第五章　辐射度学和光度学基础

仪器科学与光电工程学院光电工程系
北京航空航天大学

目 录 Contents

应用

辐射度学 — 对一切波段电磁辐射能量的计量学科。

光 度 学 — 对可见光能量的计量学科。

相机、人眼、探测器等………

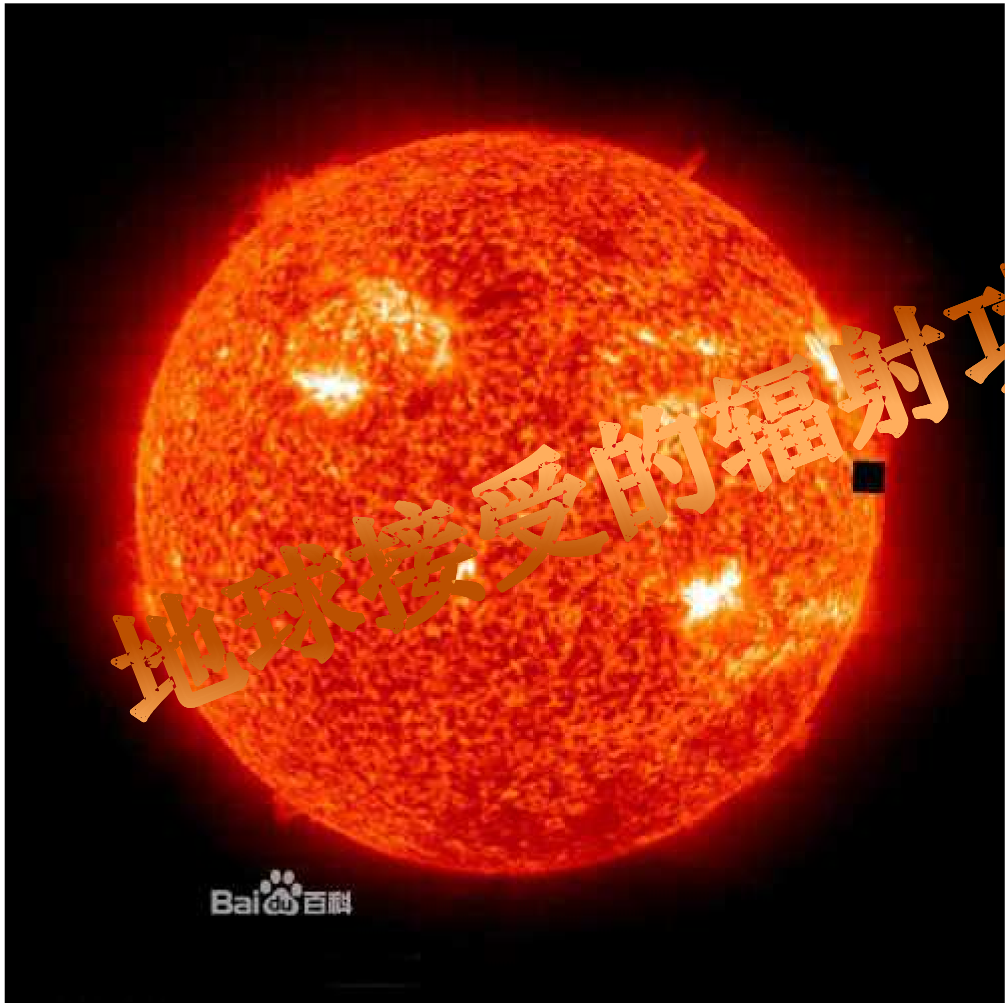
电磁炉、手机、电脑等的辐射

大气辐射学（太阳、大气、地球……）

辐射科学及应用

同步辐射实验室

解决问题



地球接受的辐射功率是多少？

总辐射功率：3.86×10^{26} W

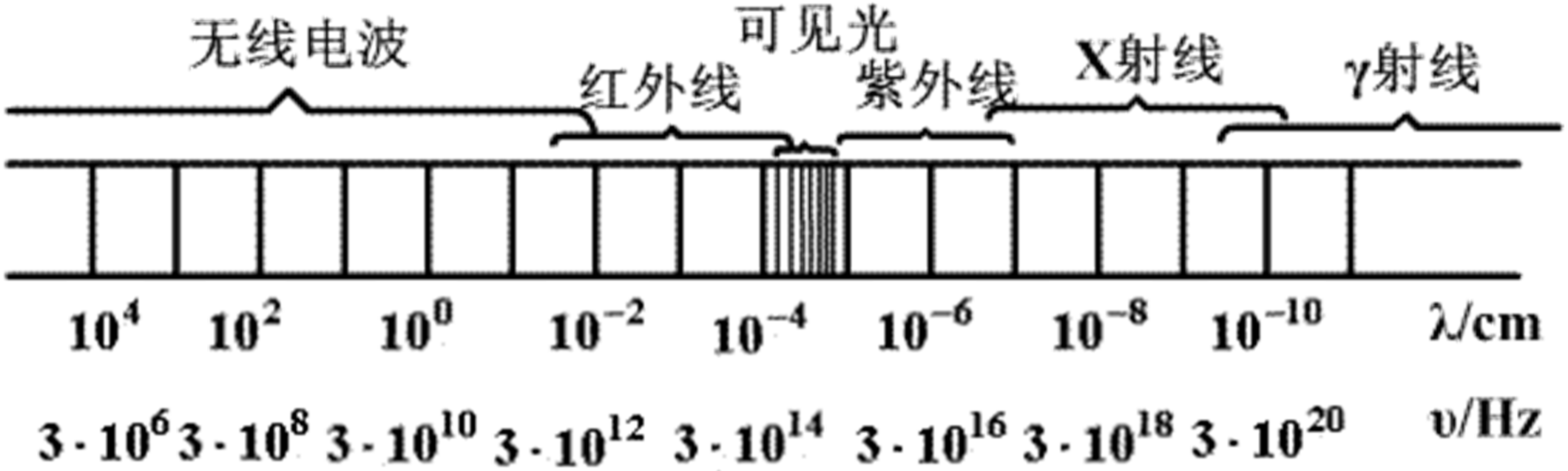
日地平均距离：1亿5千万公里

地球半径：6400公里

引入

电磁波谱

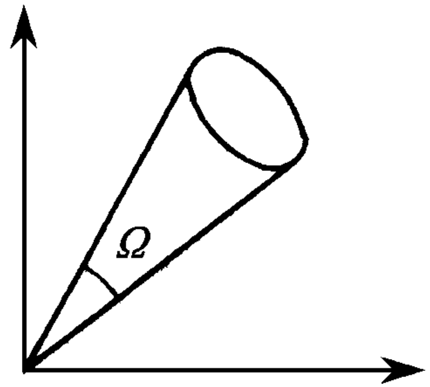
- 可见光：波长 λ 在 3.8×10^{-7}~7.8×10^{-7}m范围内的电磁辐射。
- 描述电磁辐射的物理量，即辐射量，也可用来描述可见光。
- 可见光对人的视觉形成刺激并被人眼所感受。用视觉受到刺激或视觉感受的程度描述可见光。
- 光学量：按“视觉响应”原则建立的表征可见光的量。

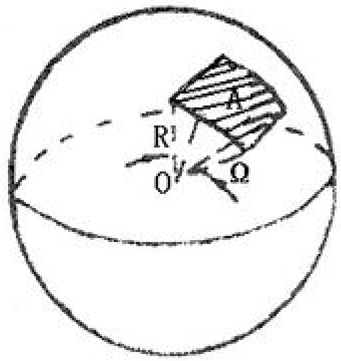


目 录 Contents

第一节　辐射度学和光度学量

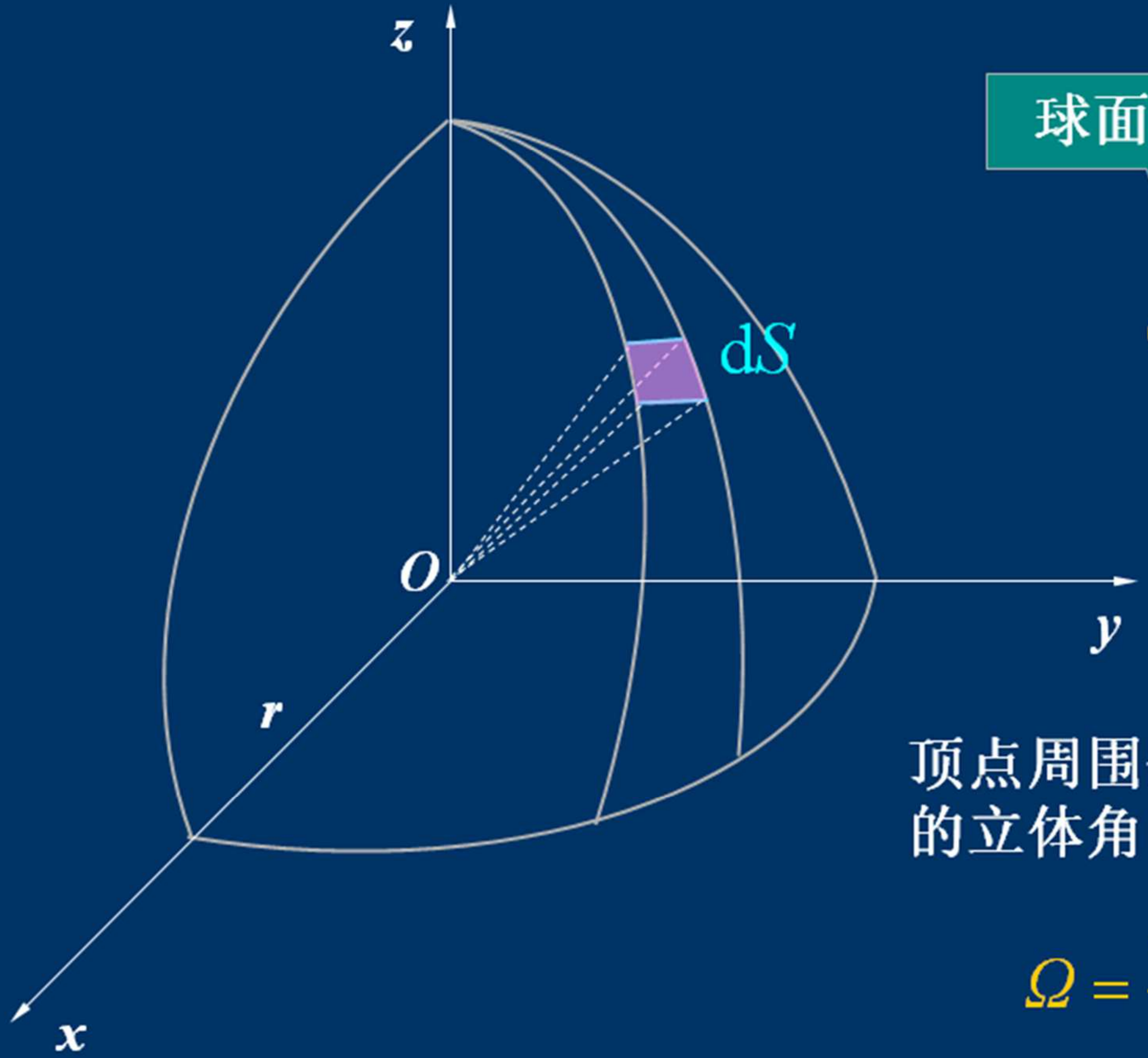
- 立体角：一个任意形状的封闭锥面所包含的空间，是一个物体对特定点的三维空间的角度。
- 单　位：整个球面空间等于4 π 个球面度（sr）。





$$\Omega = \frac{A}{R^2}$$

1. 立体角的度量



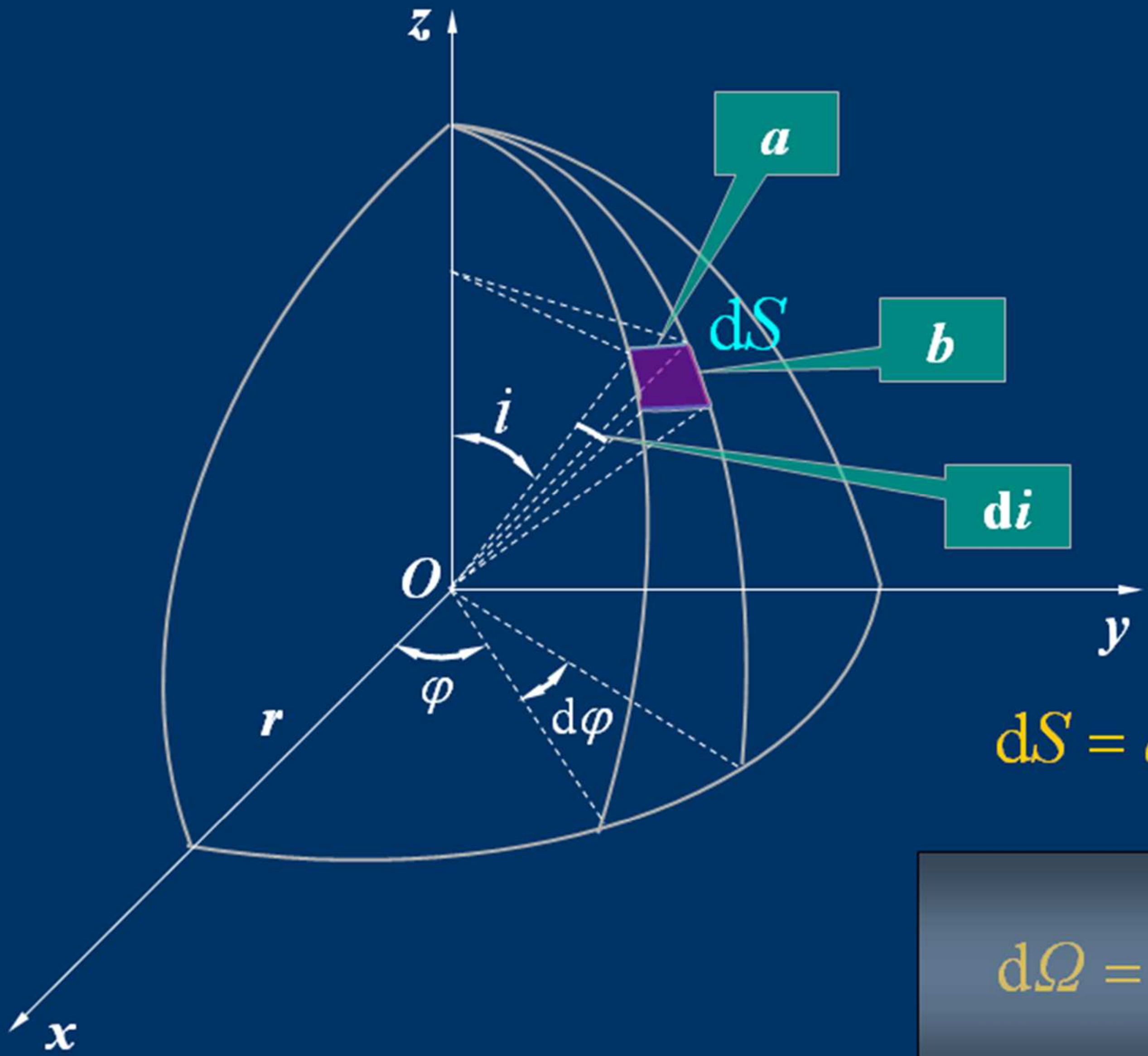
球面度

$$\mathrm{d}\Omega = \frac{\mathrm{d}S}{r^2}$$

顶点周围全部空间范围内的立体角

$$\Omega = \frac{4\pi r^2}{r^2} = 4\pi$$

2. 立体角的计算



由图可知：

$$\begin{cases} a = r\sin i\,\mathrm{d}\varphi \\ b = r\mathrm{d}i \end{cases}$$

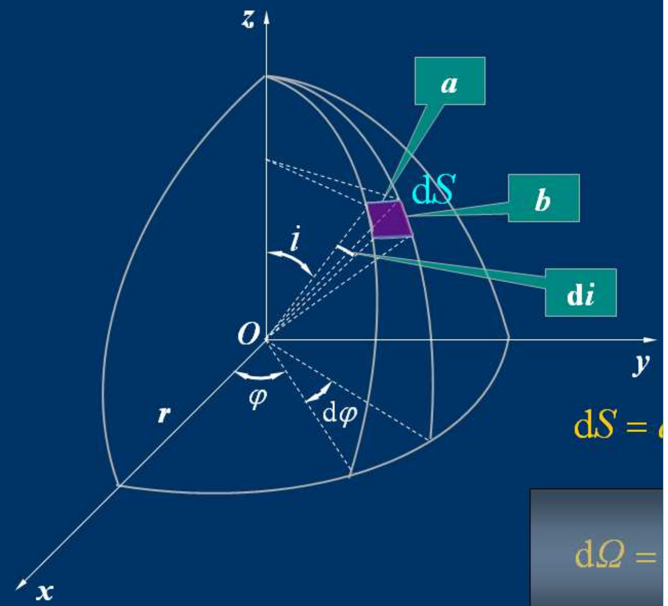
$$\mathrm{d}S = a \times b = r^2 \sin i\,\mathrm{d}i\,\mathrm{d}\varphi$$

$$\mathrm{d}\Omega = \frac{\mathrm{d}S}{r^2} = \sin i\,\mathrm{d}i\,\mathrm{d}\varphi$$

例 利用积分求整个空间的立体角

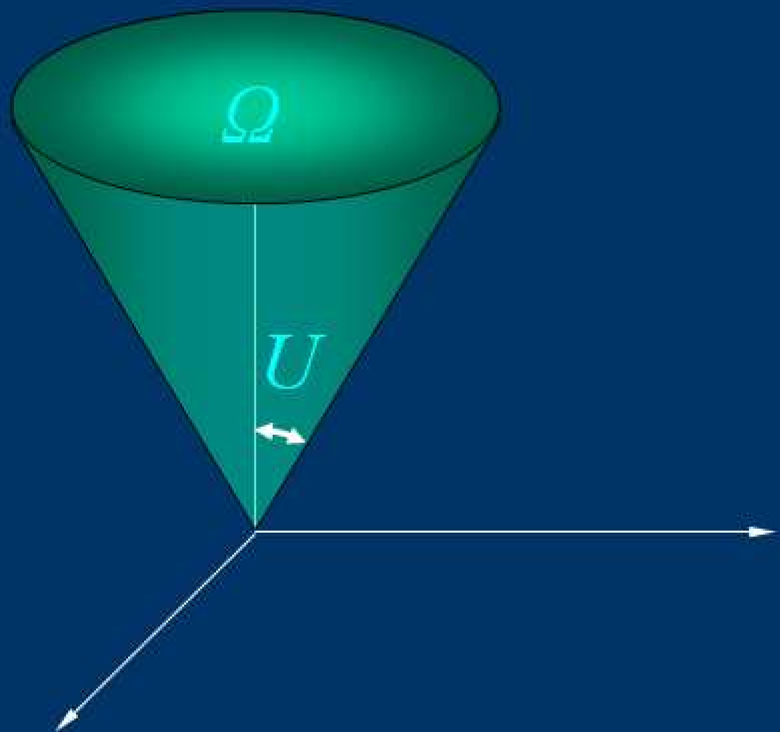
$$\mathrm{d}\Omega = \sin i\,\mathrm{d}i\,\mathrm{d}\varphi$$

$$\Omega = \iint \sin i\,\mathrm{d}i\,\mathrm{d}\varphi = \int_{\varphi=0}^{2\pi}\mathrm{d}\varphi\int_{i=0}^{i=\pi}\sin i\,\mathrm{d}i = 4\pi$$



$\mathrm{d}S =$

$\mathrm{d}\Omega =$



$$\mathrm{d}\Omega = \sin i\,\mathrm{d}i\,\mathrm{d}\varphi$$

$$\Omega = \iint \sin i\,\mathrm{d}i\,\mathrm{d}\varphi = \int_{\varphi=0}^{2\pi}\mathrm{d}\varphi\int_{i=0}^{i=U}\sin i\,\mathrm{d}i = 4\pi\sin^2\frac{U}{2}$$

当U很小时， $\sin\frac{U}{2} = \frac{u}{2}$（弧度）

$$\Omega \approx \pi u^2$$

平面角和立体角的转换关系

第一节 辐射度学和光度学量

一、辐射度学的基本量

1、辐射能 Q_e (J)

以电磁辐射形式发射、传输或接收的能量。

2、辐射通量 Φ_e (W)

单位时间内发射、传输或接收的辐射能。

$$\Phi_e = \frac{dQ_e}{dt}$$

3、辐射出射度 M_e (W/m^2)

辐射源单位发射面积发射的辐射通量。

$$M_e = \frac{d\Phi_e}{dA}$$

4、辐照度 E_e (W/m^2)

辐射照射面单位受照面积上接受的辐通量。

$$E_e = \frac{d\Phi_e}{dA}$$

5、辐射强度 I_e(W/sr)

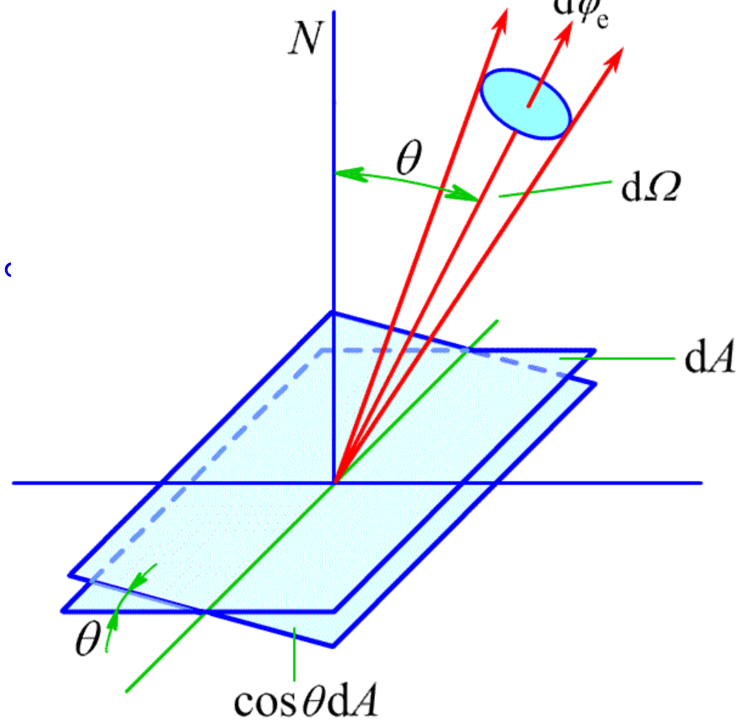
点辐射源向某一方向单位立体角内发出的辐通量。

$$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\Omega}$$

6、辐射亮度 L_e (W/ (sr • m^2))

单位面积辐射源在和其表面法线N成 θ 角方向的单位立体角内发出的辐射通量。

$$L_e = \frac{d\Phi_e}{\cos\theta\, dA\, d\Omega}$$



第一节　辐射度学和光度学量

二、光度学的基本量

1、光通量 Φ_v (lm :流明)

可见光对人眼的视觉刺激程度的量。

$$\Phi_v$$

2、光出射度 M_v (lm/m²)

光源单位发射面积发射的光通量。

$$M_v = \frac{d\Phi_v}{dA}$$

3、光照度 E_v (lx勒克斯；lx=lm/m²)

光照射面单位受照面积上接受的光通量。

$$E_v = \frac{d\Phi_v}{dA}$$

4、发光强度 I_v (cd:坎德拉)

点光源在某一方向上单位立体角内发出的光通量。

$$I_v = \frac{d\Phi_v}{d\Omega}$$

第一节　辐射度学和光度学量

二、光度学的基本量

1979年第十六届国际计量大会对发光强度的单位“坎德拉”做了明确的规定：“一个光源发出频率为540×10^{12} Hz 的单色光，在一定方向上的辐射强度为1/683 W/sr，则此光源在该方向上的发光强度为1坎德拉”。

发光强度是光学基本量，是国际单位制中七个基本量之一。从发光强度的单位“坎德拉”可以导出光通量的单位“流明”：发光强度为1 cd 的均强点光源，在单位立体角内发出的光通量为1 lm。

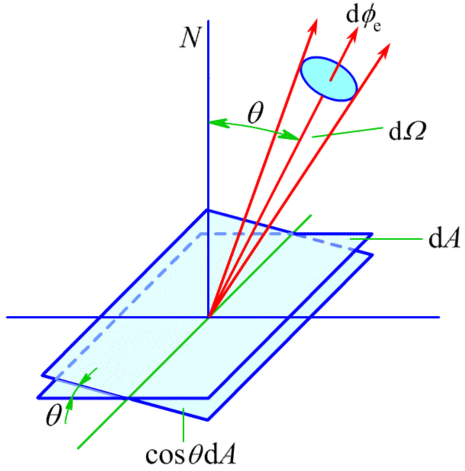
第一节　辐射度学和光度学量

二、光度学的基本量

5、光亮度 L_v (cd/m^2)

- 描述具有有限尺寸的发光体发出的可见光在空间分布的情况；
- 发光面单位面积，在和发光面法线N成 θ 角方向，在单位立体角内发出的光通量。

$$L_v = \frac{d\Phi_v}{\cos\theta dA d\Omega} = \frac{I_v}{\cos\theta dA}$$



第一节　辐射度学和光度学量

三、辐射量和光学量间的关系

1．视觉光谱光效率函数（视觉函数）

人眼：可见光探测器

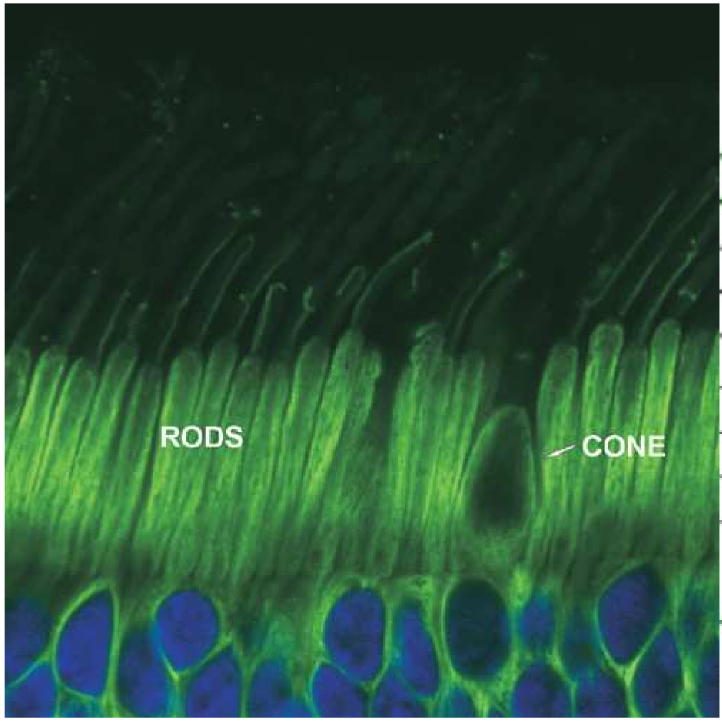
辐射量度量的可见光辐射 →  → 光学量表示的光感受

❖ 视觉光谱光效率函数（视觉函数）

光度学中，为了表示人眼对不同波长辐射的敏感度的差别定义了一个函数V（λ），称为视觉函数。有了视觉函数就可以比较两个不同波长的辐射体对人眼产生视觉的强弱。

第一节　辐射度学和光度学量

三、辐射量和光学量间的关系



人类的明视觉和暗视觉特征

特征	明视觉	暗视觉
光感受器	视锥细胞	视杆细胞
光化学物质	锥体色素	视紫红质
色觉	正常的三色	无色
所在视网膜区域	中心	周边
暗适应速度	快（8分钟或更少）	慢（30分钟或更多）
空间分辨能力	高	低
时间辨别	反应快	反应慢
照明水平	昼光（>3cd/m^2）	夜光(<0.001cd/m^2)
光谱灵敏峰值	555nm	507nm

明视觉和暗视觉（PhotopicandScotopicVision）不同波长的光刺激在两种亮度范围内作用于视觉器官而产生的视觉现象。在光亮条件下，视锥细胞能够分辨颜色和物体的细节。当刺激物作用于视网膜中央凹时，视敏度最高，偏高中央凹 5° 时，视敏度几乎降低一半，在偏离中央凹 40—50° 的地方，视敏度只有中央凹的 1/20。社网膜不同部位视敏度的判别与视锥细胞的分布情况是一致的。视风膜一定区域的视锥细胞数量决定着视觉的敏锐程度。视杆细胞只在较暗条件下起作用，适宜于微光视觉，但不能分辨颜色与细节。1912 年。J.V.凯斯根据上述事实，提出了视觉的两重功能学说，认为视觉有两重功能：视网膜中央的“视锥细胞视觉”和视网膜边缘的“视杆细胞视觉”，也叫做明视觉和暗视觉。

由于视觉的两重机能，正常视觉的人由光亮环境到黑暗环境时，由视锥细胞视觉转到视杆细胞视觉，对不同波长的光的视觉感受性也发生变化。在光亮条件下，人眼可看到光谱上明暗不同的各种颜色。光谱亮度降到一定程度的时候，人眼便看不到光谱上的各种颜色，整个光谱表现为一条不同明暗的灰带。通过实验确定人眼观察不同波长的光达到同样明度时所需的辐射能量，可以确定人眼对不同波长可见光谱的感受性。

第一节　辐射度学和光度学量

三、辐射量和光学量间的关系

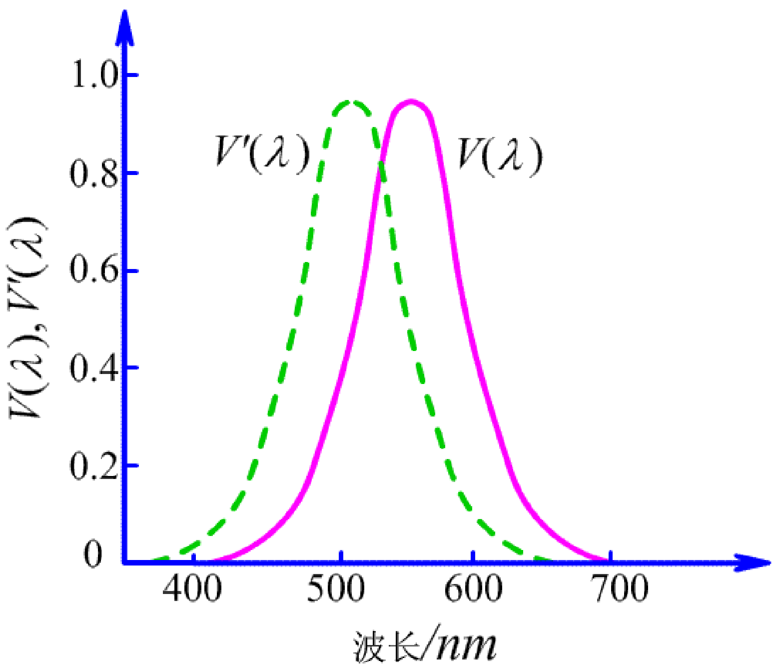
- 明视觉光谱光效率函数$V(\lambda)$：
  - 实线
  - 亮度大于3cd/m^2
  - 视觉主要由人眼视网膜上分布椎体细胞的刺激所引起。

- 暗视觉光谱光效率函数$V'(\lambda)$：
  - 虚线
  - 亮度小于0.001cd/m^2
  - 视觉主要由人眼视网膜上分布杆状细胞的刺激所引起。

明视觉光谱光效率函数　$V(\lambda)$

暗视觉光谱光效率函数　$V'(\lambda)$

最灵敏的光：555nm，507nm



第一节 辐射度学和光度学量

三、辐射量和光学量间的关系

2. 辐射量和光学量的关系

在波长 λ 附近的小波长间隔 $d\lambda$ 内，辐射通量 $d\Phi_e(\lambda)$ 和光通量 $d\Phi_v(\lambda)$ 之间的关系表示为：

明视觉的情况下：$d\Phi_v(\lambda) = K_m V(\lambda)\Phi_e(\lambda)d\lambda$ $\Phi_v = \int_{380}^{780} K_m V(\lambda)\Phi_e(\lambda)d\lambda$

暗视觉的情况下：$d\Phi_v(\lambda) = K'_m V'(\lambda)\Phi_e(\lambda)d\lambda$ $\Phi_v = \int_{380}^{780} K'_m V'(\lambda)\Phi_e(\lambda)d\lambda$

其中， K_m**=683*lm/W*，** λ=555nm，*V*（λ）=*1*对应的绝对光谱光效率值

K'_m **=1755*lm/W*，** λ=507nm，*V'*（λ）=*1*对应的绝对光谱光效率值

光及有关电磁辐射的量和单位

辐射度量		光度量	
量的名称（符号）	单位的名称（符号）	量的名称（符号）	单位的名称（符号）
辐射能通量（Φ或P） **Radiant Flux**	瓦特（W）	光通量（Φ） **Luminous Flux**	流明（lm） lm=cd•sr
辐射强度（I） **Radiant Intensity**	瓦特每球面度（W/sr）	发光强度（I） **Luminous Intensity**	坎德拉（cd） cd=lm/sr
辐射照度（E） **Irradiance**	瓦特每平方米（W/m^2）	光照度（E） **Illuminance**	勒克斯（lx） $lx=lm/m^2$
辐射出射度（M） **Radiant Exitance**	同辐射照度	光出发度（M） **Luminous Exitance**	同光照度
辐射亮度（L） **Radiance**	瓦特每球面度平方米 $[W/(sr.m^2)]$	光亮度（L） **Luminance**	坎德拉每平方米 $(\frac{cd}{m^2}) = \frac{lm}{sr \cdot m^2}$

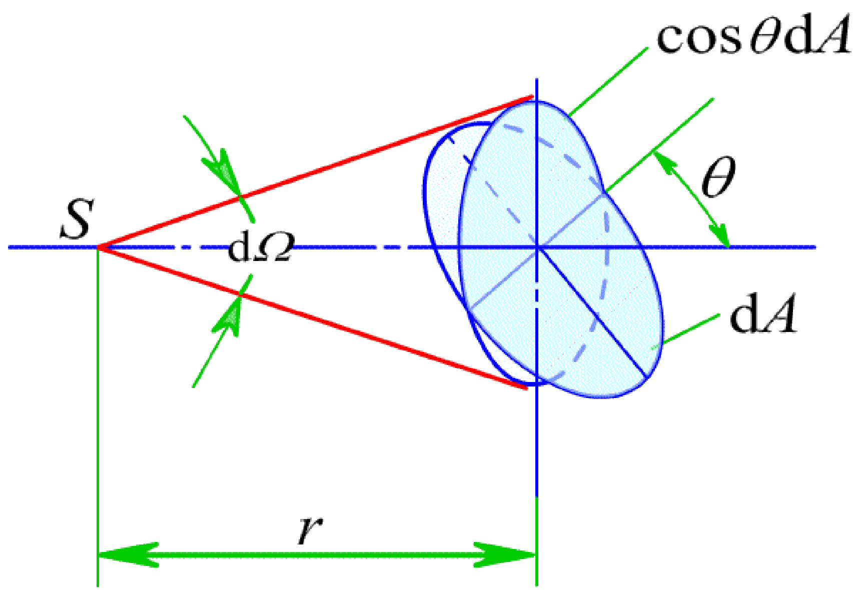
目 录 Contents

第二节　传播过程中光学量的变化

一、点光源在与之距离为 r 处的表面上形成的照度

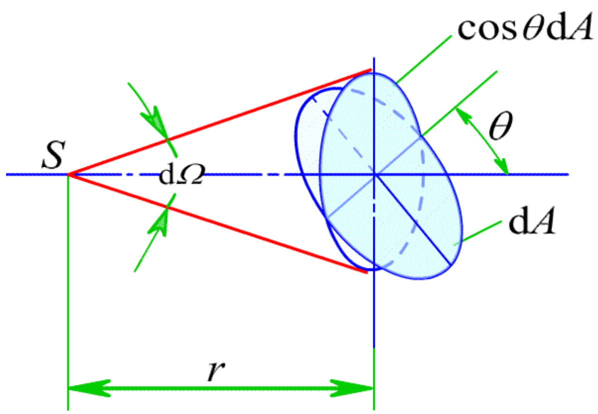
已知：点光源，发光强度 I

求：　与之距离为 r 处的 $\mathrm{d}A$ 表面上形成的照度



第二节　传播过程中光学量的变化

一、点光源在与之距离为r处的表面上形成的照度



照度公式　$$E = \frac{d\Phi}{dA}$$

发光强度公式　$$d\Phi = Id\Omega$$

dA对点源 **S** 所张的立体角

$$d\Omega = \frac{\cos\theta dA}{r^2} \Rightarrow d\Phi = Id\Omega = \frac{I\cos\theta dA}{r^2}$$

$$E = \frac{I}{r^2}\cos\theta$$

照度平方反比定律：

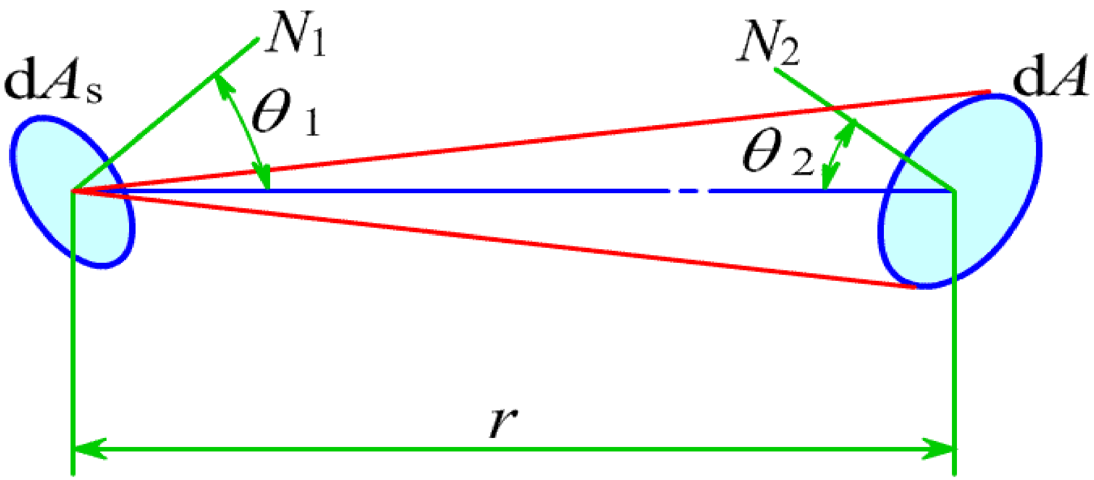
同样大小的被照面，其照度值随它距点光源的距离r的平方成反比。

第二节　传播过程中光学量的变化

二、面光源在与之距离为r处的表面上形成的照度

已知：面光源，光亮度 L

求：　与之距离为 r 处的表面上形成的照度



第二节　传播过程中光学量的变化

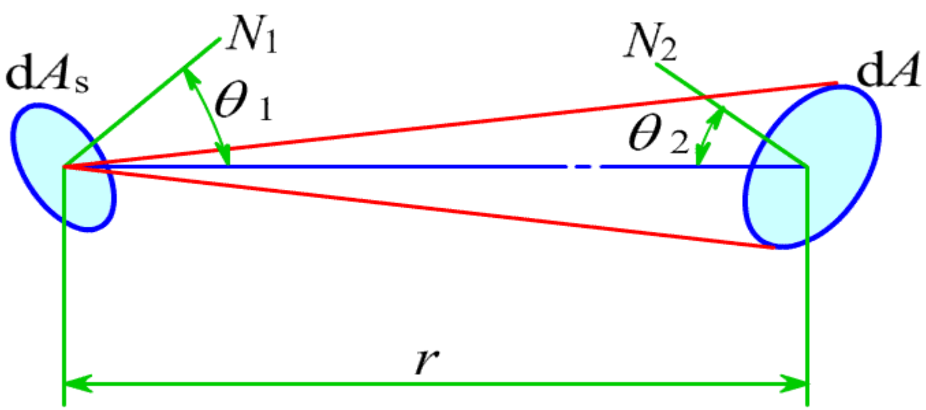
二、面光源在与之距离为r处的表面上形成的照度

面光源的亮度为：
$$L=\frac{d\Phi}{\cos\theta_1 dA_s d\Omega}$$

则：
$$d\Phi=L\cos\theta_1 dA_s d\Omega$$

$$d\Omega=\frac{dA\cos\theta_2}{r^2}$$

$$d\Phi=\frac{L\cos\theta_1\cos\theta_2 dA_s dA}{r^2}$$



照度：
$$\boxed{E=\frac{d\Phi}{dA}=\frac{L\cos\theta_1\cos\theta_2 dA_s}{r^2}}$$

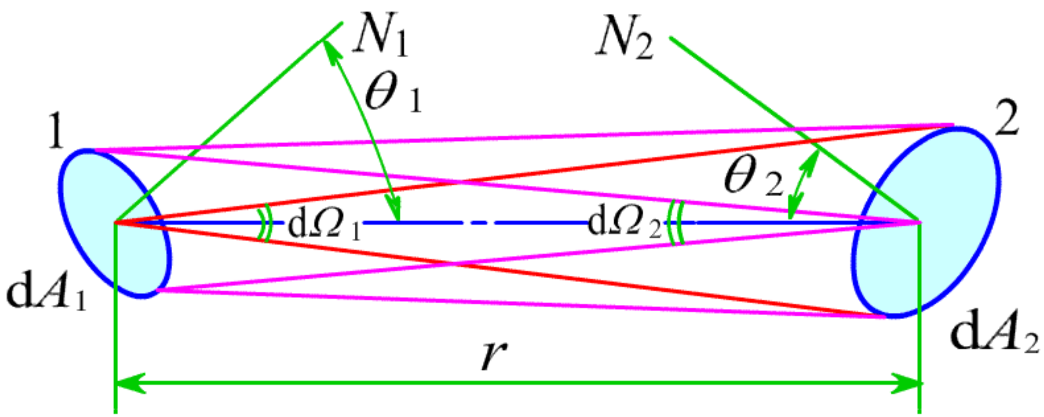
$$E\propto L\propto dA_s\propto\frac{1}{r^2}\propto\frac{1}{\theta_1}\propto\frac{1}{\theta_2}$$（假定 L 为常数）

第二节　传播过程中光学量的变化

三、单一介质光管内光亮度的传递

已知：光在元光管中传播，给出元光管中任意两截面

求：该两截面分别发出的光亮度的关系



第二节　传播过程中光学量的变化

三、单一介质光管内光亮度的传递

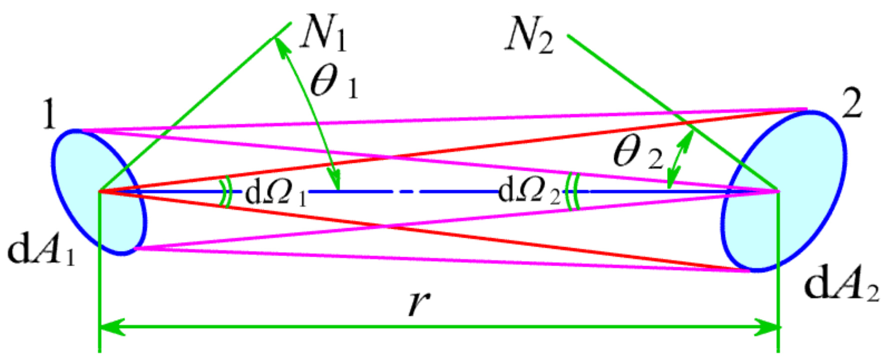
$d\Phi_1 = d\Phi_2$　元光管壁上无光溢出

观察两截面 dA_1, dA_2　上的光亮度，有　$L = \dfrac{d\Phi}{\cos\theta dA d\Omega}$

$$d\Phi_1 = L_1 \cos\theta_1 dA_1 d\Omega_1 = L_1 \cos\theta_1 dA_1 \left(\frac{\cos\theta_2 dA_2}{r^2} \right)$$

$$d\Phi_2 = L_2 \cos\theta_2 dA_2 d\Omega_2 = L_2 \cos\theta_2 dA_2 \left(\frac{\cos\theta_1 dA_1}{r^2} \right)$$

$\Longrightarrow$ $L_1 = L_2$　　光在元光管内传播，各截面亮度相同。

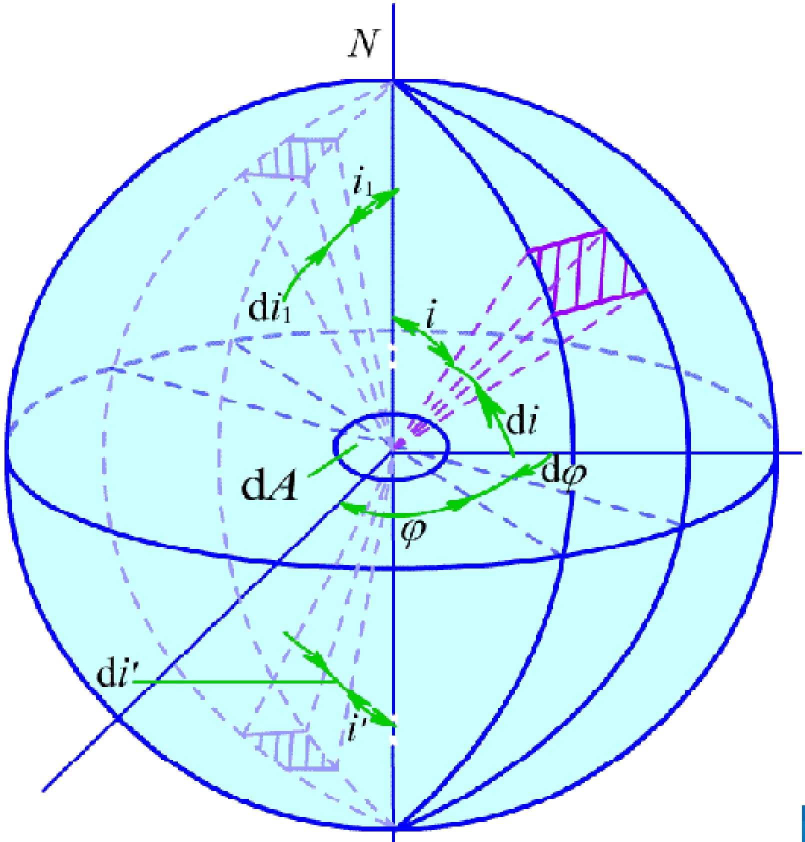


第二节 传播过程中光学量的变化

四、光束经界面反射和折射后的亮度

已知：入射光的光亮度为 L

求：反射光、折射光光亮度与之关系



第二节　传播过程中光学量的变化

四、光束经界面反射和折射后的亮度

设入射光的光亮度为 L，由于在入射过程中，自光源到入射面类似于元光管，故其亮度不变。

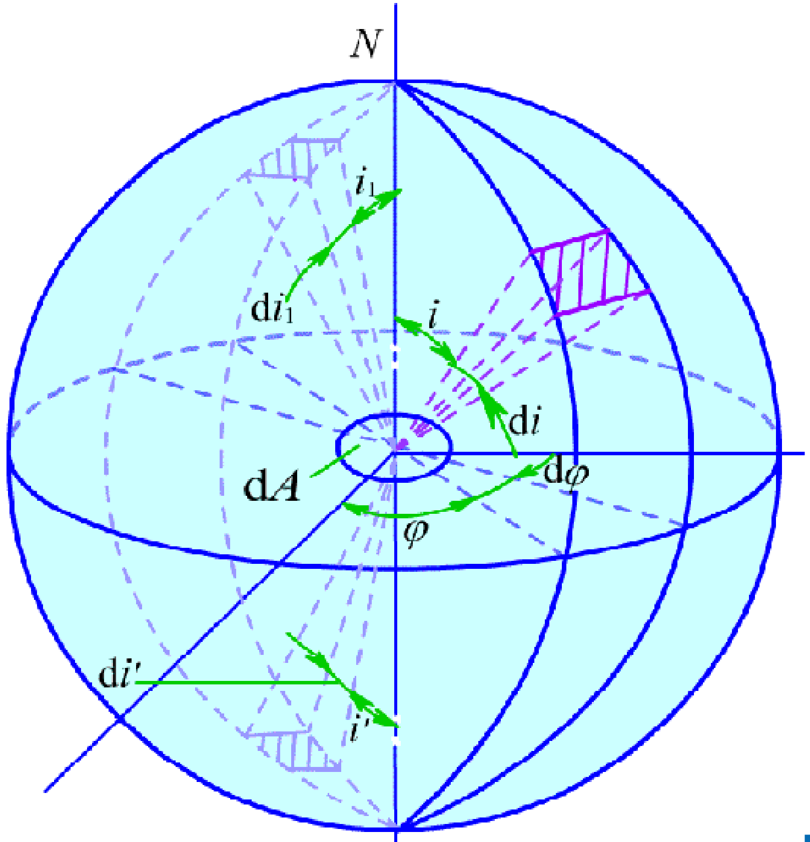
$$L = \frac{d\Phi}{\cos i dA d\Omega} \qquad d\Phi = L\cos i dA d\Omega$$

反、折射的光通量：

$$d\Phi_1 = L_1 \cos i_1 dA d\Omega_1$$

$$d\Phi' = L'\cos i' dA d\Omega'$$

L_1, L' 分别是反、折射的光亮度

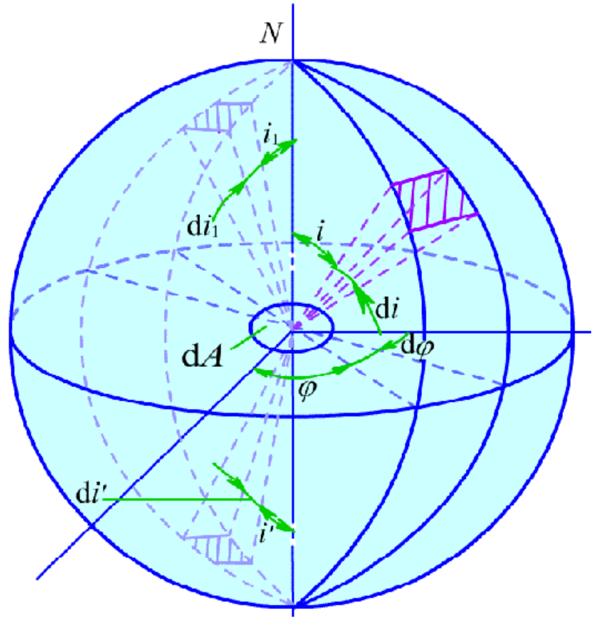


1、反射光束的亮度

根据反射定律

$$i_1 = i \qquad d\Omega_1 = d\Omega$$

$$\frac{d\Phi_1}{d\Phi} = \frac{L_1 \cos i_1 d\Omega_1 dA}{L \cos i d\Omega dA} = \frac{L_1}{L}$$



得 $\dfrac{d\Phi_1}{d\Phi} = \rho$ 界面反射比 ρ

$$\boxed{L_1 = \rho L}$$

反射光束的亮度等于入射光束亮度与界面反射系数之积

2、折射光束的亮度

$$\frac{d\Phi'}{d\Phi}=\frac{L'\cos i' d\Omega' dA}{L\cos i d\Omega dA}$$

根据能量守恒

$$d\Phi = d\Phi' + d\Phi_1$$

$$d\Phi' = d\Phi - d\Phi_1 = (1-\rho)d\Phi$$

根据折射定律 $n\sin i = n'\sin i'$

两边微分，并与折射定律公式相乘：

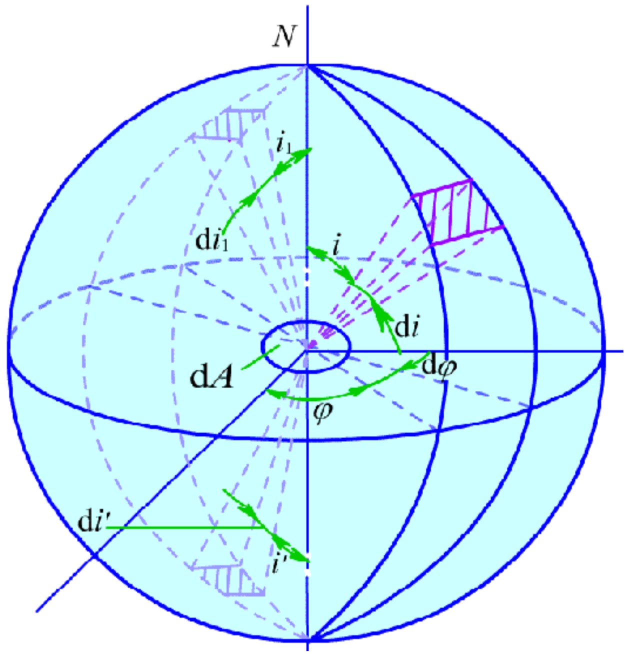
$$n^2\sin i\cos i di = n'^2\sin i'\cos i' di'$$

立体角公式

$$d\Omega = \sin i d\phi di$$

$$d\Omega' = \sin i' d\phi di'$$

得 $\boxed{\dfrac{n^2}{n'^2}=\dfrac{\sin i'\cos i' di' d\varphi}{\sin i\cos i di d\varphi}}$ $\boxed{\dfrac{n^2}{n'^2}=\dfrac{d\Omega'\cos i'}{d\Omega\cos i}}$



光束经界面反射和折射

第二节　传播过程中光学量的变化

对于折射光束：

$$\frac{n^2}{n'^2} = \frac{d\Omega' \cos i'}{d\Omega \cos i}$$

代入

$$\frac{d\Phi'}{d\Phi} = \frac{L' \cos i' d\Omega' dA}{L \cos i d\Omega dA}$$

$$d\Phi' = d\Phi - d\Phi_1 = (1-\rho)\, d\Phi$$

得：

$$L' = (1-\rho) L \frac{n'^2}{n^2}$$

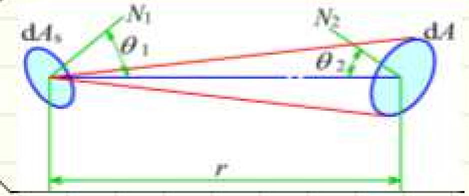
折射光束的亮度与界面的反射比及界面两边介质的折射率有关。

忽略两透明介质界面上的反射损失 $\rho = 0$

$$\frac{L'}{n'^2} = \frac{L}{n^2} = L_0$$

界面无损失时，光亮度发生变化。

光传播过程中的光学量的变化规律

- 点光源在与之距离为r处的表面上形成的照度
  - $$E=\frac{I}{r^2}\cos\theta$$
- 面光源在与之距离为r处的表面上形成的照度
  - $$E=\frac{d\Phi}{dA}=\frac{L\cos\theta_1\cos\theta_2 dA_s}{r^2}$$
  - 

- 单一介质光管内光亮度的传递
  - $$L_1=L_2$$
- 光束经界面反射和折射后的亮度
  - $$L_1=\rho L$$
  - $$L'=(1-\rho)L\frac{n'^2}{n^2}$$

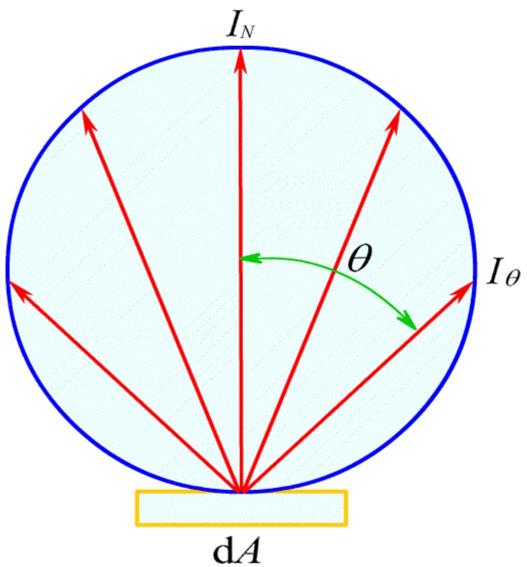
第二节　传播过程中光学量的变化

五、余弦辐射体

余弦辐射体：发光强度空间分布可用 $I_\theta = I_N \cos\theta$ 表示的发光表表面。

式中 I_N 为发光面在法线方向的发光强度， I_θ 为和法线成 θ 角的发光强度。

发光强度向量 I_θ 端点轨迹是一个与发射面相切的球面，球心在法线上，球的直径为 I_N 。



余弦辐射体发光强度的空间分布

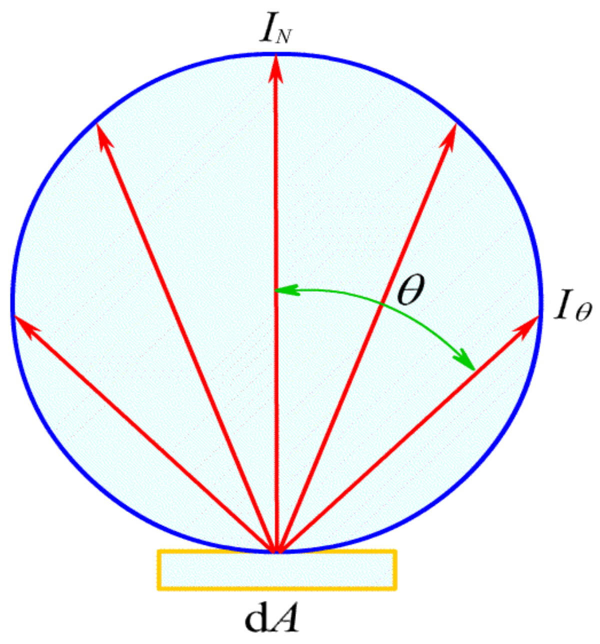
第二节　传播过程中光学量的变化

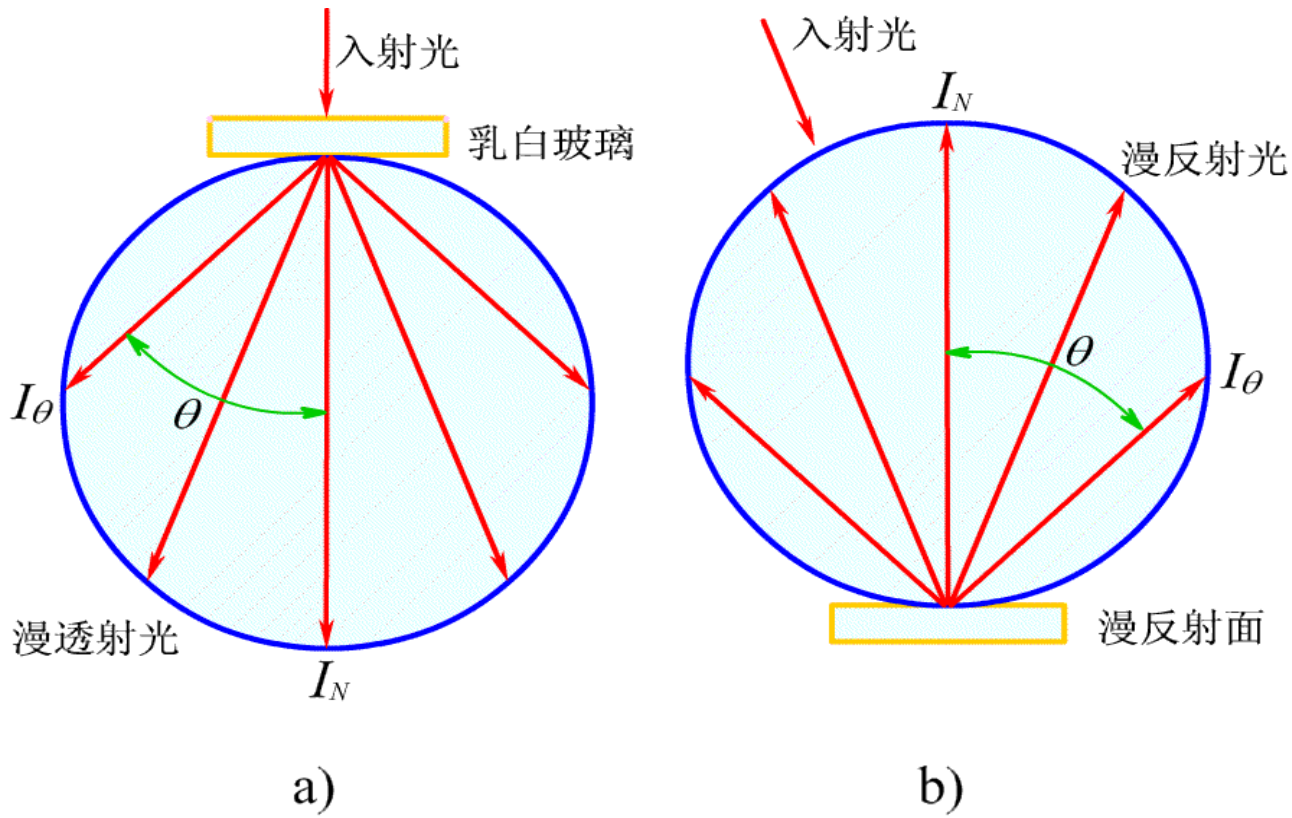
五、余弦辐射体

1）余弦辐射体在和法线成任意角 θ 方向上的光亮度 L_θ ，可表示为：

$$L_\theta = \frac{I_\theta}{dA\cos\theta} = \frac{I_N\cos\theta}{dA\cos\theta} = \frac{I_N}{dA} = 常数$$

余弦辐射体在各方向的光亮度相同。





- 自发光面：绝对黑体、平面钨丝灯等；
- 漫透射体或漫反射体：

透射或反射体受光照射经过透射或反射形成的余弦辐射体。

第二节　传播过程中光学量的变化

五、余弦辐射体

2）余弦辐射体向平面孔径角为U的立体角范围内发出的光通量：

$$\Phi = \int LdA\cos\theta d\Omega = LdA\int_{\varphi=0}^{\varphi=2\pi}\int_{\theta=0}^{\theta=U}\sin\theta\cos\theta d\theta d\varphi$$

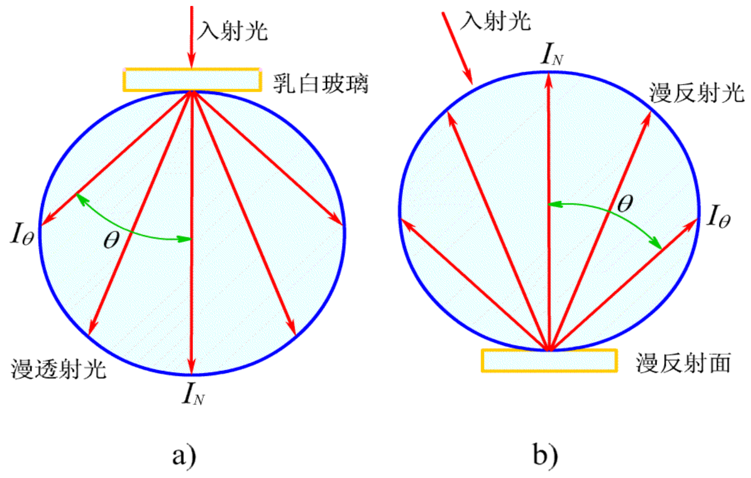
有

$$\Phi = \pi LdA\sin^2 U$$

当 $U=\dfrac{\pi}{2}$ 时，有

$$\Phi = \pi LdA$$

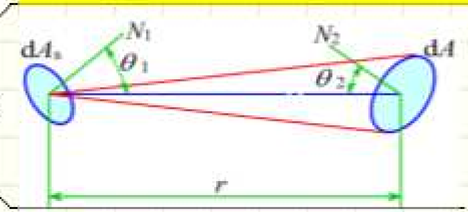
–余弦辐射体向半个空间中发出的总的光通量。



3）光出射度为：

$$M = \frac{\phi}{dA} = \pi L$$

光传播过程中的光学量的变化规律

- 点光源在与之距离为r处的表面上形成的照度
  - $$E=\frac{I}{r^2}\cos\theta$$
- 面光源在与之距离为r处的表面上形成的照度
  - $$E=\frac{d\Phi}{dA}=\frac{L\cos\theta_1\cos\theta_2 dA_s}{r^2}$$
  - 

- 单一介质光管内光亮度的传递
  - $$L_1=L_2$$
- 光束经界面反射和折射后的亮度
  - $$L_1=\rho L$$
  - $$L'=(1-\rho)L\frac{n'^2}{n^2}$$
- 余弦辐射体
  - $$I_\theta=I_N\cos\theta$$
  - $$L_\theta=\frac{I_\theta}{dA\cos\theta}=\frac{I_N\cos\theta}{dA\cos\theta}=\frac{I_\theta}{dA}=\text{常数}$$
  - $$\Phi=\pi L dA\sin^2 U$$
  - $$M=\frac{\phi}{dA}=\pi L$$

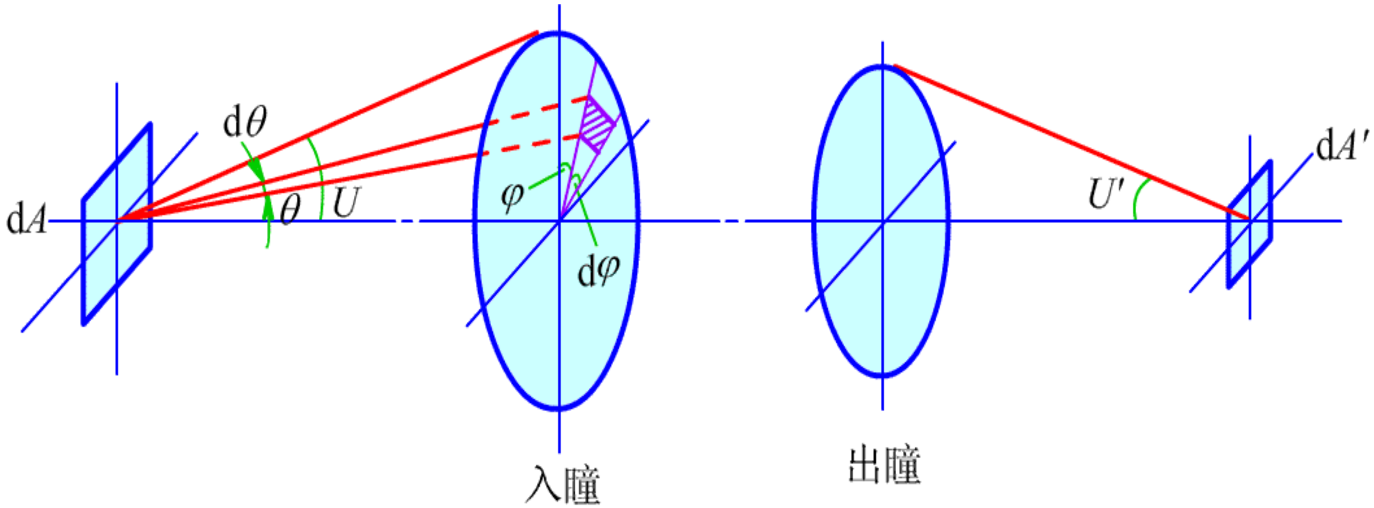
第三节　成像系统像面的光照度

一、轴上像点的光照度公式

物看成余弦辐射体

物面光通量　$\Phi = \pi L dA \sin^2 U$

像面光通量　$\Phi' = \pi L' dA' \sin^2 U'$



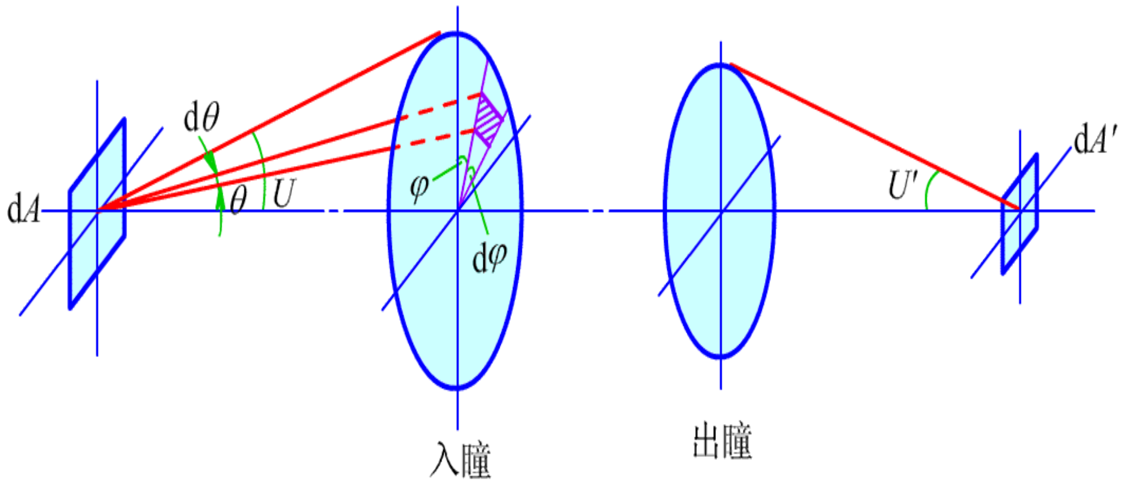
成像光学系统

第三节　成像系统像面的光照度

一、轴上像点的光照度公式

假设透射率τ　　$\Phi' = \tau\Phi$

有　　$\Phi' = \tau\pi L dA \sin^2 U$



成像光学系统

第三节　成像系统像面的光照度

一、轴上像点的光照度公式

轴上像点的照度

$$E' = \frac{\Phi'}{dA'} = \tau\pi L \frac{dA}{dA'} \sin^2 U$$

因为

$$\frac{dA}{dA'} = \frac{1}{\beta^2}$$

所以

$$E' = \frac{1}{\boxed{\beta^2}} \tau\pi L \sin^2 U$$

当满足正弦条件（拉赫不变量）

$$\beta = \frac{n \sin U}{n' \sin U'}$$

有

$$E' = \frac{n'^2}{n^2} \tau\pi L \boxed{\sin^2 U'}$$

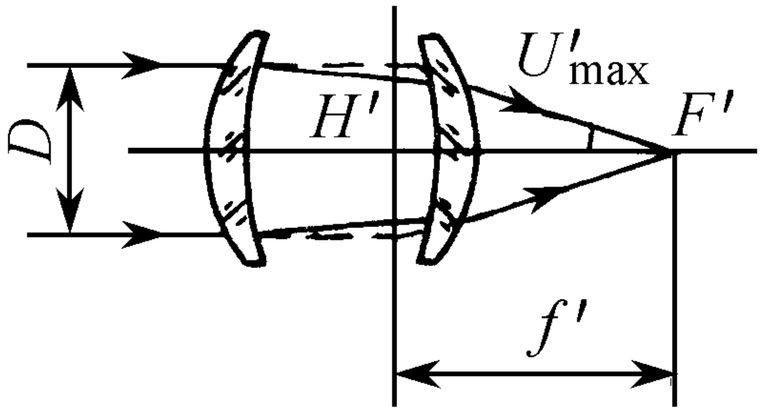
轴上像点的照度与孔径角正弦的平方成正比

第三节　成像系统像面的光照度

举例：照相机像面的光照度和光圈数

照相机是把景物成像到胶片或CCD像面上，由于景物距离与物镜焦距相比，一般都达到几十倍，因此可以认为像平面近似位于物镜的像方焦平面上。有

$$\sin U'_{max} \approx \frac{D}{2f'}$$



第三节 成像系统像面的光照度

举例：照相机像面的光照度和光圈数

照相机像平面上的光照度为：

$$E' = \frac{n'^2}{n^2}\tau\pi L\sin^2 U'$$

$$E_0' = \frac{\pi}{4}\tau L\left(\frac{D}{f'}\right)^2$$

$(\frac{D}{f'})$ 为照相机物镜的相对口径，用A 表示，是照相机的一个重要的光学性能，一般和物镜的焦距一起标注在镜框上。（相对口径越大，像面照度越大，理论分辨率越高）

照相机的光圈（相对孔径的倒数）：

1　1.4　2　2.8　4　5.6　8　11　16　22　32

第三节　成像系统像面的光照度

举例：照相机像面的光照度和光圈数

T制光圈：假定物镜的透过率为τ，T 制光圈为：

$$\left(\frac{D}{f'}\right)_T^2 = \tau\left(\frac{D}{f'}\right)^2$$

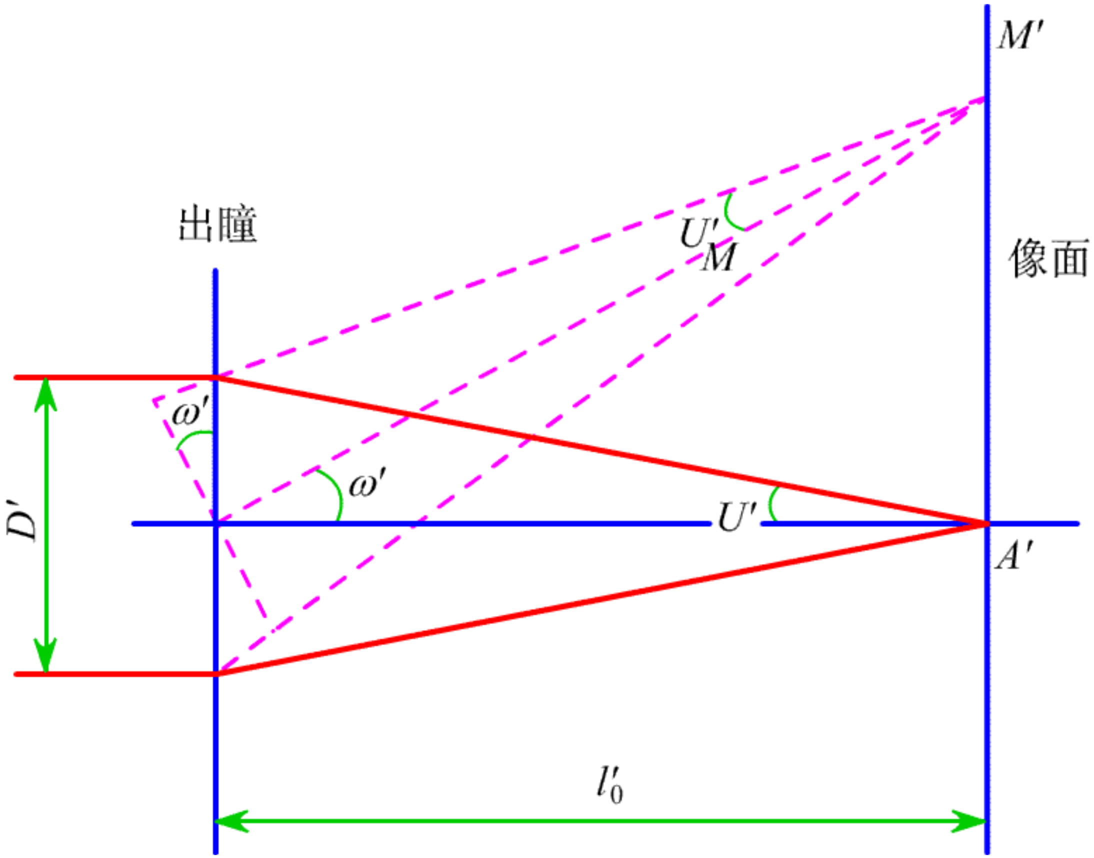
这样就保证了不同的物镜结构和透过率的情况下，在景物的光亮度相同的情况下，像平面的光照度相同。

例题：在晴朗的天空的情况下，光亮度为 5000 cd/m^2，底片的曝光量为 0.4 $lx \cdot s$，在曝光时间为 $1/100s$ 时，问选取光圈数为多少？

曝光量：某一面元接收的光照度在时间t内的积分

第三节 成像系统像面的光照度

二、轴外像点的光照度



光学系统的轴外点成像

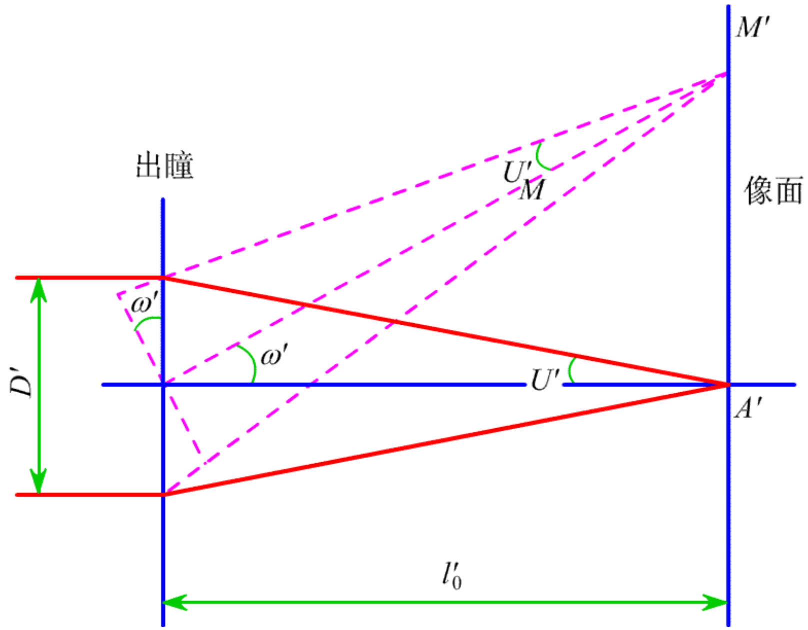
第三节 成像系统像面的光照度

二、轴外像点的光照度

$$E' = \frac{n'^2}{n^2}\tau\pi L\sin^2 U'$$

$$E'_M = \frac{n'^2}{n^2}\tau\pi L\sin^2 U'_M$$

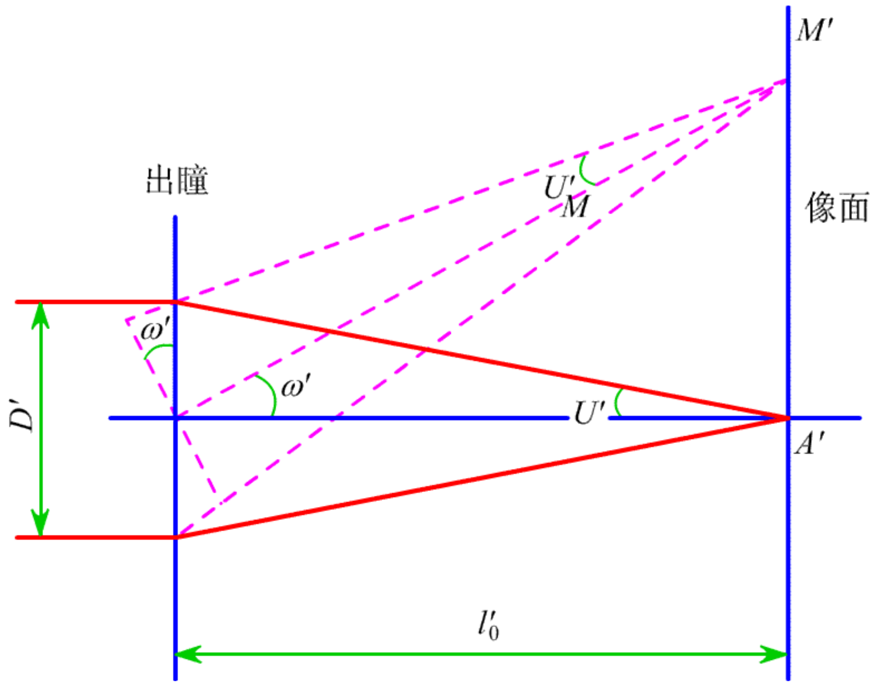
轴外像点照度的简化



$$\sin U'_M \approx \tan U'_M = \frac{\dfrac{D'}{2}\cos\omega'}{\dfrac{l'_0}{\cos\omega'}} = \frac{D'\cos^2\omega'}{2l'_0} \approx \sin U'\cos^2\omega'$$

第三节　成像系统像面的光照度

轴外像点照度的简化



$$E' = \frac{n'^2}{n^2}\tau\pi L\sin^2 U'$$

$$E'_M = \frac{n'^2}{n^2}\tau\pi L\sin^2 U'\cos^4\omega'$$

$$= E'_0\cos^4\omega'$$

其中，轴上像点照度

$$E'_0 = \frac{n'^2}{n^2}\tau\pi L\sin^2 U'$$

轴外像点的光照度随视场角 ω' 的增大而降低。

第三节　成像系统像面的光照度

三、通过光学系统时的能量损失

1、光在透明介质折射面上的反射损失

2、介质吸收

3、反射面的光能损失：光的透射和光的吸收

光学系统的透射比—衡量光学系统中光能损失的大小

$$\tau = \frac{\Phi '}{\Phi}$$

第三节　成像系统像面的光照度

三、通过光学系统时的能量损失

1、光在两透明介质界面上的反射损失

反射比：反射光通量与入射光通量之比

$$\rho = \frac{1}{2}\left[\frac{\sin^2(i-i')}{\sin^2(i+i')} + \frac{\tan^2(i-i')}{\tan^2(i+i')}\right]$$

当入射角很小　$\sin i \approx \mathrm{tg} i \approx i$

$$\rho = \left(\frac{n'-n}{n'+n}\right)^2$$

N_1个空气—冕牌、N_2个空气—火石玻璃界面的出射光通量的经验公式

$$\Phi' = \Phi(1-\rho_1)^{N_1}(1-\rho_2)^{N_2} \approx (0.96)^{N_1}(0.95)^{N_2}\Phi$$

第三节 成像系统像面的光照度

三、通过光学系统时的能量损失

2、介质吸收造成的光能损失

$$d\Phi = -k\Phi\, dl$$

介质吸收后通过的光通量规律

$$\Phi = \int_l d\Phi = \Phi_0 e^{-kl} = \Phi_0 P^l$$

$$P = e^{-k}$$

介质透明率

介质吸收的光通量

$$\Delta\Phi = \left(1 - P^l\right)\Phi_0$$

多层介质吸收后通过的光通量

$$\Phi = \Phi_0 P_1^{\sum d_1} P_2^{\sum d_2} \cdots$$

第三节　成像系统像面的光照度

三、通过光学系统时的能量损失

3、反射面的光能损失

反射光的光通量 $\Phi_1 = \rho \Phi_0$

反射损失的光通量 $\Delta\Phi_1 = (1-\rho)\Phi_0$

反射面的反射比

镀银反射面：$\rho \approx 0.95$

镀铝反射面：$\rho \approx 0.85$

抛光良好的棱镜全反射面：$\rho \approx 1$

全反射

第三节　成像系统像面的光照度

四、光学系统的总透射比

M种介质的中心厚度　$\sum d_1$、$\sum d_2$、…、$\sum d_M$

M种介质的透明率　P_1、P_2、…、P_M

N_1 个冕牌玻璃折射面，　N_2 个火石玻璃折射面，　N_3 个反射面

出射的总光通量

$$\Phi=(1-\rho_1)^{N_1}(1-\rho_2)^{N_2}P_1^{\sum d_1}P_2^{\sum d_2}\ldots P_M^{\sum d_M}\rho^{N_3}\Phi_0$$

系统的总透射比

$$\tau=\frac{\Phi}{\Phi_0}=(1-\rho)^{N_1}(1-\rho)^{N_2}P_1^{\sum d_1}P_2^{\sum d_2}\ldots P_M^{\sum d_M}\rho^{N_3}$$

成像系统像面的光照度

- 轴上像点的光照度
  - 物看成余弦辐射体
  - $\Phi' = \tau \Phi$
  - $E' = \dfrac{n'^2}{n^2} \tau \pi L \sin^2 U'$
- 轴外像点的光照度
  - $$E'_M = \frac{n'^2}{n^2} \tau \pi L \sin^2 U' \cos^4 \omega' = E'_0 \cos^4 \omega'$$
- 通过光学系统时的能量损失
  - 光在透明介质折射面上的反射损失：$\Phi' = \Phi (1-\rho_1)^{N_1} (1-\rho_2)^{N_2} \approx (0.96)^{N_1} (0.95)^{N_2} \Phi$
  - 介质吸收：$\Phi = \Phi_0 P_1^{\sum d_1} P_2^{\sum d_2} \cdots$
  - 反射面的光能损失：光的透射和光的吸收：$\Delta \Phi_1 = (1-\rho) \Phi_0$

例**1** 一投影读数系统如图所示。

投影物镜 **IV** 使物面 **III** 成一放大 **50** 倍的实像在投影屏 **V** 上；

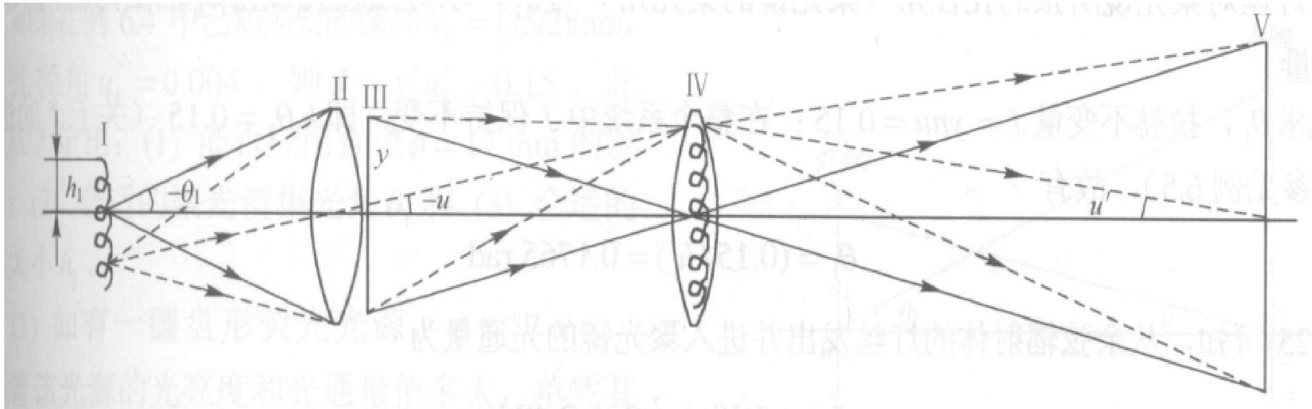
II 是照明用聚光镜，紧挨物面，通光口径大小等于物面；

I 是灯丝，经聚光镜 **II** 成实像在投影物面**IV**的入瞳上，灯丝像大小等于入瞳。

这样布置是为了有效地利用光能并减少多余的杂光。

已知物面直径为 **1.5 mm**，像面直径为 **75 mm**；投影物镜的物、像方孔径角各为 $u=-0.2\approx\sin U$，$u'=-0.2/\beta=0.004\approx\sin U'$。整个光学系统（包括聚光镜）的通光系数为 $K=0.29$。

希望像面中心的光照度不低于 **75 lx,** 试为此系统选择光源。



I—灯丝；II—聚光镜；III—物面；IV—投影物镜；V—投影屏

图 6.26 投影读数系统光路示意图

表6.7 各种发光表面的光亮度参考值

表面名称	$L/(cd/m^2)$	表面名称	$L/(cd/m^2)$
地面上所见太阳表面	$(15\sim20)\times10^8$	日用 200 W 白炽钨丝灯	800×10^4
日光下的白纸	2.5×10^4	白光 LED	$(4\sim10)\times10^6$
晴朗白天的天空	0.3×10^4	仪器用钨丝灯	10×10^6
月亮表面	$(0.3\sim0.5)\times10^4$	6 V 汽车头灯	10×10^6
月光下的白纸	0.03×10^4	投影放映灯	20×10^6
烛焰	$(0.5\sim0.6)\times10^4$	卤素钨丝灯	30×10^6
钠光灯	$(10\sim20)\times10^4$	碳弧灯	$(15\sim100)\times10^7$
日用 50W 白炽钨丝灯	450×10^4	超高压(UHP)汞弧灯	$(40\sim100)\times10^7$
日用 100W 白炽钨丝灯	600×10^4	超高压电光源	25×10^8

各种光源辐射的光通量参考值

光源名称	Φ/lm	光源名称	Φ/lm
日用220V,40W 白炽钨丝灯	约500	250W 溴钨放映灯	约7500
日用40W 白色荧光灯	约2000	120W 超高压（UHP）汞灯	约6000
仪器用6V，7.5W 白炽钨丝灯	约90	200W 超高压（UHP）汞灯	约12000
6V，12W 白炽钨丝灯	约160	500W 氙灯	约25000
6V，30W 白炽钨丝灯	约400	1000W 碳弧灯	约50000
6V，50W 白炽钨丝灯	约1000	LED	约120

（1）求平面所需的光照度 ***E'*=75lx**, 故屏面所应接受的光通量为 ***Φ'*=*E'S'*=0.331 lm,**从灯丝发出并进入聚光镜的光通量至少需为

$$\Phi = \Phi' / K = 1.141lm$$

（2）求像平面的光亮度L' 及灯丝光亮度L. 由式

$$\Phi' = \pi L' dS' \sin^2 U'$$

可得像面光亮度为

$$L' = \frac{\Phi'}{\pi dS' \sin^2 U'} = 149.1 \times 10^4 (\mathrm{cd/\ m^2})$$

于是灯丝发光面的光亮度至少应为

$$L = L' / K = 514 \times 10^4 (\mathrm{cd/\ m^2})$$

（3）根据所需的亮度L 选用钨丝灯。

由产品规格可知6V，12W仪器用钨丝灯的总光通量为160 lm。

沿光轴方向看去，灯丝表面为边长1.5mm的正方形。

为了与圆形入瞳相配。在本例的计算中把它近似取为直径1.7mm的圆盘（面积大致等于上述正方形）。这样处理并不改变计算原理，其目的只是为了在计算示例中避免方孔与圆孔的交叠。在实际装调时，当然应该使方形灯丝像大致与圆形入瞳内切或外切。

平面灯丝的发光状态接近于图所示的双向余弦辐射体。

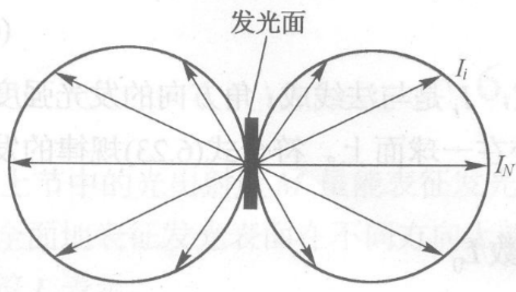


图 6.16　双向的余弦发光体

向一边发出的光通量为 $\frac{1}{2} \times 160 = 80lm$

这种灯的光亮度完全满足所需

$$\Phi = \pi L ds$$

得灯丝的光亮度为

$$L = \frac{\Phi}{\pi ds} = 1122 \times 10^4 (cd/m^2)$$

可见这种灯的光亮度完全满足所需 $514 \times 10^4 (cd/m^2)$ 的要求。

$$1122 / 514 = 2.18$$

。

（4）核算光通量

设灯丝对聚光镜所张的孔径角（聚光镜的集光角）为 θ_1，求灯丝在孔径角 θ_1 范围内射向聚光镜的光通量。

先求 θ_1，拉赫不变量 $J=ynu=0.15$； 在整个系统中J保持不变，即$h_1\theta_1=0.15$，故有

$$\theta_1 = (0.15 / h_1) = 0.1765\ \mathrm{rad}$$

由式

$$\Phi = LdS\int_0^{2\pi} d\varphi\int_0^{U} \cos i \sin i di = \pi LdS \sin^2 U$$

可知，从余弦辐射体的灯丝发出并进入聚光镜的光通量为

$$\Phi = \pi LdS \sin^2\theta_1 = 2.49 lm$$

- 完全满足所需的 1.141 lm 的要求（2.49/1.141=2.18）。
- 和前面由光亮度算出的完全相同。
- 从光亮度或者从光通量出发这两种计算方法所得的结果完全相同。满足了光亮度就等于满足了进入光学系统光通量的要求。

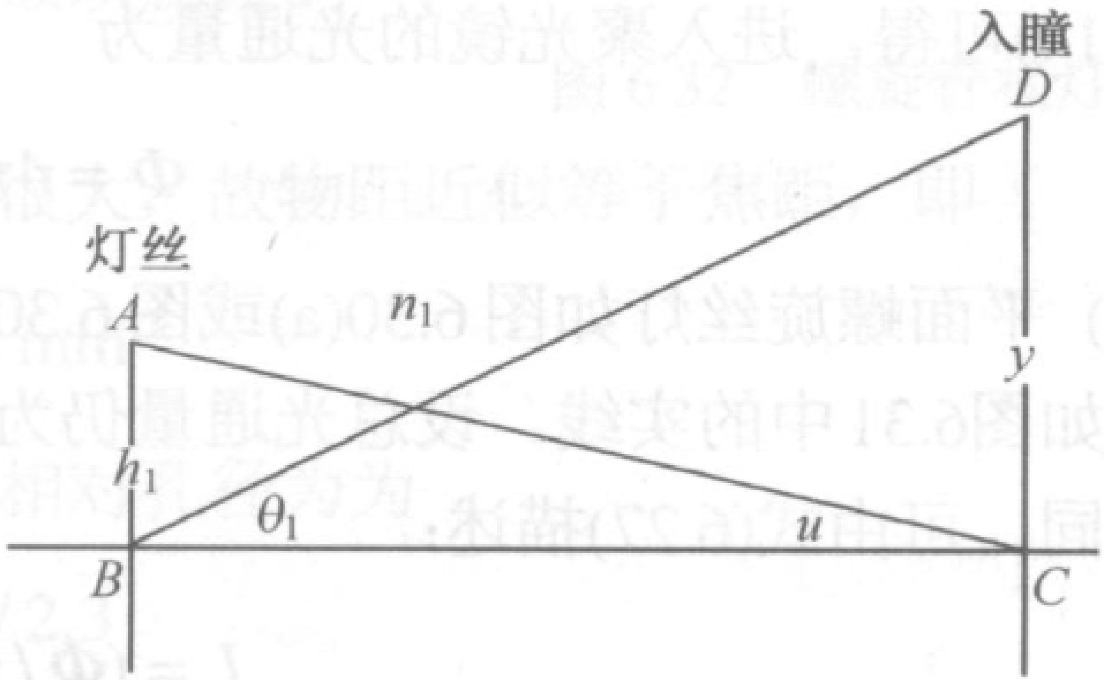


图 6.27 证明近轴区拉赫不变量 $n_1h_1\theta_1 = n_1y_1u_1$ 示意图

例2　一种放在像面上的远红外探测器，接收从物镜射来的辐射，这种探测器的工作特性是希望单位面积上接收的能通量大（既辐照度大）。

为了提高像面照度，可在探测器表面叠放一块半球形的锗透镜（折射率约为4），如图所示，球心就在像面（探测器工作表面）上。

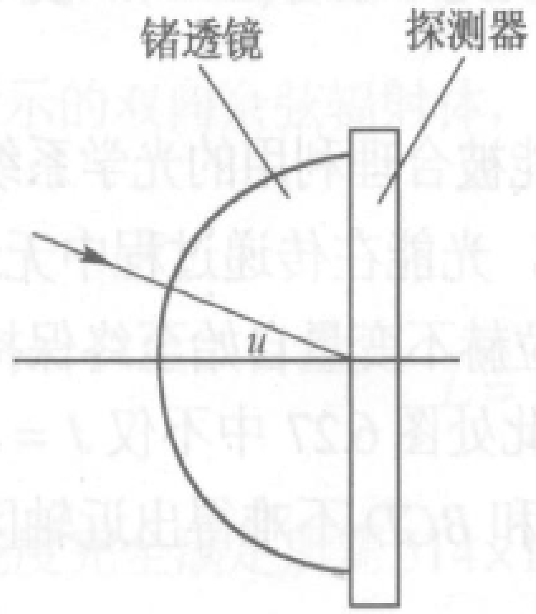


图 6.28　远红外探测器提高像面照度的一种方法

此时入射光线对半球面是同心入射，光线不发生折射，然而最后所成的像却缩小了。

因为系统的放大倍率

$$\beta = y'_k / y_1 = n_1 u_1 / n'_k u'_k$$

其中，u_1、u'_k 都未变，但 n'_k 从原来空气中的 $n'_k = 1$ 提高到了锗的4倍，

故所成的像（线量）缩小了1/4，面积缩小了1/16，于是照度提高了16倍。

例3 发光体辐射方向特性（辐射能空间分布特性）的讨论。

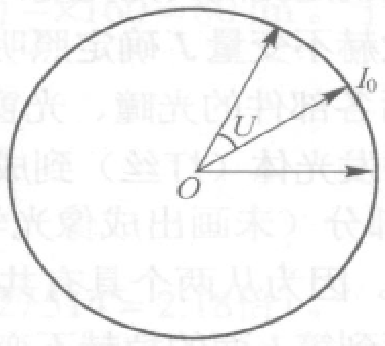


图 6.29　钨弧灯示意图

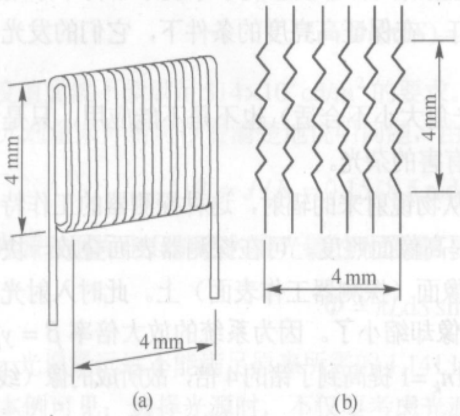


图 6.30　平面螺旋丝灯

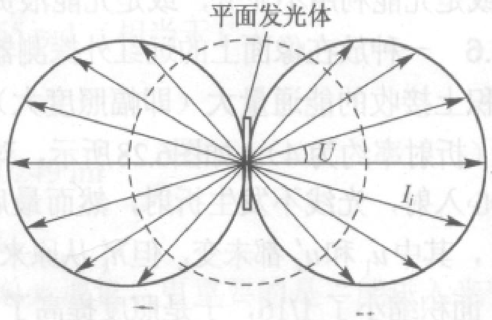


图 6.31　平面螺旋丝灯辐射特性示意图

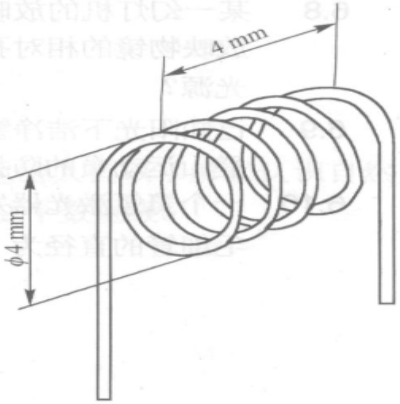


图 6.32　螺旋管状灯丝

解 （1）钨弧灯是一个无灯丝的白炽钨球，各向发光强度 I_0 相等。在极坐标中的发光强度曲面是一个以钨球为中心的球面，如图 6.29 所示，由式可得其平均发光强度为

$$I_0 = \Phi / 4\pi = 79.6\text{cd}$$

由式（6.14）可得，进入聚光镜的光通量为

$$\Phi = 4\pi I_0 \sin^2\left(U/2\right) = 40\text{lm}$$

（2）平面螺旋丝灯如图 6.30（a）或图 6.30（b）所示平面排丝灯，其发光强度分布近似于双向的余弦辐射体，如图 6.31 中的实线。设总光通量仍为 1000lm，单向为 500lm。光亮度 L 各向相同，发光强度各向不同。可由式描述：

$$L = \left(\Phi / \pi dS\right) = 996\times10^4\left(\text{cd}/\text{m}^2\right)$$

得法线方向（i=0）的发光强度为

$$I_N = LdS = 159.4\text{cd}$$

即光轴方向的发光强度比钨弧灯大一倍。再由式（6.25）可求得进入聚光镜的光通量为

$$\Phi = \pi LdS\sin^2 U = 80\text{lm}$$

即进入聚光镜的光通量也比钨弧灯大一倍。

图 6.31 中用虚线画出了同样光通量的钨弧灯发光强度分布，平面发光体的优点是显而易见的。

此外还有一种螺旋管状灯丝，如图 6.32 所示。它的发光体是一个圆柱表面，发光状况近似于余弦辐射。计算面积时可近似地按投影面积计算，如图 6.32 中按 $(4\times4)\text{mm}^2$ 计算。

选择光学系统光源时应考虑的几点如下：

- 发光体的光亮度（这一要求已把进入系统的光通量包括在内，一般不必单独再对光通量提出要求）。
- 辐射能的空间分布特性（方向特性）
- 发光体的几何形状和尺寸
- 发光效率（常指每瓦特电功率给出的光通量值）
- 光源辐射的光谱成分及色度特性。

此外尚须注意稳定性、寿命、热量、使用方便等要求。

1. 作业：P104

   1、2、4

Thank You！