

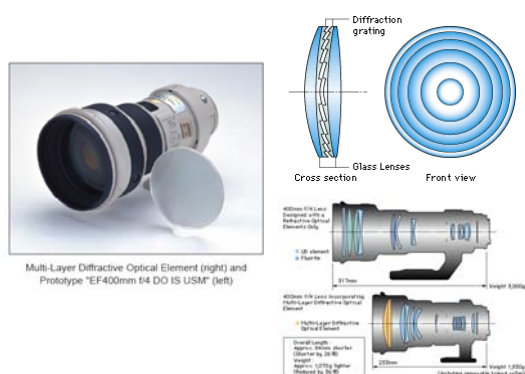
# 应用光学

谭峭峰

tanqf@mail.tsinghua.edu.cn

清华大学 精密仪器系 光电工程研究所

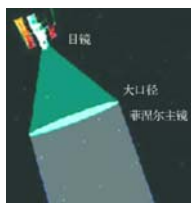
## 折衍混合成像系统



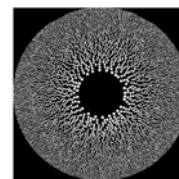
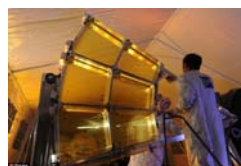
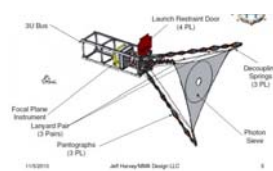
The Canon EF 400mm f/4 DO IS USM is TIPA Award Winner for Best Lens 2002-2003

Canon's **EF 400mm f/4 DO IS USM Lens** has been awarded the 'best Lens' by TIPA (Technical Image Press Association). The award was announced at the European Photo & Imaging Awards 2002-2003.

Canon will continue its research and development efforts with the aim of incorporating the Multi-Layer Diffractive Optical Element in a variety of products, such as interchangeable SLR camera lenses, digital camera lenses, HMDs (Head-Mounted Displays),\*2 LCD projector lenses, and other imaging equipment.

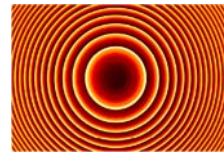
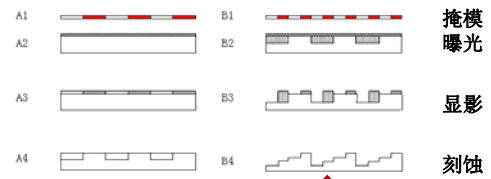
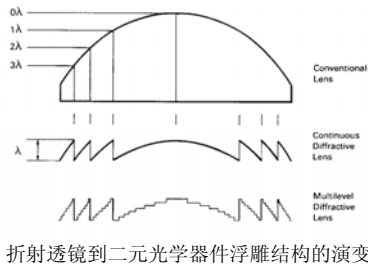


“眼镜”计划的衍射成像望远镜和5m口径衍射望远镜的样机



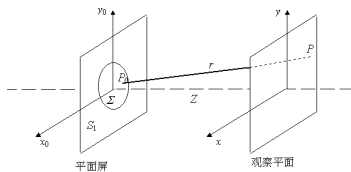
薄膜型光学即时成像器(MOIRE) 口径20厘米、焦距为1米

### 基础知识1:



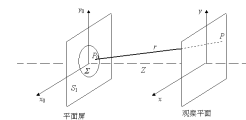
二元!

### 基础知识2: 基尔霍夫标量衍射理论



$$E_Z(P) = \frac{1}{i\lambda} \int_{\Sigma} E_{\Sigma}(P_0) K(\theta) \frac{e^{ikr}}{r} dS$$

索末菲辐射条件  
光源和观察到衍射屏的距离足够远  
满足基尔霍夫边界条件(衍射孔甚大于波长)



瑞利-索末菲衍射: 积分公式  
菲涅耳衍射:

$$E_Z(x, y) = G(E_{\Sigma}(x_0, y_0))$$

$$= \frac{e^{ikZ}}{i\lambda Z} \iint_{\Sigma} E_{\Sigma}(x_0, y_0) e^{\frac{ik}{2Z}[(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2]} dx_0 dy_0 = CF(E_{\Sigma}(x_0, y_0)) e^{\frac{ik(x_0^2 + y_0^2)}{2Z}}$$

夫琅和费衍射:

$$E_Z(x, y) = G(E_{\Sigma}(x_0, y_0))$$

$$= \frac{e^{ikZ}}{i\lambda Z} e^{\frac{ik}{2Z}(x^2 + y^2)} \iint_{\Sigma} E_{\Sigma}(x_0, y_0) e^{-\frac{ik}{Z}(xx_0 + yy_0)} dx_0 dy_0 = CF(E_{\Sigma}(x_0, y_0))$$

### 基础知识3: 角谱理论

角谱理论  $\longleftrightarrow$  光波的平面波分解与传播

对任一输入平面上的光场复振幅分布作傅里叶分析

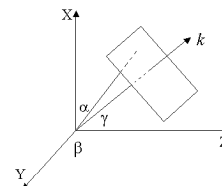
分解为沿不同方向传播的平面波的迭加

$$u(x, y, 0) = \iint_{-\infty}^{\infty} U_0(f_x, f_y) \exp[i2\pi(f_x x + f_y y)] \cdot df_x df_y$$

$$U_0(f_x, f_y) = \iint_{-\infty}^{\infty} u(x, y, 0) \exp[-i2\pi(f_x x + f_y y)] dx dy$$

角谱分布

$f_x, f_y$  代表着空间频率



光波面的法线方向与X、Y、Z夹角为 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$

$$f_x = \frac{\cos \alpha}{\lambda} \quad f_y = \frac{\cos \beta}{\lambda}$$

$$\exp[i2\pi(xf_x + yf_y + z\sqrt{1/\lambda^2 - f_x^2 - f_y^2})]$$

对任一输入平面上的光场复振幅分布作傅里叶分析

$$u(x, y, 0) = \int \int_{-\infty}^{\infty} U_0(f_x, f_y) \exp[i2\pi(f_x x + f_y y)] \cdot df_x df_y$$

$$U_0(f_x, f_y) = \int \int_{-\infty}^{\infty} u(x, y, 0) \exp[-i2\pi(f_x x + f_y y)] dx dy$$

对任一输出平面上的光场复振幅分布作傅里叶分析

$$u(x, y, z) = \int \int_{-\infty}^{\infty} U(f_x, f_y; z) \exp[i2\pi(f_x x + f_y y)] df_x df_y$$

$$U(f_x, f_y; z) = \int \int_{-\infty}^{\infty} u(x, y, z) \exp[-i2\pi(f_x x + f_y y)] dx dy$$

$U(f_x, f_y, z)$  与  $U_0(f_x, f_y)$  间的关系?

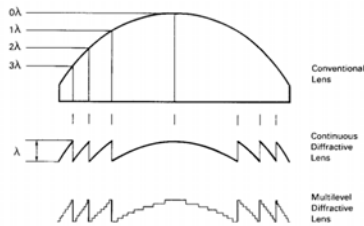
平面波传播  $\exp[i2\pi(xf_x + yf_y + z\sqrt{1/\lambda^2 - f_x^2 - f_y^2})]$

$$U(f_x, f_y; z) = U_0(f_x, f_y) \exp[i2\pi(1/\lambda^2 - f_x^2 - f_y^2)^{1/2} Z]$$

$$u(x, y, z) = \int \int_{-\infty}^{\infty} U(f_x, f_y; z) \exp[i2\pi(f_x x + f_y y)] df_x df_y$$

#### 基础知识4: 菲涅耳波带透镜

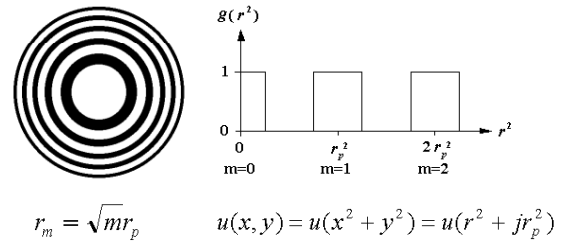
具有浮雕表面结构的透镜称为菲涅耳波带透镜



折射透镜到二元光学器件浮雕结构的演变

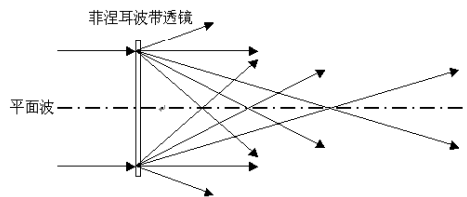
菲涅耳波带透镜是基于菲涅耳波带片FZP (Fresnel Zone Plate), 将FZP的图形制作成闪耀的相位结构, 以获得高衍射效率。

菲涅耳波带片FZP:



$$u(x, y) = u(x^2 + y^2) = u(r^2 + jr_p^2)$$

若以波长为 $\lambda$ 的平面波照射FZP, 将观察到多个发散和会聚的球面波, 每一列波对应一个衍射级次, 其振幅和焦距由菲涅耳波带透镜的图形决定, 直接透过菲涅耳波带透镜的无衍射光形成零级背景光。



$z=0$ 复振幅分布:  $u(x, y) = u(x^2 + y^2) = u(r^2 + jr_p^2)$

$$u(r) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n \exp(i2\pi n \frac{r^2}{r_p^2})$$

$$A_n = (\frac{1}{r_p^2}) \int_0^{r_p^2} u(r^2) \exp(-i2\pi n \frac{r^2}{r_p^2}) d(r^2)$$

传播到 $z$ 复振幅分布(菲涅耳衍射):

$$u(x', y', z) = \iint u(x, y) \exp\{\frac{i\pi}{\lambda z} [(x-x')^2 + (y-y')^2]\} dx dy$$

$$u(x', y', z) = \iint u(x, y) \exp\left\{\frac{i\pi}{\lambda z} [(x-x')^2 + (y-y')^2]\right\} dx dy$$

$$u(r) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n \exp(i2\pi n \frac{r^2}{r_p^2}) \Rightarrow u(x, y) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n \exp(i2\pi n \frac{x^2 + y^2}{r_p^2})$$

$$u(x', y', z) = \sum_n A_n \exp\left[\frac{i\pi}{\lambda z} (x'^2 + y'^2)\right] \bullet \iint \exp\left[i2\pi\left(\frac{n}{r_p^2} + \frac{1}{2\lambda z}\right)(x^2 + y^2)\right] \bullet \exp\left[-i2\pi\left(\frac{xx' + yy'}{\lambda z}\right)\right] dx dy$$

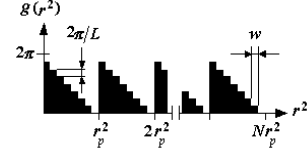
焦点位置:

$$z_n = -\frac{r_p^2}{2\lambda n} \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

$$A_n = \left(\frac{1}{r_p^2}\right) \int_0^{r_p^2} u(r^2) \exp(-i2\pi n \frac{r^2}{r_p^2}) d(r^2)$$

振幅型: 存在多个级次, 能量利用率低

纯位相器件、闪耀特性, 提高能量利用率



透过率函数:

$$u(r^2) = \sum_{k=0}^{N(L-1)} \exp\left(\frac{-i2\pi k}{L}\right) \text{rect}\left(\frac{r^2 - k r_p^2 / L - r_p^2 / 2L}{r_p^2 / L}\right)$$

$$A_n = \left(\frac{1}{r_p^2}\right) \int_0^{r_p^2} u(r^2) \exp(-i2\pi n \frac{r^2}{r_p^2}) d(r^2)$$

$$A_n = \int_0^{L-1} \sum_{k=0}^{L-1} \exp\left(\frac{-i2\pi k}{L}\right) \text{rect}\left(\frac{r^2 - k/L - 1/2L}{1/L}\right) \exp(-i2\pi n r^2) d(r^2)$$

$$= \exp\left(-\frac{i\pi n}{L}\right) \text{sinc}(n/L) \frac{1}{L} \sum_{k=0}^{L-1} \exp\left\{-i2\pi \frac{k(n+1)}{L}\right\}$$

$$\sum_{k=0}^{L-1} \exp\left\{-i2\pi \frac{k(n+1)}{L}\right\} = \begin{cases} L & n = jL - 1, j \in N \\ 0 & \text{else} \end{cases}$$

焦点位置:

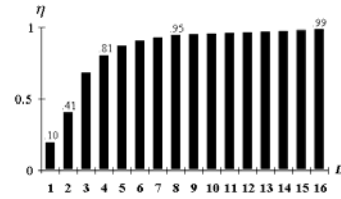
$$z_n = -\frac{r_p^2}{2\lambda n} \quad n = jL - 1, j \in N$$

各焦点处光强:

$$I_n = |A_n|^2 = \text{sinc}^2(n/L)$$

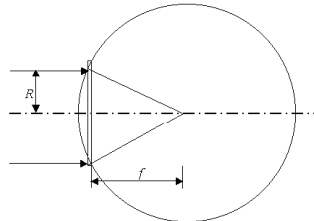
集中于主焦点 ( $n=-1$ ) 处的光强度被定义为菲涅耳波带透镜的衍射效率  $\eta$ :

$$\eta = |A_{-1}|^2 = \text{sinc}^2(1/L)$$



已知: 焦距  $f$   
最大外径  $2R$   
衍射效率  $\eta$

求解结构参数:  
波带片周期数  $N$   
环带半径  
相位台阶数  $L$   
环带数  $M=NL$   
最小线宽  $V$



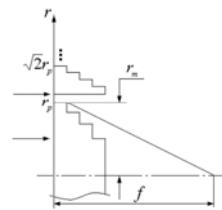
$$\text{傍轴条件下: } \phi_{out} = \frac{\pi}{\lambda f} r^2$$

$$\phi_{in} = \text{const.}$$

$$\phi = \phi_{out} - \phi_{in} = \frac{\pi}{\lambda f} r^2$$

$$\frac{\pi}{\lambda f} r_m^2 = 2\pi m / L$$

$$r_m = \sqrt{2m\lambda f / L}$$



当 $m=M$ 时:  $R = \sqrt{2M\lambda f/L}$

$$f = R^2 L / 2M\lambda = R^2 / 2N\lambda$$

当相位台阶数 $L$ 变化时, 焦距 $f$ 不变。

最小线宽是指最大环带半径与其相邻环带半径之差:

$$v = r_M - r_{M-1} = \sqrt{2Mf\lambda/L} - \sqrt{2(M-1)f\lambda/L} = r_M(1 - 1 + 1/2M + 1/8M^2 + \dots)$$

当 $M$ 足够大时:  $v = r_M / 2M = R / 2M$

菲涅耳波带透镜设计公式组

- 焦距  $f = R^2 / 2N\lambda$
- 环带半径  $r_m = \sqrt{2m\lambda f/L}$
- 环带数  $M = R^2 L / 2f\lambda$
- 最小线宽  $v = \sqrt{2Mf\lambda/L} - \sqrt{2(M-1)f\lambda/L} = R / 2M$
- 数值孔径  $NA = 2R/f$
- 衍射效率  $\eta = \text{sinc}^2(1/L) = [\frac{\sin(\pi/L)}{\pi/L}]^2$

$$v = R / 2M = f\lambda / RL = 2\lambda / (NA \cdot L)$$

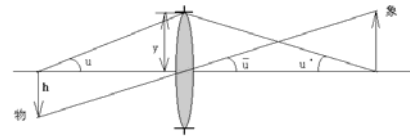
### 1 衍射光学透镜的成像性质

全息光学透镜HOL(Holographic Optical Lens)、二元光学透镜BOL(Binary Optical Lens)等衍射光学透镜DOL(Diffractive Optical Lens)均等效于折射率无限大的薄透镜,可直接运用几何光学的相关理论对衍射成像的像差特性进行研究。

旋转对称衍射透镜的相位函数表示形式为:

$$\Phi(r) = \frac{2\pi}{\lambda} (A_1 r^2 + A_2 r^4 + \dots)$$

### • 单色像差



傍轴量的图示说明

所有符号意义及正负号规定均遵循维尔福德(Welford)约定。 $h$ 为物高,  $\rho$ 和 $\theta$ 为光瞳面上的极坐标。

$$W(h, \rho, \cos\theta) = \frac{1}{8} \rho^4 S_{\text{I}} + \frac{1}{2} h \rho^3 \cos\theta S_{\text{II}} + \frac{1}{2} h^2 \rho^2 \cos^2\theta S_{\text{III}} + \frac{1}{4} h^2 \rho^2 (S_{\text{III}} + S_{\text{IV}}) + \frac{1}{2} h^3 \rho \cos\theta S_{\text{V}}$$

**零匹兹万场曲和零畸变**是衍射光学透镜的显著特点,其他单色像差特性与传统透镜相似。

### • 色散性质

在可见光波段,大部份光学材料的折射率随波长增大而减小,从而构成的光学面的**光焦度随波长增大而减小**。

若DOL的设计波长为 $\lambda_d$ , 焦距为 $f_d$

对应于 $\lambda_C$ 和 $\lambda_F$ 的同一级衍射焦距:

$$\phi_C = \frac{\lambda_C}{\lambda_d} \phi_d \quad \phi_F = \frac{\lambda_F}{\lambda_d} \phi_d$$

**DOL的光焦度与波长成正比!**

材料折射率为 $n(\lambda)$ 的传统薄透镜的光焦度为:

$$\phi(\lambda) = \frac{1}{f(\lambda)} = [n(\lambda) - 1]c_0$$

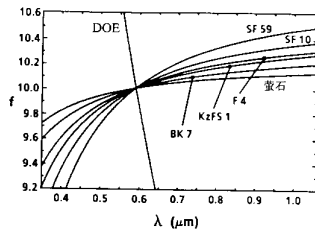
$c_0$ 是与透镜表面几何形状有关的常数

$$\text{DOL光焦度: } \phi_z = [n(\lambda_z) - 1]c_0 \quad \phi_z = \frac{\lambda_z}{\lambda_d} \phi_d$$

$$n_z^{\text{eff}} = 1 + \frac{1}{c_0 f_z} = 1 + \frac{\lambda_z}{c_0 f_d \lambda_d}$$

$$\text{传统光学材料的阿贝数 } V_d \quad V_d = \frac{n_d - 1}{n_F - n_C}$$

$$\text{DOL的等效阿贝数 } V_d^D \quad V_d^D = \frac{\lambda_d}{\lambda_F - \lambda_C} = -3.452$$



与传统材料相比可知：

- DOL色散与材料无关，仅与波长有关，显示出衍射特性；
- DOL的阿贝数 $v_d^p$ 的符号与传统玻璃的阿贝数 $V_d$ 符号相反；
- $v_d^p$ 的绝对值较传统玻璃的小，表明DOL的色散较大。

### • 热特性

当设计系统工作于较大的温度范围时，必需考虑温度对系统光学性能的影响。

单位温度变化量的单位焦距的变化：光热膨胀系数

折射单透镜的光热膨胀系数：

$$x_{f,r} = \frac{1}{f} \frac{df}{dT} = \alpha_g - \frac{1}{n-n_0} \left( \frac{dn}{dT} - \frac{dn_0}{dT} \right)$$

$\alpha_g$  是透镜玻璃的热膨胀系数

$n$  是透镜玻璃的折射率

$n_0$  是像空间的折射率

$$\Delta f = f \cdot x_{f,r} \cdot \Delta T$$

相位型FZP掩模设计公式组

- 焦距  $f = R^2 / (2N\lambda)$
- 环带半径  $r_m = \sqrt{2m\lambda f / L}$   $f = \frac{n_0 r_m^2}{2m\lambda_0}$ ,  $m = 1, 2, 3, \dots$
- 环带数  $M = R^2 L / (2f\lambda)$
- 最小线宽  $v = \sqrt{2Mf\lambda / L} - \sqrt{2(M-1)f\lambda / L} = R / (2M)$
- 数值孔径  $NA = 2R / f$
- 衍射效率  $\eta = \text{sinc}^2(1/L) = [\frac{\sin(\pi/L)}{\pi/L}]^2$

随着温度的变化

- ◆ DOL的相位区间的半径膨胀或收缩：

$$r_m(T) = r_m(1 + \alpha_g \Delta T)$$

- ◆ 像方折射率：

$$n_0(T) = n_0 + \frac{dn_0}{dT} \Delta T$$

焦距关于温度的函数为：

$$f(T) = f[1 + 2\alpha_g \Delta T + \alpha_g^2 (\Delta T)^2 + \frac{1}{n_0} \frac{dn_0}{dT} \Delta T + 2 \frac{1}{n_0} \frac{dn_0}{dT} \alpha_g (\Delta T)^2 + \frac{1}{n_0} \frac{dn_0}{dT} \alpha_g^2 (\Delta T)^3]$$

DOL的光热膨胀系数：

$$x_{f,d} = 2\alpha_g + \frac{1}{n_0} \frac{dn_0}{dT} \quad \text{与 } n, dn/dT \text{ 无关}$$

折射单透镜的光热膨胀系数：

$$x_{f,r} = \frac{1}{f} \frac{df}{dT} = \alpha_g - \frac{1}{n-n_0} \left( \frac{dn}{dT} - \frac{dn_0}{dT} \right)$$

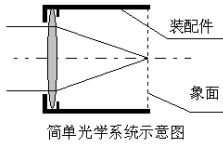
几种典型材料的多种系数 ( $\alpha_g, dn/dT, x_{f,r}, x_{f,d}$  的单位均是  $\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ )

材料	系数	$n$	$\alpha_g$	$dn/dT$	$X_{f,r}$	$X_{f,d}$
FK5		1.487	9.2	-2.2	10.77	18.4
PK2		1.518	6.9	1.6	0.99	13.8
BK1		1.510	7.7	0.8	3.28	15.4
BK7		1.517	7.1	1.7	0.98	14.2
BaK1		1.573	7.6	1.3	2.68	15.2
LaKN16		1.734	5.3	4.9	-3.65	10.6
F1		1.626	8.7	2.3	2.52	17.4
LaSFN3		1.808	5.9	6.5	-4.30	11.8
SF1		1.717	8.1	6.4	-3.13	16.2
Si		3.420	4.2	162	-64.10	8.4
Ge		4.000	6.1	270	-85.19	12.2
ZnSe		2.400	7.7	48	-28.24	15.4
石英		1.450	0.55	8.0	-20.33	1.1

$x_{f,r}, x_{f,d}$  有以下不同点：

- 1) 传统透镜的光热膨胀系数有正有负，数值变化范围较大，而DOL的则全为正值，且变化范围较小；
- 2) 绝大多数的玻璃材料的衍射热膨胀系数 $x_{f,d}$ 大于折射热膨胀系数 $x_{f,r}$ ；
- 3) Si、石英、ZnSe、Ge等红外材料的衍射热膨胀系数 $x_{f,d}$ 小于折射热膨胀系数 $x_{f,r}$ ，且红外材料的 $x_{f,d}$ 为正值，与 $x_{f,r}$ 反号，使用DOL可以补偿折射透镜的热变形。

### ◆ 消热变形光学系统的设计



温度变化会引起光学系统的性能发生改变，焦点、像面位置发生改变，同样用于紧固的装配件也会因热胀冷缩而改变机械结构。

假设温度变化均匀，消热变系统应满足： $x_{f,s} = \alpha_m$

$x_{f,s}$  为光学系统的光热膨胀系数

$\alpha_m$  是光学透镜外装配紧固结构的热膨胀系数

对于由密接双透镜构成的合成焦距为  $f$  的光学系统，设两透镜的光热膨胀系数分别为  $x_{f1}$  和  $x_{f2}$ ，材料阿贝数分别为  $V_1$  和  $V_2$ ，焦距分别为  $f_1$  和  $f_2$ ，光学系统和紧固件的热膨胀系数分别为  $x_{f,s}$  和  $\alpha_m$ ，若欲使此系统同时满足消色差和消热变的要求，应满足：

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2}$$

$$\frac{f_2}{f_1} = -\frac{V_1}{V_2}$$

$$x_{f,s} = \left(\frac{f}{f_1}\right)x_{f1} + \left(\frac{f}{f_2}\right)x_{f2}$$

$$x_{f,s} = \alpha_m$$

$$\alpha_m = \frac{V_1 x_{f1} - V_2 x_{f2}}{V_1 - V_2}$$

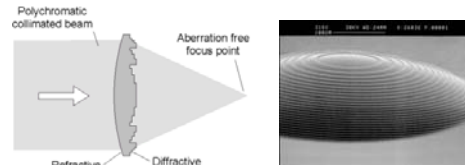
$$x_{f,s} = \frac{V_1 x_{f1} - V_2 x_{f2}}{V_1 - V_2} = \alpha_m$$

- 挑选两透镜和外固件材料同时满足消色散和消热变形的要求。
- DOL 等效阿贝数是负值，而所有光学材料的阿贝数均为正值，分母值大大增加，通常情况下折衍混合系统的光热膨胀系数比折射光学系统的小。
- 在消热变要求最迫切的红外光谱区，对于常用的红外材料而言，折射器件与衍射器件的光热膨胀系数符号刚好相反，分子也减小，折衍混合系统的光热膨胀系数自然就更小，更利于系统进行热平衡设计。

## 2 折衍混合系统 (HOS: Hybrid Optical System)

### HOS 的优势：

- DOL 具有较大的波长依赖性，色差大，不适于在宽波段光学系统中单独使用；色差不但数值大，而且与传统材料的相反，可用于校正传统器件的色差。将 DOL 与传统光学系统相结合，利用 DOL 校正色差和部分单色像差，则可简化光学系统，提高系统的像质。



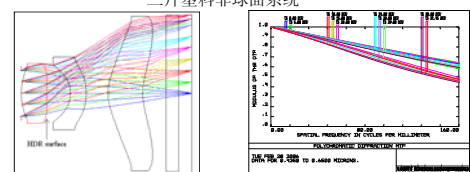
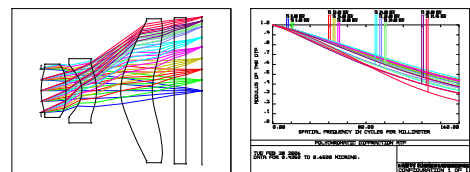
可以在球面、非球面上加工衍射光学透镜

- 在单色光或准单色光场合，HOS 也有重要意义。加工技术所能达到的最小线宽限制了 DOL 所能承担的光焦度，而 HOS 利用折射器件承担系统的主要光焦度，DOL 主要用来校色差和某些单色像差，充分利用二者优势。

- HOS 可避免亚波长线宽的出现及其影响。随着线宽的减小，需用严格电磁场理论（矢量理论）来分析。在折衍混合系统中 DOL 的线宽较大，不但易于加工还有较高的衍射效率，且对偏振和入射方向不敏感，能在宽波段、大视场场合使用。

- 增加光学设计自由度，简化光学系统结构，减弱或避免采用特殊或贵重光学材料的必要性，减小系统的体积、重量和成本，更能提高系统的像质和抗热变性能。

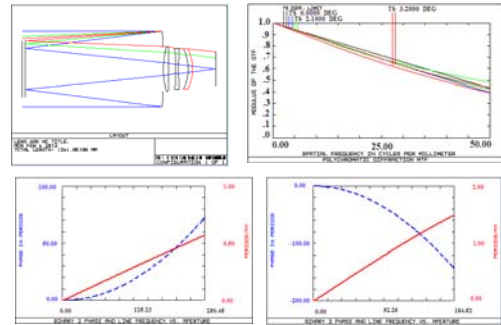
### 设计实例：折衍混合手机镜头(130万像素)



光学参数

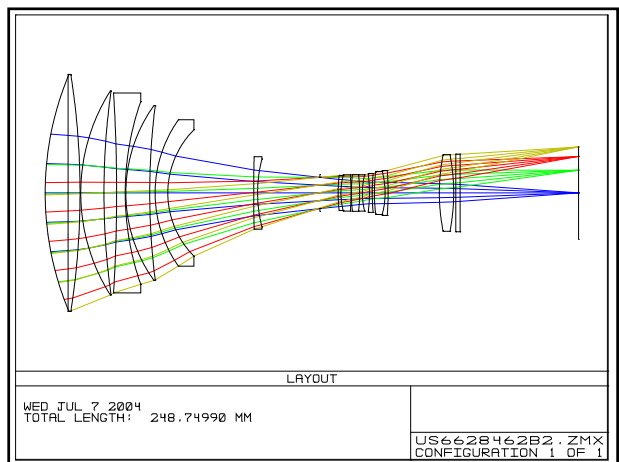
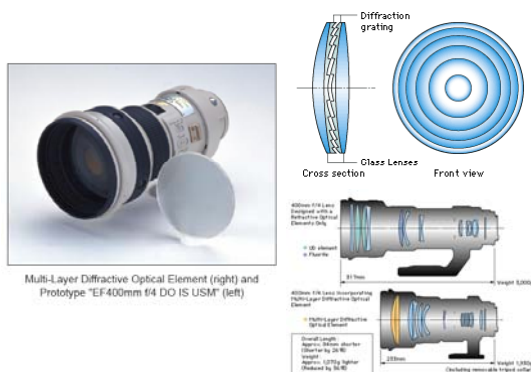
Construction	Aspheric lens	Hybrid diffractive-refractive lens
Material	480R+PC+480R	480R+PC+480R
Focal Length	4.15mm	4.16mm
F number	2.8	2.8
Field of view	63 deg	63 deg
Relative illumination	>55%	>58%
Telecentric	<18deg	<17.7deg
Total length	5.50mm	5.49mm
Resolution (MTF)	Center	160Lp/mm 43%
		80Lp/mm 70%
	Edge	160Lp/mm 25%
		80Lp/mm 60%

### 设计实例：反/衍混合卡塞格林系统

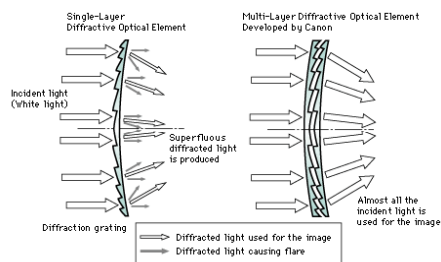


左上：系统；右上：传函；左下：主镜衍射光学器件相位及空间频率分布曲线；右下：次镜衍射光学器件相位及空间频率分布曲线

### 3 谐衍射光学透镜的成像性质



### 为什么用多层？



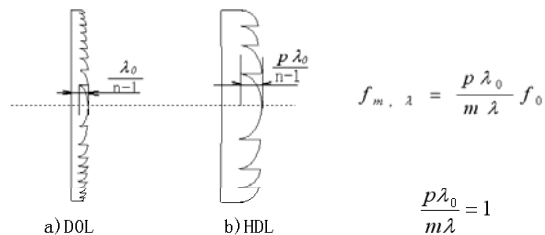
### 原因：减小色散与提高衍射效率

色散是普通衍射成像透镜的最大缺陷。

一个焦距为  $f$  的衍射透镜，在可见光区，轴向色差约为  $f/3$ 。

1995年提出了谐衍射器件(HDL: harmonic diffractive lens)的概念，可在一系列分离波长处获得相同的光焦度，减小色散，在一定程度上克服了普通DOL存在大色差的缺点。

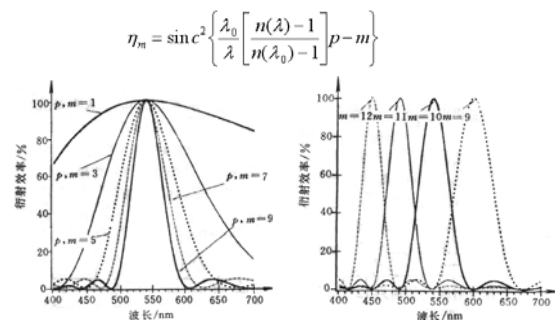




谐衍射器件是普通衍射器件与折射器件的过渡区域。

$p$ 越大，在确定光谱段内的谐振波长越多(不同级次)，色散越小，将越接近折射器件。

- 谐衍射器件第 $m$ 级衍射的衍射效率：



- 谐衍射器件的阿贝数：

$$f_{m, \lambda} = \frac{p \lambda_0}{m \lambda} f_0$$

用分析DOL等效阿贝数的方法分析HDL

对于设计波长 $\lambda_d$ ，消色差波长 $\lambda_F$ 和 $\lambda_C$

$$n_{F,HDL}^{eff} = 1 + \frac{1}{c_0 f_F} = 1 + \frac{m_{ZF} \lambda_F}{c_0 p \lambda_d} \phi_d$$

$$n_{C,HDL}^{eff} = 1 + \frac{1}{c_0 f_C} = 1 + \frac{m_{ZC} \lambda_C}{c_0 p \lambda_d} \phi_d$$

$$n_{d,HDL}^{eff} = 1 + \frac{1}{c_0 f_F} = 1 + \frac{m_{Zd} \lambda_d}{c_0 p \lambda_d} \phi_d = 1 + \frac{\phi_d}{c_0}$$

$$V_d^{HDL} = \frac{n_d - 1}{n_F - n_C} = \frac{p \lambda_d}{m_{ZF} \lambda_F - m_{ZC} \lambda_C} = \frac{\lambda_d}{x_F \lambda_F - x_C \lambda_C}$$

$$x_F = m_{ZF} p, \quad x_C = m_{ZC} p$$

$$x_F > 1, \quad x_C < 1$$

$$\text{DOL的等效阿贝数 } V_d^D = \frac{\lambda_d}{\lambda_F - \lambda_C} = -3.452$$

**HDL的等效阿贝数绝对值较DOL的大，HDL色散较DOL小。**

$$p = 10, \quad V_d^{HDL} = -79.95$$

谐衍射透镜可较大幅度地减小色散。在普通衍射透镜与传统折射透镜之间，决定其性能巨大差异的结构参数为透镜的厚度(HDL的结构参数 $p$ )。

1)  $p=1$ ，即普通衍射透镜，几何外形为极薄的相位透镜，表现出衍射特性：色散大且与折射透镜的色散反号，仅与波长有关，焦距与波长成反比，材料种类不影响透镜的光谱特性；

2) 随 $p$ 逐渐增大，透镜厚度缓慢增加，外形上逐渐趋于折射透镜，色散大小介于DOL与折射透镜之间，方向仍与传统透镜的相反，且衍射性能减弱；材料对光谱性能有所影响，折射性能增强，兼具折-衍之特点，此为谐衍射透镜；

3)  $p$ 趋近无穷大，即传统折射透镜，体积与重量均增加，色散小，其值由材料决定，无明显的衍射性能。

## 小结：

衍射透镜的成像特性。

色散特性

热特性

**与折射器件具有互补性！**

谐衍射透镜