

用视锥的光纤耦合器理论解释色觉

梁安辉*, 蒙自明

广东工业大学物理与光电工程学院, 广州 510006

* 联系人, E-mail: liangah@gdut.edu.cn

2016-02-26 收稿, 2016-05-15 修回, 2016-05-16 接受, 2016-08-05 网络版发表

国家自然科学基金(81470661)、广东工业大学“百人计划”资金、江苏省“双创”人才项目和江苏省创新团队项目资助

摘要 提出中心凹相邻两视锥细胞的外纤维和内段形成了强耦合区, 构成光纤耦合器, 我们的计算结果证实了这一点. 发现红光和绿光在相邻视锥细胞交叉传输, 黄光跑到相邻细胞而蓝光能量是在两细胞中接近均匀分配. 根据中心凹相邻视锥细胞构成光纤耦合器的理论, 我们统一了争论138年的两个重要色觉学说——三原色说和对立色学说, 找到了对立色学说在视网膜光感受器水平一级的解剖学光学基础, 解决了这个138年的世界性难题. 同时在前人的颜色视觉三阶段学说基础上, 提出了四阶段学说, 发现在两相邻视锥细胞的外纤维和内段形成的强耦合区对不同波长的光进行了选择性预处理, 称之为颜色预处理. 根据红光和绿光在相邻视锥细胞交叉传输的现象, 发现在视网膜的中心凹的外段成正像(即视网膜进行光电转换时为正像), 颠覆了通常认为的眼睛成反像(即视网膜进行光电转换时为反像)的理论. 最后, 解释了中心凹的最中心区(蓝色盲15°视角区)无S视锥细胞的原因是提高空间分辨率.

关键词 视觉, 色觉, 视细胞, 光纤, 光纤耦合器, 颜色, 视网膜

人脑约80%的信息是通过视觉系统获得^[1], 所以视觉在人所有的感觉中起着至关重要的作用, 视觉研究领域至少已有10位诺贝尔奖获得者, 深入理解视觉是解开大脑大部分奥秘的基础. 视网膜上有两类光接收器细胞, 根据外段形状的特点光接收器分为外段呈锥形的视锥细胞(cone), 和外段呈杆状的视杆细胞(rod), 它们负责将入射的光信号转换成电信号. 目前已经有不少研究表明: 视网膜上的光接收器细胞是人体中活的光波导. Enoch^[2]通过观察入射到光接收器细胞外段的光所产生的模式图样, 最先证明光接收器是活的光波导. Snyder等人^[3]采用多模光纤理论研究视锥细胞, 他们发现视锥细胞可以产生斯泰尔丝-克劳福德效应. 1998年, 本文作者Liang^[4]在世界上首先发现人眼视锥细胞外段和内段是单模

光波导, 这种结构使中心凹视锥具有高分辨能力并且对光反应速度快. 前期, 我们的研究表明视锥细胞外段在其几何直径(1 μm)处的模场直径几乎都是曲线上的最小值. 经过长期的进化, 视觉系统结构是非常优化的. 我们发现视觉系统中存在许多的黄金分割点, 2013年Liang等人^[5]在瑞典召开的国际会议PIERS的特邀报告中报道了人眼中5个新的黄金分割点, 并且提出了视杆和视锥新的四段电路模型, 并在世界上首先发现细胞核有电流放大作用, 提出细胞核可能是三极管或者是APD的倍增层. 我们首先提出双极细胞的细胞核为三极管的理论, 这是在生物体中首次提出有三极管存在^[5~8]. 本文作者Liang^[6,7]在邀请报告中报道了不同的领域中新发现的8个黄金分割点. 视觉中众多的黄金分割点不得不让我们惊

引用格式: 梁安辉, 蒙自明. 用视锥的光纤耦合器理论解释色觉. 科学通报, 2016, 61: 2952–2959

Liang A H, Meng Z M. The explanation of color vision based on fiber coupler theory of foveal cones (in Chinese). Chin Sci Bull, 2016, 61: 2952–2959, doi: 10.1360/N972016-00261

叹, 黄金分割背后的机理值得我们深入研究和借鉴. Vohnsen等人^[9,10]和Liang等人^[11]认为光感受器的内段模场主要由基模贡献, 采用基模来分析斯泰尔丝-克劳福德效应, 他们由实验测量结果推得的内段的模场直径与我们前期由光纤结构及折射率算出的模场直径结果相接近.

颜色视觉的理论有很多种, Young-Helmholtz学说(1802年Young提出, 1862年Helmholtz补充)、Hering学说(1878年)和阶段学说是其中较重要的三种学说^[12]. Young-Helmholtz学说又称三色说, 三色说能较充分地解释了颜色的混合现象, 用三元色能产生所有的光谱色. 但其最大的缺点是不能满意地解释色盲和互补色的存在. Hering学说被称为对立色学说或四色学说, 对立学说能够解释色盲总是成对出现的事实, 并可解释红绿色盲产生黄色感觉和颜色后像的现象, 但是其最大缺陷在于对立学说不能满意地解释三原色能产生所有颜色的现象, 并且至今也没有在光感受器水平找到解剖学上的证据. Walraven等人提出色觉的形成是分阶段的, 并提出了颜色视觉的阶段学说, 阶段学说能够将上面提及的三色学说和对立学说融合起来, 是目前接受较多的理论. 但是, 视觉中的颜色拮抗机制, 至今也没有完美的解释.

本文发现在生物体中有光纤耦合器. 以光纤耦合器模型为基础, 我们从理论上研究视网膜中心凹区域相邻两个视锥细胞之间的光耦合特性. 计算结果表明, 在视锥细胞的外纤维和内段构成强耦合区, 主要的现象表现为红光和绿光在相邻视锥细胞间交叉传输, 黄光大部分的能量耦合到相邻的另一个视锥, 蓝光分为两个部分在相邻两个视锥比较均匀地传输. 这些现象的发现能够统一对立了100多年的两个色觉学说——三原色说和对立色学说, 为Hering学说在视网膜光感受器水平一级找到了解剖学基础. 我们发现在视网膜的中心凹的外段成正像(即视网膜进行光电转换时为正像), 并非是通常人们认为的成反像; 我们提出在中心凹的最中心区(15°视角区)是蓝色盲区的原因是提高空间分辨率. 这些结论对揭示颜色拮抗的机理将起到巨大作用, 可能使我们对色盲及色弱的理解和治疗有重要意义.

1 单视锥细胞的光学模型与相邻两视锥细胞的光纤耦合器模型

人眼中两类视细胞, 分别是负责明视的视锥细

胞和负责暗视的视杆细胞. 视锥细胞具有分辨率高、对光反应快、灵敏度低等特点; 而视杆细胞具有分辨率低、对光反应较慢、灵敏度高的特点. 视锥细胞又可细分为3种, 分别是对短波长敏感的视锥细胞(short wavelength sensitive cone, S视锥), 对中波长敏感的视锥细胞(middle wavelength sensitive cone, M视锥)和对长波长敏感的视锥细胞(long wavelength sensitive cone, L视锥). L, M和S三种视锥细胞的峰值吸收波长分别为564, 534和420 nm^[12].

早期对视细胞光学模型的研究只分为三段, 即肌样体、椭球体和外段^[3], 我们将视细胞在光学上分为五段, 其五段光学模型如图1所示. 视细胞的五段分别为细胞核、外纤维、肌样体、椭球体和外段. 人眼视网膜黄斑区域的中心凹部位是视觉最敏锐的部分, 在中心凹内只有视锥细胞, 无视杆细胞. 因此, 我们重点研究视锥细胞的光学特性.

根据文献, 中心凹视锥细胞外纤维直径约为1.6~2 μm , 内段的直径约为1.88~2 μm , 外段的直径约为1 μm ^[13,14]; 其外纤维、肌样体、椭球体、外段及周围介质的折射率分别约为1.36, 1.36, 1.39, 1.385和1.3476^[15,16]. 中心凹相邻视锥细胞的芯间距约为2~2.3 μm ^[17]. 我们前期的研究表明, 视锥细胞外段的模场直径与其几何直径相当, 并且非常接近模场直径曲线的最小值, 使得外段的光互扰比较小, 有利于提高空间分辨率^[11]. 然而, 肌样体和外纤维的模场直径约为2.05~2.46 μm ^[11], 与相邻视锥细胞的芯间距相当, 这将导致一个视锥细胞外纤维和内段部分与相邻的另一个视锥细胞的外纤维和内段部分之间有强烈的耦合(光互扰), 形成一个强耦合区. 我们认为颜色拮抗机制是受到视锥细胞外纤维和内段部分的波导耦合特性的很大影响(详细计算请看下一节).

视锥细胞外纤维和内段的光耦合作用类似于光

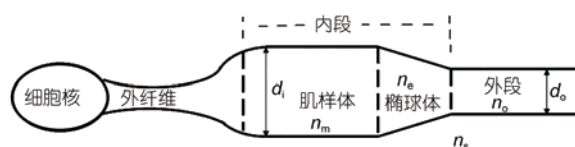


图1 视细胞的五段光学模型. d_i 和 d_o 分别是视细胞内段和外段的几何直径, n_m , n_e , n_o 及 n_s 分别是肌样体、椭球体、外段及细胞外围(相当于包层)的折射率

Figure 1 Five-section optical model of photoreceptors. d_i and d_o are geometrical diameters of inner segment and outer segment, respectively. n_m , n_e , n_o and n_s are refractive indexes of myoid, ellipsoid, outer-segment and surrounding medium (cladding), respectively

通信系统中广泛使用的光纤耦合器^[18,19]. 在光纤传输系统中用光纤耦合器把多根光纤传输的光信号耦合进一根光纤或将一路光信号分成几路, 并对各路的光功率分配比例有明确的要求, 它是光纤通信系统中的一种重要的无源器件. 因此, 我们利用光纤耦合器模型来研究相邻两个视锥细胞之间的光耦合特性, 图2是一个2×2四端口光纤耦合器的示意图.

2 双视锥细胞间光功率耦合的研究

光纤耦合器是光纤通信系统中的重要无源器件, 可以实现光信号分路/合路的功能, 一般是对同一波长的光功率进行分路或合路. 对它的基本原理已经有大量的文献和专著进行报道^[20]. 对于圆柱形的单模光纤, 在纤芯折射率 n_1 仅仅略大于包层折射率 n_2 的条件下, 相邻两根光纤间的耦合系数 C 可以近似为以下公式^[21]:

$$C = \frac{\sqrt{\delta} U^2 K_0[W(\Delta d/\rho)]}{\rho V^3 K_1^2(W)}, \quad (1)$$

其中 V 是无量纲的归一化频率, 由下式给出:

$$V^2 = \left(\frac{2\pi\rho n_1}{\lambda} \right)^2 \delta, \quad (2)$$

$$= U^2 + W^2,$$

纤芯半径为 ρ , λ 为光在真空中的波长, 而 δ 定义为

$$\delta = 1 - \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2. \quad (3)$$

通过求解如下 HE_{11} 模的特征方程, 参量 U 可以被确定:

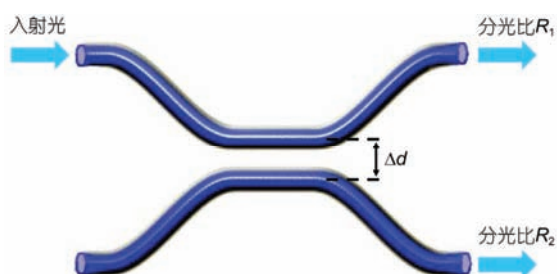


图2 光纤耦合器的示意图. Δd 是相邻两根光纤纤芯的间距, R_1 和 R_2 分别为相邻两根光纤的分光比

Figure 2 Schematic diagram of fiber couplers. Δd is the center distance between two neighbored fibers. R_1 and R_2 are splitting ratios of the transmitted port and coupled port, respectively

$$UK_0(W)J_1(U) = WK_1(W)J_0(U), \quad (4)$$

式中, $J_p(x)$ 是 p 阶贝塞尔函数, $K_q(x)$ 是 q 阶的第二类变型贝塞尔函数. 在公式(4)中, p 和 q 的取值为0或1.

通过联合公式(1)~(4)可以确定耦合系数 C . 于是, 相邻两根光纤的分光比可以通过公式计算:

$$R_1 = \cos^2(Cl), \quad (5)$$

$$R_2 = \sin^2(Cl), \quad (6)$$

其中 l 为光纤耦合器耦合区的长度.

因为不同年龄的中心凹视锥细胞的尺寸和长度会存在差异^[14], 所以选取成人的视细胞的尺寸和长度作为计算依据. 前期通过计算视锥细胞外段的模场直径发现外段的光互扰或者光耦合比较弱, 所以本文主要分析外纤维和内段部分的光耦合特性. 人们通常认为光吸收或者光电转换是发生在视锥细胞的外段部分^[15,22], 而通常认为外纤维和内段部分光吸收很弱. 所以, 在计算模型中, 并没有考虑外纤维和内段部分的折射率的虚部. 分段计算视锥细胞不同部分的光功率耦合情况. 首先, 计算外纤维部分的分光比. 外纤维的直径为 $d_{out}=2\ \mu\text{m}$ 或者 $1.6\ \mu\text{m}$, 相邻两个外纤维中心间距取 $\Delta d=2.1\ \mu\text{m}$, 外纤维的长度 l_{out} 约为 $80\sim 100\ \mu\text{m}$ ^[23]. 假设最初光功率从其中一个视锥细胞入射(结构的示意图如图2). 外纤维的参数分别取 $d_{out}=2\ \mu\text{m}$, $l_{out}=80\ \mu\text{m}$; $d_{out}=2\ \mu\text{m}$, $l_{out}=100\ \mu\text{m}$; $d_{out}=1.6\ \mu\text{m}$, $l_{out}=100\ \mu\text{m}$, 计算的结果如图3所示. 从计算结果可以清楚表明两视锥细胞间有很强光功率耦合. 其中在图3(a), 对于 $437\ \text{nm}$ 波长分光比约为0.5, 这种现象非常类似于在光纤通讯中大量应用的3 dB耦合器.

然后, 计算肌样体部分和椭球体部分的分光比. 根据不同年龄群体的内段的截面尺寸和长度存在差异^[14], 肌样体的直径 d_{myo} 、芯间距 Δd 和长度 l_{myo} 分别取 $d_{myo}=2\ \mu\text{m}$, $\Delta d=2.1\ \mu\text{m}$, $l_{myo}=16\ \mu\text{m}$; $d_{myo}=2\ \mu\text{m}$, $\Delta d=2.1\ \mu\text{m}$, $l_{myo}=11\ \mu\text{m}$; $d_{myo}=1.88\ \mu\text{m}$, $\Delta d=2.1\ \mu\text{m}$, $l_{myo}=16\ \mu\text{m}$; $d_{myo}=2.2\ \mu\text{m}$, $\Delta d=2.3\ \mu\text{m}$, $l_{myo}=11\ \mu\text{m}$. 椭球体的直径 d_{ell} 、芯间距 Δd 和长度 l_{ell} 分别取 $d_{ell}=2\ \mu\text{m}$, $\Delta d=2.1\ \mu\text{m}$, $l_{ell}=20\ \mu\text{m}$; $d_{ell}=2\ \mu\text{m}$, $\Delta d=2.1\ \mu\text{m}$, $l_{ell}=14\ \mu\text{m}$; $d_{ell}=1.88\ \mu\text{m}$, $\Delta d=2.1\ \mu\text{m}$, $l_{ell}=20\ \mu\text{m}$; $d_{ell}=2.2\ \mu\text{m}$, $\Delta d=2.3\ \mu\text{m}$, $l_{ell}=14\ \mu\text{m}$. 计算结果如图4和5. 对于肌样体和椭球体的分光比, 计算结果表明取不同的直径和长度光功率耦合情况差别不大.

在前面的计算中, 已经得到了相邻两个视锥细胞的外纤维、肌样体和椭球体各段独立时的分光比,

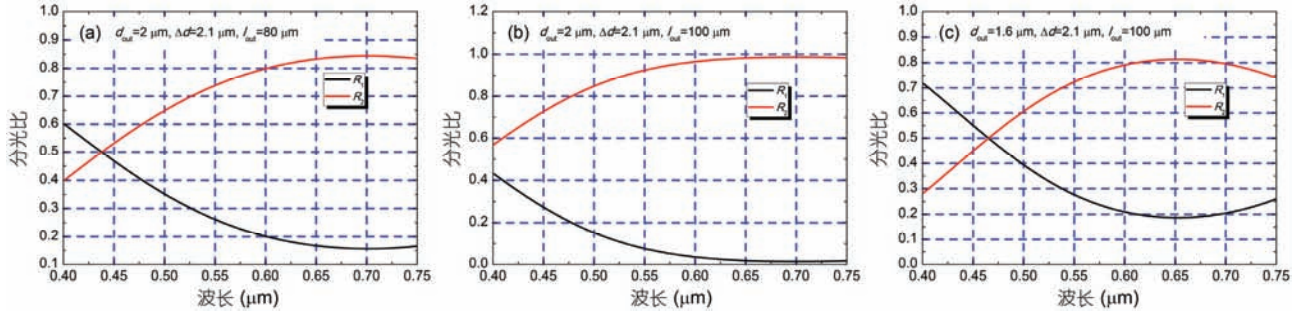


图3 不同长度和直径的外纤维光功率耦合情况. (a) $d_{out}=2 \mu m$, $l_{out}=80 \mu m$; (b) $d_{out}=2 \mu m$, $l_{out}=100 \mu m$; (c) $d_{out}=1.6 \mu m$, $l_{out}=100 \mu m$

Figure 3 Wavelength dependence of splitting ratios of outer fibers with different lengths and diameters. (a) $d_{out}=2 \mu m$, $l_{out}=80 \mu m$; (b) $d_{out}=2 \mu m$, $l_{out}=100 \mu m$; (c) $d_{out}=1.6 \mu m$, $l_{out}=100 \mu m$

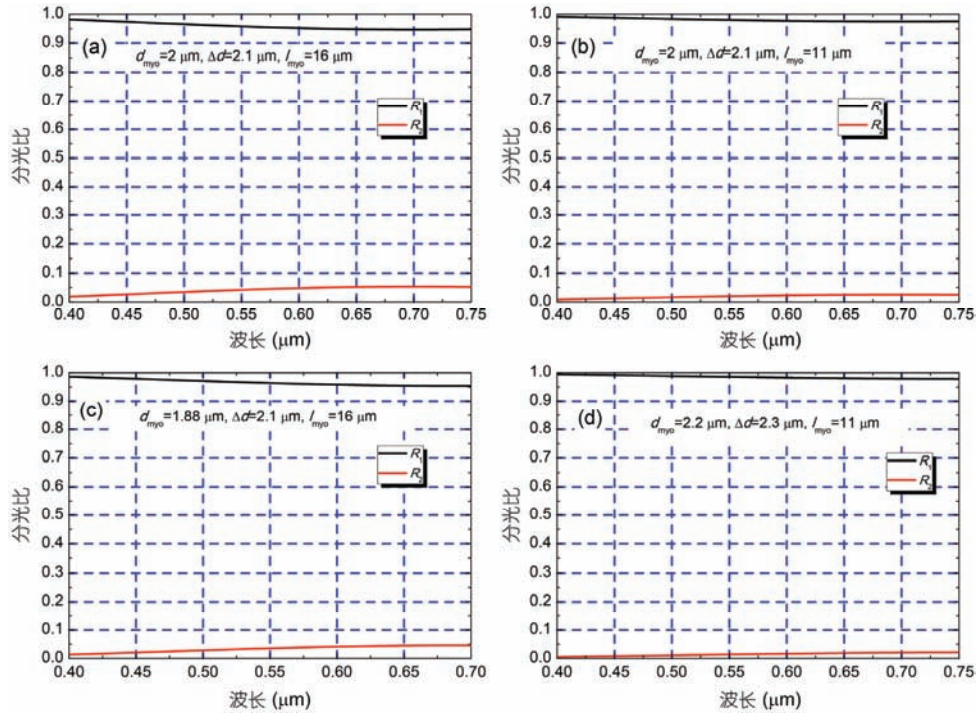


图4 不同长度和直径的肌样体光功率耦合情况. (a) $d_{myoid}=2 \mu m$, $\Delta d=2.1 \mu m$, $l_{myoid}=16 \mu m$; (b) $d_{myoid}=2 \mu m$, $\Delta d=2.1 \mu m$, $l_{myoid}=11 \mu m$; (c) $d_{myoid}=1.88 \mu m$, $\Delta d=2.1 \mu m$, $l_{myoid}=16 \mu m$; (d) $d_{myoid}=2.2 \mu m$, $\Delta d=2.3 \mu m$, $l_{myoid}=11 \mu m$

Figure 4 Wavelength dependence of splitting ratios of myoid with different lengths and diameters. (a) $d_{myoid}=2 \mu m$, $\Delta d=2.1 \mu m$, $l_{myoid}=16 \mu m$; (b) $d_{myoid}=2 \mu m$, $\Delta d=2.1 \mu m$, $l_{myoid}=11 \mu m$; (c) $d_{myoid}=1.88 \mu m$, $\Delta d=2.1 \mu m$, $l_{myoid}=16 \mu m$; (d) $d_{myoid}=2.2 \mu m$, $\Delta d=2.3 \mu m$, $l_{myoid}=11 \mu m$

接下来, 需要计算相邻两个视锥细胞内段部分(肌样体和椭球体)的分光比, 以及外纤维和内段的总分光比. 在不考虑外纤维与肌样体之间的耦合损耗, 肌样体和椭球体之间的耦合损耗的前提下, 根据外纤维、肌样体和椭球体在视锥细胞中的位置, 结合图3~5的计算结果, 可以计算内段部分的分光比以及外纤维和内段的总分光比. 图6显示的是内段部分的分光比, 计算的参数分别取 $l_{myoid}=16 \mu m$, $l_{ell}=20 \mu m$, $d_{myoid}=2 \mu m$, $d_{ell}=2 \mu m$, $\Delta d=2.1 \mu m$ 和 $l_{myoid}=11 \mu m$, $l_{ell}=14 \mu m$, $d_{myoid}=2.2 \mu m$, $d_{ell}=2.2 \mu m$, $\Delta d=2.3 \mu m$. 视锥细胞外纤维和内段的参数分别取 $l_{out}=80 \mu m$ 或者 $100 \mu m$, $l_{myoid}=16 \mu m$, $l_{ell}=20 \mu m$, $d_{out}=2 \mu m$, $d_{myoid}=2 \mu m$, $d_{ell}=2 \mu m$, $\Delta d=2.1 \mu m$, 计算结果如图7.

2.2 μm , $d_{ell}=2.2 \mu m$, $\Delta d=2.3 \mu m$. 视锥细胞外纤维和内段的参数分别取 $l_{out}=80 \mu m$ 或者 $100 \mu m$, $l_{myoid}=16 \mu m$, $l_{ell}=20 \mu m$, $d_{out}=2 \mu m$, $d_{myoid}=2 \mu m$, $d_{ell}=2 \mu m$, $\Delta d=2.1 \mu m$, 计算结果如图7.

3 讨论和结论

通过分析计算结果(图7), 发现红光和绿光在相邻视锥中基本上是交叉传播(图8(b)), 黄光从一个视锥入射大部分的能量将传到相邻的另一个视锥(图8(c)),

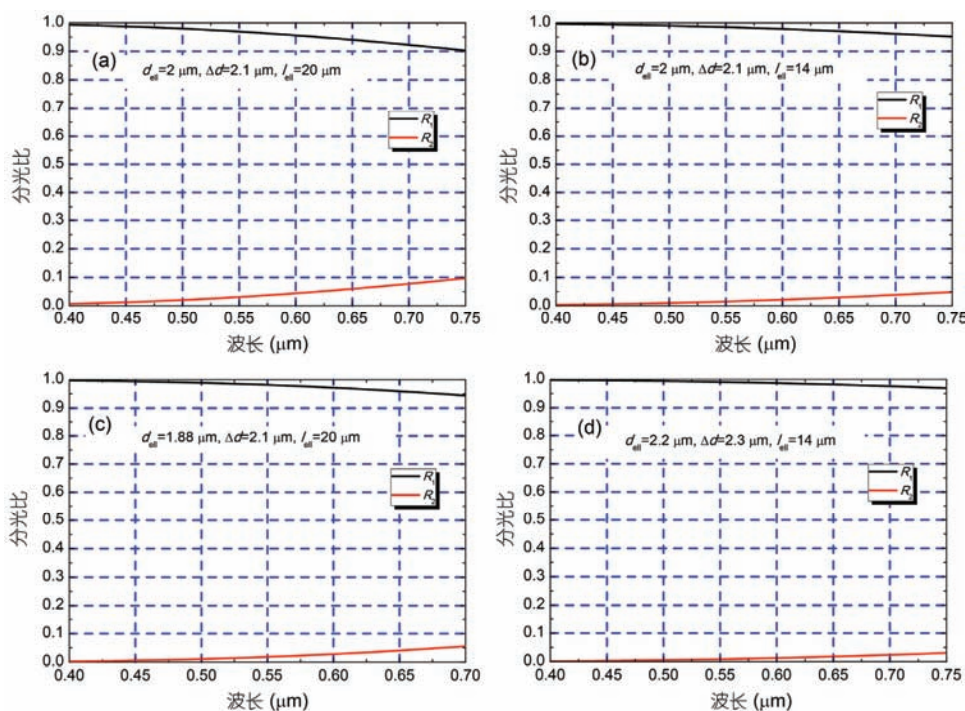


图5 不同直径和长度的椭球体光功率耦合情况. (a) $d_{\text{ell}}=2 \mu\text{m}$, $\Delta d=2.1 \mu\text{m}$, $l_{\text{ell}}=20 \mu\text{m}$; (b) $d_{\text{ell}}=2 \mu\text{m}$, $\Delta d=2.1 \mu\text{m}$, $l_{\text{ell}}=14 \mu\text{m}$; (c) $d_{\text{ell}}=1.88 \mu\text{m}$, $\Delta d=2.1 \mu\text{m}$, $l_{\text{ell}}=20 \mu\text{m}$; (d) $d_{\text{ell}}=2.2 \mu\text{m}$, $\Delta d=2.3 \mu\text{m}$, $l_{\text{ell}}=14 \mu\text{m}$

Figure 5 Wavelength dependence of splitting ratios of ellipsoid with different lengths and diameters. (a) $d_{\text{ell}}=2 \mu\text{m}$, $\Delta d=2.1 \mu\text{m}$, $l_{\text{ell}}=20 \mu\text{m}$; (b) $d_{\text{ell}}=2 \mu\text{m}$, $\Delta d=2.1 \mu\text{m}$, $l_{\text{ell}}=14 \mu\text{m}$; (c) $d_{\text{ell}}=1.88 \mu\text{m}$, $\Delta d=2.1 \mu\text{m}$, $l_{\text{ell}}=20 \mu\text{m}$; (d) $d_{\text{ell}}=2.2 \mu\text{m}$, $\Delta d=2.3 \mu\text{m}$, $l_{\text{ell}}=14 \mu\text{m}$

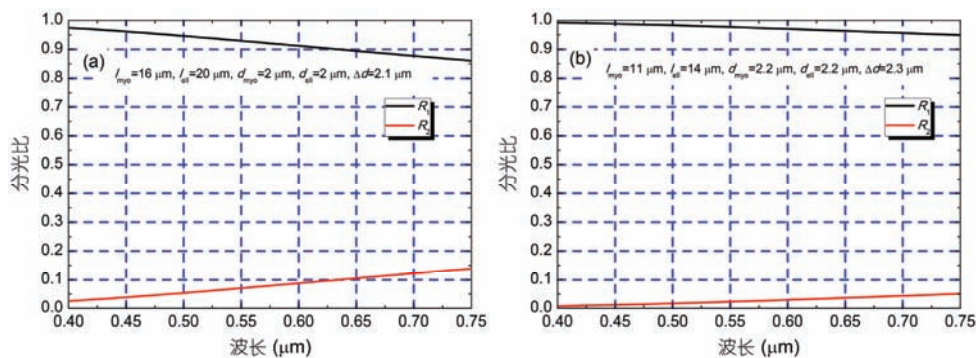


图6 两相邻视锥细胞的内段部分的光功率耦合情况. (a) $l_{\text{myo}}=16 \mu\text{m}$, $l_{\text{ell}}=20 \mu\text{m}$, $d_{\text{myo}}=2 \mu\text{m}$, $d_{\text{ell}}=2 \mu\text{m}$, $\Delta d=2.1 \mu\text{m}$; (b) $l_{\text{myo}}=11 \mu\text{m}$, $l_{\text{ell}}=14 \mu\text{m}$, $d_{\text{myo}}=2.2 \mu\text{m}$, $d_{\text{ell}}=2.2 \mu\text{m}$, $\Delta d=2.3 \mu\text{m}$

Figure 6 Wavelength dependence of splitting ratios of inner segment. (a) $l_{\text{myo}}=16 \mu\text{m}$, $l_{\text{ell}}=20 \mu\text{m}$, $d_{\text{myo}}=2 \mu\text{m}$, $d_{\text{ell}}=2 \mu\text{m}$, $\Delta d=2.1 \mu\text{m}$; (b) $l_{\text{myo}}=11 \mu\text{m}$, $l_{\text{ell}}=14 \mu\text{m}$, $d_{\text{myo}}=2.2 \mu\text{m}$, $d_{\text{ell}}=2.2 \mu\text{m}$, $\Delta d=2.3 \mu\text{m}$

蓝光在相邻两个视锥中比较均匀的传播(相当于3 dB耦合器, 见图8(c)). 这些现象与我们对红光和绿光在L视锥和M视锥的传播的传统认识有很大的区别(图8(a)).

从以上的计算结果分析, 可以得到以下3点重要的结论:

(1) 我们首先发现了中心凹相邻视锥是光纤耦

合器, 这一发现统一对立了100多年的两个色觉学说——三原色说和对立色学说. 相邻视锥光耦合对入射光波长产生的选择性(红光和绿光在相邻视锥细胞间交叉传输; 黄光大部分的能量耦合到相邻的另一个视锥; 蓝光分为两个部分在相邻两个视锥比较均匀地传输), 我们认为这就是Hering学说在视网膜光感受器水平一级的解剖学光学基础. 我们提出在颜色

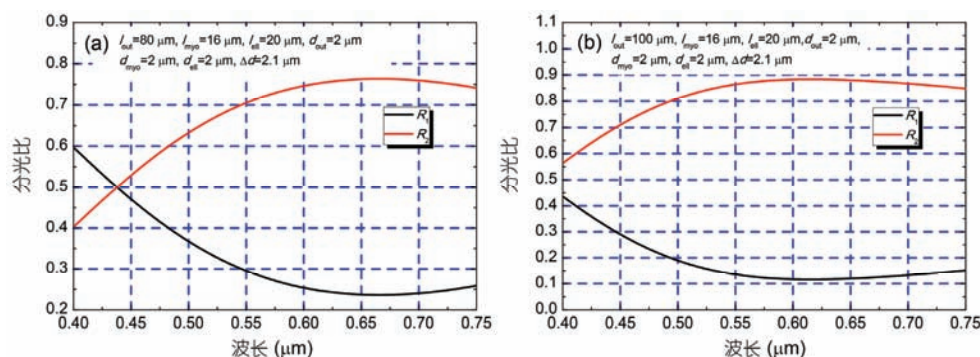


图7 两相邻视锥细胞的外纤维和内段部分的总的光功率耦合情况. (a) $l_{myoe}=16 \mu\text{m}$, $l_{eli}=20 \mu\text{m}$, $d_{out}=2 \mu\text{m}$, $d_{myoe}=2 \mu\text{m}$, $d_{eli}=2 \mu\text{m}$, $\Delta d=2.1 \mu\text{m}$, $l_{out}=80 \mu\text{m}$; (b) $l_{myoe}=16 \mu\text{m}$, $l_{eli}=20 \mu\text{m}$, $d_{out}=2 \mu\text{m}$, $d_{myoe}=2 \mu\text{m}$, $d_{eli}=2 \mu\text{m}$, $\Delta d=2.1 \mu\text{m}$, $l_{out}=100 \mu\text{m}$

Figure 7 Wavelength dependence of overall splitting ratios of outer fiber and inner segment. (a) $l_{myoe}=16 \mu\text{m}$, $l_{eli}=20 \mu\text{m}$, $d_{out}=2 \mu\text{m}$, $d_{myoe}=2 \mu\text{m}$, $d_{eli}=2 \mu\text{m}$, $\Delta d=2.1 \mu\text{m}$, $l_{out}=80 \mu\text{m}$; (b) $l_{myoe}=16 \mu\text{m}$, $l_{eli}=20 \mu\text{m}$, $d_{out}=2 \mu\text{m}$, $d_{myoe}=2 \mu\text{m}$, $d_{eli}=2 \mu\text{m}$, $\Delta d=2.1 \mu\text{m}$, $l_{out}=100 \mu\text{m}$

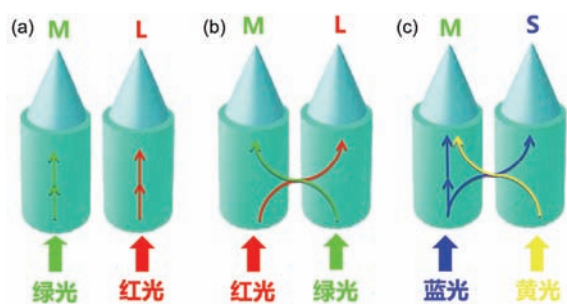


图8 红光、绿光、蓝光在相邻视锥中传播的示意图. L, M, S分别表示L视锥、M视锥、S视锥. (a) 红光和绿光在L视锥和M视锥中传播的传统认识的示意图; (b) 红光和绿光在相邻视锥中交叉传输的示意图; (c) 黄光大部分的能量将耦合到相邻的视锥, 蓝光在相邻两个视锥中比较均匀的传输的示意图

Figure 8 Schematic diagram of light propagating pathway between two neighbored cones. L, M, and S represent the L, M, and S cones. (a) The red and green colors propagate independently in two individual cones; (b) the red and green light exchange energy almost completely between two adjacent cones; (c) the most of the energy of a yellow light couples into the adjacent cone's outer-segment. The blue light is divided equally into two parts in the two adjacent cones' outer-segments approximately

视觉阶段学说的三个阶段发生之前^[12], 波长相关性的强耦合已经发生作用, 颜色视觉阶段学说应该分为四个阶段, 如图9(b)所示.

(2) 根据红光和绿光在相邻两个视锥细胞间的交叉传输的特点, 在视觉成像方面, 可以发现由于视锥光纤耦合器的原因, 红光和绿光在相邻视锥中交叉传播, 在视网膜的中心凹的外段成正像(即视网膜进行光电转换时为正像), 示意图如图10. 颠覆了通常认为的眼睛成反像(即视网膜进行光电转换时为反像)的理论.

(3) 根据蓝光在相邻两个视锥细胞间均匀传播, 可以解释在中心凹的最中心区(蓝色盲15'视角区)无S视锥细胞的原因是提高空间分辨率. 因为蓝光经过两相邻视锥时, 在椭球体出口处功率基本上平分, 这样会导致无法从光电转换的电信号中准确判断蓝光是从哪个视锥细胞进来的.

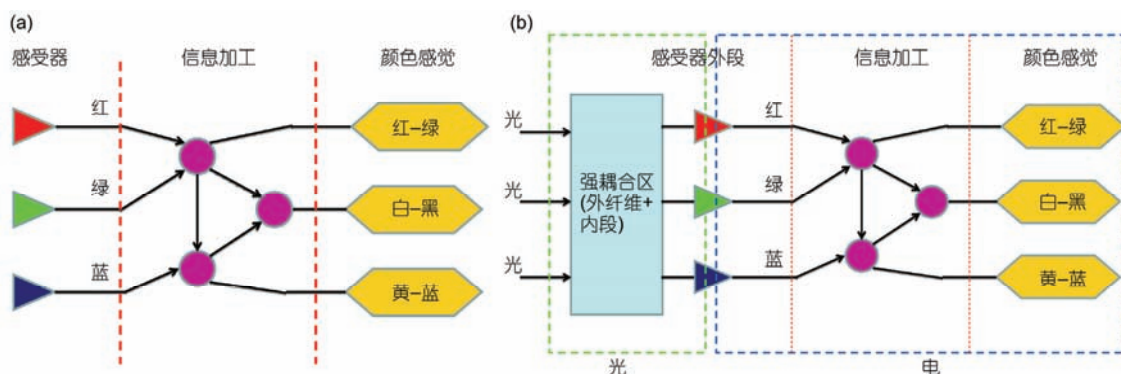


图9 (a) 传统的颜色视觉阶段学说的示意图; (b) 颜色视觉阶段学说的四阶段示意图

Figure 9 (a) Schematic diagram of traditional three-stages theory of color vision; (b) schematic diagram of our proposed four-stages theory of color vision



图10 在视网膜中心凹的外段成正像的原理示意图

Figure 10 Schematic diagram of formation of erect image in the two neighbored foveal cones' outer-segments

本文提出了中心凹相邻两视锥细胞的外纤维和内段形成了强耦合区, 构成光纤耦合器, 我们的计算结果证实了这一点. 根据中心凹相邻视锥细胞强光耦合现象, 可以统一对立了100多年的两个色觉学说——三原色说和对立色学说, 找到了Hering学说在视

网膜光感受器水平一级的解剖学光学基础. 同时, 在前人的颜色视觉三阶段学说基础上我们提出四阶段学说; 根据红光和绿光在相邻视锥细胞交叉传输的现象, 提出在视网膜的中心凹的外段成正像(即视网膜进行光电转换时为正像), 颠覆了通常认为的眼睛成反像(即视网膜进行光电转换时为反像)的理论. 中心凹的最中心区(蓝色盲15'视角区)无S视锥细胞, 这样可提高空间分辨率. 如果有S视锥, 因为我们发现蓝光在两个相邻视锥细胞几乎均匀传播, 这样会导致人无法从两个视锥光电转换后的电信号来判断光是从哪个视锥入射的, 从而导致空间分辨率的降低.

参考文献

- Sharma R K, Ehinger B E. *Adler's Physiology of the Eye*. St Louis: Mosby, 2003
- Enoch J M. Visualization of waveguide modes in retina receptors. *Am J Ophthalmol*, 1961, 51: 1107–1118
- Snyder A W, Pask C. The Stiles-Crawford effect-explanation and consequences. *Vision Res*, 1973, 13: 1115–1137
- Liang A H. Photoreceptors of animals are quantum-well detectors. In: *Proceedings of The Japan Society of Applied Physics 59th Autumn Meeting Japan*. Higashihiroshima: The Japan Society of Applied Physics, 1998
- Liang A H, Hu L T. Novel optical waveguide theory and novel electrical circuit theory of photoreceptors in the human retina. In: *Progress in Electromagnetics Research Symposium*. Stockholm, 2013. Session 2P3
- Liang A H. New golden ratio points in several new fields. In: *Proceedings of Laser and Optoelectronics Conference*. Suzhou, 2015
- Liang A H. Golden ratio points in human color vision and golden ratio periodic table on temperature. In: *Proceedings of the 8th International Symposium on Photonics and Optoelectronics*. Shanghai: SOPO, 2015
- Liang A H. Optical fibers in human body and optical communication bionics. In: *Proceedings of The 23rd Wireless and Optical Communication Conference (WOCC) Invited Talk*. Newark: WOCC, 2014
- Vohnsen B, Iglesias I, Artal P. Guided light and diffraction model of human-eye photoreceptors. *J Opt Soc Am A*, 2005, 22: 2318–2328
- Vohnsen B. Photoreceptor waveguides and effective retinal image quality. *J Opt Soc Am A*, 2007, 24: 597–607
- Liang A H, Hu L T, Liang Z M. Mode-field-diameter and the coupling loss between inner and outer segment of photoreceptors. *Opt Photonics J*, 2015, 5: 151–160
- Liu X L. *Visual Neurophysiology* (in Chinese). Beijing: People's Medical Publishing House, 2011 [刘晓玲. 视觉神经生理学. 北京: 人民卫生出版社, 2011]
- Hsu A, Tsukamoto Y, Smith R G, et al. Functional architecture of primate cone and rod axons. *Vision Res*, 1998, 38: 2539–2549
- Yuodelis C, Hendrickson A. A qualitative and quantitative analysis of the human fovea during development. *Vision Res*, 1986, 26: 847–855
- Sidman R L. The structure and concentration of solids in photoreceptor cells studied by refractometry and interference microscopy. *J Biophys Biochem Cytol*, 1957, 3: 15–30
- Enoch J M, Tobey Jr F T. Use of the waveguide parameter V to determine the difference in the index of refraction between the rat rod outer segment and the interstitial matrix. *J Opt Soc Am*, 1978, 68: 1130–1134
- O'Brien B. Vision and resolution in the central retina. *J Opt Soc Am*, 1951, 41: 882–894
- Chen Y, Joines W T. Enhanced WDM performance using curved waveguide couplers. *Opt Commun*, 2003, 228: 319–330
- Ibrahim M H, Lee S Y, Chin M K, et al. Multimode interference wavelength multi/demultiplexer for 1310 and 1550 nm operation based on BCB 4024-40 photo-definable polymer. *Opt Commun*, 2007, 273: 383–388
- Yang X L, Meng Y, Cai X B, et al. *Fiber Communication Systems* (in Chinese). Beijing: National Defense Industry Press, 2009 [杨祥林, 孟宇, 蔡祥宝, 等. 光纤通信系统. 北京: 国防工业出版社, 2009]
- Cheng B T, Lu X H. Analysis of power transfer characteristics among many parallel optical fibers (in Chinese). *Acta Photon Sin*, 2006, 35: 29–32 [程波涛, 陆璇辉. 多根平行光纤的功率转移特性分析. 光子学报, 2006, 35: 29–32]
- Brown P K, Wald G. Visual pigments in single rods and cones of the human retina. *Science*, 1964, 144: 45–52
- Yamada E. Some structural features of the fovea centralis in the human retina. *Arch Ophthalmol-Chic*, 1969, 82: 151–159

The explanation of color vision based on fiber coupler theory of foveal cones

LIANG AnHui & MENG ZiMing

School of Physics and Optoelectronic Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China

In this paper, we first propose that there is strong optical coupling between the two outer-fibers and inner segments of two adjacent foveal cones, and our simulation proves our new fiber coupler theory of foveal cones. This is the first discovery of fiber couplers in biological bodies. It is found that a red and a green light exchange energy almost completely between two adjacent cones; the most of the energy of a yellow light couples into the adjacent cone's outer-segment. However, the energy of a blue light is divided equally into two parts in the two adjacent cones' outer-segments approximately. By using the optical coupler theory, we unify the two important color vision theories (the trichromatic theory of vision and the opponent color theory), which have been controversial over 138 years. We find the anatomic basis of the opponent color theory on the retina photoreceptor level, and we solve this world class difficult problem lasting for 138 years. When a light enters the outer fiber and inner segment of adjacent cones, the wavelength dependent optical coupling occurs. We call the strong optical coupling region as the color preprocessing stage. By adding the color preprocessing stage, we first propose the four stage theory for color vision based on the traditional three stages (stage theory). According to our new discovery on the crossover behavior of red and green light in the two neighbor red and green cones, we first propose that an erect image is formed in the two neighbor foveal cones' outer-segments where the photoelectric conversion processes, and this new phenomena overturns the traditional knowledge of that an inverted image is formed in the two neighbor foveal cones' outer-segments. Finally, by considering the blue light behavior in the coupling process, we propose that the reason for the absence of S-cones in the very central region (15' blue blinded region) of the central fovea is to increase the spatial resolution.

vision, color vision, photoreceptors, fiber, fiber coupler, color, retina

doi: 10.1360/N972016-00261