

鸽子羽毛单层膜结构的论证

张代谦 复旦大学物理系, 裴管铖 复旦大学物理系

本文基于 SEM 下看到的 $2\mu\text{m}$ 尺度下鸽子羽毛小羽枝图, 从理论上论证鸽子羽毛结构色应起源于单层膜。同时结合 5° 至 65° 角度下的反射谱数据, 验证了此种结构。最后结合 $300\text{nm}\sim 400\text{nm}$ 紫外波段的反射谱给出了单层膜结构的一种解释。

关键词: 光子晶体, 单层膜, 结构色

一. 引言

结构色是一种与色素着色无关的光学效果, 由生物体亚显微结构所导致。比如生物体上的蜡层、刻点、沟缝或鳞片等细微结构, 都能使光波发生散射、衍射或干涉而产生的各种颜色, 这些颜色依赖于观察角度且无法用化学药品去除, 这是它区别于色素的特征。光子晶体和单层膜都能产生结构色。前者是一类在光学尺度上具有周期性结构的晶体, 它完全依靠自身结构就可产生光子带隙从而产生结构色并能实现滤波, 在微波电路、微波天线等方面均具有广阔的应用前景; 单层膜结构也能产生结构色, 其主要原理可用等倾干涉解释, 对它的研究已经比较透彻。

二. 理论及实验部分

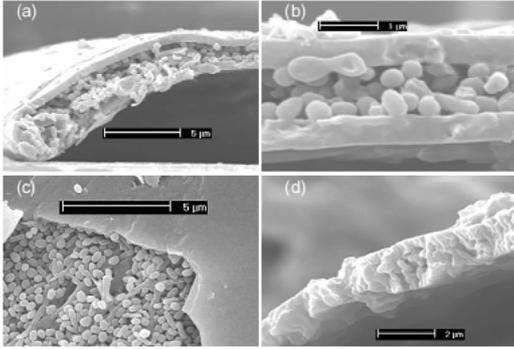


FIG. 1: SEM images of iridescent barbules. (a) Perspective view of the cross-section of a green barbule. (b) Transverse cross-section of a purple barbule. (c) Perspective top view of a green barbule with the top keratin cortex layer removed (lower left corner). (d) Perspective view of the cross-section of a grey barbule. Scale bars, (a) $5\mu\text{m}$; (b) $1\mu\text{m}$; (c) $5\mu\text{m}$; (d) $2\mu\text{m}$. [1]

家鸽脖颈处羽毛具有如下肉眼观察到的现象, 从几乎垂直的角度看, 呈现绿色; 随着观察的角度不断倾斜, 颜色逐渐变为紫色。由此判断其为一种结构色。SEM 显微镜下观察结果如下图 Fig.1:

仅仅由该扫描图不足以判断是单层膜结构或者有更深层的周期性结构。因为微米尺度下的单层膜, 可能在纳米尺度下表现出周期性结构。以下将论证, 继续放大实际上是没有必要的, 更深层的周期性即使存在, 对结构色也是没有贡献的。

为此, 首先简单回顾一下光子晶体产生结构色的原理[2]。不是所有的电磁波模式都能在周期性的结构中传播, 为了讨论

哪些模式是允许的, 先将麦克斯韦方程组化为关于 \mathbf{H} 场的本征方程式:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\epsilon(\mathbf{r})} \nabla \times \mathbf{H}(\mathbf{r}) \right) = \left(\frac{\omega}{c} \right)^2 \mathbf{H}(\mathbf{r}) \quad (1)$$

由于 $\epsilon(\mathbf{r})$ 的周期性, \mathbf{H} 场同时也是格矢平移算符的本征函数。如果把本征方程(1)对应于量子力学中的薛定谔方程, \mathbf{H} 对应于电子波函数, 则 \mathbf{H} 场也应满足类似于固体物理中的 Bloch 定理, 即 \mathbf{H} 场可以写成一个周期性调幅平面波的形式:

$$\mathbf{H}_{\mathbf{n},\mathbf{k}}(\mathbf{r}) = e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}} \mathbf{u}_{\mathbf{n},\mathbf{k}}(\mathbf{r}) \quad (2)$$

k 代表波矢，被限定在第一布里渊区，它与频率 ω 也同样形成一条条“能带”，由 n 表示能带数，每一条能带中 ω 是 k 的单值函数； $u(r)$ 函数以晶格常数为周期。考虑晶格常数为 a 的一维情况，在第一布里渊区的边界有 $k=\pi/a$ ，此时波长为晶格常数的两倍， H 函数形成一个驻波。在第一能带顶和第二能带底， k 都趋向于 π/a ，但驻波中心分别位于 ϵ 不同的介质中(空晶格中则没有该现象)。导致能量以及频率差，从而光子带隙产生。带隙中，无论 k 取何值 ω 都不存在，换言之带隙中的频率无法在该周期性材料中传播，它们将被完全反射，结构色由此产生。

鸽子羽毛的电镜图中，可以看到对结构色起作用的角质层，其厚度大概在微米量级，假设在其中有更精细的周期性结构，则其晶格常数 a 必须更小，即 $a \ll 1\mu\text{m}$ 。第一布里渊区边界处的 $k=\pi/a$ ，又由 k 与波长的关系 $k=2\pi/\lambda$ ，从而 $\lambda \ll 1\mu\text{m}$ ，可以判断其不在可见光范围内。在更高阶的布里渊区边界上，其光子带隙对应的频率更高，即波长更短，更加不在可见光范围内。从更加物理的角度看，可见光的波长与鸽子羽毛角质层的厚度相当，即使角质层中存在细小的周期型结构，可见光波段完全可以对其“视而不见”，角质层中的周期型结构对可见光不会有任何影响。由以上讨论可以判断，通常看到的鸽子羽毛结构色，不是起源于周期性的光子晶体，而更像是由单层膜引起的。

为说明上述结论，我们分别测量了从 5° 入射角至 65° 入射角情况下的反射谱，从实验数据上论证。实验光路见附录一。回顾一下单层膜结构反射波相干加强的条件：

$$\delta = 2d\sqrt{n_2^2 - n_1^2\sin^2 i} + \delta' \quad (3)$$

$$\delta = k\lambda, k \in Z \quad (4)$$

$$R = \frac{4r^2\sin^2\left(\frac{2\pi d\sqrt{n_2^2 - n_1^2\sin^2 i}}{\lambda}\right)}{(1 - r^2)^2 + 4r^2\sin^2(2\pi d\sqrt{n_2^2 - n_1^2\sin^2 i}/\lambda)} \quad (5)$$

(3)式是光程差计算公式，其中 d 为单层膜厚度， n_2 为膜的折射率， n_1 为空气折射率，此处取为 1， i 为入射角， δ' 为半波损失项。当(4)式满足时，发生干涉加强，(5)为反射比计算公式。通过测量不同角度的反射谱，发现与单层膜结构所具有的性质符合得很好。

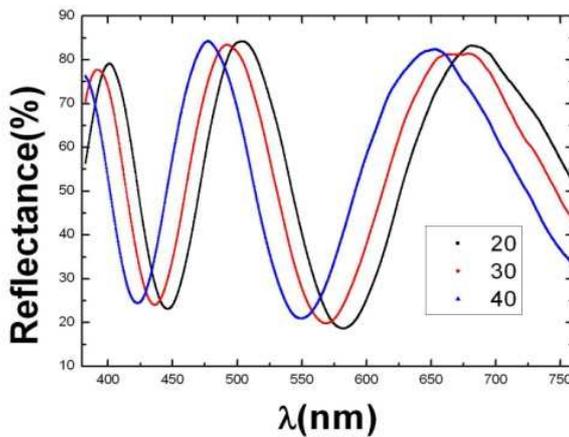


Fig. 2 入射角分别为 20° 、 30° 、 40° 情况下反射谱的对比

图 Fig.2 显示了 20° 、 30° 、 40° 分别对应的反射谱，可以看到峰位置随着角度的增大整体向短波长方向移动，且形状基本不变，这是单层膜结构特有的性质之一。

图 Fig.3 显示了依据单层膜理论所预测的反射峰位置和我们实际得到的反射峰位置的对比。其中单层膜的厚度和折射率我们采用了参考文献[1]中的取值。结果发现实验结果和理论预测结果符合得很好，再次证明鸽子羽毛确实是一种单层膜结构。

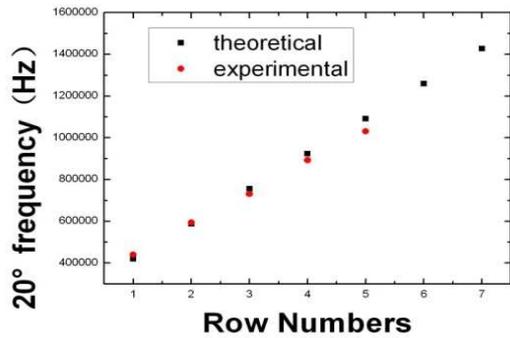


Fig. 3 在20° 入射角下实验测得反射峰位置和理论计算的反射峰位置的比较

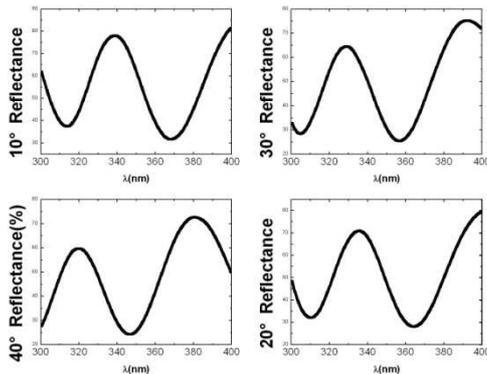


Fig. 4 四个不同角度下紫外波段反射谱

在每一个角度下的反射谱都有一系列的峰，这些峰对应的频率呈线性增加，且其斜率与厚度和折射率有关。可以用此思想推出角质层厚度和折射率，具体计算见附录二。

三. 结果与讨论

以上从实验数据上说明了鸽子羽毛的单层膜性质，以下将讨论这种结构存在的意义。

根据参考文献[3]对鸽子眼睛的颜色敏感性研究，发现与人类完全不同，鸽子对紫外波段的光非常敏感。该文献通过测量鸽子对含有和不含有紫外线的两种刺激的不同反应，得出了上述结论。作者发现在给鸽子以光线刺激时，如果把紫外波段滤掉，鸽子的反应灵敏度会急剧下降。以下将利用该结论说明羽毛单层膜结构对鸽子这种生物的意义。

事实上可以看到，单层膜结构与鸽子对紫外波段的敏感性是有着密切关系的，如图 Fig.4, 该图显示了在 10°、20°、30°、40° 四个角度下，鸽子羽毛在紫外波段的反射谱

可以发现无论角度怎么变化，始终有 1~2 个反射波峰位于此区间，说明鸽子羽毛的这种特定的角质层厚度和折射率保证了在紫外波段的高效率反射，也即鸽子之间可以通过脖颈羽毛的这种颜色互相引起注意，保证了鸽子群体的交流和联络。从而解释了单层膜结构对鸽子的意义。

另外注意到，虽然本实验中的数据很好的验证了单层膜的结构，但是在严格计算其厚度和折射率上误差较大。这可能有多方面的原因：首先光路中的透镜有一定的通透范围，在这个范围外及其边界处，入射光强度已经很小，造成对反射比的测量有较大误差，表现在反射谱上为峰的形状不稳定，散点过多（本文中的图均是光滑之后的结果）；其次由于光纤的输入孔非常狭窄，把光线聚焦进入光纤这一段很难调节，稍微偏差一点就会导致聚焦后的光线打偏导致有部分无法进入光纤。而在转角度时又不可避免的有震动以及拖拽光纤，从而产生误差。再次角质层本身厚度不均匀也会有影响，导致反射峰的分辨率不够好，寻峰时产生误差。为更精确测量角质层厚度和折射率，有如下改进方案：由于反射峰多位于短波长区，可以考虑使用截止频率更短的透镜（同时光源也要做相应调整）。为保证光纤始终能全部进入光纤，应将光纤端口牢固固定在一个二维可调的支架上，方便调节输入孔至透镜焦点处。

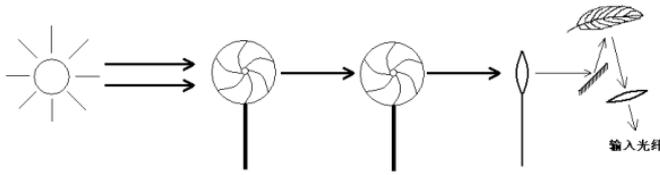
四. 小结

本实验以 SEM 电镜观察图为起点，通过理论论证初步确定了鸽子羽毛应为单层膜结构，接下来通过不同角度的反射谱数据验证单层膜结构，发现理论和实验符合的很好。确定单层膜结构之后，进一步可以看到该种单层膜能够高效率的反射紫外线，而这与鸽子对于紫外线的特殊敏感不谋而合，从而得知此种单层膜对于鸽子种群的有利影响。最后鉴于在实验过程中的实际情况，提出了减小测量误差的几个方案。

致谢

刘晓晗导师，乐永康导师，姜丽萍学姐，董必勤学长

附录一:



左图是简易的光路示意图,光源发出的光首先经过两个光阑,经过透镜聚焦和 45° 平面镜反射后打在样品羽毛上,反射光线经过另一透镜聚焦后被光纤接收然后进入光谱仪进行

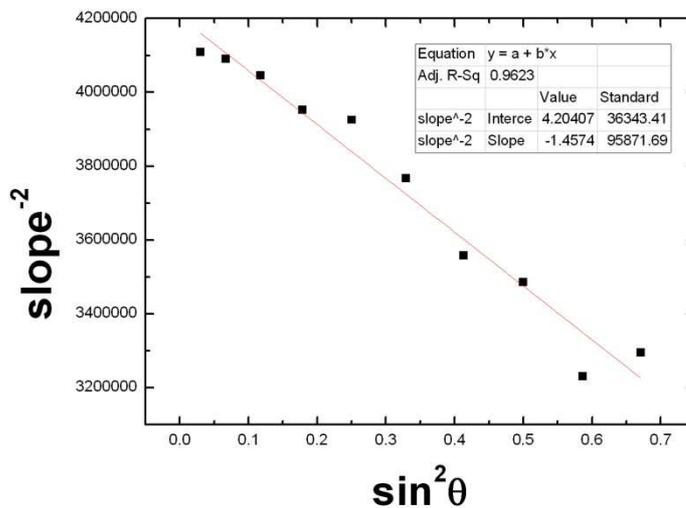
光谱分析。其中光源采用氙光灯,透镜的通透范围为 200nm 至 900nm,调节光路的主要难点在于平面镜 45° 角的调节以及最后透镜聚焦进入光纤。测量反射比之前,我们先把样品换成一块白板,这样测到的谱线作为本底;换上样品后再测到的谱线除以本底就得到反射比。

附录二:

为计算厚度和折射率,把(3)、(4)两式联立,得到波长的倒数 λ^{-1} 与峰序数 k 的线性关系,其斜率为

$$\text{slope} = (2d \sqrt{n_2^2 - \sin^2\theta})^{-1}$$

变换角度得到不同的斜率值,做出 $\sin^2\theta$ 与 slope^{-2} 的线性关系,如下图:



利用该图的拟合得到的斜率和截距,可以计算出 d 和 n_2 的值。经计算, $d \approx 603.6\text{nm}$, $n \approx 1.70$ 。此直线的相关系数 $R^2=0.9623$ 。造成误差的原因:
1. 透镜截止频率导致紫外部分测量不准, slope 的值本身不准。
2. 光线在最后聚焦后未全部进入光纤。
3. 角质层厚度本身不够均匀。

参考文献:

- [1] Jian Zi, Iridescence in the neck feather of domestic pigeons, Physical Review E, vol. 74, Issue 5, id. 051916(2006)
- [2] John D.Joannopoulos, Robert D.Meade, Photonic Crystals(Princeton University Press 2008)
- [3] Anthony A. Wright, The Influence of Ultraviolet Radiation on the Pigeon's Color Discrimination, Journal of the Experimental Analysis of Behavior, 17,325-337(1972)