

随机微扰表面反射光谱的低角度依赖性

张金英^{1,2*}, 李世豪^{1**}, 王瑞^{1***}, 王鑫野¹, 李卓^{1,2}, 王欣¹, 杨苏辉¹, 高彦泽^{1,2}¹精密光电测试仪器及技术北京市重点实验室, 北京理工大学光电学院, 北京 100081;²北京理工大学长三角研究院, 浙江 嘉兴 314001

摘要 结构色在光学伪装等领域具有重要的应用前景,但其存在严重的角度依赖性。提出利用随机微扰表面降低反射光谱角度依赖性的方法;研究了不同微扰特征的粗糙表面结构在不同入射角下的反射光谱;通过有限元法计算了横电磁波、横磁波的反射光谱特性和能量传播特性,并据此获得了等效自然光的反射光谱和角度依赖规律。分析发现在 $0^\circ\sim 40^\circ$ 入射角度范围内,平整表面结构的反射光谱峰值移动了 34.0 nm,随机微扰表面结构的反射光谱峰值仅移动了 10.0 nm,角度依赖特性降低了 70.6%,结果表明微扰表面结构对于降低角度依赖性具有显著作用。

关键词 表面光学; 微扰表面; 结构色; 角度依赖特性; 光学伪装

中图分类号 TN202

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS221293

1 引言

根据显色机理的不同,颜色分为化学色和结构色^[1]。化学色通过色素分子选择性吸收光来产生颜色,但颜色易发生紫外光漂白且化学稳定性不佳^[2]。相比于化学色,结构色具有化学稳定性高、对环境污染小等突出优势^[3-4],近年来在光学伪装、动态显示、保密通信等领域获得了科研人员的极大关注^[5-9]。结构色来源于微纳结构与光之间的相互作用,决定性颜色主要基于薄膜干涉^[10]、布拉格散射^[11]等反射光中的相长干涉成分,因此不可避免地具有结构敏感性。传统结构色器件主要采用平整薄膜^[12]或周期性的一维、二维、三维微纳结构^[13-15],这些结构各向异性的特点决定了结构色具有角度依赖性,即从不同角度观察,器件呈现的颜色不同,这在某些应用中受到限制,例如在光学伪装中仅能实现某个观察角度上的伪装效果。

为打破这种结构的各向异性、降低角度依赖性,研究人员开展了三维准无定形光子晶体研究。Zhang等^[16]使用短程有序的 SiO_2 纳米粒子实现了与角度无关的结构色,周金明等^[17-20]使用 Fe_3O_4 纳米粒子、ZnS纳米粒子等,通过电泳实现了与角度无关的可变结构色。这些报道从实验上验证了通过打破三维结构的周期性可以使其不再具有各向异性的特点,进而降低角度依赖性,但并未从理论计算方面研究何种准无定形结构能够达到何种程度的角度依赖性降低效果。

本文从理论计算方面研究了一种可降低角度依赖

性的随机微扰表面结构。通过与平整薄膜结构进行对比,计算微扰表面结构参数对降低角度依赖性的作用。

2 平整薄膜结构反射光谱的角度依赖性

2.1 薄膜干涉反射光谱的有限元法模型验证

薄膜干涉结构的颜色主要由反射光谱的中心波长决定,因此本文采用中心波长峰值的偏移量来衡量其角度依赖性。单层薄膜的反射光谱可使用多光束干涉原理进行计算,示意图如图 1 所示。薄膜结构的第一层为空气,折射率为 n_0 ;第二层为钛酸钡薄膜(BTO),折射率为 n_1 ;第三层为基底,折射率为 n_2 。光由空气入射至该 BTO-on-substrate 结构时,会在 BTO 薄膜内发生多次反射,总反射系数 r 为

$$r = \frac{r_1 + r_2 e^{i\varphi}}{1 + r_1 r_2 e^{i\varphi}}, \quad (1)$$

式中: r_1 为 BTO 薄膜上表面的反射系数; r_2 为 BTO 薄膜下表面的反射系数; φ 为 BTO 薄膜上表面相邻出射光光束间的相位差,且满足

$$\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} n_1 h \cos \theta_1. \quad (2)$$

当垂直入射时,薄膜上下表面的反射系数为

$$r_1 = \frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1}, \quad (3)$$

$$r_2 = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}. \quad (4)$$

收稿日期: 2022-06-10; 修回日期: 2022-07-02; 录用日期: 2022-07-11; 网络首发日期: 2022-07-21

基金项目: 国家自然科学基金(62174012, 61704166)、国家重点研发计划(2018AAA0100301)

通信作者: *jyzhang@bit.edu.cn; **3220210530@bit.edu.cn; ***3120190641@bit.edu.cn

联立式(1)、(3)、(4)可得

$$R = rr^* = \frac{(n_0 - n_2)^2 \cos^2 \frac{\varphi}{2} + \left(\frac{n_0 n_2}{n_1} - n_1 \right)^2 \sin^2 \frac{\varphi}{2}}{(n_0 + n_2)^2 \cos^2 \frac{\varphi}{2} + \left(\frac{n_0 n_2}{n_1} + n_1 \right)^2 \sin^2 \frac{\varphi}{2}}, \quad (5)$$

式中: R 为总反射率; r 为总反射系数; r^* 为总反射系数的共轭。

研究薄膜干涉结构的反射特性, 需要计算其反射光谱和电磁场分布在不同入射角度下的特性, 多光束干涉法可清晰反映反射光谱受哪些因素影响, 但无法反映电磁场分布特性, 且当入射角度不为零时, 反射光谱的计算将变得繁琐。有限元法(FEM)可计算反射光谱和电磁场分布, 并可方便地设置不同入射角度。本文建立薄膜干涉结构反射特性的FEM模型, 为验证模型有效性, 将垂直入射的多光束干涉法反射光谱和样品的测试反射光谱进行了比较。

采用磁控溅射法在氩气流量为 40 mL/min、充入氩气后的真空度为 7×10^{-4} Pa、射频功率为 100 W 条件

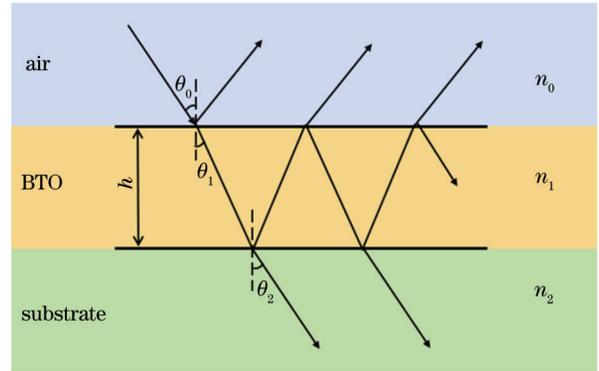


图 1 单层介质膜的反射与透射示意图

Fig. 1 Schematic of reflection and transmission of single layer dielectric film

下生长薄膜结构 120 min, 获得如图 2(a) 所示的硅衬底上 BTO 平整薄膜结构样品。采用台阶仪(DektakXT, 布鲁克)测量得到 BTO 薄膜的厚度为 120 nm。采用椭圆偏振测量仪(Horiba UVISSEL)测试 BTO 薄膜的折射率, 如图 2(b) 所示。

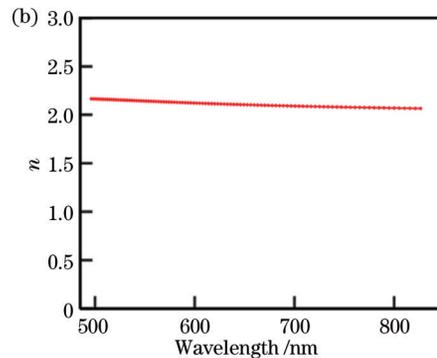
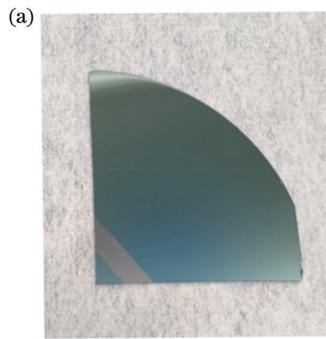


图 2 BTO 薄膜样品及其折射率的测试结果。(a) 样品实物图; (b) BTO 薄膜折射率的测试结果

Fig. 2 BTO film sample and test results of refractive index. (a) Physical drawing of sample; (b) test results of refractive index of BTO film

本文关注的反射颜色的呈现主要由反射光谱峰值位置决定, 为了在较小的误差范围内减少仿真计算量, 选择与实际色散折射率误差较小的常数折射率。分别将 Si 衬底和 BTO 薄膜的折射率设置为色散折射率 ($n_{Si}=3.9$) 和常数折射率 ($n_{BTO}=2.1$), 仿真计算的反射光谱如图 3 所示。可见: 当将 Si 衬底和 BTO 薄膜的折射率设置成色散值和常数值时, 反射光谱的峰值大小发生了小幅度的变化, 但峰值位置的变化可忽略。

采用复享光学 PG2000 高速光谱仪测试 BTO 平整薄膜结构样品的反射光谱, 光谱范围为 360~1100 nm, 光谱分辨率为 0.13 nm。光源为 HL2000 卤素光源 (发射光谱范围为 360~2500 nm)。采用 Y 形可见/红外石英光纤 (FIB-Y-600-NIR, 工作光谱范围为 360~2500 nm) 实现信号收发, 采用标准铝镜 (景颐光电科技公司) 作为参考。垂直入射时样品的反射光谱如图 4 所示, 其中实线为光谱仪的测试结果, 虚线为

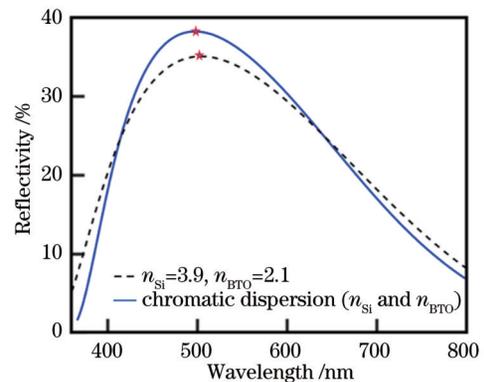


图 3 色散折射率与常数折射率反射光谱的对比分析

Fig. 3 Comparative analysis of reflection spectra of dispersive refractive index and constant refractive index

FEM 仿真结果, 实线+叉为多光束干涉法计算的结果。可见 FEM 仿真结果与多光束干涉法计算结果重合, 且与测试结果的一致性良好, 这验证了 FEM 模型

的有效性。

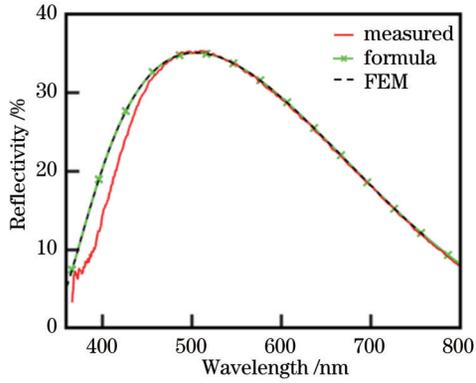


图 4 制备样品的反射光谱计算结果及测试结果

Fig. 4 Calculation and measured reflection spectra of fabricated sample

2.2 平整薄膜结构反射光谱的角度依赖性

将 BTO 薄膜的折射率设置为 2.1, 基底的折射率设置为 3.9, 膜厚设置为 120 nm, 根据电矢量在面外或者面内的振动, 将电磁波分为横电 (TE) 波 (面外) 和横

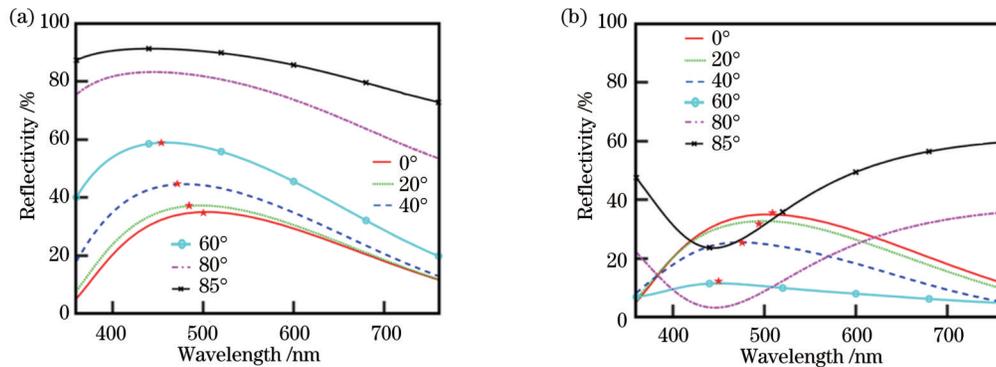


图 5 平整薄膜结构在不同入射角度下的反射光谱。(a) TE 波的反射光谱; (b) TM 波的反射光谱

Fig. 5 Reflection spectra at different incident angles of flat film structure. (a) Reflection spectra of TE waves; (b) reflection spectra of TM waves

为了研究光在该平整薄膜结构中的传播特性, 对于 TE 波, 计算了面外电场分量 E_z 在膜层中的分布, 如图 6 所示。箭头表示能流方向, 图 6(a) 为 364 nm 的光波在 0° 入射时 E_z 的分布, 可见很大比例的能量穿过了膜层, 这与计算得到的 7% 反射率相吻合; 图 6(b) 为 440 nm 的光波在 85° 入射时 E_z 的分布, 可见几乎没有能量穿过膜层, 这与计算得到的 91.3% 反射率相吻合。

对于 TM 波, 计算了面外磁场 H_z 在该平整薄膜结构中的分布, 如图 7 所示, 箭头表示能流方向。图 7(a) 为 364 nm 的光波在 0° 入射时 H_z 的分布, 可见有很大比例的能量穿过了膜层, 这与计算得到的 7% 反射率相吻合; 图 7(b) 为 440 nm 的光波在 85° 入射时 H_z 的分布, 可见较多能量穿过膜层, 这与计算得到的 23.6% 反射率相吻合。

自然光的反射光谱等于 TE 波和 TM 波的反射光

谱的平均值, 由图 5 得到自然光的反射光谱如图 8 所示。可见: 当入射角度为 0° 、 20° 、 40° 、 60° 时, 反射光谱峰值的波长随入射角度的增大而减小; 入射角从 0° 增大到 40° 时, 峰值的波长移动了 34 nm; 而不同入射角度下反射光谱的峰值幅度相等, 均为 35.0%; 此外, 当入射角为 80° 和 85° 时, 反射光谱呈现高反特性。

3 随机微扰表面结构反射光谱的角度依赖性

对于平整薄膜结构, 反射光谱呈现显著的角度依赖性, 入射角度分别为 0° 和 40° 时对应峰值波长分别为 508 nm 和 474 nm, 蓝移达到 34 nm, 表现为颜色的明显变化。如图 9 所示, 为降低平整薄膜结构反射光谱的角度依赖性, 本文将平整薄膜结构改为随机微扰表面结构, 分析其结构参数对降低角度依赖性的影响。

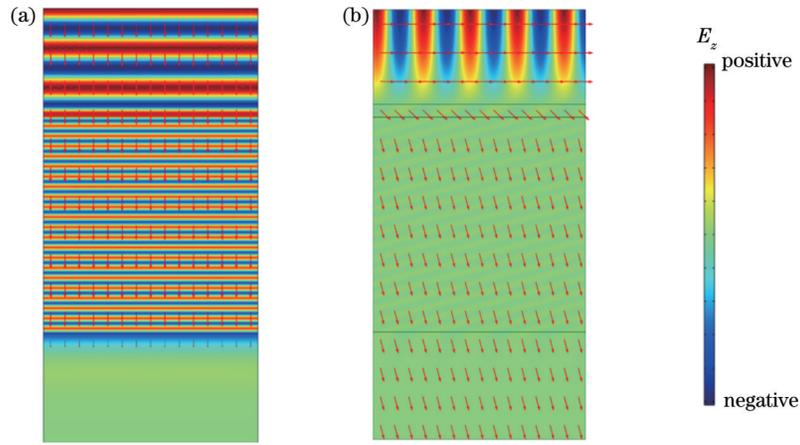


图 6 TE 波面外电场分量 E_z 在膜层中的分布。(a) 364 nm 的光波在 0° 入射时的电场分量 E_z ; (b) 440 nm 的光波在 85° 入射时的电场分量 E_z

Fig. 6 Distributions of out-of-plane electric field component E_z in film for TE wave. (a) E_z distribution of 364 nm light wave at 0° incidence; (b) E_z distribution of 440 nm light wave at 85° incidence

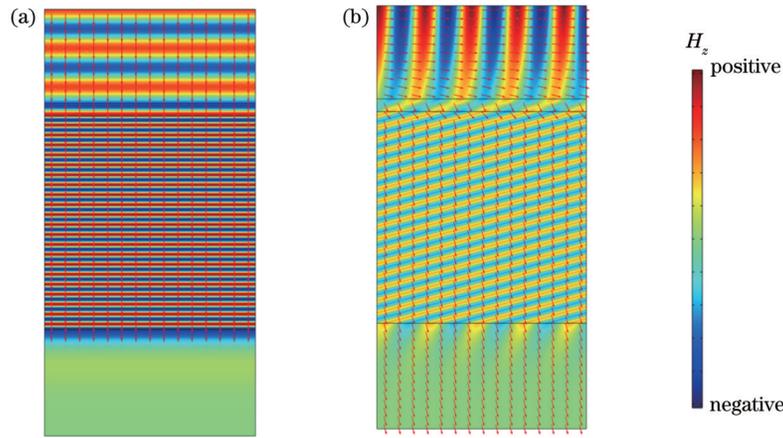


图 7 TM 波面外磁场分量 H_z 在膜层中的分布。(a) 364 nm 的光波在 0° 入射时的磁场分量 H_z ; (b) 440 nm 的光波在 85° 入射时的磁场分量 H_z

Fig. 7 Distributions of out-of-plane magnetic field component H_z in film for TM wave. (a) H_z distribution of 364 nm light wave at 0° incidence; (b) H_z distribution of 440 nm light wave at 85° incidence

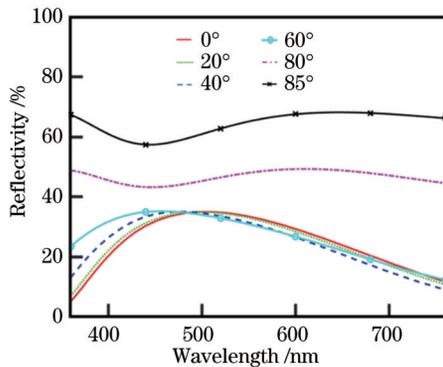


图 8 平整薄膜结构在不同入射角度下等效自然光的反射光谱计算结果

Fig. 8 Reflection spectra of equivalent natural light of flat film structure at different incident angles

3.1 随机微扰表面结构的生成

随机微扰表面的主要特征包括空间频率和起伏高

度,可使用二维三角函数级数来构造。随机微扰表面可表示为

$$f(x, y) = \sum_{m=-M}^M \sum_{n=-N}^N a(m, n) \cos[2\pi(mx + ny) + \phi(m, n)], \quad (6)$$

式中: $\phi(m, n)$ 是相位,对于随机微扰表面,相位可取任意值,一般取 $[-\pi/2, \pi/2]$ 内的一个均匀随机分布, m 和 n 是空间频率,本文限定其最大可取值为 20; $a(m, n)$ 是振幅,满足

$$a(m, n) = H_1 g(m, n) h(m, n), \quad (7)$$

式中: H_1 是随机微扰表面起伏的高度, H_1 越大,表面起伏越大、越粗糙,反之,则越平整; $g(m, n)$ 是一个随机高斯分布函数; $h(m, n)$ 可表示为

$$h(m, n) = \frac{1}{(m^2 + n^2)^{\frac{\beta}{2}}}, \quad (8)$$

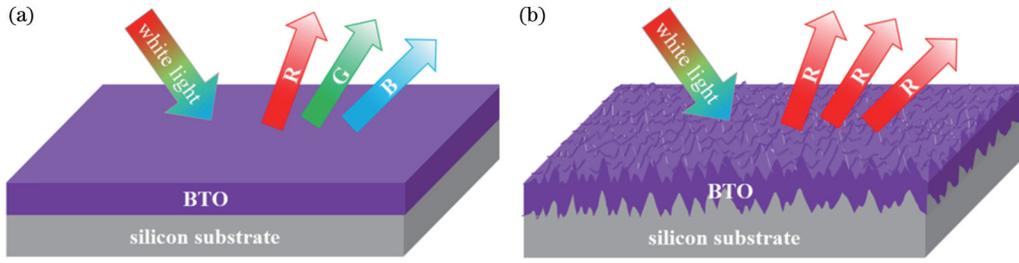


图 9 角度依赖性示意图。(a)平整薄膜结构的高角度依赖性;(b)随机微扰表面结构的低角度依赖性

Fig. 9 Schematic diagram of angle dependence. (a) High angle dependence of flat film structure; (b) low angle dependence of random perturbation surface structure

式中: β 是频谱指数,是一个和分形维数有关的量^[21]。改变 β ,就能改变表面的粗糙度,不同 $\beta(0.7、1.4、2.1、2.8)$ 生成的随机微扰表面如图 10 所示。可见: β 越大,

相同面积上起伏峰的个数越少,表面越光滑;反之, β 越小,表面越粗糙。因此通过改变 H_1 和 β 可以控制表面粗糙度。

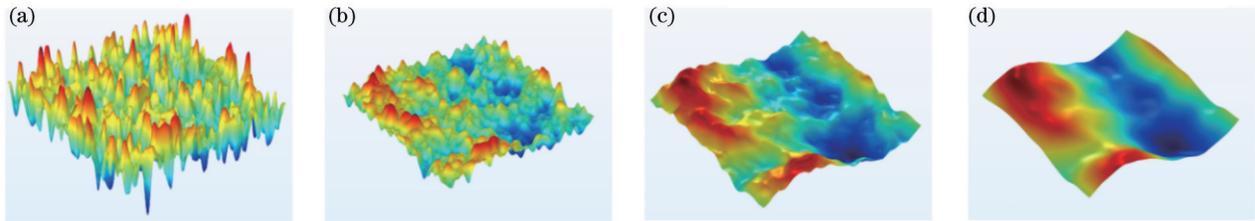


图 10 不同 β 生成的随机微扰表面。(a) $\beta=0.7$; (b) $\beta=1.4$; (c) $\beta=2.1$; (d) $\beta=2.8$

Fig. 10 Generated random perturbation surfaces for different β . (a) $\beta=0.7$; (b) $\beta=1.4$; (c) $\beta=2.1$; (d) $\beta=2.8$

3.2 随机微扰表面结构的角速度依赖性

为减小计算量,采用一维随机微扰表面结构模型,如图 11 所示,表面一层表示粗糙的薄膜,中间部分表示衬底,点划线表示内部端口条件,用来设置入射光波,最上面和最下面都设置了完美匹配层,分别吸收反射和透射的光波,两侧使用周期性边界条件。由于随机微扰表面的反射是漫反射,不能直接使用端口来提取散射(s)参数进行分析,因此通过反射功率(透射功率)除以入射功率来计算反射光谱(透射光谱)。沿图 11 中实线积分可计算出反射功率,沿虚线积分可计算出透射功率。

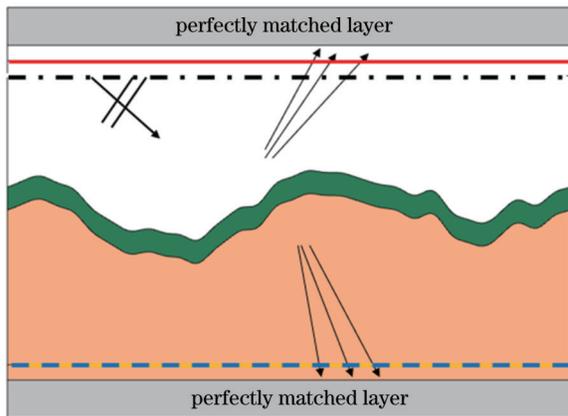


图 11 随机微扰表面反射光谱仿真模型示意图

Fig. 11 Schematic diagram of simulation model of random perturbation surface reflection spectrum

3.2.1 垂直入射时 H_1 和 β 对 TE 波反射光谱的影响

由于随机微扰表面薄膜的厚度为 120 nm,因此表面起伏尺度 H_1 最大不超过 120 nm。分别计算了 H_1 为 10 nm、40 nm、80 nm、120 nm 时,对应的 $\beta=0.7、\beta=1.4、\beta=2.1、\beta=2.8$ 的 TE 波反射光谱,如图 12 所示。图中实线、点线、虚线、点划线分别表示 $\beta=0.7、\beta=1.4、\beta=2.1、\beta=2.8$ 时的反射光谱,五角星表示峰值波长的位置。

表 1 汇总了不同微扰特征对应的峰值波长位置。可见:随着 β 减小即粗糙度增加,反射光谱呈现蓝移且峰值幅度减小;当 $H_1=120$ nm 时,反射峰值蓝移量最大;随着 β 从 2.8 变化至 2.1,峰值波长移动量高达 36 nm;当随机微扰表面足够粗糙,即 $H_1=120$ nm、 $\beta=0.7$ 时,反射光谱在整个波段都呈现低反射特性,这是因为表面粗糙使得可见光发生了陷光效应。总之, H_1 和 β 共同影响随机微扰表面的反射光谱特性。

3.2.2 垂直入射时 H_1 和 β 对 TM 波反射光谱的影响

当 0° 入射时,分别计算 H_1 为 10 nm、40 nm、80 nm、120 nm 对应的 $\beta=0.7、\beta=1.4、\beta=2.1、\beta=2.8$ 时的 TM 波反射光谱,计算结果如图 13 所示,实线、点线、虚线、点划线分别表示 $\beta=0.7、\beta=1.4、\beta=2.1、\beta=2.8$ 时的反射光谱。五角星表示反射峰值波长的位置。

表 2 汇总了不同微扰特征对应的峰值波长位置。结果表明:同 TE 波的规律类似, TM 波的反射光谱也

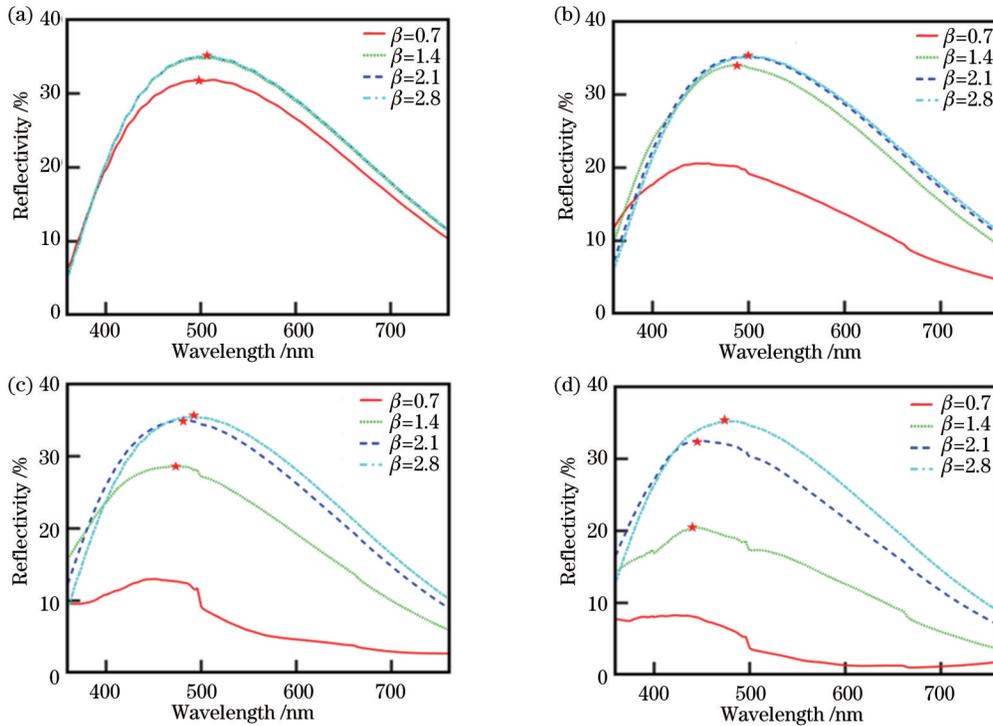


图 12 垂直入射时 TE 波的反射光谱。(a) $H_1=10$ nm; (b) $H_1=40$ nm; (c) $H_1=80$ nm; (d) $H_1=120$ nm

Fig. 12 Reflection spectra of TE wave at normal incidence. (a) $H_1=10$ nm; (b) $H_1=40$ nm; (c) $H_1=80$ nm; (d) $H_1=120$ nm

表 1 不同微扰特征下 TE 波反射峰值波长的位置计算结果
Table 1 Position calculation results of TE wave reflection peak wavelength under different perturbation characteristics

Condition	unit: nm			
	$H_1=10$ nm	$H_1=40$ nm	$H_1=80$ nm	$H_1=120$ nm
$\beta = 1.4$	512	488	474	444
$\beta = 2.1$	512	498	480	446
$\beta = 2.8$	512	500	490	482

随 β 的减小呈现蓝移,且峰值幅值减小,当 $H_1=120$ nm 时,反射峰值移动量最大;与 TE 波不同的是,由于表面粗糙度打破了平整薄膜结构的对称性,在 0° 入射时, TM 波反射峰值波长的位置与 TE 波不同,且粗糙度越大, TM 波和 TE 波在相同条件下的反射峰值波长相差越大。

3.2.3 随机微扰表面结构反射光谱的角度依赖性

选择 $H_1=40$ nm, $\beta = 1.4$ 的随机微扰表面结构,计算其 TE 波和 TM 波的角度依赖性。入射角度为 0° 、 20° 、 40° 、 60° 、 80° 、 85° 时 TE 波的反射光谱如图 14(a) 所示, 0° 、 20° 、 40° 、 60° 入射时对应的反射峰值波长分别为 488 nm、492 nm、468 nm、446 nm,五角星表示峰值波长的位置。微扰表面结构在各个角度下的峰值波长移动量均小于平整薄膜结构,微扰表面结构在 40° 时相比于 0° 入射的峰值波长移动量为 20 nm,而前述平整薄膜结构的峰值波长则移动了 31 nm。可见:对于 TE 波,微扰表面结构比平整薄膜结构具有更低的角度依

赖性;当入射角为 80° 和 85° 时,微扰表面结构同平整薄膜结构一样,反射光谱呈现高反特性。

计算入射角度为 0° 、 20° 、 40° 、 60° 、 80° 、 85° 时 TM 波的反射光谱如图 14(b) 所示。可见:TM 波在 0° 、 20° 、 40° 、 60° 入射时峰值波长分别为 486 nm、482 nm、480 nm、454 nm,五角星表示峰值波长的位置;随着入射角度的增大,反射光谱的峰值幅度减小,峰值波长呈现蓝移;TM 波对应的反射峰值波长的位置和 TE 波并不相同,且 TM 波峰值波长的移动量比 TE 波要小;与平整薄膜结构的 TM 波反射光谱相比,该微扰表面结构的反射峰值波长随角度的移动量更小,该微扰表面结构在 40° 入射时 TM 波的反射峰值波长仅移动了 6 nm,而前述平整薄膜结构在此条件下的峰值波长移动了 34 nm;同平整薄膜结构相似,当入射角为 80° 和 85° 时,该微扰表面结构的反射光谱也在 400~500 nm 之间呈现了波谷。

由 TE 波和 TM 波的反射光谱得到随机微扰表面结构等效自然光的反射光谱如图 15 所示。当入射角度为 0° 、 20° 、 40° 、 60° 时,反射光谱的峰值波长分别为 486 nm、488 nm、476 nm、446 nm,峰值幅度均为 32.0% 左右。可见:该微扰表面结构的反射峰值随入射角度的变化很小,相比于垂直入射的情况,当入射角度为 40° 时,峰值仅移动了 10 nm;而前述平整薄膜结构的等效自然光反射峰值在相同条件下的移动范围达 34 nm。微扰表面结构对降低角度依赖性起到了重要作用,角度依赖性降低了 70.6%。此外,当入射角为 80° 和 85° 时,相比于 $0^\circ \sim 60^\circ$,反射光谱也呈现高反

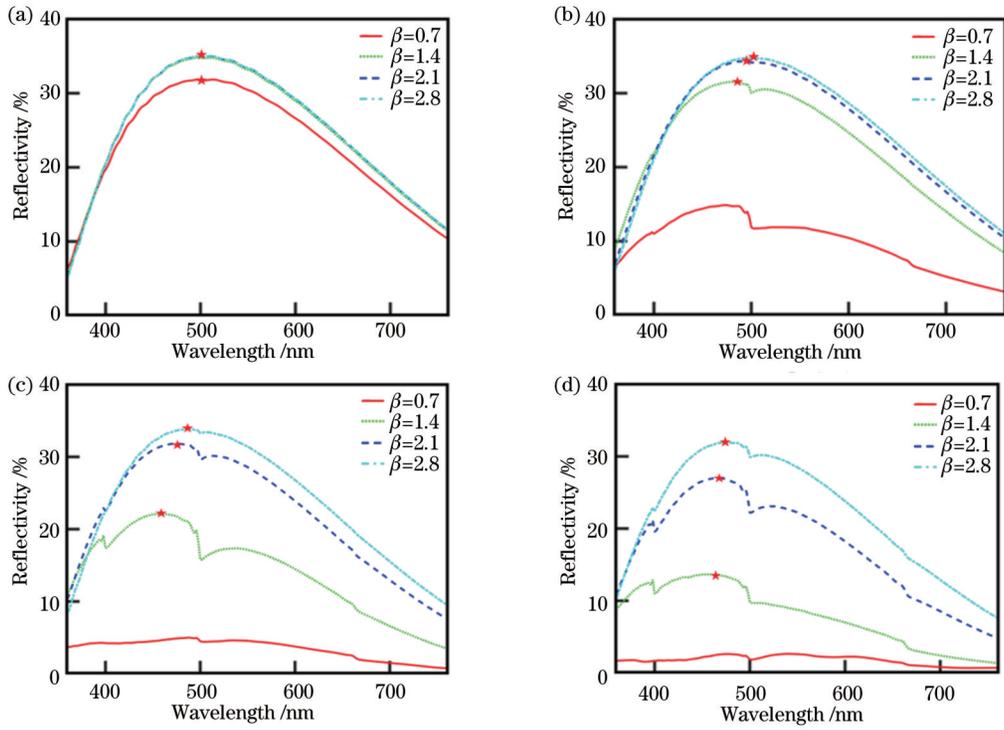


图 13 垂直入射时 TM 波反射光谱。(a) $H_1=10\text{ nm}$; (b) $H_1=40\text{ nm}$; (c) $H_1=80\text{ nm}$; (d) $H_1=120\text{ nm}$

Fig. 13 TM wave reflection spectra at normal incidence. (a) $H_1=10\text{ nm}$; (b) $H_1=40\text{ nm}$; (c) $H_1=80\text{ nm}$; (d) $H_1=120\text{ nm}$

表 2 不同微扰特征下 TM 波反射峰值波长的位置计算结果
Table 2 Position calculation results of TM wave reflection peak wavelength under different perturbation characteristics

Condition	unit: nm			
	$H_1=10\text{ nm}$	$H_1=40\text{ nm}$	$H_1=80\text{ nm}$	$H_1=120\text{ nm}$
$\beta=1.4$	512	486	458	458
$\beta=2.1$	512	496	474	464
$\beta=2.8$	496	498	488	474

特性。

4 结 论

针对平整薄膜结构中存在的结构色角度依赖性问

题, 研究了一种随机微扰表面结构对降低反射光谱角度依赖性的作用。在硅衬底上溅射制备了 BTO 薄膜, 将测试得到的 BTO 薄膜的折射率用于所建立的有限元仿真模型, 测试与仿真的反射光谱一致性良好, 验证了所建模型的有效性。采用该模型理论研究了不同特征随机微扰表面的反射光谱特性, 优化得到了一组结构参数, 即 $H_1=40\text{ nm}$ 、 $\beta=1.4$ 。将该结构参数的随机微扰表面结构与平整薄膜结构的反射光谱进行了对比, 结果表明: 随机微扰表面结构等效自然光的反射光谱峰值在 $0^\circ\sim 40^\circ$ 入射角度范围内仅移动了 10 nm , 比平整薄膜结构的角速度依赖性降低了 70.6% 。本文提出的随机微扰表面结构在降低结构色的角度依赖特性方面具有显著作用。

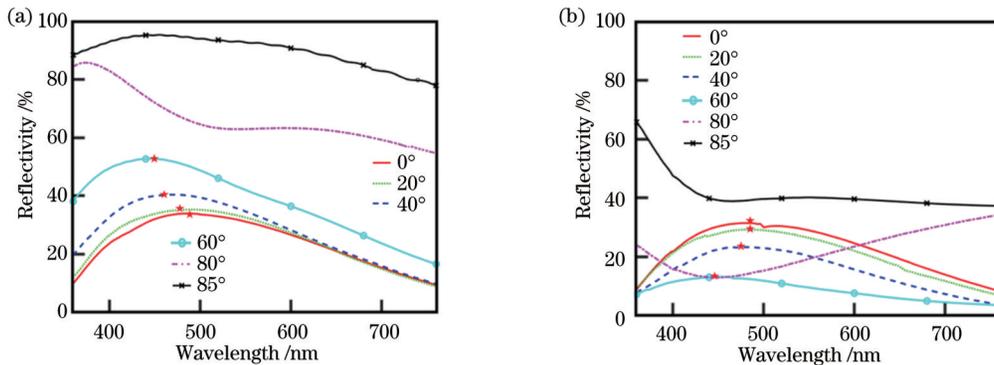


图 14 随机微扰表面结构在不同入射角度下的反射光谱。(a) TE 波的反射光谱; (b) TM 波的反射光谱

Fig. 14 Reflection spectra of random perturbation surface structure at different incident angles. (a) Reflection spectra of TE waves; (b) reflection spectra of TM waves

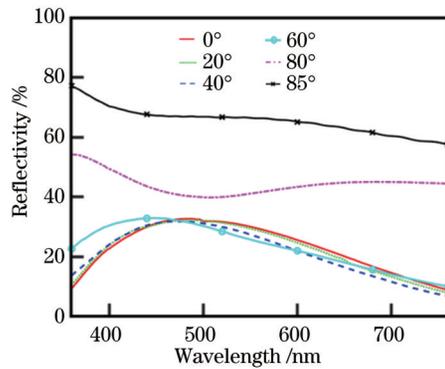


图 15 随机微扰表面结构在不同入射角度下等效自然光的反射光谱

Fig. 15 Reflection spectra of equivalent natural light of random perturbation surface structure at different incident angles

参 考 文 献

- [1] John S. Localization of light[J]. *Physics Today*, 1991, 44(5): 32-40.
- [2] Liu Y, Hu J, Wu Z H. Fabrication of coatings with structural color on a wood surface[J]. *Coatings*, 2020, 10(1): 32.
- [3] Kinoshita S, Yoshioka S, Miyazaki J. Physics of structural colors[J]. *Reports on Progress in Physics*, 2008, 71(7): 076401.
- [4] 宋茂文. 基于表面等离子体纳米结构的显色原理及偏振复用技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2019.
Song M W. Research on the principle of color display and polarization-multiplexed techniques with plasmonic nanostructures[D]. Chongqing: Chongqing University, 2019.
- [5] Goodling A E, Nagelberg S, Kaehr B, et al. Colouration by total internal reflection and interference at microscale concave interfaces[J]. *Nature*, 2019, 566(7745): 523-527.
- [6] 周震宇, 朱晓梅, 贺绍瑞, 等. 基于环氧树脂的显隐性复合防伪薄膜的制备[J]. *光学学报*, 2022, 42(10): 1016002.
Zhou Z Y, Zhu X M, He S R, et al. Preparation of explicit and recessive composite anti-counterfeiting film based on epoxy resin [J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(10): 1016002.
- [7] 欧阳旭, 谢子健, 张孟瑞, 等. 基于激光诱导表面周期结构的微纳防伪结构色[J]. *光电工程*, 2022, 49(1): 210320.
Ouyang X, Xie Z J, Zhang M R, et al. Laser-induced periodic surface structure for microscale anti-counterfeiting structural colors[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2022, 49(1): 210320.
- [8] Kim D Y, Kim M J, Sung G, et al. Stretchable and reflective displays: materials, technologies and strategies[J]. *Nano Convergence*, 2019, 6(1): 21-44.
- [9] Hou J, Li M Z, Song Y L. Recent advances in colloidal photonic crystal sensors: materials, structures and analysis methods[J]. *Nano Today*, 2018, 22: 132-144.
- [10] Kinoshita S, Yoshioka S, Miyazaki J. Physics of structural colors[J]. *Reports on Progress in Physics*, 2008, 71(7): 076401.
- [11] Dumanli A G, Savin T. Recent advances in the biomimicry of structural colours[J]. *Chemical Society Reviews*, 2016, 45(24): 6698-6724.
- [12] 张金英, 王瑞, 王炳楠, 等. 基于黑色层纳米薄膜的可重构可见光滤波器[J]. *光学学报*, 2021, 41(22): 2231001.
Zhang J Y, Wang R, Wang B N, et al. A reconfigurable visible light filter based on nanofilms with a black layer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(22): 2231001.
- [13] 王丹燕, 李墨馨, 陆如斯, 等. 多层膜结构色滤光片的原理、制备及应用[J]. *人工晶体学报*, 2021, 50(7): 1287-1306.
Wang D Y, Li M X, Lu R S, et al. Multilayer thin film based structural color filters: principle, fabrication and applications[J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2021, 50(7): 1287-1306.
- [14] Chiappini A, Tran L T N, Trejo-Garcia P M, et al. Photonic crystal stimuli-responsive chromatic sensors: a short review[J]. *Micromachines*, 2020, 11(3): 290.
- [15] Wijnhoven J E G J, Vos W L. Preparation of photonic crystals made of air spheres in titania[J]. *Science*, 1998, 281(5378): 802-804.
- [16] Zhang X, Wang F, Wang L, et al. Brilliant structurally colored films with invariable stop-band and enhanced mechanical robustness inspired by the cobbled road[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2016, 8(34): 22585-22592.
- [17] 周金明. 一种形貌可控且色彩无角度依赖性的光子晶体微粒及其制备方法: CN105177714A[P]. 2015-12-23.
Zhou J M. A photonic crystal particle with controllable morphology and no angle dependence of color and its preparation method: CN105177714A[P]. 2015-12-23.
- [18] 魏超萍, 温小翔, 刘宇婷, 等. 混合型 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ 胶体光子晶体光传输特性的仿真分析[J]. *红外*, 2021, 42(10): 16-23.
Wei C P, Wen X X, Liu Y T, et al. Simulation analysis of optical transmission characteristics of mixed $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ colloidal photonic crystals[J]. *Infrared*, 2021, 42(10): 16-23.
- [19] Hirashima R, Seki T, Katagiri K, et al. Light-induced saturation change in the angle-independent structural coloration of colloidal amorphous arrays[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2014, 2(2): 344-348.
- [20] 林田田, 杨丹, 高伟洪, 等. 具有低角度依赖性的全可见光谱结构色薄膜的制备[J]. *纺织学报*, 2022, 43(2): 149-155.
Lin T T, Yang D, Gao W H, et al. Low angle-dependent structurally coloured films over full visible spectrum[J]. *Journal of Textile Research*, 2022, 43(2): 149-155.
- [21] Good I J. The science of fractal images (Heinz-Otto Peitgen and Dietmar Saupe, eds.)[J]. *SIAM Review*, 1991, 33(3): 496-499.

Low Angular Dependence Characteristic of Reflection Spectra of Random Perturbation Surfaces

Zhang Jinying^{1,2*}, Li Shihao^{1**}, Wang Rui^{1***}, Wang Xinye¹, Li Zhuo^{1,2}, Wang Xin¹,
Yang Suhui¹, Gao Yanze^{1,2}

¹Beijing Key Laboratory for Precision Optoelectronic Measurement Instrument and Technology, School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

²Yangtze Delta Region Academy of Beijing Institute of Technology, Jiaxing 314001, Zhejiang, China

Abstract

Objective Structural color has the outstanding advantages of high chemical stability and low environmental pollution. In recent years, it has received great attention from researchers in the fields of optical camouflage, dynamic display, secure communication, etc. Traditional structural color devices mainly use flat films or one-dimensional, two-dimensional, and three-dimensional periodic micro/nano structures. The anisotropic characteristics of these structures determine that the structural color has an angle dependence. The colors are different when we view from different angles, which limits its applications in many fields such as optical camouflage. It can only achieve camouflage effects from a certain detection angle. The reported work has experimentally verified that the angle dependence can be reduced by breaking the periodicity of three-dimensional structures so that they no longer have the anisotropic characteristics. However, it has not been studied from the perspective of theoretical calculation to indicate what kind of quasi-amorphous structures can achieve what degree of angle dependence reduction. In this paper, a random perturbation surface structure that can reduce the angle dependence is studied theoretically. Compared with the flat film structure, the effect of the perturbation surface structural parameters on reducing the angle dependence is calculated.

Methods The color of the film interference structure is mainly determined by the central wavelength of the reflection spectrum. Therefore, we use the shift of the central wavelength peak to measure its angle dependence. In this paper, a finite element method (FEM) model of thin-film interference structures is established to investigate the reflection characteristics. In order to verify the validity of the model, the reflection spectra at perpendicular incidence of the FEM model are compared with those of multi-beam interference method and the measured fabricated samples. The FEM simulation results agree well with calculation results of the multi-beam interference method, and are in good agreement with the test results, which verifies the accuracy of the FEM model. Based on this model theory, the reflection spectra of rough surface structures with different perturbation characteristics at different incident angles are studied, and a set of structural parameters are optimized, namely fluctuation height $H_1=40$ nm and spectral index $\beta=1.4$. With this set of structural parameters, the reflection spectra and energy propagation characteristics of TE wave and TM wave of flat film structure and random perturbation surface structure are calculated using our FEM model. Finally, the reflection spectra and angle dependence of equivalent natural light are obtained.

Results and Discussions For the flat film structure, the reflection spectrum shows a significant angle dependence. When the incident angle is 0° and 40° respectively, the corresponding peak wavelengths are 508 nm and 474 nm, respectively, and the blue shift reaches 34 nm, showing a remarkable change in color. For the random perturbation surface structure, the corresponding peak wavelength is 486 nm and 476 nm when the incident angle is 0° and 40° respectively, and the peak wavelength change is only 10 nm.

Conclusions Aiming at the angle dependence of structural color in flat film structures, this paper studies the effect of a random perturbation surface structure on reducing the angle dependence of reflection spectrum. The results indicate that in the incident angle range of 0° to 40° , the reflection spectrum peak of the flat surface structure shifts by 34 nm, whereas that of the random perturbation surface structure only shifts by 10 nm. A decrease of 70.6% in angular dependence is thus achieved. It indicates that the perturbation surface structure plays a significant role in reducing angular dependence.

Key words optics at surfaces; perturbation surface; structural color; angular dependence; optical camouflage