

文章编号: 0253-2239(2008)05-1001-06

# 宽截止窄带高反射滤光膜设计

彭东功 吴永刚 焦宏飞 曹 鸿 王振华 付联效 郑秀萍

(同济大学,精密光学工程技术研究所,上海 200092)

**摘要** 窄带高反射滤光膜在光通讯、光学探测仪器等领域有着重要应用。探讨了“基片 | H(LH)<sup>m<sub>1</sub></sup> αL(HL)<sup>m<sub>2</sub></sup> β<sub>Cr</sub>M | 空气”膜系结构的窄带高反射滤光膜系,讨论了金属 Cr 层厚度,以及两种不同的匹配膜系对滤光膜特性的影响,计算了 Cr 层内部的电场分布。结果表明,较厚的金属层可实现更宽的截止带宽,匹配层的加入有效地实现了宽截止带的深截止,使中心波长处导纳为较大值的匹配膜系可以更好地实现滤光膜宽截止、窄带高反射特性;匹配膜层使中心波长处 Cr 层内部的电场强度趋于零,有效地降低了整个膜系的吸收,提高了反射率。

**关键词** 薄膜光学;窄带反射滤光膜;非对称法布里-珀罗结构;导纳;匹配膜系;超薄金属

**中图分类号** O484; TB43 **文献标识码**: A

## Design of Narrowband High-Reflection Filter Coating with Wide Stop Band

Peng Donggong Wu Yonggang Jiao Hongfei Cao Hong Wang Zhenhua  
Fu Lianxiao Zheng Xiuping

(Institute of Precise Optical Engineering and Technology, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract** Narrowband high-reflection filter coatings are very important in optical communication and optical detectors. A kind of narrowband high-reflection filter coating with structure of “substrate | H(LH)<sup>m<sub>1</sub></sup> αL(HL)<sup>m<sub>2</sub></sup> β<sub>Cr</sub>M | air” was proposed, the influences of Cr thickness and two different matching film stacks on the characteristics of the filter coating was discussed, and the distribution of the internal electric field was calculated. Results show that a wider stop band in reflection can be realized with a thicker metallic layer and inserting a matching stack will produce a deep rejection of the stop-band. The matching stack leading to a greater admittance helps obtain a wide stop-band and narrow-band high reflection, and also produces zero electric field intensity in the Cr layer at the central wavelength, which consequently reduces the absorption and enhances the reflectance of the filter.

**Key words** thin film optics; narrowband reflection filter coating; asymmetrical Fabry-Pérot structure; admittance; matching film stack; ultra-thin metal

## 1 引 言

窄带高反射滤光膜在光纤通讯系统以及光学探测仪器等领域有广泛的应用。对这种高反射滤光膜的设计与制备已有深入的研究,如 Thelen<sup>[1]</sup>提出了全介质负滤光膜,Knittl<sup>[2]</sup>,Thetford<sup>[3]</sup>,Zheng<sup>[4]</sup>,

Robin Gamble<sup>[5]</sup>等研究了金属-介质组成的多层高反膜。然而,所提出的膜层结构过于复杂、实验上不易制备。导模共振光栅<sup>[6~14]</sup>也可以实现窄带高反射镜的设计,但是这种光栅的制作较为复杂、成本较高。为了简化膜系的结构,Sun 等<sup>[15]</sup>提出了“基片

收稿日期: 2007-09-30; 收到修改稿日期: 2007-12-12

基金项目: 国家自然科学基金(10175049)资助课题。

作者简介: 彭东功(1979-),男,安徽人,硕士研究生,主要从事低维光子晶体方面的研究。

E-mail: pengdonggong@163.com

导师简介: 吴永刚(1957-),男,上海人,教授,博士生导师,主要从事低维光子晶体、真空紫外、极紫外、软 X 射线滤光薄膜、物理气相法制备高效能电磁波屏蔽织物等方面的研究。E-mail: ygwu@mail.tongji.edu.cn(通信联系人)。

$|H(LH)^{m_1}2L(HL)^{m_2}3Cr|$ 空气”窄带高反射镜多层膜结构。这种结构膜层数少,容易制备,但是截止波段范围较窄,仅为100 nm左右。本文工作对Sun的结构进行了改进,构造了“基片 $|H(LH)^{m_1}\alpha L(HL)^{m_2}\beta_{Cr}M|$ 空气”膜系结构,增加金属层的厚度,再添加适当的匹配膜系,探讨了金属层厚度和匹配层对窄带反射光谱特性的影响。

## 2 膜系结构

通常情况下法布里-珀罗(F-P)滤光膜间隔层两边的膜系结构是完全相同的,反射率也几乎相同。当间隔层两边的膜系结构相差很大时会导致非对称的法布里-珀罗结构,引起很大的反射率差异。如“基片 $|H(LH)^{m_1}\alpha L(HL)^{m_2}|$ 空气”的非对称法布里-珀罗结构,这种结构中, $m_1$ 、 $m_2$ 分别为HL对的周期数,且 $m_1$ 远大于 $m_2$ ; $\alpha$ 为间隔层厚度系数, $H=n_H d_H=\lambda_0/4$ , $L=n_L d_L=\lambda_0/4$ , $n_H$ 、 $n_L$ 分别为高低折射率两种材料的折射率, $d_H$ 、 $d_L$ 分别为与 $\lambda_0/4$ 光学厚度H,L相对应的两种材料的物理厚度, $\lambda_0$ 是中心波长。在非对称法布里-珀罗结构的基础上,我们构造了一种非对称的法布里-珀罗介质-金属复合结构,即基片 $|H(LH)^{m_1}\alpha L(HL)^{m_2}\beta_{Cr}M|$ 空气,其中 $\beta_{Cr}$ 为Cr层厚度,单位nm,M表示匹配膜系,用于系统导纳匹配。

采用的介质材料参量为 $n_H=2.16$ 、 $n_L=1.46$ ,金属材料Cr的光学参量见表1。

表1 铬金属膜的光学常数(取自 Essential Macleod 软件)

Table 1 Optical constants of metal Cr film (from Essential Macleod software)

Wavelength /nm	$n$	$k$
490.1	2.49	4.44
512.3	2.75	4.46
532.1	2.98	4.45
558.5	3.18	4.41
582.1	3.34	4.38
610.8	3.48	4.36
700.5	3.84	4.37
815.7	4.23	4.34
826.6	4.27	4.33

## 3 金属层厚度的影响

图1是金属层厚度 $\beta_{Cr}$ 取3 nm、7 nm、15 nm和30 nm时,对应膜系“基片 $|H(LH)^{15}2L(HL)^3\beta_{Cr}|$ 空

气”的反射谱线。从图1看出,对应不同的Cr层厚度,滤光膜在中心波长处的反射率基本保持不变。当Cr层较薄时,反射峰两侧有较大的截止深度,但其范围较窄。当Cr层较厚时,反射峰两侧的截止深度快速减小,同时截止深度趋于平坦。显然对于具有较厚金属层的膜系,为了获得大的截止深度,需要采用匹配膜系来调整膜系的导纳,使其与周围媒质相匹配,从而减小反射,增加截止深度。

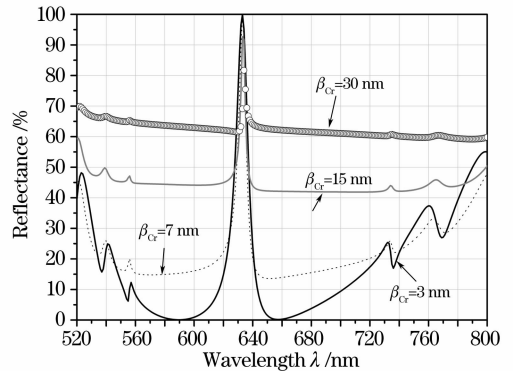


图1 不同 $\beta_{Cr}$ 膜系结构的反射谱

Fig. 1 Reflection spectra of different film systems

图2给出了“基片 $|H(LH)^{15}2L(HL)^3\beta_{Cr}|$ 空气”膜系中金属铬层厚度分别为3 nm、7 nm、15 nm和30 nm时的导纳。当Cr层厚度为3 nm和7 nm时,由于在中心波长位置的导纳值非常大,因此为显示整个导纳谱图的全貌以及局部特征,实线和点线分别表示导纳的实部和虚部,图2(a)和图2(b)显示了膜系导纳的全谱,而在对应的插图中显示了中心波长处的导纳谱细节。从图2可知,随着金属铬厚度增加,中心波长处导纳的实部和虚部的绝对值快速减小,而中心波长两侧导纳绝对值则增大。

某一波长处如要获得高反射,可以使导纳的实部和虚部的绝对值取较大的值(相对于1);也可以使导纳的实部取为零;而如果欲获得零反射率,则应使系统导纳的实部取为1、虚部为零,即导纳与空气匹配。由图2可知,随着金属层变厚,中心波长处导纳绝对值快速减小、不过仍远大于1,而两侧区域导纳绝对值逐渐变大,与周围媒质的导纳产生偏离,由此导致中心波长处仍保持高反射率,而两侧区域反射率上升,如图1所示。由图2还可以知道,随着金属层变得更厚,中心波长处的导纳绝对值会变得更小、中心波长两侧区域的导纳与周围媒质的导纳更加偏离,因此会使窄带高反射膜不易实现。

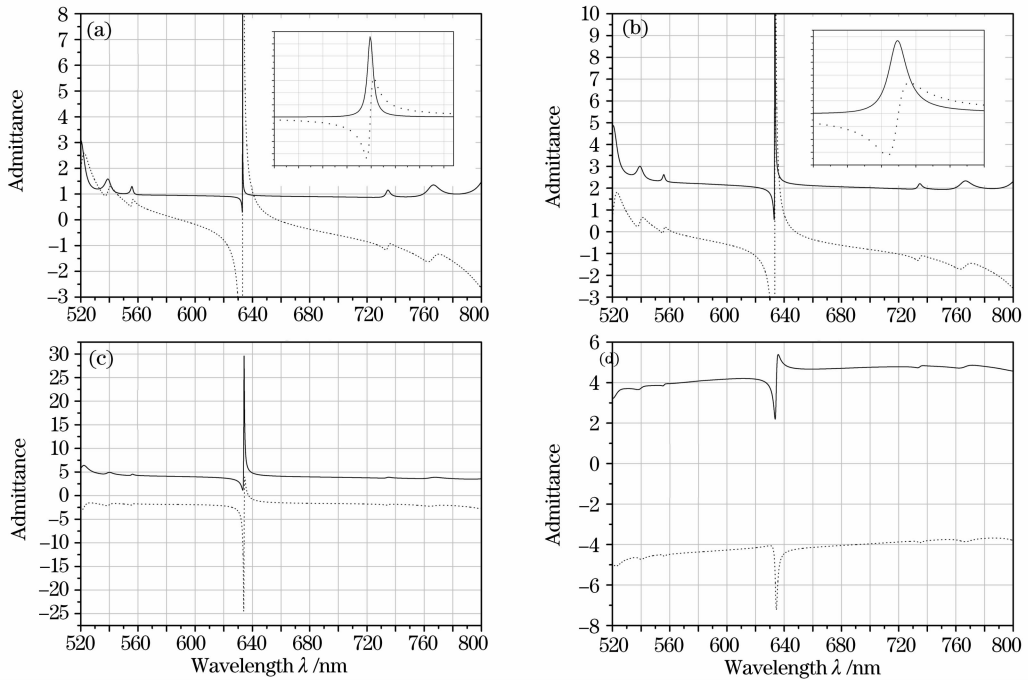


图 2 金属层厚度  $\beta_{Cr}$  分别取 3 nm (a), 7 nm (b), 15 nm (c) 和 30 nm (d) 时, 膜堆“基片 | H(LH)<sup>15</sup>2L(HL)<sup>3</sup> $\beta_{Cr}$  | ”的导纳图  
 Fig. 2 Admittance curves of film stack “substrate | H(LH)<sup>15</sup>2L(HL)<sup>3</sup> $\beta_{Cr}$  | air”, according to  $\beta=3$  nm (a), 7 nm (b), 15 nm (c) and 30 nm (d), respectively

### 4 匹配膜系的作用

图 3(a) 是膜堆“基片 | H(LH)<sup>15</sup>2L(HL)<sup>3</sup> | ”对应不同波长的导纳。在膜堆上加上 12.8 nm 的 Cr 层后, 就构成了窄带高反射膜系。由图 3(b) 可见, 膜堆“基片 | H(LH)<sup>15</sup>2L(HL)<sup>3</sup>12.8 $\beta_{Cr}$  | ”的导纳发生了较大的变化。但此膜堆的反射率并不理想, 采用简单的试探方法, 设计了单层匹配层 0.84H, 这样最终膜堆“基片 | H(LH)<sup>15</sup>2L(HL)<sup>3</sup>12.8 $\beta_{Cr}$ 0.84H | ”的导纳较好地达到了设计要求, 如图 3(c) 所示。其中中心波长

处导纳实部约为 0, 而中心波长两侧很宽范围内的导纳均接近于 (1, 0)。根据图 3(c) 所示的导纳曲线, 计算可得多层膜系统的光谱反射率见图 4 中实线所示。由图 4 可见, 在中心波长处反射率接近 100%, 而其两侧区域反射率趋于 0。

实际上中心波长处导纳还可以取较大的值, 同样可使反射率接近于 100%。为此我们构建了结构为“0.82H0.94L1.6H0.78L”的匹配膜系, 图 5(a) 给出了膜堆“基片 | H(LH)<sup>15</sup>2L(HL)<sup>3</sup>12.8 $\beta_{Cr}$ ”

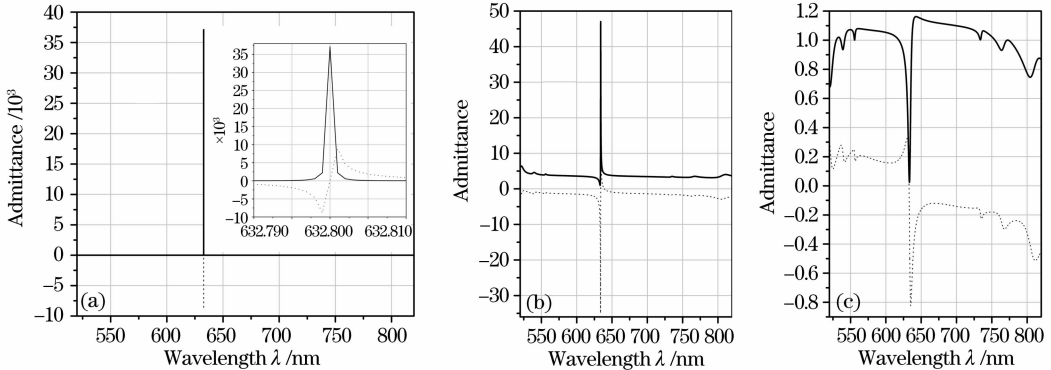


图 3 不同膜堆结构的导纳图。(a)“基片 | H(LH)<sup>15</sup>2L(HL)<sup>3</sup> | ”, (b)“基片 | H(LH)<sup>15</sup>2L(HL)<sup>3</sup>12.8 $\beta_{Cr}$  | ”, (c)“基片 | H(LH)<sup>15</sup>2L(HL)<sup>3</sup>12.8 $\beta_{Cr}$ 0.84H | ”。(a) 中的插图是该图在 633 nm 附近的放大图(设计中心波长 632.8 nm, 下同)  
 Fig. 3 Admittance curves of different film stacks “substrate | H(LH)<sup>15</sup>2L(HL)<sup>3</sup> | air” (a), “substrate | H(LH)<sup>15</sup>2L(HL)<sup>3</sup>12.8 $\beta_{Cr}$  | air”(b) and “substrate | H(LH)<sup>15</sup>2L(HL)<sup>3</sup>12.8 $\beta_{Cr}$ 0.84H | air”(c). Inset of (a) gives enlarged drawings at central wavelength of 632.8 nm (hereinafter the same)

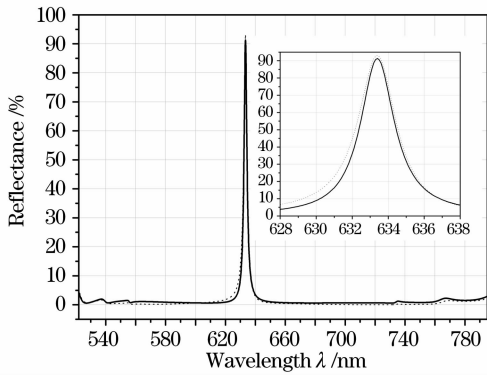
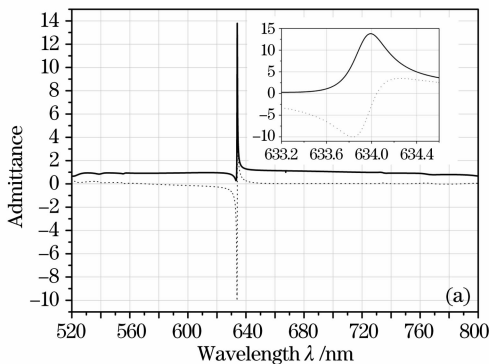


图 4 膜系结构为“基片 | H(LH)<sup>15</sup> 2L(HL)<sup>3</sup> 12. 8<sub>Cr</sub> 0.84H | 空气” (实线) 和 “基片 | H(LH)<sup>15</sup> 2L(HL)<sup>3</sup> 12. 8<sub>Cr</sub> 0.82H0.94L1.6H0.78L | 空气” (虚线) 的反射图谱 (设计中心波长 632.8 nm), 插图是反射峰的放大部分

Fig. 4 Reflection spectral curves of structures “substrate | H(LH)<sup>15</sup> 2L(HL)<sup>3</sup> 12. 8<sub>Cr</sub> 0.84H | air” (solid line) and “substrate | H(LH)<sup>15</sup> 2L(HL)<sup>3</sup> 12. 8<sub>Cr</sub> 0.82H0.94L1.6H0.78L | air” (dot line). Inset shows enlarged figure of reflection peak and the central wavelength is 632.8 nm

0.82H0.94L1.6H0.78L”在 520~800 nm 范围内的导纳。由图 5(a)可知,在中心波长处,导纳实部、虚部都很大(远大于 1),很好地满足了高反射的要求;而在中心波长两侧区域,导纳的实部约为 1、虚部约为 0,与空气媒质匹配,也很好满足了低反射的要求。图 4 中虚线给出了采用这一匹配膜系得到的窄带高反射镜反射图谱。

显然采用两种不同匹配膜系的膜系结构,它们的反射图谱都具有宽截止带、窄带高反射的特性。



由于在中心波长两侧“0.82H0.94L1.6H0.78L”比“0.84H”更好地实现了整个膜系与周围媒质的匹配,因而其截止特性更好于后者。

由上述分析可知,当金属层取一定厚度时,可以通过不同的匹配膜系来调整系统的导纳,从而获得宽截止带、窄带高反射镜。

对于中心波长处反射率而言,当导纳绝对值较小时要获得高反射,可以通过匹配膜系使导纳的实部为零。当金属层厚度在 3~30 nm 之间变换时,相对于较小的金属层厚度(比如在 3~13 nm 范围),导纳的实部、虚部变化较大。但它们相对于周围空气媒质来说仍然很大,因而可以很容易选择较少层数的匹配膜系来调整系统的导纳,使中心波长处导纳满足高反射条件,同时两侧区域导纳满足零反射条件。当金属层厚度较大时,中心波长处导纳已经变成较小的值,这时要满足高反射条件应该使实部为零,所选择的匹配膜系就需要更多的层数,才能同时满足中心波长的高反射条件和两侧的低反射条件。比如对于图 2(c)的膜堆“基片 | H(LH)<sup>15</sup> 2L(HL)<sup>3</sup> 15<sub>Cr</sub> |”而言,其中心波长处导纳的实部已降低到约 30 左右,借助于计算机数值优化方法设计得到该膜系的匹配膜系为“0.86H1.1L0.54H2.2L1.1H2L0.72H2.2L0.73H1L”,显然,匹配膜系层数相比较于薄金属膜层而言增加得较多。图 5(b)给出了设计膜堆“基片 | H(LH)<sup>15</sup> 2L(HL)<sup>3</sup> 15<sub>Cr</sub> 0.86H1.1L0.54H2.2L1.1H2L0.72H2.2L0.73H1L |”的导纳图,可以看到在中心波长处基本满足高反射条件;在其两侧大致满足零反射条件,与此对应的反射图谱如图 6 所示。

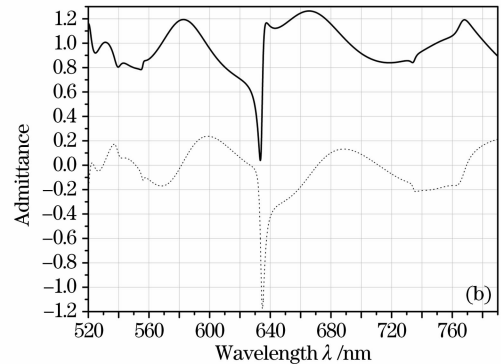


图 5 膜堆“基片 | H(LH)<sup>15</sup> 2L(HL)<sup>3</sup> 12. 8<sub>Cr</sub> 0.82H0.94L1.6H0.78L |” (a), “基片 | H(LH)<sup>15</sup> 2L(HL)<sup>3</sup> 15<sub>Cr</sub> 0.86H1.1L0.54H2.2L1.1H2L0.72H2.2L0.73HL |” (b) 的导纳图。实线和点线分别表示导纳的实部和虚部

Fig. 5 Admittance curves of structure “substrate | H(LH)<sup>15</sup> 2L(HL)<sup>3</sup> 12. 8<sub>Cr</sub> 0.82H0.94L1.6H0.78L |” (a), “substrate | H(LH)<sup>15</sup> 2L(HL)<sup>3</sup> 15<sub>Cr</sub> 0.86H1.1L0.54H2.2L1.1H2L0.72H2.2L0.73HL |” (b). Real part (solid line), imagery part (dot line)

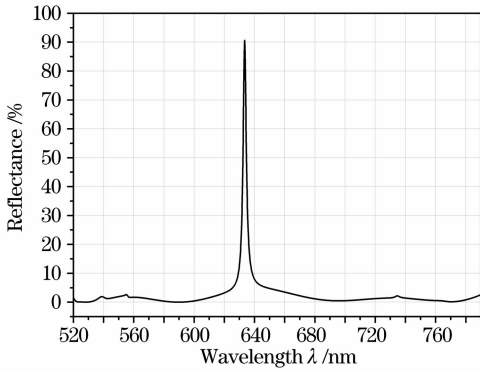


图 6 膜系“基片 | H(LH)<sup>15</sup> 2L(HL)<sup>3</sup> 15Cr 0.86H1.1L 0.54H 2.2L1.1H2L0.72H2.2L0.73HL | 空气”的反射光谱

Fig.6 Reflection spectrum of structure “substrate | H(LH)<sup>15</sup> 2L(HL)<sup>3</sup> 15Cr 0.86H1.1L0.54H2.2L 1.1H2L0.72H2.2L0.73HL | air”

### 5 内部电场分布

图 7 给出了膜系“基片 | H(LH)<sup>15</sup> 2L(HL)<sup>3</sup> 12.8Cr 0.84H | 空气”中膜系结构内相应于 633.4 nm 入射波长的电场强度分布。由图可知,金属 Cr 层内电场极小,导致该波长的入射辐射几乎未被吸收。而膜系结构内相应于其它波长的电场强度分布则如图 8 所示,从中不难发现 Cr 金属层中相应于 633.4 nm 两侧波长的电场均相当强,因而大部分辐射都将被金属层所吸收掉。因此在一个较宽的波段内,仅中心频率附近的光子能够不被吸收而穿过金属层,产生了所谓的光子隧穿现象。

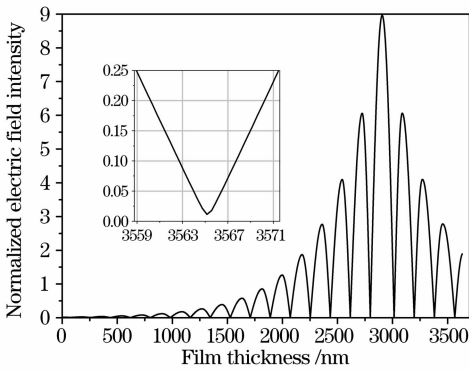


图 7 膜系“基片 | H(LH)<sup>15</sup> 2L(HL)<sup>3</sup> 12.8Cr 0.84H | 空气”结构中内部电场强度分布(波长为 633.4 nm),放大部分是金属 Cr 层的内部电场强度分布

Fig.7 Internal electric field intensity distribution of structure “substrate | H(LH)<sup>15</sup> 2L(HL)<sup>3</sup> 12.8Cr 0.84H | air” at 633.4 nm, inset represents enlarged internal electric field intensity of Cr layer

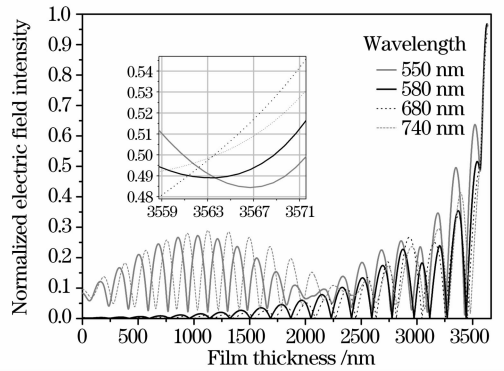


图 8 膜系“基片 | H(LH)<sup>15</sup> 2L(HL)<sup>3</sup> 12.8Cr 0.84H | 空气”结构中在 550 nm, 580 nm, 680 nm 和 740 nm 不同波长的内部电场强度分布。放大部分是金属 Cr 层的内部电场强度分布

Fig. 8 Internal electric field intensity distributions of structure “substrate | H(LH)<sup>15</sup> 2L(HL)<sup>3</sup> 12.8Cr 0.84H | air” at different wavelengths: 550 nm, 580 nm, 680 nm and 740 nm. Inset shows magnified internal electric field intensity of Cr layer

### 6 结 论

通过引入匹配膜系,设计了“基片 | H(LH)<sup>m1</sup> αL (HL)<sup>m2</sup> βCr M | 空气”型的宽截止带、窄带高反射滤光膜。选取相对较厚的金属层可以获得较宽的截止带,但需要更多层数的匹配膜系。对应于同一个合适的金属层厚度,可以采用两种不同的导纳匹配方法构建匹配膜系。这种滤光膜利用金属层对光子的高吸收特性和介质缺陷层导致的光子隧穿效应,匹配膜系的加入使金属 Cr 层内部在中心波长位置的电场强度趋于零,在中心波长两侧的电场强度迅速增大,从而在中心波长实现高反射、中心波长两侧区域高吸收。

### 参 考 文 献

- 1 Alfred Thelen. Design of optical minus filters[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1971, **61**(3): 365~369
- 2 Zdenek Knittl. *Optics of Thin Films* [M]. London: A Wiley-Interscience Publication, 1976. 300~320
- 3 A. Thetford. Absorbing multilayers and reflection interference filters[J]. *J. Modern Optics*, 1978, **25**(10): 945~961
- 4 Shuying Zheng, John W. Y. Lit. Design of a narrow-band reflection IR multilayer[J]. *Can. J. Phys.*, 1983, **61**: 361~368
- 5 Robin Gamble, Paul H. Lissberger. Reflection filter multilayers of metallic and dielectric thin films[J]. *Appl. Opt.*, 1989, **28**(14): 2838~2846
- 6 S. S. Wang, R. Magnusson, J. S. Bagby. Guided-mode resonances in planar dielectric-layer diffraction gratings[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1990, **7**(8): 1470~1475

- 7 R. Magnusson, S. S. Wang. New principle for optical filters [J]. *Appl. Phys Lett.*, 1992, **61**(9): 1022~1024
- 8 S. S. Wang, R. Magnusson. Design of waveguide grating filters with symmetrical line shapes and low sidebands[J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(12): 919~921
- 9 S. S. Wang, R. Magnusson. Multilayer waveguide grating filters[J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(10): 2414~2420
- 10 Z. S. Liu, S. Tibuleac, D. Shin *et al.*. High-efficiency guided-mode resonance filter[J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(9): 1556~1558
- 11 Zhanshan Wang, Tian Sang, Li Wang *et al.*. Guided-mode resonance Brewster filters with multiple channels [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **88**: 251115-1~251115-3
- 12 Zhanshan Wang, Tian Sang, Jingtao Zhu *et al.*. Double-layer resonant Brewster filters consisting of a homogeneous layer and a grating with equal refractive index [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **89**: 241119-1~241119-3
- 13 Zhang Liang, Li Chengfang, Zhang Fei. Diffractive characteristics of 1D metal gratings with subwavelength periodic structure[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(6): 652~656  
张 亮,李承芳,张 飞. 一维金属亚波长周期光栅的衍射特性 [J]. *中国激光*, 2006, **6**(33): 805~808
- 14 Liu Shijie, Kong Weijing, Shen Zicai *et al.*. Rigorous vector analysis of multi-layer dielectric film pulse compression gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(5): 652~656  
刘世杰,孔伟金,沈自才等. 多层介质膜脉宽压缩光栅的严格矢量分析[J]. *光学学报*, 2006, **26**(5): 652~656
- 15 Xuezheng Sun, Peifu Gu, Weidong Shen *et al.*. Design and fabrication of a novel reflection filter [J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(15): 2899~2902