

薄膜波导光栅滤光片反射特性研究*

桑 田^{1,2} 王占山¹ 吴永刚¹ 陈玲燕¹

(1 同济大学精密光学工程技术研究所,物理系,上海 200092)

(2 黔南民族师范学院物理系,贵州 558000)

摘 要 根据将减反射薄膜结构引入波导光栅滤光片中可以较好地抑制反射旁通带的理论,设计了单层、三层薄膜结构的波导光栅滤光片,旨在运用尽可能少的膜层数,在宽光谱范围内得到窄的反射带和高反射峰. 运用严格的耦合波理论,对所设计的薄膜波导光栅滤光片的各种可能光栅结构进行了精确计算,得到反射率分布良好的特性曲线,并对计算结果进行分析,同时,还得到一种操作上较易于实现、在宽光谱范围内具有良好反射特性的三层膜光栅结构.

关键词 波导光栅;共振;减反射

中图分类号 O436.1 **文献标识码** A

0 引言

国内外学者对薄膜波导光栅的研究已经做了大量的工作^[1],较典型的有:1965年,Hessel和Oliner^[2]首次建立数学模型来研究薄膜波导光栅的共振异常现象,指出这种共振效应是由于入射光与光栅所支持的“泄漏波”发生耦合而产生的;Wang等人^[3]用等效折射率的方法,把介质光栅看作平板波导,利用严格的耦合波理论,从而确定薄膜波导光栅的共振位置;周传宏等^[4]用严格的耦合波理论,验证薄膜波导光栅为导模共振的原因,采用减反射设计,得到对称、低旁通带的窄带共振峰;Priambodo等人^[5]在实验中获得性能良好的薄膜波导光栅反射滤光片;曹召良等^[6]利用严格的耦合波理论,分析了方向误差和面形误差对亚波长光栅衍射效率的影响;Magnusson等人^[7]采用级联波导光栅的办法来抑制旁通带,获得窄带反射滤光片;张殿文等^[8]采用一个有效的数学模型,对离子束刻蚀工艺进行研究,提高光栅元件制作的质量.在上述有关薄膜波导光栅反射滤光片的设计中,旁通带普遍都被抑制得较好,但反射光谱的范围仍不够宽,在100 nm以内.而宽光谱分布范围显然是良好滤光片所应具备的一个重要的性能指标,也是理论和实验工作者热心关心的问题.本文从薄膜波导光栅的基本原理出发,通过合理选择薄膜波导光栅的各物理参数,用尽可能少的膜层数,设计出能够在宽光谱范围内具备优良反射特性的薄膜波导光栅滤光片,并对其特点与物理机制作了清晰阐释,因而对薄膜波导光栅滤

光片的制作具有较好的指导意义.

1 设计原理与方法

图1是n层结构的薄膜波导光栅,波导光栅层位于第1层,它是由两种高低不同介电常数分别为 ϵ_{1H} 和 ϵ_{1L} 的材料组成,光栅周期为 Λ ,光栅深度为 d_1 .第2,3,...,n层为各向同性介质层,其介电常数分别为 $\epsilon_2, \epsilon_3, \dots, \epsilon_n$,膜层厚度分别为 d_2, d_3, \dots, d_n .基片和覆盖层的介电常数分别为 ϵ_s 和 ϵ_c . θ' 为任意给定的入射角, θ'_i 为第i级向后传播光波的衍射角, θ_i 为第i级向前传播光波的衍射角.

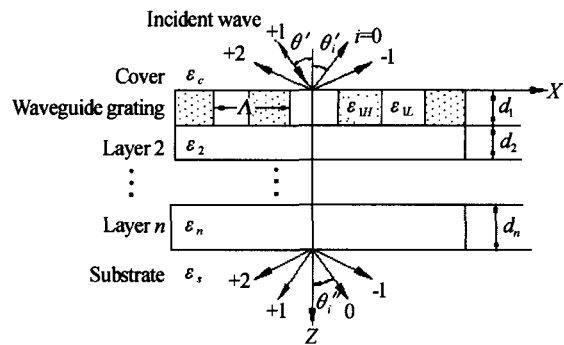


图1 薄膜波导光栅
Fig.1 The sketch map of waveguide-grating filter

在处理薄膜波导光栅时,利用多层波导薄膜的特征矩阵^[9],可以将介于覆盖层和基片的多层波导薄膜的本征值方程转化为多层波导薄膜共振本征值方程^[3]

$$P_c A + P_s P_s B + C + P_s D = 0 \quad (1)$$

这里, $P_c = [\epsilon_c - (\beta_n/k)^2]^{1/2}$, $P_s = [\epsilon_s - (\beta_n/k)^2]^{1/2}$, β_n 为沿边界的传播常数分量, $\beta_n = k\sqrt{\epsilon_n} \cdot \sin \theta_n$, θ_n 为第n层薄膜的折射角,n为膜层数($n=1, 2, 3, \dots$),A, B, C, D为多层波导薄膜的特征矩阵分量,它与各膜层厚度有关.式(1)给出多层膜堆中可能支持的波导模的色散关系.

*国家重点基础研究发展规划(2001CB10407)和上海市科委重点项目(03dz11007)资助
Tel: 021-65984652 Email: wangzs@mail.tongji.edu.cn
收稿日期:2004-08-03

对薄膜波导光栅,对于 TE 偏振(电场矢量垂直于图 1 的入射面),当调制振幅 $\Delta\epsilon$ 较小时,将描述薄膜波导光栅的耦合波方程与未经调制的介质波导的波动方程进行比较,得到波导光栅的有效传播常数^[1]

$$\beta_i = k(\sqrt{\bar{\epsilon}_n} \sin \theta_n - i\lambda/\Lambda) \quad (2)$$

这里, i 为衍射级次($i=0, \pm 1, \pm 2, \dots$), Λ 为光栅周期.

将式(2)中的 β_i 替换式(1)中的 $\beta_n, \bar{\epsilon}_n$ 替代 ϵ_n , 这里, $\bar{\epsilon}_n$ 为光栅所在膜层的平均介电常数, $\bar{\epsilon}_n = (\epsilon_{nH} + \epsilon_{nL})/2$, 即得到多层波导薄膜的共振本征值方程, 它可以近似地确定给定参数结构的薄膜波导光栅的共振位置. 可以看到, 随着光栅的各物理参数($\Lambda, \epsilon_n, \theta_n, \lambda, d, i$)变化, 相应的共振位置也会发生改变. 通常的计算中, 使光栅周期足够低($\Lambda < \lambda$)以满足光栅中只存在+1级和-1级衰减波的共振作用, 从而只有向前和向后传播的 0 级衍射波^[3]. 此时, 薄膜波导光栅共振范围满足的条件为

$$\max \{ \sqrt{\epsilon_c}, \sqrt{\epsilon_s} \} \leq \beta_i/k < \max \{ \sqrt{\bar{\epsilon}_n} | n=1, 2, 3, \dots \} \quad (3)$$

可见, 对于薄膜波导光栅, 无论是光栅层, 还是其它各向同性膜层, 其中至少有一层的平均介电常数比覆盖层和基片的介电常数高.

在下面的设计中采用减反射薄膜波导光栅结构^[10]. 这是一种将薄膜结构中的减反射效应与波导光栅波导模式的共振效应结合起来的结构, 这种结构具有良好的反射特性. 在进行具体计算时, 在满足共振范围条件的情况下, 将减反射薄膜结构参数带入薄膜波导光栅的共振本征值方程中, 可得到具有确定参数值的光栅结构, 再利用严格的耦合波理论^[11], 计算并探讨其反射特性. 考虑到实际情况, 下面的设计中, 都选择了可用的镀膜材料进行设计.

2 设计结果与计算

2.1 单层膜波导光栅滤光片

作为一种最基本的波导光栅结构, 单层膜结构的波导光栅是进行各种波导光栅设计的基础. 这种结构中相当于图 1 中膜层厚度 d_2, d_3, \dots, d_n 等于 0 的情形, 具有单层膜与波导光栅的特性, 因而表现出单层膜与波导光栅共同作用所呈现出来的综合效应. 在远离共振处, 由于衰减的衍射级次具有很小的振幅和位相变化, 衰减波与传播波的耦合效应可以忽略, 于是光栅主要呈现出单层各向同性薄膜的性质. 而在共振处则不同, 由于外部传播的波与邻近的衰减的衍射级次具有很强的耦合作用, 因而光栅主要

呈现出波导光栅的特性.

对于单层结构, 其共振本征值方程可以简化为^[3]

$$\tan(kP_{1i}d_1) = jP_{1i}(P_\alpha + P_s)/(P_{1i}^2 + P_\alpha P_s) \quad (4)$$

这里, $P_{1i} = [\bar{\epsilon}_1 - (\beta_i/k)^2]^{1/2}$, $P_\alpha = [\epsilon_c - (\beta_i/k)^2]^{1/2}$, $P_s = [\epsilon_s - (\beta_i/k)^2]^{1/2}$, 对应的共振范围为

$$\max \{ \sqrt{\epsilon_c}, \sqrt{\epsilon_s} \} \leq \beta_i/k < \sqrt{\bar{\epsilon}_1} \quad (5)$$

利用这一具有简洁形式的薄膜波导光栅的共振本征值方程, 能够较方便地近似确定给定参数结构的薄膜波导光栅的共振位置.

图 2 给出未经减反射设计的单层膜光栅结构的反射率曲线, 光栅深度 $d_1 = 190$ nm 是任意给定的, 其余各物理参数为 $\epsilon_c = 1.0, \epsilon_{1H} = 3.6, \epsilon_{1L} = 2.46, \bar{\epsilon}_1 = 3.03, \epsilon_s = 2.31$, 光栅周期为 $\Lambda = 315$ nm, 入射角 $\theta' = 0$, 共振波长 $\lambda = 508$ nm, 这里, 入射波为 TE 偏振波. 从图中可以看到, 该结构的波导光栅的确出现了一个很高的反射尖峰, 表现了共振异常现象. 但该峰形分布不对称, 且旁通带的反射率起伏较大, 反射率分布曲线不理想, 这是由于没有选择合适的光栅深度造成的. 为了获得理想的反射率分布曲线, 就需要对它进行减反射薄膜结构设计.

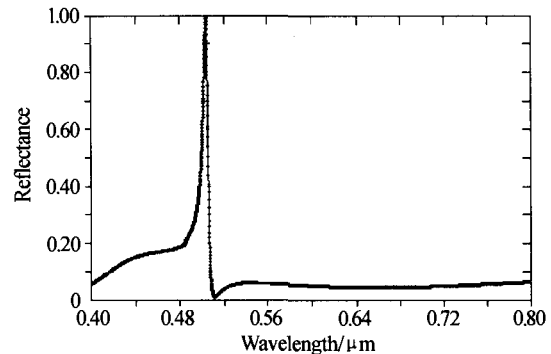


图 2 未经减反射设计的单层膜波导光栅滤光片的反射率曲线

Fig. 2 Reflection curve single-layer waveguide-grating without antireflection design

对于单层膜波导光栅, 当波导层的介电常数之差趋于 0, 即时, 在偏离共振位置附近的旁通带的反射率 R 可以简化为^[9]

$$R = \frac{\bar{\epsilon}_1(\sqrt{\epsilon_c} - \sqrt{\epsilon_s})^2 \cos^2 \bar{k}_1 d_1 + (\sqrt{\epsilon_c} \sqrt{\epsilon_s} - \bar{\epsilon}_1)^2 \sin^2 \bar{k}_1 d_1}{\bar{\epsilon}_1(\sqrt{\epsilon_c} + \sqrt{\epsilon_s})^2 \cos^2 \bar{k}_1 d_1 + (\sqrt{\epsilon_c} \sqrt{\epsilon_s} + \bar{\epsilon}_1)^2 \sin^2 \bar{k}_1 d_1} \quad (6)$$

这里, $\bar{k}_1 = 2\pi\sqrt{\bar{\epsilon}_1}/\lambda$. 从式(6)中可以看到, 当光栅厚度 $d_1 = \lambda/2\sqrt{\bar{\epsilon}_1}$, 即等于半波长的光学厚度时, 式(6)可以简化为

$$R = [(\epsilon_c - \epsilon_s)/(\epsilon_c + \epsilon_s)]^2 \quad (7)$$

可见, 在光栅深度等于二分之一光学厚度, 且入射媒

质的介电常数与基片的介电常数相等($\epsilon_c = \epsilon_s$)时,旁通带的反射率等于 0. 也就是说,在这种条件下,旁通带将最大程度地被抑制,反射率分布曲线是很理想的.

图 3 给出了具有减反射薄膜波导光栅结构的反射率分布曲线. 共振波长 $\lambda = 508 \text{ nm}$, $\epsilon_c = \epsilon_s = 2.31$, 光栅深度 $d_1 = \lambda/2 \sqrt{\epsilon_1}$ (二分之一光学厚度). 从图中可以看到,在 400 nm 的波长范围内得到了峰形对称、性能良好的反射率分布曲线. 但是,该曲线的带宽还是相对较宽的,大小等于 2.9 nm. 这是由于光栅层的调制率 $(\epsilon_{1H} - \epsilon_{1L})/(\epsilon_{1H} + \epsilon_{1L}) = 0.188$ 较大的原因造成的. 如果想进一步压缩带宽,获得更窄的高反射峰. 则可以在平均介电常数 $\bar{\epsilon}_1$ 不变的情况下,选择介电常数 ϵ_{1H} 和 ϵ_{1L} 更加接近的材料,即调制率较小的光栅结构,从而得到更窄的反射带宽. 图 4 给出了这样的结构,其调制率仅为 0.05,该结构在 500 nm 的波长范围内得到了对称、带宽很窄(等于 0.18 nm)的反射率分布曲线,在波长满足 $412 \text{ nm} < \lambda < 676 \text{ nm}$ 的范围内,旁通带的反射率低于 1%.

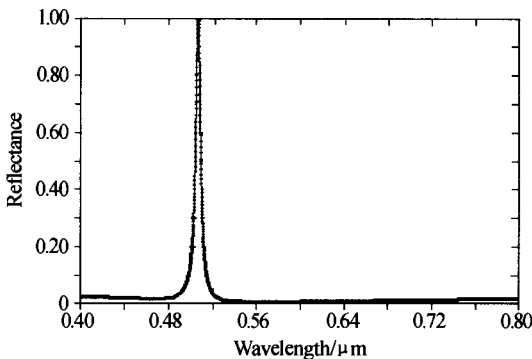


图 3 $\epsilon_c = \epsilon_s = 2.31, d_1 = 146 \text{ nm}$, 其它参数同图 2
Fig. 3 $\epsilon_c = \epsilon_s = 2.31, d_1 = 146 \text{ nm}$, other parameters are the same as the Fig. 2

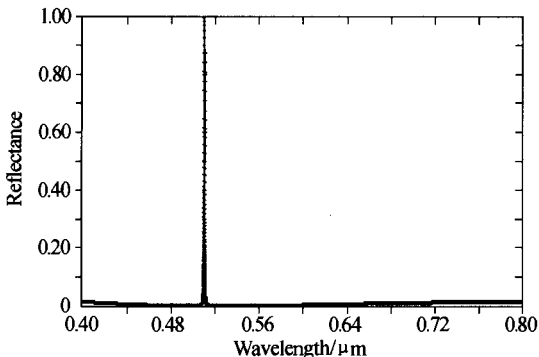


图 4 $\epsilon_{1H} = 3.18, \epsilon_{1L} = 2.88$, 其它参数同图 3
Fig. 4 $\epsilon_{1H} = 3.18, \epsilon_{1L} = 2.88$, other parameters are the same as the Fig. 3

2.2 多层膜波导光栅滤光片

单层膜结构的波导光栅具有设计简单,反射率特性曲线分布良好的优点,但同时它也存在不足. 首先是结构单一,灵活性差,其次是减反射条件要求

$\epsilon_c = \epsilon_s$ 这一条件,这在实际中是难以做到. 与单层膜结构相比,多层膜波导光栅设计方法比较灵活,且在波导光栅层材料已经给定的情况下,反射率的光谱范围仍可以进一步得到拓宽.

下面,设计了 $\lambda/4 - \lambda/4 - \lambda/4$ 型具有三层减反射薄膜结构的波导光栅,其基本结构相当于图 1 中膜层厚度 d_4, d_5, \dots, d_n 等于 0 的情形.

对于具有减反射结构的三层膜,各膜层之间的介电常数需满足

$$\epsilon_1^2 \epsilon_3^2 / \epsilon_2^2 = \epsilon_c \epsilon_s \quad (8)$$

设计中,在维持各膜层平均介电常数不变的情况下,通过改变波导光栅所在的膜层位置,从而能够灵活设计出共振波长不变、不同参数的 $\lambda/4 - \lambda/4 - \lambda/4$ 三层减反射结构的波导光栅.

图 5 的反射分布曲线对应的三层膜波导光栅结构,入射波为 TE 偏振波,入射角 $\theta' = 0$,光栅层位于第 1 层,各膜层介电常数为 $\epsilon_{1H} = 2.8$ (氧化钨), $\epsilon_c = \epsilon_{1L} = 1.0, \bar{\epsilon}_1 = 1.9, \epsilon_2 = 3.88$ (二氧化铪), $\epsilon_3 = 3.1$ (五氧化二铌), $\epsilon_s = 2.31$, 光栅周期 $\Lambda = 433 \text{ nm}$. 这是一种在操作上较易于实现的结构,采用全息光刻制作光栅掩模,再用离子束刻蚀转移光栅掩模图形的方法^[2],能够在实验中得到. 这里,共振波长为 710 nm. 利用式 $d_i = \lambda/4 \sqrt{\epsilon_i}$ ($i = 2, 3$) 和 $d_1 = \lambda/4 \sqrt{\bar{\epsilon}_1}$ 计算出来的膜层厚度为: $d_1 = 128.6 \text{ nm}, d_2 = 80.7 \text{ nm}, d_3 = 100.9 \text{ nm}$. 从图中可以看到,该反射率曲线峰形较为对称,反射带宽也较窄,为 2.75 nm,在波长满足 $607.7 \text{ nm} \leq \lambda \leq 892.3 \text{ nm}$ 的光谱范围内,旁通带的反射率低 1%. 这对实验中较易于制作的薄膜波导光栅反射滤光片而言,其反射率分布曲线已经很理想了.

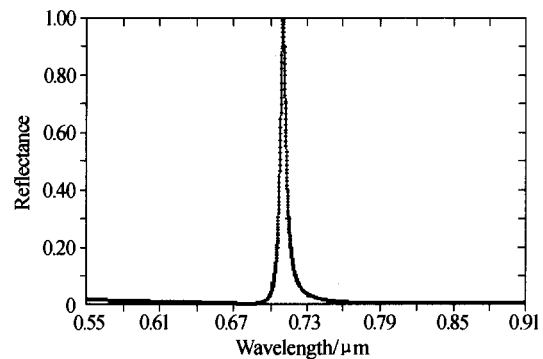


图 5 三层膜波导光栅滤光片反射率曲线,光栅层位第一层
Fig. 5 Reflection curve of triple-layer waveguide-grating, the modulation is in the first layer

图 6 对应的三层膜波导光栅结构中光栅层位于第 2 层 $\epsilon_1 = 1.9, \epsilon_{2H} = 4.08, \epsilon_{2L} = 3.68, \bar{\epsilon}_2 = 3.88$, 相当于图 5 对应的结构中光栅层移至第 2 层,而第一层用一层介电常数等于 1.9 的材料来替代图 5 中的 $\bar{\epsilon}_1$, 其

余的参数不变. 该结构得到反射率分布良好的特性曲线. 由于图 6 对应的调制率为 $(\epsilon_{1H} - \epsilon_{1L})/(\epsilon_{1H} + \epsilon_{1L}) = 0.052$, 较图 5 的 0.47 小了许多, 薄膜近似程度较图 5 得到了很大的提高, 因而带宽相应地减小了, 仅为 0.26 nm. 图 7 对应的情况是光栅位于第 3 层的情形, 同样, 也得到反射率分布良好的曲线.

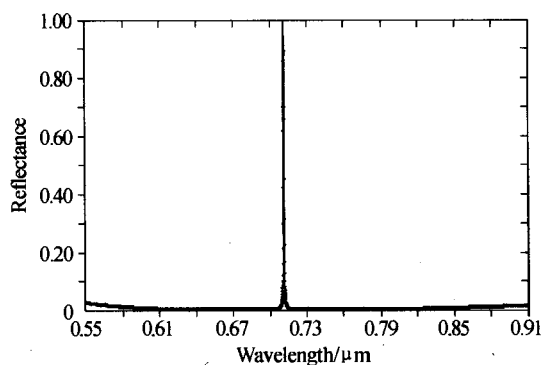


图 6 $\epsilon_1 = 1.9, \epsilon_{2H} = 4.08, \epsilon_{2L} = 3.68, \epsilon_2 = 3.88$, 其它参数同图 5

Fig. 6 $\epsilon_1 = 1.9, \epsilon_{2H} = 4.08, \epsilon_{2L} = 3.68, \epsilon_2 = 3.88$, other parameters are the same as Fig. 5

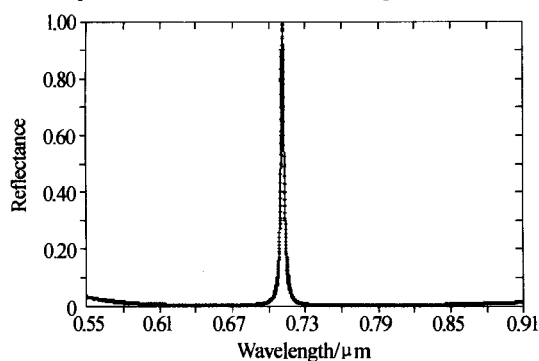


图 7 $\epsilon_1 = 1.9, \epsilon_{3H} = 3.54, \epsilon_{3L} = 2.66, \epsilon_3 = 3.1$, 其它参数同图 5

Fig. 7 $\epsilon_1 = 1.9, \epsilon_{3H} = 3.54, \epsilon_{3L} = 2.66, \epsilon_3 = 3.1$, other parameters are the same as Fig. 5

3 结论

本文运用将减反射薄膜结构引入薄膜波导光栅中可以较好地抑制反射旁通带的理论, 旨在用尽可能少的膜层数, 进一步拓宽反射光谱的范围. 利用严格的耦合波理论, 计算和设计了反射特性良好的单层、三层各种可能结构的薄膜波导光栅滤光片, 并得到一种操作上较易于实现的三层结构. 可以看到, 对于单层结构, 当满足减反射单层膜的条件时, 选择两种介电常数接近的材料, 能够进一步压缩带宽, 得到峰形分布更加对称、旁通带反射更低、光谱范围分布更宽的反射特性曲线. 对于多层结构,

可将光栅层视为介电常数为平均介电常数的各向同性膜层, 保持各膜层的介电常数不变, 改变光栅层所在的膜层位置, 共振波长几乎不发生改变. 但无论对单层还是多层结构, 调制因子都是一种控制带宽的有效手段, 调制因子越小, 带宽也就越窄, 反之亦然. 当调制因子趋于 0 时, 波导光栅层趋向于各向同性的膜层, 相应的带宽也趋于 0. 所以, 通过对调制率的合理选择, 可以得到实际需要的带宽.

参考文献

- Magnusson R, Wang S S. New principle for optical filters. *Appl Phys Lett*, 1992, **69**(9): 1022~1024
- Hessel A, Oliner A A. A new theory of wood's anomalies on optical gratings. *Applied Optics*, 1965, **4**(10): 1275~1298
- Wang S S, Magnusson R. Multilayer waveguide-grating filters. *Applied Optics*, 1995, **34**(10): 2414~2420
- 周传宏, 王磊, 聂娅, 等. 介质光栅导模共振耦合波分析. *物理学报*, 2002, **51**(1): 27~32
Zhou C H, Wang L, Nie Y, et al. *Acta Physica Sinica*, 2002, **51**(1): 27~32
- Priambodo P S, Maldonado T A, Magnusson R. Fabrication and characterization of high-quality waveguide-mode resonant optical filters. *Appl Phys Lett*, 2003, **83**(16): 3248~3250
- 曹召良, 卢振武, 李凤有, 等. 亚波长介质光栅的制作误差分析. *光子学报*, 2004, **33**(1): 76~79
Cao Zh L, Lu Zh Y, Li F Y, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(1): 76~79
- Magnusson R, Priambodo P S. Cascaded resonant-grating filters: experimental results on lowered sidebands and narrowed lines. *IEEE Phototech Lett*, 2003, **15**(3): 404~406
- 张殿文, 卢振武, 曹召良, 等. 刻蚀表面面形的分析. *光子学报*, 2002, **31**(7): 888~893
Zhang D W, Lu Zh W, Cao Zh L, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(7): 888~893
- Macleod H A. Thin-film optical filters. London: Institute of physics publishing, 1989. 37~50
- Wang S S, Magnusson R. Design of waveguide-grating filters with symmetrical line shapes and low sidebands. *Optics Letters*, 1994, **19**(12): 919~921
- Gaylord T K, Moharam M G. Analysis and applications of optical diffraction by gratings. *Proc IEEE*, 1985, **73**(897): 894~937

Reflected properties Analysis of Thin-film Waveguide-grating Filters

Sang Tian^{1,2}, Wang Zhanshan¹, Wu Yonggang¹, Cheng Lingyan¹

¹ Institute of Precision Optical Engineering, Department of Physics, Tongji University, Shanghai 20092

² Department of physics, Qianna Nationalities teacher's college, Guizhou 558000

Received date: 2004-08-03

Abstract Waveguide-grating filters with single-layer and triple-layer thin-film structure were designed, which were based on the theory that reflected sidebands depressed more by introducing antireflection structures of thin-film into waveguide-gratings. The purpose was to obtain narrow linewidth and high peak response in wide spectral range by using layers as few as possible. Rigorous coupled-wave theory was used in precise calculation on the possible structures of single-layer and triple-layer thin-film waveguide filters, and good reflected curves were obtained. Furthermore, a good triple-layer thin-film structure which was easy achieved in experiment in wide spectral range was also obtained.

Keywords Waveguide-gratings; Resonances; Antireflection



Sang Tian was born on May 1, 1978, in Guizhou Province, China. He received the B. S. degree in 2000, from Guizhou Normal University, China. He is presently pursuing the M. S. degree in optical engineering at Tongji University. He is interested in optical coating and grating designing and fabrication.