

绿带翠凤蝶中微纳结构的光学特性及其传感应用

王倩, 宇磊磊, 刘昌吉, 靳延平, 董晓翔, 徐新龙

(西北大学光子学与光子技术研究所 陕西省石墨烯联合实验室, 陕西 西安 710127)

摘要: 通过变角度光谱系统测量了绿带翠凤蝶闪亮后翅中微纳结构的光谱, 并建立了多层膜反射结构模型来解释蝴蝶翅膀的结构色产生机理。通过测量绿带翠凤蝶后翅微结构中的圆二向色性光谱, 研究了其光学偏振特性。基于结构色的特点, 设计并实现了利用蝴蝶翅膀对溶液折射率的传感实验, 结果表明随着折射率的增大, 反射光谱谱线发生红移。相关的研究结果为理解自然界中微结构材料的偏振和传感应用提供了基础。

关键词: 绿带翠凤蝶; 结构色; 传感; 偏振转换; 圆二向色性

中图分类号: O433 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0203006

Optical properties and sensing applications of micro-nano structures in *Papilio maackii*

Wang Qian, Yu Leilei, Liu Changji, Jin Yanping, Dong Xiaoxiang, Xu Xinlong

(Shaanxi Joint Lab of Graphene, Institute of Photonics & Photon-Technology, Northwest University, Xi'an 710127, China)

Abstract: The optical property of the flashing hind wings of the *Papilio maackii* were measured by an angle resolved spectrum system. A multilayer reflection structure model was established to explain the mechanism of the structural color of the butterfly wings. The circular dichroism in the microstructure of the hind wings of the butterflies was measured and the polarization properties were verified. Based on the structural color, the sensing experiments of the refractive index of solutions by using butterfly wings were designed and implemented. The results show that the spectra of butterfly wings redshift with the increase of the refractive index of solutions. The research provides a technological platform for polarization and sensing applications based on the microstructures in nature.

Key words: *Papilio maackii*; structural color; sensing; polarization conversion; circular dichroism

收稿日期: 2018-09-05; 修订日期: 2018-10-03

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(11374240); 陕西省自然科学基金重点科技创新团队项目(017KCT-01)

作者简介: 王倩(1992-), 女, 硕士生, 主要从事光子晶体中的 Fano 共振、结构色方面的研究。Email: wangqianphysics@163.com

导师简介: 徐新龙(1976-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事太赫兹科学与技术、光与物质相互作用方面的研究。

Email: xlxuphy@nwu.edu

0 引言

颜色是眼睛对一定范围内的电磁波感应后经过大脑神经反应和个体自身的经验综合后产生的一种视觉效应,它由光的辐射、光与物质相互作用、视觉感受共同决定的。根据成因不同,颜色可以分为两大类:色素色和结构色。色素色也被称为化学色,是指化合物由于分子或原子中电子的跃迁而吸收特定波长光波或者反射特定波长光波而产生的颜色^[1]。常见的色素色有花青素、黑色素、类胡萝卜素、黄酮素等。工业中的染料和着色剂经常采用色素进行着色,但是色素并不稳定,在不同的化学环境中会呈现不同的颜色,随着温度、湿度和光照等变化也会发生变化。因此,用色素进行着色的结果容易受环境的影响而褪色或变色,而且大量使用染料也会对环境造成污染。

结构色是指光在微观结构中由于干涉、衍射或者散射而产生的颜色现象,例如蜻蜓的透明薄翼中观察到的虹彩色。结构色的产生只与材料的微观结构有关,不随化学环境的变化而变化,因此在着色、装饰、印刷和仿生学等方面具有重要的应用前景。其中,蝴蝶、鸟类、蛾、甲壳虫等生物中就存在大量的结构色^[2]。例如早期发现最简单的多层膜结构就存在于甲壳虫的翅鞘和角质层,因此可以显示特殊的金属光泽^[3-4];而复杂的多层膜结构也常常出现在各类蝴蝶翅膀鳞片的脊线处^[5-6]。在象鼻虫^[7]和蝴蝶^[8]鳞片中还发现了三维周期性结构的生物光子晶体。Ghiradella 等人发现灰蝶科卡灰蝶(*Callophrys rubi*)的鳞片上的三维光子晶体为面心立方结构(Face-Centered Cubic)^[9],Biro 等人发现眼灰蝶(*Polyommatus*)的翅膀鳞片为柴堆结构^[10]。在番凤蝶(*Parides sesostris*)^[11]和喙凤蝶(*Teinopalpus imperialis*)^[12]的鳞片中还发现了四面体结构。除此之外,Michielsen 等人在灰蝶和凤蝶科的翅膀鳞片中发现存在体心立方螺旋二十四面体结构^[13],与其他结构不一样,体心立方螺旋二十四面体结构具有手性,其对于不同入射偏振光具有不同的响应,因此可用于实现光的偏振转换以及提高光学活性。

对于自然界中结构色角度信息和偏振特性的研究对光子器件、隐身、通讯及仿生等领域有着重要作用^[14]。而生物光子晶体材料对外界的介电环境的变化是非常灵敏的,随着外界环境介电常数的变化,结构色也会产生相应的变化,因此可以用于传感器的

研究。文中,选用存在螺旋二十四面体微结构的绿带翠凤(*Papilio maackii*)闪亮后翅(flashes hind wings)为研究对象,通过变角度光谱系统测量了其微结构的光谱。并建立了多层膜反射结构模型,来解释蝴蝶翅膀的结构色产生机理。通过测量绿带翠凤蝶后翅微结构中的圆二向色性光谱,研究了其偏振特性。基于结构色的特点,设计实现了利用该微结构对溶液折射率的传感实验,结果表明随着溶液折射率的增大,谱线发生红移。笔者的工作进一步推动了对于仿生偏振器件和传感器件的理解与实现。

1 绿带翠凤蝶结构色研究

绿带翠凤蝶,拉丁学名为 *Papilio maackii*,属于鳞翅目凤蝶科。雌性绿带翠凤前翅呈现灰色,后翅颜色暗淡呈蓝绿相间。而雄性绿带翠凤前翅和后翅在正入射的时候呈现出闪亮的、具有金属光泽的绿色(图 1(a)),当入射光的入射角度增大时可以发现金属光泽的绿色逐渐转变为蓝绿色继而呈现蓝色(图 1(b))。

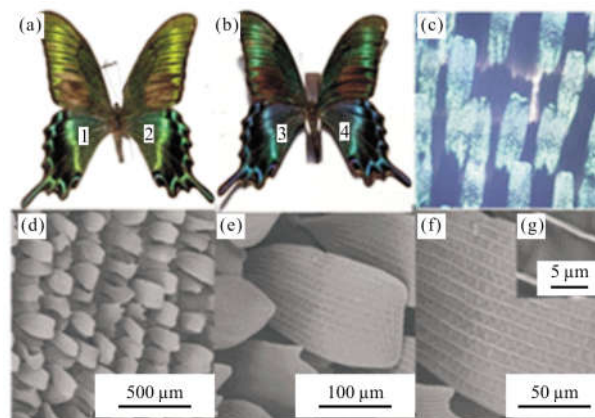


图 1 在正入射光照射下和掠射光照射下绿带翠凤蝴蝶翅膀彩色图像展现出闪耀的绿色(a)和蓝色(b);(c)为 10 倍光学显微镜下观察到的鳞片排布;(d)~(g)对应于图(a)中标“1”处的绿带翠凤翅膀在不同尺度下的 SEM 图,(d)标“1”区域的整体 SEM 图,(e)一片完整的鳞片,(f)鳞片 100 倍放大,(g)鳞片由凹凸面和脊组成

Fig.1 Wings of *Papilio maackii* show brilliant green (a) and blue (b) under normal illumination and grazing illumination, respectively, (c) is the optical microscope (10 times enlarged), (d)~(g) corresponds to the SEM diagram of the *Papilio maackii* wing in (a), (d) SEM diagram of "1" in (a), (e) a complete slice of butterfly scales, (f) scales at 100 times magnetification, (g) the scales consist of a concave convex surface and a ridge

图 1(c)为在 10 倍光学显微镜下观察到的闪亮的绿色鳞片和灰色的鳞片,证明了宏观看到的绿色是由鳞片组成的微结构产生的。图 1(d)为在低倍扫描电子显微镜(SEM)下绿带翠凤蝶的后翅像鱼鳞一样由多层鳞片周期性层叠排列组成^[8,15],所观察到的虹彩色就是由这些微纳结构的鳞片与光相互作用产生的。图 1(e)、(f)显示出单个鳞片是通过具有复杂的凹凸面和脊等多层膜微纳结构组合而成的,多层膜平行于翅膀表面而脊垂直于翅膀表面^[16-17]。图 1(g)显示多层膜表面为凹凸不平的面,它是由角质层和空气-隔离层(局部排列的角质小球)组成的周期性结构^[15]。单个鳞片的尺寸大约为 170 μm×50 μm,脊和脊之间的距离大约为 7 μm 左右,有 13 个左右的脊-多层膜周期。

取绿带翠凤蝶翅膀的一片切片(面积为5 mm×5 mm)作为笔者的研究对象(图 1(a)中标“1”的区域)。采用变角度测量系统研究样品在自然光入射时的变角度反射光谱,角度测量范围设置为 0°~65°,步长为 1°,从图 2(a)中可以明显地观察到,反射光谱峰值位置大约在 400~570 nm 的光谱范围而可见光光谱中对应的这一范围为绿光、蓝光和紫光的光谱区域。选取 15°、25°、35°、45°和 55°的角度信息展示在图 2(b)中。入射光角度为 15°时,反射光谱峰值位于 513 nm 附近,入射光角度为 25°时,反射光谱峰值位于 500 nm 附近,入射光角度为 35°时,反射光谱峰值位于 481 nm 附近,入射光角度为 45°时,反射光谱峰值位于 455 nm 左右,入射光角度为 55°时,反射光谱峰值位于 448 nm 附近。也就是说,随着入射光入射角度的逐渐增大,反射光谱呈现逐渐蓝移趋势,反映了光谱从绿光区域到蓝光和紫光区域的变化趋势,这和图 1 观察到的实验现象一致。而且伴随着入射角度的增大,反射光的强度变弱,这是因为表面的多层膜结构凹凸面造成光线漫反射所导致的。

采用一个周期性多层膜模型来解释金属光泽的产生和反射光谱的蓝移现象。模型结构由壳质组成的各向同性支撑层和空气-角质层组成的空气隔离层相互交替构成。根据长波近似理论,最佳多层膜反射峰的位置表达为^[18]:

$$m^* \lambda = 2 * d * \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta} \quad (1)$$

式中:λ 为反射峰的波长位置;d 为周期性结构的厚

度; \bar{n} 为多层膜结构的平均折射率;θ 为入射角。对于文中的样品来说,周期性结构的厚度大约为 155 nm,取多层膜的平均折射率为 1.65^[16,17,19]。将各个参数代入公式(1),当入射角 θ 为 15°的时候,计算可得反射光谱峰值位于 505.2 nm 的波长附近,θ 为 25°的时候,反射光谱峰值位于 494.4 nm 波长附近,为 35°的时候,反射波光谱峰值位于 479.6 nm 附近,θ 为 45°的时候,反射光谱峰值位于 462.2 nm 附近,θ 为 55°的时候,反射光谱峰值位于 444 nm 附近。模型的计算结果也显示了光谱从绿光到蓝光的蓝移现象,和实验测量的结果基本一致,也证实了周期性多层膜模型的可行性。理论计算和实验测量之间存在的偏差主要来源于层状鳞片表面还存在一些角蛋白等其他杂质的分布。

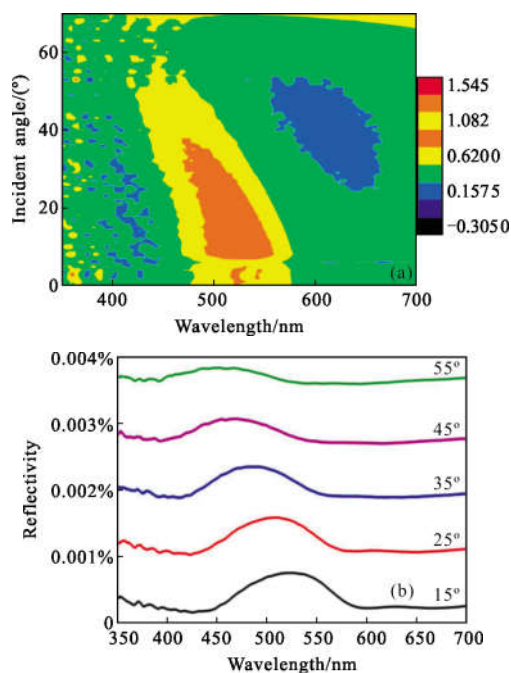


图 2 (a)自然光入射下,绿带翠凤蝶的角度依赖反射光谱(测量范围 0°~65°), (b)特定角度下绿带翠峰蝶的反射光谱(15°~55°)

Fig.2 (a) Angle dependent reflection spectra of the butterflies measured under natural light (range 0° to 65°), (b) reflection spectrum of the Papilio maackii at specific angles(15°-55°)

2 绿带翠凤蝶后翅的光学手性

近年来,手性结构材料因其独特的光学特性而吸引了很多研究人员的关注,这是由于这些结构中

往往可以显示光学活性、圆二色性、偏振转换等特殊的光学特性。

在卡灰蝶 (*Callophrys rubi*)^[20-21]、番凤蝶 (*Parides sesostris*)^[13,22]、喙凤蝶 (*Teinopalpus imperialis*)^[12] 等蝶类翅膀中发现光子晶体——螺旋二十四面体结构, 这一结构具有三重周期形态^[23]、圆二色性^[20]和圆偏振^[24]等特性。为了探究存在螺旋二十四面体的结构中是否具有手性响应, 根据偏振特性的关系, 对绿带翠凤蝶后翅进行了偏振测量。首先在测量光路的人射端和出射端同时加入水平方向的偏振片, 测量 0°~65° 角度范围之间的反射光谱。然后调节出射端偏振片的偏振方向为竖直方向, 再次进行测量。接着转动入射端的偏振片偏振方向为垂直方向, 进行测

$$\begin{pmatrix} R_{++} & R_{+-} \\ R_{-+} & R_{--} \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} (R_{ss}+R_{pp})+i(R_{sp}+R_{ps}) & (R_{ss}-R_{pp})-i(R_{sp}+R_{ps}) \\ (R_{ss}-R_{pp})+i(R_{sp}+R_{ps}) & (R_{ss}+R_{pp})-i(R_{sp}-R_{ps}) \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中: $R_{jk}(j, k$ 可取 s 和 p) 代表强度反射率; $R_{jk}=|r_{jk}|^2$, 第一个和第二个下标分别表示出射光和入射光的偏振状态。公式(2)左边的下标“+”和“-”分别表示右旋圆偏振光(Right-handed circularly polarized wave, RCP)和左旋圆偏振光(Left-handed circularly polarized wave, LCP), 公式右边的下标“s”和“p”代表偏振方向。

在图 3 所示的实验结果中, 测量结果显示 $R_{sp}=R_{ps}=0, R_{ss} \neq R_{pp}$, 表明测量样品具有结构对称性。将其代入公式(2)得到圆偏振反射率 $R_{++}=R_{--}, R_{+-} \neq R_{-+}$, 这一理论推导的结果表明:(a) 对于绿带翠凤蝶

量。最后转动出射端偏振片的偏振方向为水平方向进行测量。也就是说分别测量了 s 偏振和 p 偏振入射情况下, 不同方向偏振出射的反射光谱。测量结果分别表示为 R_{ps}, R_{ss}, R_{pp} 和 R_{sp} , 选择 15°、25°、35°、45° 和 55° 的角度下的这些测量结果显示在图 3 中。从图中可以看出, 在 R_{ss} 和 R_{pp} 的反射峰和自然光入射的反射峰均存在向高频移动的趋势, 但是移动大小不同。在 R_{sp} 和 R_{ps} 偏振情况下, 并没有出现很明显的反射峰并且每个角度的反射光谱几乎一样。

根据线性偏振测量光谱与圆反射系数的关系, 进一步研究了绿带翠凤蝶的圆偏振特性。圆反射矩阵可以从线性反射矩阵计算得到, 具体的转换矩阵可以从下式计算:

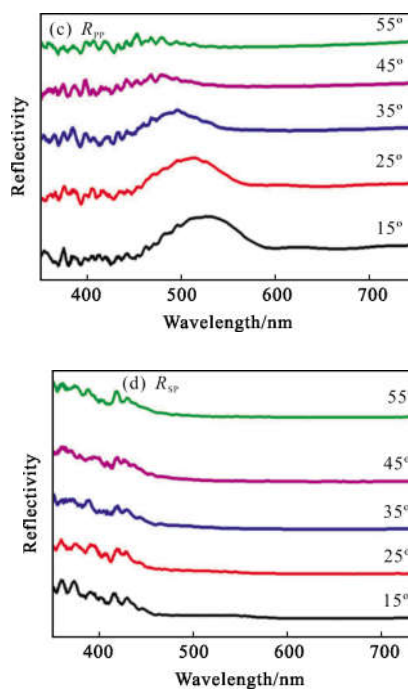
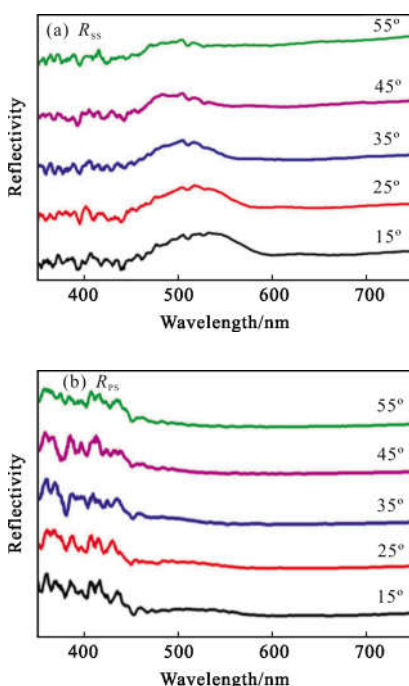


图 3 偏振光入射下, 绿带翠凤蝶翅膀的角度依赖反射谱(测量范围 0°~65°), (a)~(d)分别为 s 偏振入射探测 s 偏振和 p 偏振出射, 以及 p 偏振入射探测 p 偏振和 s 偏振出射的反射光谱

Fig.3 Angle dependent reflectance spectrum of the *Papilio maackii* (measured range 0°~65°), (a) R_{ss} (b) R_{ps} (c) R_{pp} , (d) R_{sp} , under polarized light incidence

翅膀上的微结构而言, 其在 380~780 nm 的可见光范围内反射率在右旋光(RCP)和左旋光(LCP)激发下是完全相同的。圆二向色性是指两种圆偏振光入射因

吸收损耗不同所引起的直接反射率的差异 ($R_{++} \neq R_{--}$), 常见于三维手性结构中^[25]。该结构中 $R_{++} = R_{--}$, 因此说明该微结构在反射光谱中不具有圆二向色性。圆转换二向色性是指左旋到右旋圆偏振光和右旋到左旋圆偏振光转换效率的不同。这一特征主要存在于二维手性结构中, 自然界中二维手性材料非常稀少, 因此对这一特性的探究常在人工平面手性结构中实现^[26]。而计算结果显示, 即经过样品的反射后, 会发生从左旋(右旋)到右旋(左旋)偏振态的转换。特别地, 两个转换项的转换效率不同, 说明绿带翠凤蝶翅膀上的微结构可以实现圆转换二向色性。在绿带翠凤蝶翅膀上的微结构中实现了这一有趣的手性特征, 相信在今后的研究中将蝴蝶翅膀微结构与人工手性结构相结合的方法将进一步提高圆转换二向色性的效率。

图 4 为在 R_{ss} 、 R_{pp} 偏振情况下, 反射峰位置与入射角角度的依赖关系。可以看出, 反射峰随着入射角

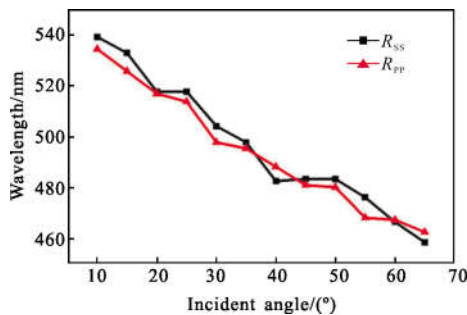


图 4 R_{ss} 、 R_{pp} 偏振情况下反射峰位置随入射角的变化关系
Fig.4 Relationship between the position of reflection peak and incident angle under the polarization of R_{ss} and R_{pp}

度的增大而发生蓝移, 从而证实了多层膜结构起到了光子晶体的功能。下面通过对 R_{ss} 、 R_{pp} 偏振谱的数据拟合和理论计算来对其进行分析。绿带翠凤蝶的鳞片结构在很多方面都能看作光子晶体。根据布拉格定律^[17], 最佳反射率满足下面条件^[27-28]:

$$\lambda = n_{av} P_0 \cos \phi_1 = 2n_{av} P_h \cos \phi_1 \quad (3)$$

式中: λ 为反射峰的波长位置; n_{av} 为多层膜的平均有效折射率; ϕ_1 为折射角; P_0 为周期性结构的间距; $P_h = \frac{1}{2} P_0$ 为结构的倾斜。利用斯涅耳定律: $n_0 \sin \phi_0 = n_{av} \sin \phi_1$ ^[28], 得到如下结果:

$$\sin^2 \phi_0 = -\frac{1}{2} \frac{\lambda^2 + n_{av}^2}{P_0^2} \quad (4)$$

式中: n_0 为空气的折射率; ϕ_0 为入射角度。根据公式(4), n_{av} 为公式的截距; $-1/P_0^2$ 为斜率, 可以通过对 TE(s 偏振)、TM(p 偏振)偏振角度依赖反射光谱(图 4)数据进行拟合。图 5 是对 TE、TM 两种偏振情况下入射角与反射峰位置的线性拟合结果, 对于 TE 偏振, 提取的 n_{av} 为 1.70, P_h 为 158nm。对于 TM 偏振, n_{av} 为 1.66, P_h 为 155 nm。这个数据和在公式(1)中采用的参数数据非常接近, 因此, 所提出来的圆转换二向色性理论是成立的。

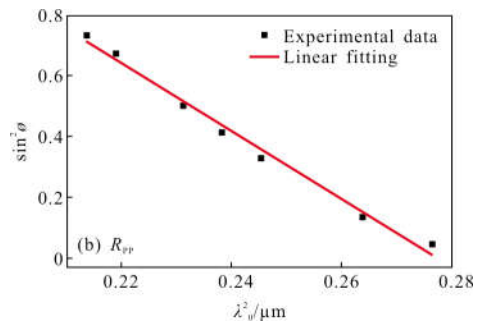
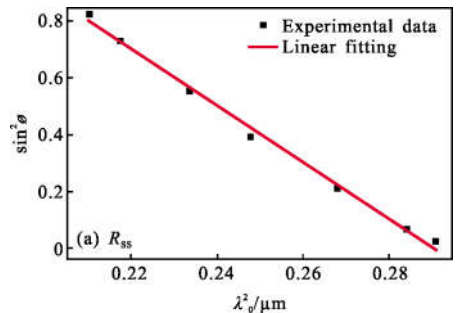


图 5 (a) R_{ss} 和 (b) R_{pp} 测量的入射角与反射峰波长位置的线性拟合

Fig.5 Linear fitting of incident angle and wavelength of reflection peak under (a) R_{ss} and (b) R_{pp} polarization

3 结构色的传感研究

结构色除了和结构本身有关外, 还可以灵敏地感知外界介电常数(折射率)的变化, 随着外界环境折射率的变化, 所呈现的结构色也随之发生变化。因此可以用于传感方面的研究。为了探究这一性能, 根据公式 $n_{\text{溶液}} = (1-f)n_{\text{水}} + fn_{\text{溶质}}$, 配制了一系列不同折射率的溶液: 水溶液(H_2O), 折射率 1.333; 氯化钾溶液(KCl), 折射率 1.340; 硫酸钠溶液(Na_2SO_4), 折射率 1.359; 葡萄糖溶液($C_6H_{12}O_6$), 折射率 1.376; 葡萄糖溶液($C_6H_{12}O_6$), 折射率 1.385。首先量取 6 份水溶液各 15 ml 置于容器中; 然后称取氯化钾粉末 5.130 g, 硫

酸钠粉末 2.925 g, 葡萄糖粉末分别 6.000 g 和 7.500 g, 依次倒入容器中搅拌; 将相同部位的绿带翠凤蝶样品切片分别浸泡在溶液中 24 h, 随后取出测量其变角度反射光谱信息。取每一组测量结果的 35° 的光谱信息展示在图 6(a) 中。从图中可以看到, 随着溶液的折射率的增加, 反射光谱发生红移, 光谱强度逐渐减弱。在葡萄糖溶液 1.385 中减弱比较明显, 此时是因为葡萄糖溶液接近于饱和状态。对图 6(a) 中的数据的拟合, 提取峰值, 得到图 6(b) 中的数据, 可以看到共振波长和折射率之间为线性函数关系, 可以用线性函数拟合。由自然材料传感特性具有良好的线性关系, 而且其制作简单, 在传感器的应用方面具有潜在的优势。

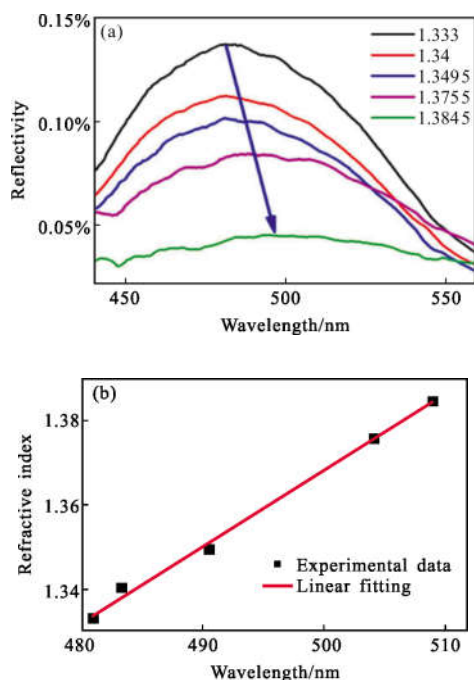


图 6 (a)35°入射时, 绿带翠凤蝶翅膀在不同折射率溶液下的反射光谱, (b)共振波长和折射率的关系可以利用线性方程拟合

Fig.6 (a) Reflectivity spectra at different refractive indices at 35° of incidence, (b) linear relationship between resonant wavelength and refractive index

4 结论

文中运用扫描电子显微镜、变角度光谱测量系统等实验手段, 对绿带翠凤蝶的后翅结构色成因展开了研究。结果显示具有金属光泽的绿色源自于鳞片的层状结构的周期性分布。而通过自然光入射和

偏振光入射情况下的反射光谱结果显示, 随着入射角度的增大, 反射光谱逐渐蓝移, 颜色由绿色变为蓝色, 提出的周期性多层膜模型很好地解释了这种彩虹效应的产生原因。其次, 测量了绿带翠凤蝶后翅微结构中的圆二向色性光谱, 研究了其偏振特性。最后, 基于结构色的特点, 设计并实现了利用蝴蝶翅膀来提高对溶液折射率的传感灵敏度, 结果表明随着折射率的增大, 谱线发生红移。文中的研究结果对于理解自然界中微结构材料的偏振和传感特性提供了很好的理论解释和实验支持。

参考文献:

- [1] Nassau K. 颜色的物理与化学: 颜色的 15 种起源 [M]. 李士, 张志三, 译. 北京: 科学出版社, 1991.
- [2] Srinivasarao M. Nano-optics in the biological world: Beetles, butterflies, birds, and moths [J]. *Cheminform*, 1999, 99(7): 1935.
- [3] Neville A C, Caveney S. Scarabaeid beetle exocuticle as an optical analogue of cholesteric liquid crystals [J]. *Biological Reviews*, 1969, 44(44): 531-562.
- [4] Caveney S. Cuticle reflectivity and optical activity in scarab beetles: the role of uric acid [J]. *Proceedings of the Royal Society of London*, 1971, 178(1051): 205.
- [5] Ghiradella H. Light and color on the wing: structural colors in butterflies and moths [J]. *Applied Optics*, 1991, 30(24): 3492-3500.
- [6] Wickham S, Large M C, Poladian L, et al. Exaggeration and suppression of iridescence: the evolution of two-dimensional butterfly structural colours [J]. *Journal of the Royal Society Interface*, 2011, 3(6): 99-108.
- [7] Welch L V. Photonic Crystals in Biology [M]. Osaka: Osaka University Press, 2005.
- [8] Prum R O, Quinn T, Torres R H. Anatomically diverse butterfly scales all produce structural colours by coherent scattering [J]. *Journal of Experimental Biology*, 2006, 209(4): 748-765.
- [9] Ghiradella H, Radigan W. Development of butterfly scales. II. Struts, lattices and surface tension [J]. *Journal of Morphology*, 1976, 150(2): 279-297.
- [10] Biró L P, Bálint Z, Kértesz K, et al. Role of photonic-crystal-type structures in the thermal regulation of a Lycaenid butterfly sister species pair [J]. *Physical Review E*,

- 2003, 67(2): 021907.
- [11] Sambles J R. Shedding light on butterfly wings [C]//SPIE, 2001, 4438: 85–96.
- [12] Argyros A, Manos S, Large M C, et al. Electron tomography and computer visualisation of a three-dimensional ‘photonic’ crystal in a butterfly wing-scale [J]. *Micron*, 2002, 33(5): 483–487.
- [13] Michielsen K, Stavenga D G. Gyroid cuticular structures in butterfly wing scales: biological photonic crystals [J]. *Journal of the Royal Society Interface*, 2008, 5(18): 85–94.
- [14] Parker A R, Townley H E. Biomimetics of photonic nanostructures [J]. *Nature Nanotechnology*, 2007, 2(6): 347–53.
- [15] Kolle M, Salgard -cunha P M, Scherer M R, et al. Mimicking the colourful wing scale structure of the *Papilio blumei* butterfly [J]. *Nature Nanotechnology*, 2010, 5(7): 511–515.
- [16] Caveney S. Cuticle reflectivity and optical activity in scarab beetles: the role of uric acid [J]. *Proceedings of the Royal Society of London*, 1971, 178(51): 205–225.
- [17] Neville A C, Caveney S. Scarabaeid beetle exocuticle as an optical analogue of cholesteric liquid crystals [J]. *Biological Reviews*, 1969, 44(4): 531–562.
- [18] Born M, Wolf E. Principles of Optics [M]. 6th ed. Cambridge: Cambridge University, 1980.
- [19] Tam H L, Cheah K W, Goh D T, et al. Iridescence and nano-structure differences in *Papilio* butterflies [J]. *Optical Materials Express*, 2013, 3(8): 1087–1092.
- [20] Saba M, Thiel M, Turner M, et al. Circular dichroism in biological photonic crystals and cubic chiral nets [J]. *Physical Review Letters*, 2011, 106(10): 404–406.
- [21] Mille C, Tyrode E C, Corkery R W. Inorganic chiral 3–D photonic crystals with bicontinuous gyroid structure replicated from butterfly wing scales [J]. *Chemical Communications*, 2011, 47(35):9873–9875.
- [22] Saranathan V, Leggett A. Structure, function, and self-assembly of single network gyroid (I4132) photonic crystals in butterfly wing scales [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2010, 107(26): 11676–11681.
- [23] Wohlgenuth M, Yufa N, Hoffman J, et al. Triply periodic bicontinuous cubic microdomain morphologies by symmetries [J]. *Macromolecules*, 2001, 34(17): 6083–6089.
- [24] Yoshioka S, Fujita H, Kinoshita S, et al. Alignment of crystal orientations of the multi-domain photonic crystals in *Parides sesostris* wing scales [J]. *Journal of the Royal Society Interface*, 2014, 11(92): 9.
- [25] Huang Y, Jin Y, Wu D, et al. Coupling Tai Chi chiral metamaterials with strong optical activity in terahertz region [J]. *Plasmonics*, 2015, 10(4): 1005–1011.
- [26] Xu Xinlong, Huang Yuanyuan, Yao Zehan, et al. The design, electromagnetic properties and applications of chiral metamaterials [J]. *Journal of Northwest University*, 2016, 46(1): 1–12. (in Chinese)
- [27] John W D S, Fritz W J, Lu Z J, et al. Bragg reflection from cholesteric liquid-crystals[J]. *Physical Review E*, 1995, 51(2): 1191.
- [28] Ching S Y. Chirality in rhomborhina gigantea beetle [J]. *Optical Materials Express*, 2014, 4(11): 2340–2345.