

含有负折射率介质层的布喇格镜的光学特性研究

杨立功 顾培夫 黄弼勤

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室,杭州 310027)

摘要 从电磁场理论推导了光波在负折射率介质薄层中的传输矩阵,对由正、负折射率介质构成的全介质布喇格反射镜的反射带宽和角度特性进行了分析和讨论,与普通的均由正折射率介质构成的布喇格反射镜的相应特性做了对比,并根据薄膜理论对研究结果作了解释. 结果表明含有负折射率介质的布喇格全反射镜的反射带宽和角度特性均优于普通由正折射率介质构成的布喇格镜.

关键词 负折射率介质;传输矩阵;全介质布喇格反射镜;反射带宽

中图分类号 O441 **文献标识码** A

0 引言

同时具有负的介电系数 ϵ 和磁导率 μ 的介质具有许多特殊的物理性质^[1]. 在这种介质中电磁波的能量流密度 S 的方向和波矢 k 的方向是相反的,因此 E, H 和 k 之间呈左手系关系,所以也可称为“左手系材料”(Left-handed Materials). 不久前,Smith et al. 在微波波段首次发现用特殊微结构周期排列的复合介质可以同时得到负的介电常数 $\epsilon(\omega)$ 和磁导率 $\mu(\omega)$ ^[2,3]. 目前这种复合介质的负折射率特性还只表现在微波波段,而且由色散关系 $k(\omega) = \omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0 \epsilon_r(\omega) \mu_r(\omega)}$ 可知该介质的色散特性和普通正折射率介质的相比差别很大,但随着纳米技术和人工合成技术应用到这种介质的制备中,在短期内有望在光波波段得到各向同性、在可见光波段色散变化缓慢的负折射率材料.

另一方面,具有较小吸收系数的全介质布喇格反射镜是半导体量子阱激光器、共振腔光发射二极管等光电子器件中谐振腔的关键部分^[4,5]. 它对不同入射角度、不同波长光波的反射性能是影响器件光学性能的重要因素. 通常要求布喇格反射镜有尽量大的反射带宽和良好的角度特性. 对于一维层状介质,可以通过增加两种介质材料的折射率差来增大反射带宽. 但由于在可见光波段可选的材料并不多,因此目前所有的全介质布喇格反射镜的反射带宽和角度特性都不理想. 负折射率材料的出现和应用可能对布喇格镜的光学性能产生重要的影响.

本文在以前研究工作的基础^[6]上,根据电磁场理论推导了负折射率介质薄膜中的传输矩阵表达式;并依此研究了由交替正、负折射率介质薄膜构成的一维周期性结构的全介质布喇格反射镜的光学性质. 文中假设 $\mu_r = -1$,且正、负折射率介质在可见

光区附近波段的色散为零;各介质层都是各向同性和均匀的. 研究发现,电磁波在负折射率介质膜中具有特殊的传输性质;由正、负折射率介质薄膜构成的布喇格反射镜比普通由正折射率介质构成的反射镜具有更大的反射带宽和非常好的角度特性.

1 正负折射率介质层混合系统的传输矩阵

如图 1 所示. 考虑一时谐平面波入射到由多层薄膜系统上,坐标系原点设在 O 点,使得膜层界面在 xy 平面内,而光波传播方向沿着 z 轴正方向,光

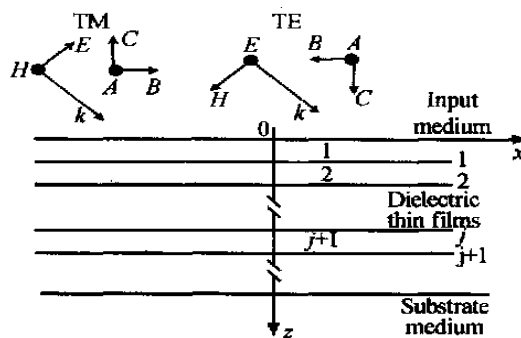


图 1 多层介质薄膜结构
Fig. 1 Multilayer dielectric films structure

波的入射面为 xz 平面. 图中膜层分别标为 $1, 2, \dots, j, j+1, \dots$; 第一层和第二层膜之间的界面标为 1 , 依次类推,第 j 层和第 $j+1$ 层之间的界面则标为 j . 对于这种层状结构,可以将 Maxwell 方程组^[7]简化为两组独立的方程组而求解,即将入射平面光波分解为 TE 波和 TM 波,如图中所示. 为简化下面的讨论,这里将这两种情况综合起来,用相同符号 ζ, κ, A, B, C 表示不同的偏振态. 其中参量

$$\zeta = \begin{cases} 0 & \text{TE} \\ 1 & \text{TM} \end{cases} \quad (1)$$

用以区分不同的偏振态. A, B, C 分别对应每种偏振态中各电磁场分量. 按照图 1,则

$$\begin{aligned} \text{TE}: A &= E_y, B = -H_x, C = H_z \\ \text{TM}: A &= H_y, B = E_x, C = -E_z \end{aligned} \quad (2)$$

设定入射光波的 k 方向和膜层法线方向(即 z 轴正方向)之间的夹角 θ 为入射角,则得到 k 在 x 和 z 方向上的分量分别为

$$k_x = k_0 n \sin \theta, k_z = (k^2 - k_x^2)^{1/2} = k_0 n \cos \theta \quad (3)$$

式中 n 为均匀介质层的折射率, k_0 为光波在真空中的波矢大小. 求解相应的 Maxwell 方程可知,可以只用 A, B 两个量来表示电磁场的分布,而且 A, B 分量之间通过定义系数 κ 相联系. 对于正折射率介质层($n > 0$),有

$$\kappa = \begin{cases} \frac{k_z}{-\mu\omega} = \frac{n \cos \theta}{-z_0} & \zeta = 0 \\ \frac{k_z}{\epsilon\omega} = \frac{z_0 \cos \theta}{n} & \zeta = 1 \end{cases} \quad (4)$$

对于负折射率介质层($n' < 0$)有

$$\kappa = \begin{cases} \frac{n' \cos \theta'}{z_0} & \zeta = 0 \\ \frac{z_0 \cos \theta'}{-n'} & \zeta = 1 \end{cases} \quad (5)$$

式中 $z_0 = (\mu_0 / \epsilon_0)^{1/2}$ 表示真空中的电磁波阻抗. 对第 j 介质层中传播的光波,如图 2 所示,以 TE 波为例考虑第 $j-1$ 层和第 j 层界面处的电磁场,沿 z 轴正向和负向传播的波则可分别表示为

$$\begin{pmatrix} A_j^+ \\ B_j^+ \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ \kappa \end{pmatrix} A_j^+, \begin{pmatrix} A_j^- \\ B_j^- \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ -\kappa \end{pmatrix} A_j^- \quad (6)$$

用 A_j^+, A_j^- 和 A_{j+1}^+, A_{j+1}^- 分别表示图 2 中第 j 层和第 $j+1$ 层界面处的正行和负行光波的场分量.

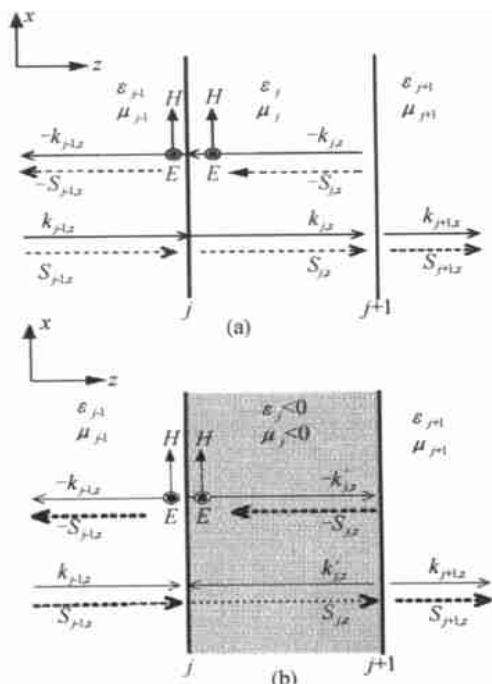


图 2 (a)光波在正折射率介质层中的传输;(b)光波在负折射率介质层中的传输

Fig. 2 (a)Light waves transmitted in a PIM layer;(b)Light waves transmitted in a NIM layer

另外,经过详细分析^[6],可以确定光波在负折射率介质中传播时波矢 k 的方向、大小和坐标系之间的关系,如图 2(b)所示. 图 2(a)是光波在正折射率介质膜堆中传播的情形. 从图中可以分别得到正、负折射率介质膜两边界面上 A_j^+, A_j^- 和 A_{j+1}^+, A_{j+1}^- 之间的相位关系. 由上分析可分别得到正折射率介质薄层中的传输矩阵

$$\begin{pmatrix} A_{j+1} \\ B_{j+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(k_{j,z} \Delta z_j) & \frac{i}{\kappa_j} \sin(k_{j,z} \Delta z_j) \\ i \kappa_j \sin(k_{j,z} \Delta z_j) & \cos(k_{j,z} \Delta z_j) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_j \\ B_j \end{pmatrix} \quad (7)$$

和负折射率介质层中的传输矩阵

$$\begin{pmatrix} A_{j+1} \\ B_{j+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(k'_{j,z} \Delta z_j) & \frac{i}{\kappa'_j} \sin(k'_{j,z} \Delta z_j) \\ i \kappa'_j \sin(k'_{j,z} \Delta z_j) & \cos(k'_{j,z} \Delta z_j) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_j \\ B_j \end{pmatrix} \quad (8)$$

式中 $\Delta z_j = (z_{j+1} - z_j) > 0$, 式(7)中 $k_{j,z} > 0$, 式(8)中 $k'_{j,z} < 0$. 可以发现式(7)和式(8)表示的矩阵在形式上是相同的,但各自的传输特性由于位相因子而明显不同. 考虑图 1 中有 j 层薄膜组成的膜堆,其总的传输矩阵可由各层传输矩阵连乘得到

$$M_{\text{Total}} = \prod_{i=1}^j M_i \quad (9)$$

假设 $A_{\text{Input}}^+, A_{\text{Input}}^-$ 分别表示入射波、反射波和透射波的横向电磁场分量(TE 波时是 E_y , TM 波时是 H_y), 则反射系数和透射系数可表示为 $r = A_{\text{Input}}^- / A_{\text{Input}}^+$ 和 $t = A_{\text{Sub}}^+ / A_{\text{Input}}^+$.

2 模拟结果和分析

布喇格反射镜可以简单地由一组不同折射率介质薄膜迭加构成. 其中最简单的情况是仅由两种介质层 M_1, M_2 交替排列而成,其中介质 M_1 的折射率为 $n_1 = 1.38, M_2$ 的 $n_2 = -2.4, n_1 d_1 = -n_2 d_2 = \lambda / 4$, 中心波长 $\lambda = 600 \text{ nm}$, 假设布喇格镜两侧介质的折射率为 1.52, 则 $(M_2 M_1)^8$ 膜堆 TE 波和 TM 波的反射率光谱曲线以及角度特性曲线分别如图 3 和图 4

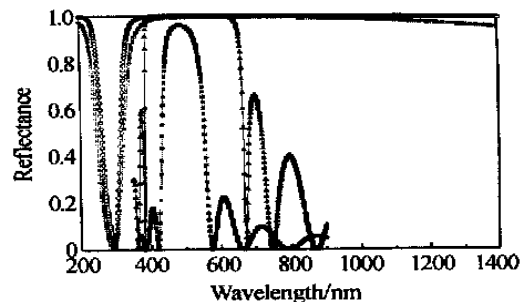


图 3 全介质布喇格反射镜的反射光谱曲线:正折射率介质层组成的布喇格镜 TE 波的反射光谱(▲)和 TM 波的反射光谱(■);正、负折射率介质层交替组成的布喇格镜 TE 波的反射光谱(○)和 TM 波的反射光谱(⊗)

Fig. 3 The reflection spectra of dielectric Bragg mirrors: reflection spectra of TE waves (▲) and TM waves (■) incident on a Bragg mirror with PIMs; reflection spectra of TE waves (○) and TM waves (⊗) incident on a Bragg mirror with alternant NIM-PIM

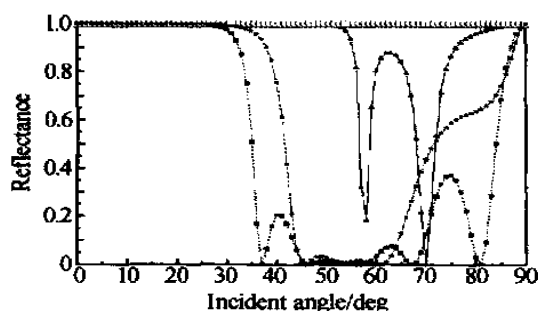


图4 全介质布喇格反射镜的反射率角度特性曲线:正折射率介质层组成的布喇格镜 TE波的角度特性曲线(▲)和 TM波的角度特性曲线(■);正、负折射率介质层交替组成的布喇格镜 TE波的角度特性曲线(○)和 TM波的角度特性曲线(☆)

Fig. 4 The relation between the reflection and incident angles of dielectric Bragg mirrors: relations of TE waves(▲) and TM waves(■) incident on a Bragg mirror with PMs; relations of TE waves(○) and TM waves(☆) incident on a Bragg mirror with alternant NIM-PM

所示. 其中图3表示平面波以 40° 角入射时的计算结果,图4对应的入射光波长为 600 nm . 作为对比,图中还给出了 n_1, n_2 均为正折射率时的布喇格镜对两种偏振态的反射率光谱曲线和角度特性曲线,计算中取 $n_1 = 1.38, n_2 = 2.4, n_1 d_1 = n_2 d_2 = \lambda/4$,设计中心波长 $\lambda = 600\text{ nm}$.

从图3中可知,正、负折射率介质交替的布喇格镜具有很宽的反射带宽,并且TE波和TM波的反射带宽分离很小. 相比之下,对正折射率介质薄膜构成的普通布喇格镜即使对TE波,其反射带宽也仅 270 nm 左右,对不同的偏振态,反射带宽分离非常明显,由于TM波的带宽太小,从而使有效反射带宽非常有限. 另外,TM波的峰值反射率随着入射角度的增大而急剧降低,在 40° 入射角时已降低到 95% . 而有负折射率介质层夹入的布喇格镜变化很小,在 0° 到 50° 的范围内几乎可以忽略. 根据图4中的结果,由正、负折射率介质交替构成的布喇格镜的反射角度特性也非常有利. 无论是对TE波还是TM波,它的角度反射带宽都要宽于相应的普通布喇格镜的反射带宽,对TE波更是实现了全角度反射.

对于这种夹有负折射率介质的全介质布喇格镜 $(M_2 M_1)^N$ (N 为介质层对数),其光学特性可以用薄膜光学理论加以分析和解释. 对于这种介质膜堆,总的传输矩阵可以经过简化表示为^[8]

$$M_{\text{total}} = \begin{pmatrix} m_{11} u_{N-1}(x) - u_{N-2}(x) & m_{12} u_{N-1}(x) \\ m_{21} u_{N-1}(x) & m_{22} u_{N-1}(x) - u_{N-2}(x) \end{pmatrix} \quad (10)$$

式中 $u_N(x)$ 是第二类切比雪夫多项式^[8]. 设 δ_1, δ_2 分别为光波在两层介质中的位相,若每个正、负折射率介质薄层的光学厚度即位相的绝对值相等,即 $\delta_1 = -\delta_2 = \delta$,则有

$$x = \cos^2 \delta \mp \frac{1}{2} \frac{\kappa_1^2 + \kappa_2^2}{\kappa_1 \kappa_2} \sin^2 \delta \quad (11)$$

式中的“ \mp ”对应两种情况:均为正折射率介质层时取“-”,有负折射率层时取“+”. 对于均为正折射率介质层时的光谱曲线已有很多著作^[8~10]作过详细讨论,这里只对含有负折射率层时的情况加以分析. 由式(4)和(5)可知,正、负折射率膜层的系数 κ 符号不变. 因此,当膜堆中有负折射率层时,只要满足条件 $\kappa_1 \neq \kappa_2$,式(12)的值就大于1;而根据切比雪夫多项式的性质,此时对于任何的位相 δ 都有 $|x| > 1$,膜堆落在反射带内. 根据式(4)和(5)还可知,当光波倾斜入射时,对TE波

$$\frac{\kappa_1^2 + \kappa_2^2}{\kappa_1 \kappa_2} = \frac{n^2 \cos^2 \theta + n'^2 \cos^2 \theta'}{n' \cos \theta' n \cos \theta} \quad (12)$$

由于对任何角度入射都满足 $n' \cos \theta' \neq n \cos \theta$,因此通过简单推导可知式(13)始终大于2,即有 $|x| > 1$,所以从 0 到 90° 入射的光波都在反射带内. 而对于TM波,由于

$$\frac{\kappa_2 + \kappa_1^2}{\kappa_1 \kappa_2} = \frac{n^2 \cos^2 \theta' + n^2 \cos^2 \theta}{n' \cos \theta' n \cos \theta} \quad (13)$$

在一定的角度条件下可以满足条件 $n' \cos \theta = n \cos \theta'$,即 $|x| = 1$. 当入射角达到该值时,反射率陡降,反射光谱发生振荡而进入透射光谱区. 随着入射角度的增大,又进入反射带,在这两者之间是振荡透射区.

3 结论

本文详细推导了光波在负折射率介质薄层中的传输矩阵,利用这种矩阵方法对由正、负折射率介质按 $(M_2 M_1)^N$ 交替构成的全介质布喇格反射镜的反射带宽和角度特性进行了计算分析. 与正折射率介质构成的布喇格反射镜的相应特性对比可以发现,含有负折射率介质层的布喇格镜具有更宽的反射带和更好的角度特性. 依据薄膜理论,证明了这些特性是由光波在负折射率介质层中的特殊位相性质所引起的.

参考文献

- 1 Veselago V G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ . *Sov Phys Usp*, 1968, **10**(4): 509~514
- 2 Shelby R A, Smith D R, Schultz S. Experimental verification of a negative index of refraction. *Science*, 2001, **292**(4): 77~79
- 3 Smith D R, Padilla W J, Vier D C, et al. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity. *Phys Rev Lett*, 2000, **84**(18): 4184~4188
- 4 Sergio T, Wayne H K, Cundiff S T, et al. Mode-locking ultrafast solid-state lasers with saturable Bragg reflectors. *IEEE J*

- Sel Top Quantum Electron*, 1996, **2**(3): 454~464
- 5 Weisbuch C, Nishioka M, Ishikawa A, *et al.* Observation of the coupled exciton-photon mode splitting in a semiconductor quantum microcavity. *Phys Rev Lett*, 1992, **69**(23): 3314~3317
- 6 杨立功, 黄弼勤, 叶辉, 等. 负折射率介质层中光波的位相和传输特性研究. *光学学报*, 2003, **24**(3): 已录用
Yang L G, Huang B Q, Ye H, *et al.* *Acta Optica Sinica*, 2003, **24**(3): accepted
- 7 Max B, Emil W. *Principles of Optics* 6th ed. New York: Pergamon. 1980. 14~21
- 8 唐晋发, 郑权. *应用薄膜光学*. 上海: 上海科技出版社, 1984. 82~95
Tang J F, Zheng Q. *Applied Thin Film Optics*. Shanghai: SST Press, 1984. 82~95
- 9 Knittl Z. *Optics of Thin Films*. New York: John Wiley Press, 1976. 41~46
- 10 Macleod H A. *Thin-Film Optical Filters* 3th ed. Bristol and Philadelphia: IP Publishing Press, 2001. 33~37

Optical Properties of a Bragg Mirror Containing Dielectric Layers with Negative Refractive Index

Yang Ligong, Gu Peifu, Huang Biqin

State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027

Received data: 2003-04-07

Abstract Transfer matrix of a negative refractive index medium (NIM) layer is derived from electromagnetic boundary conditions. Based on the transfer matrix method, the anomalous optical properties of an all-dielectric Bragg mirror containing NIM layers are simulated and compared to the corresponding characters of the Bragg mirror of the same structure with positive refractive index medium (PIM) layers. The results show that the Bragg mirror containing NIM layers have broader reflection band and better angular property than that of ordinary Bragg mirror.

Keywords Negative refractive index media; Transfer matrix; All-dielectric Bragg mirror



Yang Ligong received his B. S. in Optical Engineering Dept. of Zhejiang University, in 1998. Now he is pursuing Ph. D. degree in Institute of Thin Film Technology of Optical Engineering Dept., Zhejiang University. His research presently focuses on quantum structure semiconductor laser and optoelectronic thin films.