Optimum Design, Optical Multilayer Films, Solar Energy, Design Specifications

1. はじめに

本研究では、太陽電池や光・熱複合ソーラーパネル、ビルや自動車用窓ガラスなど、太陽光スペクトルを制御するエネルギー制御パネルについて、目標とする分光特性を実現するための多層膜構造を求めることを目的とする。

これらのパネルは太陽光スペクトルに応じた光エネルギーの透過または反射を行うとともに、放射によるエネルギー放出を抑えるなどの機能が要求される。太陽光スペクトルに関するエネルギーの偏りや偏光、入射角の日変化・季節変化およびエネルギーを受けるデバイスの機能や媒質に応じて、もっとも高い効率で太陽光を利用できることが望ましい。このためには、多層膜によりスペクトルの制御を工夫することで、効率的な太陽光の利用を行える可能性がある。

一方、多層膜のコーティングには、層数の制限やコーティング材料、コーティング方法など膜製造に関する制約がある。必要とする分光透過率・反射率を各種制約条件のもとで満足する多層構造を求めることは明示的な定式化ができず、設計値を得ることが困難な問題である。

設計仕様を可能なかぎり満足する最適設計が重要であると同時に、機器全体の性能に影響が小さいかあるいは他の仕様で補うことができる部分は、仕様を緩めてコストを削減することがより重要であるという観点から、これまでに、設計仕様の一部を緩和した場合の検討を行っている⁽¹⁾。

ここでは、可視域の透過も考慮した熱線反射パネルに施す多層膜構造を、利用可能な屈折率の種類を変えて求め、コーティング材料の屈折率と設計仕様の関係を検討した結果を示す。

2. 太陽エネルギー制御多層膜

2.1 エネルギー制御パネルの例

一例として、Fig.1に示す居住空間の窓ガラスにおけるスペクトル制御を考える。理想的には、夏季は室内への赤外線熱エネルギーの透過を押さえ、冬季は室内からの赤外線透過を押さえて冷暖房負荷を軽減する。加えて年間を通じて室外からの可視光は透過させる必要がある。

2.2 太陽光スペクトル

窓ガラスには太陽からの直達日射と周囲環境からの輻射による光が入射する。直達日射は季節と緯度により入射角が変化する。また、太陽光スペクトルには可視域にピーク

を持つ分布を有し、太陽光の持つエネルギーのうち90%近くが波長380nm～2,000nmの間に含まれている⁽²⁾⁽³⁾。海面上における太陽放射のスペクトル分布⁽⁴⁾をFig.2に示す。

2.3 太陽高度

光学多層膜により太陽光スペクトルを選択的に透過・反射することで、太陽エネルギーの制御が行える。多層膜の分光特性は光の入射角に依存する。このため、太陽光入射角度の季節変化を積極的に利用すれば、夏季と冬季で分光特性の異なるパネルが作成できる可能性がある。

2.4 薄膜に使用するコーティング材料

多層膜の製造において用いるコーティング材料は、成膜方法や積層状態、コーティング面積等により制限される。すなわち設計に利用できる材料は限られる。

Fig.1 Example of solar spectrum control

Fig.2 Intensity of solar radiation⁽⁴⁾

例えばスパッタリング法によれば、大面積への金属や誘電体膜の均一な成膜が可能である。設計値として必要な屈折率であっても、実在する材料によりその値を実現できない場合もある。したがって、多層膜構造の最適化においては、通常、屈折率が固定されたうえで膜厚の最適化がなされる。

3. 設計結果

著者らが開発した光学多層膜最適設計システム⁽⁵⁾を用いて、上述の設計仕様の一部を考慮したエネルギー制御多層膜の設計例を示す。本最適設計システムは、データベースに保存されているコーティング材料の屈折率と膜厚および層数に関して、各種の制約条件を考慮して分光特性等の設計仕様を満足する最適な組合せを求める組合せ最適化問題を解くことで設計解を得る。最適化の手法には遺伝的アルゴリズムを用いている。

利用できるコーティング材料として、実在の材料から選択した場合とある決められた屈折率の範囲から均等に値を選択した場合について、光学多層膜の最適設計システムを用いてエネルギー制御膜の設計を行った。選択可能な屈折率の種類は5, 10, 20種類の3つの場合について検討した。

波長域380nm～2,000nmを考える。Fig.3に目標反射率を太線で示すように、可視光(380nm～750nm)を透過、赤外光(750nm～2,000nm)を反射する熱線反射パネルに対する多層膜を求める。実在する材料のコーティング材料の屈折率は、 TiO_2 ($n=1.38$)～ ZnS ($n=2.39$)の範囲にある。架空の屈折率は、 $n=1.20\sim 2.50$ の間に均等に値を仮定した。入射媒質は空気($n=1.0$)、ガラス材料はBK7($n=1.52$)とした。東京(北緯35度)の夏至を想定した南中高度から、入射角は75°と仮定する。

Table 1に5～20種類の架空の屈折率が利用できると仮定した場合に対する多層構造を示す。Fig.3(a)～(c)にそれぞれの分光反射率を示す。曲線は赤外域において上部から、 R のs偏光成分、s,p偏光の平均値、p偏光成分を表している。利用可能とする材料の種類を増やすと、設計結果が全体的に改善される傾向にある。特に可視域での改善が大きい。

Table 1 Results of optimum multilayer structure

Layer	5 indexes	10 indexes	20 indexes
1	1.20	1.20	1.20
2	1.53	1.49	1.82
3	2.50	2.50	2.50
4	1.20	1.34	1.34
5	1.53	2.50	1.61
6	2.50	1.34	2.50
7	1.20	2.50	1.34
8	1.53	1.78	2.50
9	2.50	1.34	1.27
10	1.20	2.50	2.50

4. おわりに

本研究では、可視光と太陽エネルギーの制御を行う多層膜に用いるコーティング材料の屈折率について検討した。ここでは、光学多層膜設計システムを用いて、実在する材料の屈折率を用いたときと、ある範囲内の屈折率が均等に選択できるものとして架空の材料を用いた場合について、熱線反射パネルの最適設計を行った。本研究では、多層膜の層数も最適化するため、組合せ最適化問題を解くことで設計値を得た。したがって、屈折率を離散値としたが、層数を固定すれば屈折率も同時に最適化することができる。準備すべき屈折率の知見を得るためには、今後このことについても検討する必要がある。

(a) For 5 available refractive indexes

(b) For 10 available refractive indexes

(c) For 20 available refractive indexes

Fig.3 Reflectances of infrared ray reflection panel

参考文献

- (1) 中村正行・大石大典・戸谷昭寛, 太陽エネルギー制御多層膜の最適設計(設計仕様の緩和による多層構造の決定), 日本機械学会第14回計算力学講演会講演論文集, No.01-10, (2001), pp.217-218.
- (2) Muhammad Iqbal, An Introduction to Solar Radiation, (1983), Academic Press.
- (3) Paltridge, G.W. and Platt, C.M.R., Radiative Processes in Meteorology and Climatology, (1976), Elsevier.
- (4) 日本太陽エネルギー学会編, 太陽エネルギー読本, (1975), pp.1-8.
- (5) 中村正行・磯野将之・小林光征, 光学多層膜最適設計システムの開発, 1999年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1999), p.531.