

基于严格耦合波理论的蝴蝶鳞翅分级结构 光学特性研究

杨雪峰 史铁林 左海波 江 轩 廖广兰

(华中科技大学数字制造装备与技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要 Morpho 蝴蝶的颜色效应是由蝴蝶鳞翅上特殊的分级微纳结构与光发生干涉、衍射和散射等作用引起的, 是一种典型的结构色。以严格耦合波理论(RCWA)为基础, 借助光学衍射结构综合设计工具, 建立了仿蝴蝶鳞翅分级结构的二维模型, 系统分析了底层电介质单元横向周期占空比、纵向相邻电介质单元宽度差值、介质层纵向周期占空比以及脊柱与基底之间夹角等结构参数对 Morpho 蝴蝶鳞片光学特性的影响。揭示了蝴蝶鳞翅结构色的显色机理, 为具有环境检测功能的仿生微纳结构和器件的设计、制造和应用提供了理论指导。

关键词 生物光学; 光学特性; 严格耦合波理论; Morpho 蝴蝶; 分级结构

中图分类号 O43; TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0733002

Research on Optical Properties of Hierarchical Structure in Butterfly Wing Scales Based on Rigorous Coupled-Wave Analysis

Yang Xuefeng Shi Tielin Zuo Haibo Jiang Xuan Liao Guanglan

(State Key Laboratory of Digital Manufacturing Equipment and Technology,
Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract The iridescent blue color of Morpho butterfly can be found from far. This is a typical structural color, mainly caused by several elementary optical processes with the ordered arrays of micro/nano structures including multilayer interference, diffraction grating, light scattering, etc. A general design tool based on the rigorous coupled-wave analysis (RCWA) for diffractive optical structures is employed to construct a two-dimensional model that mimicks the wing scales. The influence of the structural parameters on optical properties is systematically analyzed, including the horizontal duty ratio of the bottom dielectric element, the width difference of the adjacent dielectric elements, the vertical duty ratio of the dielectric element, and the angle between the spine and the base. The mechanism of the structural color is then revealed. The results can be used to steer the design, manufacture and applications of the bionic micro/nano structures/devices for environmental detection.

Key words biological optics; optical property; rigorous coupled-wave analysis; Morpho butterfly; hierarchical structure

OCIS codes 330.1710; 050.0050; 350.4238

1 引 言

在自然界中, 几乎每个物种都有和周围环境相适应的颜色, 其中以蝴蝶翅膀最为典型。研究发现, Morpho 蝴蝶闪亮耀眼的蓝色光芒在很远的地方从

不同角度都可以看见, 这种颜色效应是由蝴蝶鳞翅上特殊的微纳结构引起的光波干涉、衍射和散射等作用引起的, 是一种典型的结构色^[1~3]。

Vukusic 等^[4~6] 通过搭建光学测试平台, 对

收稿日期: 2011-01-24; **收到修改稿日期**: 2011-04-07

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2009CB724204)、国家自然科学基金(90923019)、湖北省自然科学基金(2010CDB00506)和中央高校基本科研业务费专项资金资助(2010MS059)资助课题。

作者简介: 杨雪峰(1986—), 男, 硕士研究生, 主要从事仿生结构光学特性方面的研究。E-mail: yxfeng86hh@gmail.com

导师简介: 廖广兰(1974—), 男, 博士, 教授, 主要从事微纳制造与测试等方面的研究。

E-mail: guanglan.liao@mail.hust.edu.cn(通信联系人)

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网(www.opticsjournal.net)

Morpho 蝴蝶翅膀单个鳞片不同角度及整体的反射特性进行了研究,证明了正是由于蝴蝶翅膀鳞片上的微纳尺度分级结构使之闪烁着耀眼的蓝色光芒。Kinoshita 等^[7~9]通过实验和理论仿真研究了蝴蝶鳞片不同结构特征对光学特性的影响,包括表层鳞片与底层鳞片的不同作用以及结构中的非严格规律性结构特征对显色特性的影响。Berthier 等^[10,11]采用高精度非标准时域有限差分法研究了 Morpho 蝴蝶翅膀双层鳞片的的光学特性,指出了这种特性对入射光角度、偏振方向、波长及观察角度的依赖性,并将其光学特性与角质层材料的折射率联系起来。Potyralo 等^[12]指出,Morpho 蝴蝶闪耀着蓝色光芒的机理与鳞翅结构周围的气氛密切相关,他们测试了不同气氛环境的反射谱,采用数据处理方法对蝴蝶鳞翅的气敏性展开了研究,并进一步指出,如果仿蝴蝶鳞翅微纳结构的制作工艺获得成功,必将在航空航天、医疗、能源、环保、安全和农业等领域获得广泛应用。与此同时,国内众多学者^[13~16]也针对蝴蝶翅膀结构色的变色机理及应用探索展开了一系列研究。

本文在前期研究工作的基础上,借助以严格耦合波理论(RCWA)为基础的光学衍射结构综合设计工具,建立了仿蝴蝶鳞翅分级微纳结构的二维模型,仿真分析了影响 Morpho 蝴蝶鳞片光学特性的主要结构参数。

2 蝴蝶鳞翅分级结构建模

2.1 理论概述

目前,关于仿蝴蝶鳞翅分级结构的理论研究较多的是借助于时域有限差分法^[11,13~18],这种方法需要对场分量的差分方程进行迭代求解^[19]。与之相比,RCWA 可以对电磁场在周期性结构中的衍射问题做精确分析,并可推广到任意面型光栅的理论分析。其计算过程无需迭代,直接将光栅区域内的电磁场作空间谐波展开,通过不同区域边界的电磁场边界匹配条件得到一组无限维耦合微分方程组,再采用一定的数学方法即可求得光栅电磁场衍射问题的精确解。这种方法始终满足能量守恒定律,在保证数值稳定性的情况下可得到收敛的稳定解,其计算精度主要取决于将电磁场按傅里叶级数衍射展开的级次^[20~22]。由于计算效率高且算法稳定性好,RCWA 已被广泛应用于光栅结构的分析与设计^[23]。

2.2 结构建模

Morpho didius 样本如图 1 所示。蝴蝶的蝴蝶翅膀具有双层鳞片结构,如图 2 所示,其闪亮的蓝色主

要源于底层鳞片,在底层鳞片表面还覆盖有一层近似透明的表层鳞片,这层鳞片通过散射作用使蝴蝶翅膀表面呈现的颜色更加均匀并且可视角度范围增大^[8]。

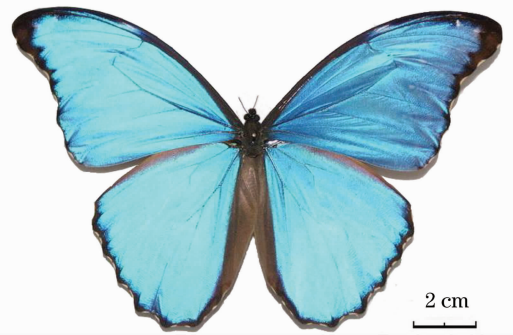


图 1 Morpho didius 蝴蝶样本
Fig. 1 Morpho didius specimen

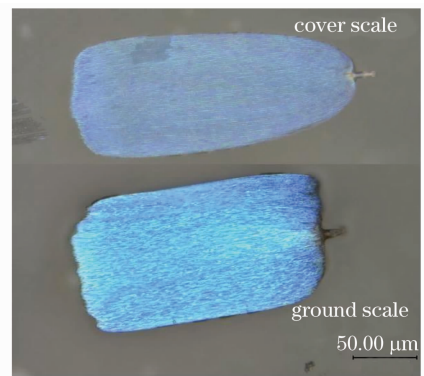


图 2 Morpho didius 蝴蝶的两种鳞片

Fig. 2 Two kinds of scales of Morpho didius

本文着重对在蝴蝶鳞翅显色中起主要作用的底层鳞片进行研究,图 3(a)即为得到的底层鳞片横截面透射电镜(TEM)图(表层鳞片的结构类似,但分布较底层鳞片稀疏),可以看出,蝴蝶鳞片是由这种周期性排列的树状脊构成的,在脊柱两侧交替分布着水平的层状结构。根据这种结构建立了仿蝴蝶鳞翅结构模型,如图 3(b)所示,层状结构用矩形介质单元代替,折射率取 1.56^[4];模型结构在 x 方向上周期分布,周期宽度为 710 nm(图中只显示了 3 个周期), z 向分布有 10 层介质单元,在脊柱两侧等宽交替分布,底下 3 层介质单元宽度相等,周期占空比为 k_1 (初始取值 0.75),从底下第 4 层开始,同侧相邻介质单元宽度相差 δ (初始取值 30 nm);介质层厚度和空隙层厚度总和为 210 nm,介质层纵向周期占空比为 k_2 (初始取值 0.5);中间脊柱也视为矩形单元,宽度为 100 nm,高度为 2180 nm,脊柱与基底平面夹角为 α (初始取值 90°);基底厚度为 100 nm,与底下介质层单元距离为 500 nm。

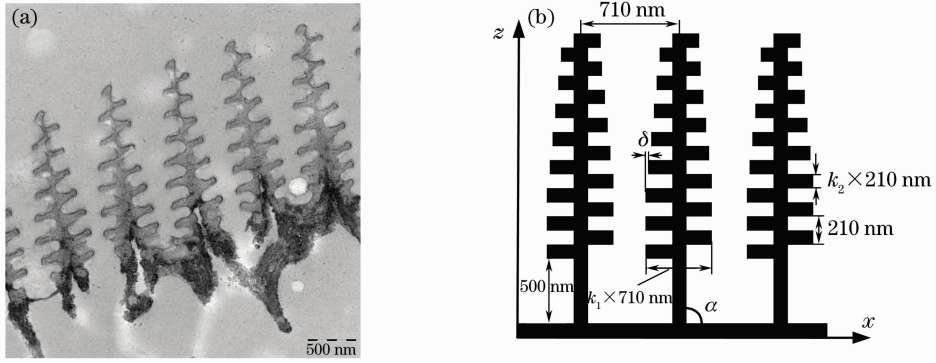


图3 Morpho didius 蝴蝶鳞片结构及理论分析模型。(a)底层鳞片横截面 TEM 图;(b)理论分析模型

Fig. 3 Structure of Morpho didius scale and the analytical model. (a) TEM image of the cross section through a ground scale; (b) analytical model

基于上述模型对反射特性进行了分析。仿真时采用 TM 形式偏振入射光(采用 TE 偏振光分析得到的趋势和规律类似),设置光线沿 $-z$ 轴入射,垂直入射到结构模型表面,环境初始折射率为 1.0,得到如图 4(a)虚线所示的反射光谱,波峰主要集中在 435~520 nm 波段,在 480 nm 处达到峰值 0.719,在此波段以外反射光谱值急剧下降。实验测试结果如图 4(a)实线所示,蝴蝶鳞翅反射光谱在 478 nm 处达到峰值 0.718,光谱波峰主要集中在 427~527 nm 波段。对比仿真和测试结果可以看出,反射光谱的波

峰数值、位置还有变化趋势都非常吻合。根据现代色度学采用的国际照明委员会(CIE)规定的 CIE 标准色度学系统,将仿真和测试结果分别绘制在 CIE1931 二维色度图中,如图 4(b)所示,仿真与测试结果对应的颜色位置同处在青蓝色区域,非常接近,这与实际观察到的蝴蝶鳞翅颜色也是一致的。由以上分析可知,仿真得到的反射光谱可以很好地反映蝴蝶鳞翅的光学特性,仿真模型及分析方法是合理可行的。下面将借助该模型来研究蝴蝶鳞翅分级结构的光学特性。

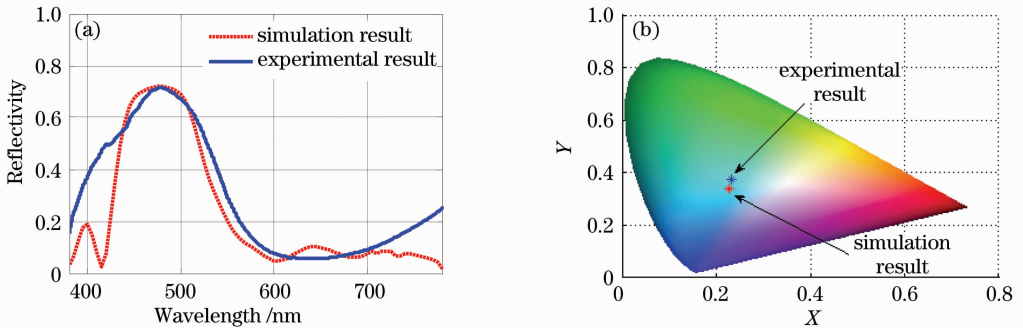


图4 仿真结果与测试结果对比。(a)反射光谱曲线,(b) CIE1931 二维色度图中对应的颜色

Fig. 4 Comparison between simulation results and experimental results. (a) Reflection spectra; (b) color variation displayed in CIE1931 two-dimensional chromaticity diagram

3 蝴蝶鳞翅分级结构模型的光学特性分析

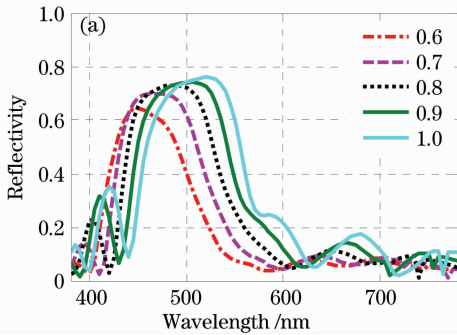
由图 3(a)可以看出,蝴蝶鳞片上周期性排列的树状脊结构 x 方向上形成了类光栅结构,而在 z 方向上形成了多层薄膜结构。在前期研究的基础上^[24],研究了构成类光栅结构和多层薄膜结构的主要结构参数包括模型底层电介质单元横向周期占空比 k_1 、纵向相邻电介质单元宽度差值 δ 、介质层纵向

周期占空比 k_2 以及脊柱与基底夹角 α 对蝴蝶鳞翅在可见光范围内反射特性的影响,以更好地揭示蝴蝶鳞翅结构的显色机理。

3.1 底层电介质单元横向周期占空比的影响

分别选取 $k_1 = 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0$, 即底层电介质单元的宽度分别为 426, 497, 568, 639 和 710 nm, $\delta = 30$ nm, $k_2 = 0.5, \alpha = 90^\circ$ 。TM 模式下光线垂直入射到模型表面的仿真光谱曲线如图 5(a) 所示。当 $k_1 = 0.6$ 时,模型的反射光谱波峰主要位

于 420~495 nm 波段,峰值为 0.643; k_1 增大到 0.7 时,反射光谱波峰偏移到 430~510 nm 波段,峰值增加到 0.699; k_1 增大到 0.8 时,反射光谱波峰位于 440~525 nm 波段,峰值达到 0.730; k_1 增加至 0.9



时,反射光谱波峰位于 450~540 nm 波段内,峰值增大到 0.742, k_1 继续增加至 1.0 时,模型的反射光谱波峰偏移至 460~555 nm 波段,反射峰值增加到 0.760。

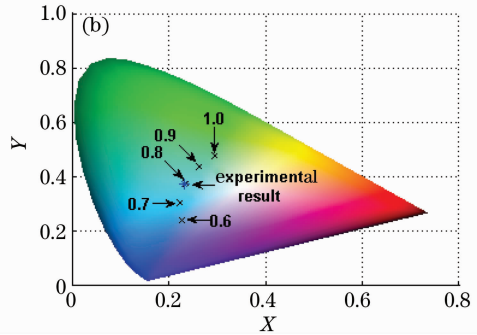


图 5 底层电介质单元横向周期占空比 k_1 对反射特性的影响。(a) 反射光谱曲线;(b) CIE1931 二维色度图中对应的颜色变化
Fig. 5 Influence of the horizontal duty factor k_1 of the bottom dielectric element to the reflection. (a) reflection spectra;
(b) color variation displayed in CIE1931 two-dimensional chromaticity diagram

由以上结果可知,在 TM 偏振状态下,随着 k_1 的增加,结构的反射光谱波峰升高,相应波段变宽,峰值位置向较长波长偏移。由图 5(b) 的 CIE1931 二维色度图可以看出其颜色变化过程, k_1 从 0.6 递增至 1.0 时,颜色由紫蓝色变到青蓝色,然后变到蓝绿色,最后变为黄绿色。当 $k_1=0.8$ 时,仿真光谱与测试光谱对应的颜色最为接近,当 $k_1<0.7$ 和 $k_1>0.9$ 时,仿真结果对应的颜色与测试结果对应颜色偏差很大,无法真实反映蝴蝶鳞翅的颜色。因此,为了保证仿蝴蝶鳞翅的结构色特性,底层电介质单元横向周期占空比 k_1 应限制在 0.7~0.9。

3.2 纵向电介质单元宽度差值的影响

分别取纵向相邻电介质单元宽度差值 δ 为 0, 10, 20, 30 和 40 nm, $k_1=0.75, k_2=0.5, \alpha=90^\circ$ 。TM 偏振状态下光线垂直入射到模型表面的结果曲线如图 6(a) 所示。当 $\delta=0$ 时,即模型上下等宽,模型的反射光谱波峰主要位于 450~530 nm 波段,峰

值为 0.858;当 $\delta=10$ nm 时,反射光谱波峰偏移到 445~525 nm 波段,峰值减小到 0.776;当 δ 增加到 20 nm 时,反射光谱波峰位于 440~520 nm 波段内,峰值减小到 0.724; δ 继续增加到 30 nm 时,模型的反射光谱波峰偏移至 435~520 nm 波段,峰值为 0.719; δ 增大至 40 nm 时,反射光谱波峰偏移到 435~520 nm 波段,峰值继续减小至 0.709。

根据上述结果可知,在 TM 模式下,随着 δ 从 0 增加到 20 nm,结构的反射光谱波峰会降低,相应波段变窄,峰值向较短波长位置偏移,但偏移较小;当 $\delta>20$ nm 时,反射光谱曲线变化微小。将反射光谱曲线对应颜色绘制在 CIE1931 二维色度图中,如图 6(b) 所示, δ 从 0 增加到 40 nm 时,由仿真得到的各反射光谱曲线对应的颜色相差较小且都处在青蓝色区域,与测试结果对应的颜色非常接近。因此,纵向电介质单元宽度差值对仿蝴蝶鳞翅结构的显色特性影响较小。

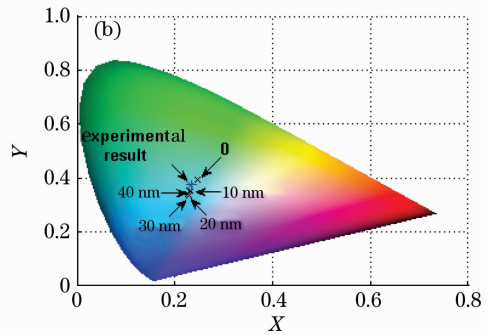
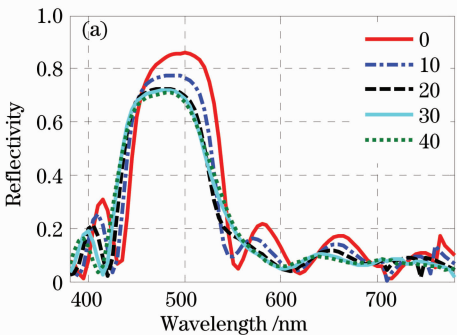
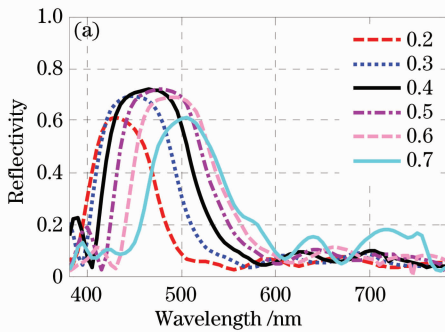


图 6 相邻电介质单元之间宽度差值 δ 对反射特性的影响。(a) 反射光谱曲线;(b) CIE1931 二维色度图中对应的颜色变化
Fig. 6 Influence of the width difference δ of the adjacent dielectric elements to the reflection. (a) reflection spectra;
(b) color variation displayed in CIE1931 two-dimensional chromaticity diagram

3.3 介质层纵向周期占空比的影响

分别取 k_2 为 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 即电介质单元厚度取 42, 63, 84, 105, 126 和 147 nm, $k_1 = 0.75, \delta = 30 \text{ nm}, \alpha = 90^\circ$ 。TM 模式下光线垂直入射到模型表面的仿真结果如图 7 所示。当 $k_2 = 0.2$ 时, 模型的反射光谱波峰主要位于 405~465 nm 波段, 峰值为 0.612; 当 $k_2 = 0.3$ 时, 反射光谱波峰偏移至 415~490 nm 波段, 峰值增加到 0.692; k_2 增大到 0.4 时, 反射光谱波位于 425~505 nm 波段内, 峰值继续增加至 0.718; k_2 增加到 0.5 时, 反射光谱波峰偏移到 435~520 nm 波段, 峰值为 0.719; k_2 继续增大至 0.6, 反射光谱波峰偏移至 450~530 nm 波段, 峰值减小到 0.690; k_2 增加到 0.7, 反射光谱波峰位于 470~540 nm 波段



内, 峰值继续减小至 0.610。由以上结果可以看出, 在 TM 模式下, 随着 k_2 的增加, 反射光谱的波峰会先增大后减小, 相应波段先变宽后变窄, 峰值位置向较长波长偏移。将光谱曲线转化为 CIE1931 二维色度图中对应的颜色变化, 如图 7(b) 所示, 当 k_2 从 0.2 递增到 0.7 时, 颜色由紫色先变到紫蓝色, 然后变到青蓝色, 随后又变到蓝绿色, 最后为黄绿色。当 k_2 处于 0.5~0.6 之间时, 仿真结果对应的颜色与测试结果对应的颜色最为接近, 而当纵向周期占空比 k_2 等于 0.4 和 0.7 时, 仿真与测试结果偏差较大。可见, 为了保证仿蝴蝶鳞翅结构模型的结构色显色特性, 介质层纵向周期占空比 k_2 应该在 0.5~0.6 选取。

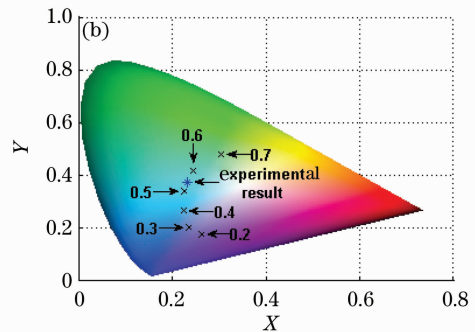
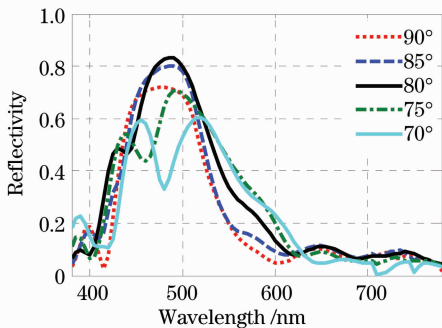


图 7 介质层纵向周期占空比 k_2 对反射特性的影响。(a) 反射光谱曲线; (b) CIE1931 二维色度图中对应的颜色变化

Fig. 7 Influence of the vertical duty factor k_2 of the dielectric element to the reflection. (a) Reflection spectra; (b) color variation displayed in CIE1931 two-dimensional chromaticity diagram

3.4 脊柱与基底夹角的影响

选取脊柱与基底夹角 α 分别为 $90^\circ, 85^\circ, 80^\circ, 75^\circ, 70^\circ, k_1 = 0.75, \delta = 30 \text{ nm}, k_2 = 0.5$ 。TM 偏振模式下光线垂直入射到模型表面的反射光谱曲线如图 8(a) 所示。当 $\alpha = 90^\circ$ 时, 模型的反射光谱波峰主要位于 435~515 nm 波段, 峰值为 0.719; 当 $\alpha = 85^\circ$ 时, 反射光谱波峰偏移到 445~520 nm 波段, 峰值达到 0.802; α 减小到 80° 时, 反射光谱波峰偏移至



450~525 nm 波段, 峰值为 0.834, 位于 485 nm 处, 另外, 在 430 nm 处出现峰值为 0.486 的微小波峰; α 角继续减小至 75° 时, 模型的反射光谱波峰偏移到 470~540 nm 波段, 峰值为 0.707, 对应波长为 490 nm, 在 440 nm 处出现一个峰值为 0.539 的明显波峰; α 角减小为 70° 时, 有两个近似等高的反射光谱波峰, 第一个波峰位于 435~470 nm 波段, 在 455 nm 达到峰值 0.592, 第二个波峰位于 490~550 nm 波段,

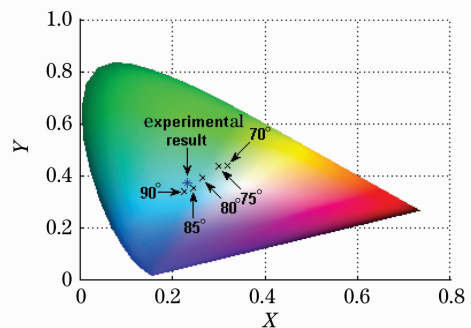


图 8 脊柱与基底夹角 α 对反射特性的影响。(a) 反射光谱曲线; (b) CIE1931 二维色度图中对应的颜色变化

Fig. 8 Influence of the angle α between the spine and the base to the reflection. (a) Reflection spectra; (b) color variation displayed in CIE1931 two-dimensional chromaticity diagram

峰值为 0.605, 位于 520 nm 处。

由上述结果可知, 随着 α 的变化, 反射光谱曲线变化非常明显, 当 α 由 90° 减小到 80° 时, 反射光谱峰值不断增大, 相应波段宽度几乎不变, 峰值位置向较长波长偏移; $\alpha < 80^\circ$ 后逐渐出现双峰, 且主峰峰值和波段宽度在不断减小, 峰值位置向较长波长偏移; 当 $\alpha = 70^\circ$ 时双峰接近等高。由图 8(b) 的 CIE 色度图可以看出反射光谱曲线对应颜色的变化过程, α 从 90° 递减到 70° 时, 颜色由青蓝先变到蓝绿色, 然后变到黄绿色, 在 $\alpha > 80^\circ$ 时, 仿真结果对应的颜色与测试结果对应颜色相差较小。因此, 为了保证仿蝴蝶鳞翅结构的显色特性, 脊柱与基底的夹角 α 应该取大于 80° 的值。

4 结 论

通过对蝴蝶鳞翅结构进行建模和光学显色特性分析, 得出结论如下:

1) 借助 TEM 结果建立了仿蝴蝶鳞翅分级结构的二维模型, 采用 RCWA 分析其反射光学特性, 实验和仿真验证了模型以及分析方法的可行性。

2) 系统分析了模型参数对光学特性的影响。改变横向周期占空比 k_1 对结构的反射特性影响显著, 反射光谱及颜色变化都很明显; 纵向介质单元宽度差值 δ 的变化对反射光谱影响较小, 也不会引起颜色的明显变化; 纵向占空比 k_2 对鳞翅结构的反射特性影响明显, 反射光谱和颜色都将随着它的改变而明显改变; 脊柱与基底夹角 α 的改变会影响类光栅结构的占空比和多层薄膜结构的占空比, 对结构的反射特性影响显著, 也更为复杂。由此, 横向类光栅结构的占空比对反射特性的影响具有一致性, 随着占空比的增大, 反射光谱波峰位置对应的波长增大, 峰值也在增大; 而纵向多层薄膜结构的占空比对反射特性的影响具有对称性, 随着占空比增大, 反射光谱波峰位置对应的波长增大, 而峰值却呈先增大后减小的对称分布。综上所述, 通过调整上述模型参数可以得到不同的光学特性, 这为后续具有环境检测功能的仿生分级微纳结构和器件的设计、制造和应用提供了理论指导。

参 考 文 献

1 H. Tada, S. E. Mann, I. N. Miaoulis *et al.*. Effects of a butterfly scale microstructure on the iridescent color observed at different angles [J]. *Opt. Express*, 1999, **5**(4): 87~92
2 O. Deparis, C. Vandenberg, M. Rassart *et al.*. Color-selecting reflectors inspired from biological periodic multilayer structures

[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(8): 3547~3555
3 Y. Ding, S. Xu, Z. L. Wang. Structural colors from Morpho peleides butterfly wing scales [J]. *J. Appl. Phys.*, 2009, **106**(7): 074702
4 P. Vukusic, J. R. Sambles, C. R. Lawrence *et al.*. Quantified interference and diffraction in single Morpho butterfly scales [J]. *Proc. R. Soc. London B*, 1999, **266**(1427): 1403~1411
5 P. Vukusic, J. R. Sambles. Photonic structures in biology [J]. *Nature*, 2003, **424**(6950): 852~855
6 P. Vukusic, D. G. Stavenga. Physical methods for investigating structural colours in biological systems [J]. *J. R. Soc. Interface*, 2009, **6**(s2): S133~S148
7 S. Kinoshita, S. Yoshioka, K. Kawagoe. Mechanisms of structural colour in the Morpho butterfly: cooperation of regularity and irregularity in an iridescent scale [J]. *Proc. R. Soc. London B*, 2002, **269**(1499): 1417~1421
8 S. Yoshioka, S. Kinoshita. Wavelength-selective and anisotropic light-diffusing scale on the wing of the Morpho butterfly [J]. *Proc. R. Soc. London B*, 2004, **271**(1539): 581~587
9 S. Kinoshita, S. Yoshioka. Structural colors in nature: the role of regularity and irregularity in the structure [J]. *Chem. Phys. Chem.*, 2005, **6**(8): 1442~1459
10 S. Berthier, E. Charron, A. Da Silva. Determination of the cuticle of the scales of the iridescent butterfly Morpho Menelaus [J]. *Opt. Commun.*, 2003, **228**(4-6): 349~356
11 S. Banerjee, Z. Dong. Optical characterization of iridescent wings of Morpho butterflies using a high accuracy nonstandard finite-difference time-domain algorithm [J]. *Opt. Rev.*, 2007, **14**(6): 359~361
12 R. A. Potyrailo, H. Ghiradella, A. Vertiatchikh *et al.*. Morpho butterfly wing scales demonstrate highly selective vapor response [J]. *Nature Photon.*, 2007, **1**(2): 123~128
13 L. Q. Ren, Z. M. Qiu, Z. W. Han *et al.*. Experimental investigation on color variation mechanisms of structural light in Papilio maackii menetries butterfly wings [J]. *Sci. China Ser. E-Tech. Sci.*, 2007, **50**(4): 430~436
14 Han Zhiwu, Wu Liyan, Qiu Zhaomei *et al.*. Microstructure and structural color in wing scales of butterfly Thaumantis diores [J]. *Chinese Sci. Bull.*, 2009, **53**(22): 2692~2696
韩志武, 鄢立岩, 邱兆美等. 紫斑环蝶鳞片的微结构及其结构色 [J]. *科学通报*, 2008, **53**(22): 2692~2696
15 He Xiaoxiang, Li Hao. Angle-dependent EM scattering analysis of special photonic crystal and its application [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 256~261
何小祥, 李浩. 特殊光子晶体电磁散射特性及其应用研究 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(1): 256~261
16 Liu Guangping, Xuan Yimin, Han Yuge. Structure-color characteristic of Morpho butterfly [J]. *Acta Laser Biology Sinica*, 2006, **15**(5): 511~514
刘广平, 宣益民, 韩玉阁. Morpho 蝴蝶结构显色特性研究 [J]. *激光生物学报*, 2006, **15**(5): 511~514
17 L. Plattner. Optical properties of the scales of Morpho rhetenor butterflies: theoretical and experimental investigation of the back-scattering of light in the visible spectrum [J]. *J. R. Soc. Interface*, 2004, **1**(1): 49~59
18 D. Zhu, S. Kinoshita, D. Cai *et al.*. Investigation of structural colors in Morpho butterflies using the nonstandard-finite-difference time-domain method; effects of alternately stacked shelves and ridge density [J]. *Phys. Rev. E*, 2009, **80**(5): 051924
19 Guo Chucai, Ye Weimin, Yuan Xiaodong *et al.*. Research on reflection characteristics of sub wavelength gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(12): 2172~2176
郭楚才, 叶卫民, 袁晓东等. 亚波长光栅反射特性研究 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(12): 2172~2176

20 Yang Yisu, Huang Yongqing, Huang Hui *et al.*. Design of photodetector with subwavelength grating structure [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(9): 2352~2357
 杨一粟, 黄永清, 黄辉等. 一种具有亚波长光栅结构的光探测器的设计[J]. *中国激光*, 2009, **36**(9): 2352~2357

21 M. G. Moharam, D. A. Pommet, E. B. Grann *et al.*. Stable implementation of the rigorous coupled-wave analysis for surface-relief gratings: enhanced transmittance matrix approach [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1995, **12**(5): 1077~1086

22 M. G. Moharam, E. B. Grann, D. A. Pommet *et al.*. Formulation for stable and efficient implementation of the

rigorous coupled-wave analysis of binary gratings [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1995, **12**(5): 1068~1076

23 Fan Shuwei, Zhou Qinghua, Li Hong. Research of optimization design of groove diffraction grating profile parameters [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(11): 3133~3139
 樊叔维, 周庆华, 李红. 槽型衍射光栅结构参数优化设计研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(11): 3133~3139

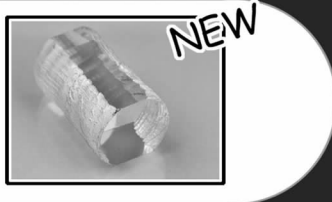
24 G. L. Liao, H. B. Zuo, Y. B. Cao *et al.*. Optical properties of the micro/nano structures of Morpho butterfly wing scales [J]. *Sci. China Ser. E-Tech. Sci.*, 2010, **53**(1): 175~181

· 广 告 ·



全球专业的激光晶体和非线性光学晶体制造商

磁光晶体系列
 铽镓石榴石 (TGG)



产品系列

1. 非线性光学晶体
2. 激光晶体
3. 绿光、蓝光晶体组件
4. 声光和电光晶体
5. 双折射晶体
6. 闪烁晶体
7. 激光光学产品
8. 通讯光学产品
9. 红外光学产品
10. Q-开关、温控炉等



BBO Q-开关

BBO 普克尔盒的应用
 1、高重复频率DPSS中Q-开关的理想选择
 2、用于高重复频率再生放大系统的控制
 3、腔倒空系统
 4、削波



Q开关驱动源



超长 Nd:YVO₄ 晶体



光学产品