

平板型复眼透镜的综合成象原理*

中国科学院生物物理研究所
昆虫复眼光学信息加工组

一、引言

根据复眼成象理论的研究, S. Exner^[1] 于 1891 年首次指出, 重叠型复眼小眼屈光器的屈光作用, 不仅是由于它的端面为球面, 而且由于其特定的折射率分布。这种分布是 K. Exner^[2] 1886 年研究不均匀光学介质圆柱体时提出的。它的折射率随着距圆柱轴心距离的平方递减, 呈抛物线状分布。S. Exner 把角膜晶体和晶锥的总体称为晶体柱。Hausen (1971^[3], 1973^[4]), Horridge^[5] (1972) 以地中海粉螟蛾 (*Ephestia Kähniella*) 为材料测量了晶锥折射率的变化, 得出了与 S. Exner 相同的结论。

在工程技术领域, Uchida^[6] 于 1969 年首次报道, 用离子交换的方法, 可以使含铈玻璃纤维的折射率具有抛物线型的分布, 这与 S. Exner 晶体柱的模型一致。这就为复眼屈光系统的模拟提供了物质条件。

本文简述了关于萤火虫屈光系统的研究结果, 并根据其综合成象原理, 推导了由柱状变折射率光学元件组成的列阵形成放大率为 1 的综合象的条件, 并采用自聚焦纤维构成了综合成象的平板型复眼透镜。

二、复眼综合成象原理

某些节肢动物的复眼, 具有透明带。这种复眼可将许多小眼形成的物象叠加综合起来, 即所说的综合成象^[7]。我们以北京萤火虫 (*Pyrocoelia pekinensis*) 为材料, 通过组织学和实验光学的方法, 研究其综合成象原理。关于北京萤火虫复眼晶体柱的结构、光学特性和成象特

点, 在《北京萤火虫复眼晶体柱的光学特性》^[8] 一文中已有详细叙述。

萤火虫复眼由四千多个小眼组成, 排列成小六角形的阵列。每个小眼都有自己的屈光系统, 由角膜晶体和晶锥构成, 二者的总体称为晶体柱, 是成象的光学系统。

萤火虫晶体柱的折射率是不均匀的, 呈轴对称分布。轴上折射率高, 约为 1.52, 边缘折射率低, 约为 1.35。

在萤火虫晶体柱阵列之后, 可以观察到综合的正立实象(图 1, 见封二图 7)。其所以能够形成综合象, 是由于晶体柱具有弯曲光线的能力, 能把入射光线折弯而使其在小眼光轴同侧的方向出射; 每个晶体柱都能形成一个小的正

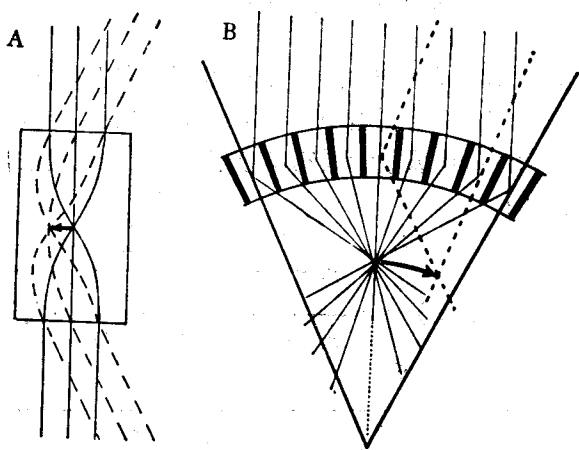


图 2 萤火虫晶体柱阵列综合成象原理

* 在平板型复眼透镜的研制过程中, 得到了中国科学院福建物质结构研究所光学纤维组的大力支持, 尤其是他们为本工作提供了含铈玻璃丝, 特此表示感谢。

立的目标象;聚焦性能良好的复眼,光线的入射角与出射角的比值接近于 1, 此时每个小眼形成的正立象可以叠加在一起, 形成较大的正立的综合象(见图 2)。

三、柱状变折射率元件的成象特性

萤火虫的晶体柱可看作锥度为 k 的锥状变折射率元件, 它和柱状自聚焦纤维有相似的光学特性。当锥度 k 趋于零时, 其极限与 Felix P. Kapron^[9] 提出的柱状自聚焦纤维几何光学的结果一致。

作为对复眼综合成象的模拟研究, 我们首先采用柱状变折射率元件构成了综合成象的平板型复眼透镜。

1. 柱状变折射率元件的几何光学

根据高斯光学的观点, 对于单个柱状变折射率元件(见图 3), 假设物空间的座标原点 O_1 取在入瞳面与光轴的交点处, 象空间的座标原点 O_2 , 取在出瞳面与光轴交点处。若 n_1 为物空间的折射率, n_2 为象空间的折射率, 柱状变折射率元件轴上的折射率为常数 n_0 , 则径向折射率分布为:

$$n(x) = n_0 \left(1 - \frac{1}{2} A x^2 \right)$$

式中 A 为柱状变折射率元件的折射率分布常数。若座标为 (Z_1, X_1) 的物空间近轴目标点, 在象空间中成象于 (Z_2, X_2) 点, 则其物象关系如下:

$$Z_2(Z_1, X_1) = n_2 \frac{z_1 - \frac{n_1}{n_0 \sqrt{A}} \operatorname{tg} \sqrt{A} z}{n_1 + n_0 z_1 \sqrt{A} \operatorname{tg} \sqrt{A} z} \quad (1)$$

$$X_2(Z_1, X_1) = \frac{X_1}{\cos \sqrt{A} z + \frac{n_0 z_1 \sqrt{A}}{n_1} \sin \sqrt{A} z} \quad (2)$$

$$Z_1(Z_2, X_2) = n_1 \frac{z_2 + \frac{n_2}{n_0 \sqrt{A}} \operatorname{tg} \sqrt{A} z}{n_2 - n_0 z_2 \sqrt{A} \operatorname{tg} \sqrt{A} z} \quad (3)$$

$$X_1(Z_2, X_2) = \frac{X_2}{\cos \sqrt{A} z - \frac{n_0 z_2 \sqrt{A}}{n_2} \sin \sqrt{A} z} \quad (4)$$

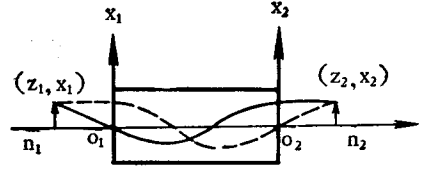


图 3 柱状变折射率元件光线轨迹与物象关系

由此可以求得焦点、主点、节点、焦距, 分别为:

$$\text{第一焦点: } F_1(z) = -\frac{n_1}{n_0 \sqrt{A}} \operatorname{ctg} \sqrt{A} z \quad (5)$$

$$\text{第二焦点: } F_2(z) = \frac{n_2}{n_0 \sqrt{A}} \operatorname{ctg} \sqrt{A} z \quad (6)$$

$$\text{第一主点: } P_1(z) = -\frac{n_1}{n_0 \sqrt{A}} \cdot \frac{\cos \sqrt{A} z - 1}{\sin \sqrt{A} z} \quad (7)$$

$$\text{第二主点: } P_2(z) = \frac{n_2}{n_0 \sqrt{A}} \cdot \frac{\cos \sqrt{A} z - 1}{\sin \sqrt{A} z} \quad (8)$$

$$\text{第一节点: } N_1(z) = -\frac{n_1}{n_0 \sqrt{A}} \cdot \frac{\cos \sqrt{A} z - n_1/n_2}{\sin \sqrt{A} z} \quad (9)$$

$$\text{第二节点: } N_2(z) = \frac{n_2}{n_0 \sqrt{A}} \cdot \frac{\cos \sqrt{A} z - n_1/n_2}{\sin \sqrt{A} z} \quad (10)$$

$$\text{第一焦距: } f_1(z) = -\frac{n_1}{n_0 \sqrt{A}} \cdot \frac{1}{\sin \sqrt{A} z} \quad (11)$$

$$\text{第二焦距: } f_2(z) = \frac{n_2}{n_0 \sqrt{A}} \cdot \frac{1}{\sin \sqrt{A} z} \quad (12)$$

2. 变折射率元件的长度与成象的关系

由公式(1)和(2)可以知道, 变折射率元件的成象位置是与其长度直接有关的。当 $x_1/x_2 > 0$ 时, 成正象; 当 $x_1/x_2 < 0$ 时, 成倒象; 当

$z_2 > 0$ 时,成实象;当 $z_2 < 0$ 时,成虚象。我们下面将讨论,变折射率元件的长度在不同的象限中变化时,分别形成各种象的条件:

$$1) 0 < \sqrt{A} z < \frac{\pi}{2};$$

当 $|z_1| > \frac{n_1}{n_0 \sqrt{A}} \operatorname{ctg} \sqrt{A} z$ 时, $\frac{x_1}{x_2} < 0$, $z_2 > 0$, 成倒立实象。

当 $|z_1| < \frac{n_1}{n_0 \sqrt{A}} \operatorname{ctg} \sqrt{A} z$ 时, $\frac{x_1}{x_2} > 0$, $z_2 < 0$, 成正立虚象。

当 $|z_1| = \frac{n_1}{n_0 \sqrt{A}} \operatorname{ctg} \sqrt{A} z$ 时, $\frac{x_1}{x_2} = 0$, $z_2 = \infty$, 成平行光束。

$$2) \sqrt{A} z = \frac{\pi}{2};$$

当 $|z_1| \neq 0$ 时, $\frac{x_1}{x_2} < 0$, $z_2 > 0$, 成倒立实象。

当 $|z_1| = 0$ 时, $\frac{x_1}{x_2} = 0$, $z_2 = \infty$, 成平行光束。

$$3) \frac{\pi}{2} < \sqrt{A} z < \pi;$$

当 $|z_1| > \frac{n_1}{n_0 \sqrt{A}} \cdot |\operatorname{tg} \sqrt{A} z|$ 时, $\frac{x_1}{x_2} < 0$, $z_2 < 0$, 成倒立虚象。

当 $|z_1| = \frac{n_1}{n_0 \sqrt{A}} \cdot |\operatorname{tg} \sqrt{A} z|$ 时, $\frac{x_1}{x_2} < 0$, $z_2 = 0$, 在端面成倒象。

当 $|z_1| < \frac{n_1}{n_0 \sqrt{A}} \cdot |\operatorname{tg} \sqrt{A} z|$ 时, $\frac{x_1}{x_2} < 0$, $z_2 > 0$, 成倒立实象。

$$4) \sqrt{A} z = \pi;$$

当 $|z_1| = 0$ 时, $\frac{x_1}{x_2} = -1$, $z_2 = 0$, 在端面成等倍倒象。

当 $|z_1| \neq 0$ 时, $\frac{x_1}{x_2} = -1$, $z_2 < 0$, 成 1:1 倒立虚象(此时平行光入射,平行光出射)。

$$5) \pi < \sqrt{A} z < \frac{3}{2} \pi;$$

$$\text{当 } |z_1| > \frac{n_1}{n_0 \sqrt{A}} \cdot \operatorname{ctg} \sqrt{A} z \text{ 时, } \frac{x_1}{x_2} > 0,$$

$z_2 > 0$, 成正立实象。

$$\text{当 } |z_1| = \frac{n_1}{n_0 \sqrt{A}} \cdot \operatorname{ctg} \sqrt{A} z \text{ 时, 成平行}$$

光束。

$$\text{当 } |z_1| < \frac{n_1}{n_0 \sqrt{A}} \cdot \operatorname{ctg} \sqrt{A} z \text{ 时, } \frac{x_1}{x_2} < 0,$$

$z_2 < 0$, 成倒立虚象。

$$6) \sqrt{A} z = \frac{3}{2} \pi;$$

当 $|z_1| \neq 0$ 时, $\frac{x_1}{x_2} > 0$, $z_2 > 0$, 成正立实象。

当 $|z_1| = 0$ 时, $\frac{x_1}{x_2} = 0$, $z_2 = \infty$, 成平行光束。

$$7) \frac{3}{2} \pi < \sqrt{A} z < 2\pi;$$

当 $|z_1| > \frac{n_1}{n_0 \sqrt{A}} \cdot |\operatorname{tg} \sqrt{A} z|$ 时, $\frac{x_1}{x_2} > 0$, $z_2 < 0$, 成正立虚象。

当 $|z_1| = \frac{n_1}{n_0 \sqrt{A}} \cdot |\operatorname{tg} \sqrt{A} z|$ 时, $\frac{x_1}{x_2} > 0$, $z_2 = 0$, 在端面成正象。

当 $|z_1| < \frac{n_1}{n_0 \sqrt{A}} \cdot |\operatorname{tg} \sqrt{A} z|$ 时, $\frac{x_1}{x_2} > 0$, $z_2 > 0$, 成正立实象。

$$8) \sqrt{A} z = 2\pi;$$

当 $|z_1| \neq 0$ 时, $\frac{x_1}{x_2} = 1$, $z_2 < 0$, 成 1:1 正立虚象(此时平行光入射,平行光出射)。

当 $|z_1| = 0$ 时, $\frac{x_1}{x_2} = 1$, $z_2 = 0$, 在端面成等倍正象。

3. 主点位置函数与变折射率元件长度的关系

由公式(5)~(12)可知,焦点、主点、节点、焦距均为 $\sqrt{A} z$ 的三角函数,并随着柱状变折射率元件长度的改变而改变。其中主点位置函数 $P_1(z)$ 、 $P_2(z)$ 与柱状变折射率元件长度 $\sqrt{A} z$

z 的关系由公式(7)(8)可知(见图 4):

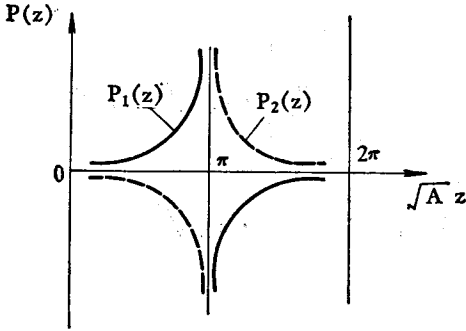


图 4 主点位置函数 $p_1(z)$ 、 $p_2(z)$ 与变折射率元件长度 $\sqrt{A}z$ 的关系

1) $0 < \sqrt{A}z < \pi$ 时

$P_1(z)$ 取正值增函数, $P_2(z)$ 取负值为减函数。且两个主点皆位于变折射率元件之内。

2) $\pi < \sqrt{A}z < 2\pi$ 时

$P_1(z)$ 取负值为增函数, $P_2(z)$ 取正值为减函数, 两个主点皆位于变折射率元件之外, $P_1(z)$ 位于物空间中, $P_2(z)$ 位于象空间中。

四、平板型复眼透镜综合成像原理

萤火虫复眼是由一定长度的变折射率晶体柱组合而成的。入射光线在晶体柱内被弯曲, 并在其光轴同侧射出, 因此每个晶体柱都能形成目标的正象。而在一定的区域中, 晶体柱所形成的正象则叠加在一起, 成为综合象。

从前面的讨论我们已经知道, 当柱状变折射率元件的长度 $\sqrt{A}z$ 在第三、四象限时, 对于一定距离的目标, 它可形成正立的实象。此时, 第一主点 P_1 的位置以及第二主点 P_2 的位置, 都在变折射率元件之外。因此, 位于第一主平面上的目标可以在第二主平面上形成放大率为 1 的正立的实象。

如果将光学特性完全相同的柱状变折射率元件组合成平板型的列阵, 则它们有公共的第一主平面和第二主平面(见图 5)。此时, 对于第一主平面上的一点 P_1 , 可以通过各个变折射率元件到第二主平面的 P_2 点上形成综合象; 对

于第一主平面上的任意目标, 同样可以在第二主平面上形成综合象。

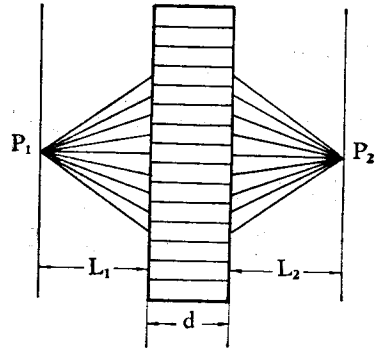


图 5 平板型复眼透镜综合成像原理图

综合成像的平板型复眼透镜的物距定义为第一主平面到前端面的距离, 象距为第二主平面到后端面的距离, 即物距、象距分别为 $P_1(z)$ 和 $P_2(z)$ 。当透镜在空气介质中成像时, 由于 $n_1 = n_2 = 1$, $P_1(z) = -P_2(z)$ 。则物距与象距相等。

由前面的讨论已经知道, 物距和象距的大小可以通过改变 $\sqrt{A}z$ 的大小来调节。当 $\sqrt{A}z$ 在第三、四象限时, $P_1(z)$ 是减函数, $P_2(z)$ 是增函数。即在第三、四象限中, $\sqrt{A}z$ 的值越大, 物距、象距越短, 当 $\sqrt{A}z$ 的值越接近 π 时, 物距、象距就越大。因此, 我们可以根据实际使用的需要, 选择物距、象距的大小, 从而确定综合成像平板型复眼透镜的 $\sqrt{A}z$ 值。其中 $\sqrt{A}$ 的值, 可以通过直接测量变折射率元件的折射率分布、或者测量焦距来确定。因此, 一待测出 $\sqrt{A}$ 值, 就可以确定综合成像的平板型复眼透镜的厚度了。

五、模拟实验

在模拟实验中, 我们采用了含铯玻璃, 其组成的重量百分比为: SiO_2 50%, TiO_2 20%, Na_2O 12%, PbO 18%。熔炼后拉制成直径为 0.8 毫米的纤维。在 460°C 条件下, 于硝酸钾熔盐中进行离子交换 104 小时。这样制得的变折射率元件, 其 $\sqrt{A}$ 值约为 0.5。选其厚度为 7.4 毫

米,组成平板型综合成象透镜。

经测试,该综合成象透镜的主要参数为:物距、象距相等,约为3毫米;分辨率达到25线/毫米视场角为40°(图6,见封二图8)。

六、讨 论

1. 综合成象的平板型复眼透镜具有以下特点:它的物距、象距短,体积小,因而在相同照明条件下,可以获得比普通透镜更高的象面照度;被观察图象的幅面大小不受视场限制,因为它可以通过增加柱状变折射率元件的数量、扩大列阵的大小来实现;综合成象透镜的中心区域与边缘区域的分辨率及亮度均匀。根据这些特点,它可望用于超小型复印机中,也可以用在与阴极射线管结合的光学印刷中,以及用于光学信息处理中。

2. 平板型综合成象透镜只是对萤火虫复眼综合成象原理的初步模拟,更进一步的模拟将考虑采用锥状变折射率元件,组成扇形球面综合成象透镜,以探索设计相对孔径大、超广角透镜系统的新途径。

3. 在柱状变折射率元件中,光线轨迹的周期 L 可以表示为:

$$L = \sqrt{2} \pi R \sqrt{N_0 / \Delta N} \quad (12)$$

因而有:

$$\frac{dL}{L} = \frac{dR}{R} + \frac{1}{2} \frac{dN_0}{N_0} - \frac{1}{2} \frac{d\Delta N}{\Delta N} \quad (13)$$

要做到前面讲的“光学性能均匀”,每个变折射率元件的光线轨迹周期就必须一致;而要做到光线轨迹周期一致,从等式(13)可知,应从 R 、 N_0 、 ΔN 三方面着手解决,即应做到纤维直径变差小,玻璃材料均匀以及离子交换条件恒定。另外,为了减小柱状变折射率元件的色差,可以采用一种含有铯的玻璃材料。

参 考 文 献

- [1] Exner, S.: Die Physiologie der facettierten Augen von Krebsen und Insekten, 1891.
- [2] Exner, K.: Ann. Phys. Chem., 29, 484, 1886.
- [3] Klaus Hausen: Nature, 231, 393, 1971.
- [4] Klaus Hausen: J. Comp. Physiol., 82, 365, 1973.
- [5] Horridge, G. A.: Proc. Roy. Soc., B, 181, 151, 1972.
- [6] Uchida, T. et al.: J. Quantum. Electronics, 5(25), 1969.
- [7] Horridge, G. A.: The Compound Eye and Vision of Insects, 1975.
- [8] 中国科学院生物物理研究所昆虫复眼光学信息加工组:北京萤火虫复眼晶体柱的光学特性,见本刊本期。
- [9] Felix P. Kapron: J. O. S. A., 60, 1433, 1970.

[本文于1978年12月8日收到]

提高微光电视图像清晰度的鲎眼侧抑制电子模型

中国科学院生物物理研究所五室三组

鲎眼对图像的侧抑制加工原理,给微光图像的信息处理以有益的启示。根据简化的侧抑制方程设计的电子模型,突出了微光电视图像的主要信息,抑制了噪声干扰,提高了图像的清晰度。

一、鲎眼侧抑制原理和微光图像的信息处理

哈特兰(H. K. Hartline)及其助手,经过

多年的研究,揭示了鲎(Limulus)眼小眼间横向联系的侧抑制(Lateral inhibition)作用,并导出了反映其定量关系的侧抑制方程^[1]。鲎活动于浅海底层,它通过小眼间的侧抑制神经网络,增强图像的轮廓、提高反差,从噪声中提取基本的视觉信息。众所周知,轮廓带有图像的基本信息,增强轮廓就能更可靠地从噪声中把图像信息的大部分分离出来^[2]。特别对于微光图像,由于缺乏足够的信息提供细节,因此,轮廓就是

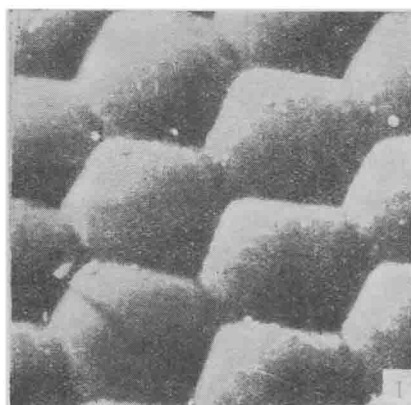


图 1 萤火虫复眼扫描电镜照片

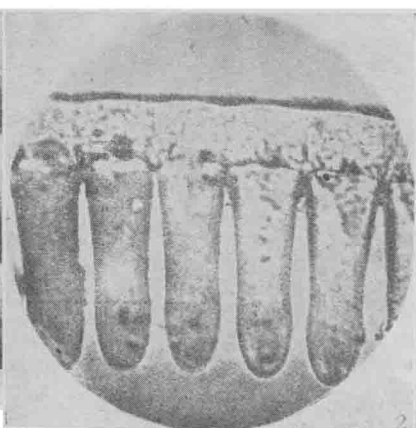


图 2 萤火虫复眼折光器的纵切面

图 3 萤火虫复眼折光器纵切面的干涉显微照片

图 4 萤火虫复眼折光器横切面的干涉显微照片

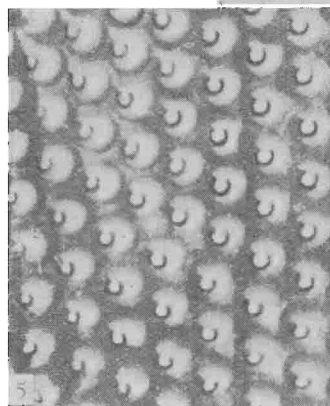
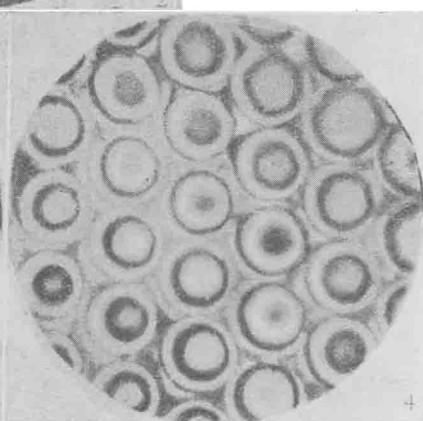
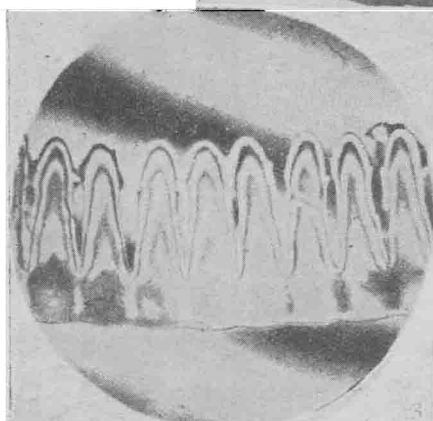


图 5 萤火虫复眼晶体柱内所形成的小倒像

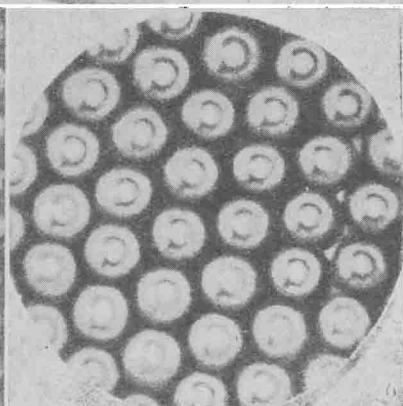


图 6 萤火虫复眼晶体柱薄横切片成的小倒像

图 7 萤火虫晶体柱阵列形成的综合像

图 8 平板型复眼透镜形成的综合象

