

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.

G02B 3/00 (2006.01)

G02B 27/42 (2006.01)



[12] 发明专利说明书

专利号 ZL 200410082316.6

[45] 授权公告日 2007 年 3 月 21 日

[11] 授权公告号 CN 1306284C

[22] 申请日 2004.12.30

[21] 申请号 200410082316.6

[73] 专利权人 浙江大学

地址 310027 浙江省杭州市西湖区浙大路
38 号

[72] 发明人 杨国光 马 韬 白 剑 侯西云

[56] 参考文献

JP2003 - 202491 A 2003.7.18

US 6229782 B1 2001.5.8

CN 1336559 A 2002.2.20

JP2000 - 147233 A 2000.5.26

审查员 郑 颖

[74] 专利代理机构 杭州求是专利事务所有限公司
代理人 张法高

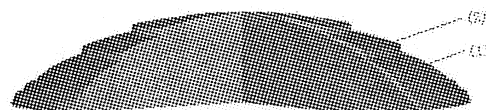
权利要求书 2 页 说明书 7 页 附图 3 页

[54] 发明名称

提供非球面度的衍/折混合光学元件及其设计方法

[57] 摘要

本发明公开了一种提供非球面度的衍/折混合光学元件及其设计方法。此元件由球面基底与二元微结构衍射光学表面二部分组成，结构如图 1 所示，其中(1)是球面基底，(2)是二元微结构衍射光学表面。根据已知的非球面结构参量，采用设计波长与最小加工线宽作为判据确定球面基底曲率，利用球面基底承担主要的光焦度；在球面基底上制作二元微结构表面衍射光学元件，用于补偿球面基底与非球面之间的光程差，通过衍/折混合光学方法，使二元微结构的最小周期间隔在最小加工线宽范围之内，从而使引入的非球面度可以微加工，最终实现光学系统全球面化的条件下，使成像质量接近衍射极限，避免光学非球面加工困难，精度不高和高成本。



1. 一种提供非球面度的衍/折混合光学元件，其特征在于：衍/折混合光学元件由球面基底(1)与二元微结构衍射光学表面(2)二部分组成，所述的衍/折混合光学元件面形分布公式 $T_k(r)$ 为：

$$T_k(r) = \frac{c_0 r^2}{1 + \sqrt{1 - c_0^2 r^2}} + \frac{[OPD_{\lambda_0}(r, c_0) - \text{int}(OPD_{\lambda_0}(r, c_0) / m\lambda_0) \cdot m\lambda_0] \cdot q}{n(\lambda_0) - 1}$$

其中 c_0 是球面基底曲率； $OPD_{\lambda_0}(r, c_0)$ 是利用二元微结构衍射光学表面补偿的球面基底到非球面之间的光程差； $\text{int}(x)$ 是取整函数，求出不大于 x 的最大整数； λ_0 是设计波长； r 是元件径向半径； q 是深度比例因子，当 $q \neq 1$ 时，表示因加工误差或设计波长与实际使用波长的偏差； $n(\lambda_0)$ 表示基底材料对应于设计波长 λ_0 的折射率； m 是 ≥ 1 的整数。

2. 一种提供非球面度的衍/折混合光学元件设计方法，其特征在于：衍/折混合光学元件由球面基底与二元微结构衍射光学表面二部分组成，根据已知的非球面结构的曲率、二次曲面系数、元件口径与高次非球面系数参量，采用设计波长与最小加工线宽作为判据确定球面基底的曲率，然后在球面基底上制作二元微结构衍射光学元件，利用它所具有的相位调制作用补偿球面基底与非球面之间的光程差，利用球面基底承担主要的光焦度，使二元微结构的最小周期间隔在最小加工线宽范围之内，通过衍/折混合光学方法，使成像质量接近衍射极限，实现光学系统的全球面化。

3. 根据权利要求2所述的一种提供非球面度的衍/折混合光学元件设计方法，其特征在于所述采用设计波长与最小加工线宽作为判据确定球面基底的曲率的方法：球面基底到非球面之间的光程差梯度的鞍点值，即光程差梯度关于球面基底曲率为最小值且关于元件径向半径为最大值位置的值，其绝对值小于或等于参考波长与最小加工线宽乘上相位台阶数积的比值，作为判断利用二元微结构衍射光学元件替代非球面可行性的充分条件，即为球面基底的判据公式：

$|S_{\lambda_0}(r_e, c_{0e})| \leq \frac{\lambda_0}{LT}$ 其中 $S_{\lambda_0}(r_e, c_{0e})$ 是光程差梯度的鞍点值， λ_0 是设计波长， T 是最小线宽， L 是相位台阶数， r_e 是获得 $|S_{\lambda_0}(r, c_0)|$ 的最大值点， c_{0e} 是在 c_0 变化区间内求取 $S_{\lambda_0}(r_e, c_0)$ 的最小值点。

4. 根据权利要求2所述的一种提供非球面度的衍/折混合光学元件设计方

法，其特征在于所述利用二元微结构衍射光学表面所具有的相位调制作用补偿球面基底与非球面之间的光程差，其表述公式为：

$$OPD_{DOE}(r) = \frac{\lambda_0}{2\pi} \phi_N(r) = \sum_{i=1}^N P_i r^{2i}$$

式中 $\phi_N(r)$ 是旋转对称二元微结构衍射光学元件相位分布公式， P_i 是光程差系数：

$$P_1 = \frac{(n-1)(c-c_0)}{2}, P_i = (n-1) \left[\frac{(2i-3)!}{2^i \times i!} (c^{2i-1} - c_0^{2i-1}) + \alpha_i \right] \quad (i \geq 2),$$

α_i 表示高次非球面系数。

5. 根据权利要求 2 所述的一种提供非球面度的衍/折混合光学元件设计方法，其特征在于所述由球面基底(1)与二元微结构衍射光学表面(2)二部分组成的衍/折混合光学元件面形分布公式 $T_k(r)$ 为：

$$T_k(r) = \frac{c_0 r^2}{1 + \sqrt{1 - c_0^2 r^2}} + \frac{[OPD_{\lambda_0}(r, c_0) - \text{int}(OPD_{\lambda_0}(r, c_0) / m\lambda_0) \cdot m\lambda_0] \cdot q}{n(\lambda_0) - 1}$$

其中 c_0 是球面基底曲率； $OPD_{\lambda_0}(r, c_0)$ 是利用二元微结构衍射光学表面补偿的球面基底到非球面之间的光程差； $\text{int}(x)$ 是取整函数，求出不大于 x 的最大整数； λ_0 是设计波长； r 是元件径向半径， q 是深度比例因子，当 $q \neq 1$ 时，表示因加工误差或设计波长与实际使用波长的偏差； m 是 ≥ 1 的整数，其中 n 表示基底材料的折射率， c 表示非球面的球面曲率， c_0 是最佳球面基底曲率。

提供非球面度的衍/折混合光学元件及其设计方法

技术领域

本发明涉及一种提供非球面度的衍/折混合光学元件及其设计方法。

背景技术

根据球面系统的光路特征和成像特性可知，单个球面透镜只能对近轴物点以细光束成完善像。平行光轴入射由一个球面构成的平凸透镜的光线随着入射点高度的不同汇聚在光轴上的位置也不同，如图 2(a)所示，这种单色光的成像缺陷即为球差。从理论上讲，用非球面替代球面构成的平凸透镜可以有效地将全部平行于光轴入射的光线汇聚到一点，如图 2(b)所示。本发明公开的由球面基底二元微结构表面衍/折混合光学表面构成的平凸透镜如图 2(c)所示，理论上同样可以将全部平行于光轴入射的光线汇聚到一点。

在球面透镜系统设计中，只有通过使用多片球面透镜，利用多表面校正球差，整个系统结构变得复杂，体积、重量与成本变大，同时也增加了光学系统装调的难度。在光学系统设计中使用非球面有利于校正光学系统像差，获得更大的视场，简化系统结构并降低重量，使设计更具灵活性，因此光学非球面元件被广泛的应用于光学系统设计之中，特别是对于一些大视场，高精度，有特殊要求的系统，光学非球面元件更加不可缺少。

但是，加工和检测非球面元件所产生的困难以及过高的制造成本限制了其在实际工程中的广泛应用。目前，用于加工非球面的技术和方法仍然十分复杂，而且很难保证非球面的面型精度和表面粗糙度，成为限制系统光学质量的瓶颈。为了保证加工精度，精密的测量技术与设备也是必不可少的，并且高额的制造成本仍然是一个需要解决的问题。

二元衍射光学元件在现代光学中创建了一个独立的分支，给传统的光学设计理论和加工工艺带来了革命性的变化。因为二元衍射光学元件具有高的衍射效率，独特的校像差特性，给光学设计带来更多的设计自由度和宽广的材料可选性，从而能实现特殊的光学功能。利用常规折射元件的曲面提供主要的光焦度，二元微结构衍射元件校正像差，构成一个衍/折混合光学元件取代非球面。二元衍射光学元件设计和制造方法主要基于标量衍射理论，二元多台阶结构可达到高的衍射效率，制作方法基于表面分步成形技术，利用掩模、光刻、离子刻蚀得到多级相位阶数，并实现大批量生产。

传统的二元微结构衍射光学元件通常制作在平面基底上，如图3(b)所示，二元微结构表面在提供相位补偿的同时，也承担着元件主要的光焦度，因此结构周期较多，相应的最小周期间隔变小，由于受到最小加工线宽的限制，可应用的范围大大缩小。在微结构衍射光学元件的设计过程中通常利用元件的另一表面提供大部分光焦度，微结构表面实现相位补偿，舍弃微结构表面提供光焦度的设计自由度以满足微结构的可加工性。本发明的球面基底二元微结构表面衍/折混合光学元件如图3(c)所示，利用球面基底承担主要光焦度，在球面基底上制作二元微结构衍射光学表面补偿球面基底与非球面之间的光程差，降低微结构周期，增大最小周期间隔，使它在最小加工线宽范围之内，方便加工，同时也扩展了二元微结构衍射光学元件在可见光波段的应用范围。

发明内容

本发明公开了一种提供非球面度的衍/折混合光学元件及其设计方法。

衍/折混合光学元件由球面基底与二元微结构衍射光学表面二部分组成，所述球面基底与二元微结构表面构成的衍/折混合光学元件面形分布公式 $T_k(r)$ 为：

$$T_k(r) = \frac{c_0 r^2}{1 + \sqrt{1 - c_0^2 r^2}} + \frac{[OPD_{\lambda_0}(r, c_0) - \text{int}(OPD_{\lambda_0}(r, c_0) / m\lambda_0) \cdot m\lambda_0] \cdot q}{n(\lambda_0) - 1}$$

其中 c_0 是球面基底曲率； $OPD_{\lambda_0}(r, c_0)$ 是利用二元微结构表面补偿的球面基底到非球面之间的光程差； $\text{int}(x)$ 是取整函数，求出不大于 x 的最大整数； λ_0 是设计波长； r 是元件径向半径； q 是深度比例因子，当 $q \neq 1$ 时，表示因加工误差或设计波长与实际使用波长的偏差； m 是 ≥ 1 的整数。

提供非球面度的衍/折混合光学元件设计方法：衍/折混合光学元件由球面基底与二元微结构衍射光学表面二部分组成，根据已知的非球面结构的曲率、二次曲面系数、元件口径与高次非球面系数参量，采用设计波长与最小加工线宽作为判据确定球面基底的曲率，然后在球面基底上制作二元微结构衍射光学元件，利用它所具有的相位调制作用补偿球面基底与非球面之间的光程差，利用球面基底承担主要的光焦度，使二元微结构的最小周期间隔在最小加工线宽范围之内，通过衍/折混合光学方法，使成像质量接近衍射极限，实现光学系统的全球面化。

所述采用设计波长与最小加工线宽作为判据确定球面基底的曲率的方法：球面基底到非球面之间的光程差梯度的鞍点值，即光程差梯度关于球面基底曲率为最小值且关于元件径向半径为最大值位置的值，其绝对值小于或等于考波

长与最小加工线宽乘上相位台阶数积的比值，作为判断利用二元微结构衍射光学元件替代非球面可行性的充分条件，即为球面基底的判据公式：

$$|S_{\lambda_0}(r_c, c_{0c})| \leq \frac{\lambda_0}{LT}$$

其中 $S_{\lambda_0}(r_c, c_{0c})$ 为鞍点值， λ_0 为设计波长， T 为最小线宽， L 为相位台阶数。

利用二元微结构衍射光学表面所具有的相位调制作用补偿球面基底与非球面之间的光程差，其表述公式为

$$OPD_{DOE}(r) = \frac{\lambda_0}{2\pi} \phi_N(r) = \sum_{i=1}^N P_i r^{2i}$$

式中 $\phi_N(r)$ 是二元微结构衍射光学元件相位分布公式， P_i 是光程差系数：

$$P_1 = \frac{(n-1)(c-c_0)}{2}, P_i = (n-1) \left[\frac{(2i-3)!}{2^{i-1} \times i!} (c^{2i-1} - c_0^{2i-1}) + \alpha_i \right] \quad (i \geq 2)$$

本发明的有益效果是，此提供非球面度的衍/折混合光学元件由球面基底与二元微结构衍射光学表面二部分组成，采用球面基底承担主要的光焦度，二元微结构衍射光学表面承担的光焦度较小，使二元微结构的最小周期间隔在最小加工线宽范围之内，利用二元微结构衍射光学元件具有的相位调制作用补偿球面到非球面之间的光程差，方便可靠的引入非球面自由度，扩展二元微结构衍射光学元件在可见光波段的应用范围。利用传统的加工方法，球面基底可以保证足够的面型精度和表面粗糙度。工艺上采用二元光学技术制作表面微结构衍射光学元件，其制造过程对于任意相位分布都是相同的，且能保证很高的面形精度。通过衍/折混合光学方法，提供非球面度，替代光学系统中的非球面元件，实现大视场，高质量成像和光学系统的全球面化。

附图说明

下面结合附图和实施例对本发明进一步说明。

图 1 是提供非球面度的衍/折混合光学元件结构示意图，其中(1)是球面基底，(2)是二元微结构衍射光学表面；

图 2 是说明三种不同结构平凸透镜的球差示意图，其中(a)是球面平凸透镜；(b)是旋转对称偶次非球面平凸透镜；(c)是球面基底二元微结构表面构成的衍/折混合光学平凸透镜；

图 3 是对比了球面基底二元微结构表面衍/折混合光学元件与平面基底二元微结构表面衍/折混合光学元件的结构示意图，其中(a)是旋转对称偶次非球面非球面；(b)是平面基底二元微结构表面衍/折混合光学元件的结构示意图；(c)

是球面基底二元微结构表面衍/折混合光学元件的结构示意图；

图 4 是利用最佳球面基底结合二元微结构表面构成的衍/折混合光学元件实现对非球面元件替代的设计方法示意图，其中(a)是旋转对称偶次非球面非球面；(b)是最佳球面基底；(c)是球面到非球面之间的光程差；(d)是二元微结构衍射光学表面；

图 5 是对比了利用一般球面基底与最佳球面基底结合二元微结构衍射光学表面实现对非球面的替代的示意图,其中(a)是旋转对称偶次非球面非球面；(b)是用一般球面基底二元微结构表面衍/折混合光学元件；(c)是用最佳球面基底二元微结构表面衍/折混合光学元件；

图 6 是利用最佳球面基底二元微结构表面衍/折混合光学元件替代激光束准直非球面透镜的实例；

图 7 是利用最佳球面基底二元微结构表面衍/折混合光学元件替代大口径非球面透镜的实例。

具体实施方式

为了避免非球面加工和检测产生的困难，同时降低制造成本，提出了利用球面基底结合二元微结构表面构成衍/折混合光学元件，如图 1 所示，提供非球面度，扩展二元微结构衍射光学元件在可见光波段的应用范围，实现对非球面光学元件的替代。最佳球面基底的选择是这项发明的关键之一，采用设计波长与最小加工线宽作为选择判据确定最佳球面基底的方法，是判断利用球面基底二元微结构表面衍/折混合光学元件替代非球面的充分条件。利用设计波长与最小加工线宽乘上相位台阶数积的比值限制非球面与最佳球面之间光程差表示函数的梯度，使得相位压缩后二元微结构最小周期间隔大于最小加工线宽，保证二元微结构表面的加工可能性和多台阶量化的适用性。

图 4(a)表示旋转对称偶次非球面，其表达方程一般用球面偏移量多项式来表示：

$$z(r) = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \alpha_2 r^4 + \alpha_3 r^6 + \alpha_4 r^8 + \dots \quad (1)$$

式中： c 为球面曲率， k 为二次曲面系数， r 为元件径向半径， α_i 为高次非球面系数。

图 4(b)是最佳球面基底，此球面的方程表达式：

$$z_0(r) = \frac{c_0 r^2}{1 + \sqrt{1 - c_0^2 r^2}} \quad (2)$$

式中 c_0 为最佳球面基底曲率。则如图 4(c) 所示的二元微结构衍射光学元件需要补偿的光程差为：

$$OPD_{\lambda_0}(r) = [n(\lambda_0) - 1][z(r) - z_0(r)] \quad (3)$$

对公式 (3) 作泰勒级数展开并整理得：

$$OPD_{\lambda_0}(r, c_0) = [n(\lambda_0) - 1] \left\{ \frac{c - c_0}{2} r^2 + \sum_{i=2}^{\infty} \left[\frac{(2i-3)!}{2^i \times i!} (c^{2i-1} - c_0^{2i-1}) + \alpha_i \right] r^{2i} \right\} \quad (4)$$

旋转对称二元微结构衍射光学元件对入射光线衍射产生的二维相位分布用 N 阶多项式表示为：

$$\phi_N(r) = \sum_{i=1}^N A_i r^{2i} \quad (5)$$

式中 N 为多项式系数， r 为环带半径， A_i 为相位分布系数，当多项式系数 $N \geq 10$ 时计算就有足够的精度。由此二元微结构衍射光学元件引起的光程差如图 4(d) 所示为：

$$OPD_{DOE}(r) = \frac{\lambda_0}{2\pi} \phi_N(r) = \sum_{i=1}^N P_i r^{2i} \quad (6)$$

式中： P_i 为光程差系数。

比较公式 (4) 与 (6)，就可以得到用二元微结构衍射光学元件替代球面到非球面之间的光程差分布系数为：

$$P_1 = \frac{(n-1)(c-c_0)}{2}, P_i = (n-1) \left[\frac{(2i-3)!}{2^i \times i!} (c^{2i-1} - c_0^{2i-1}) + \alpha_i \right] \quad (i \geq 2) \quad (7)$$

然后再由公式 (4) 直接求取替代非球面的最佳球面基底二元微结构表面衍/折混合光学元件面形分布公式：

$$T_k(r) = \frac{c_0 r^2}{1 + \sqrt{1 - c_0^2 r^2}} + \frac{[OPD_{\lambda_0}(r, c_0) - \text{int}(OPD_{\lambda_0}(r, c_0) / m\lambda_0) \cdot m\lambda_0] \cdot q}{n(\lambda_0) - 1} \quad (8)$$

其中 $\text{int}(x)$ 是取整函数，求出不大于 x 的最大整数； q 为深度比例因子，当 $q \neq 1$ 时，表示因加工误差或设计波长与实际使用波长的偏差； m 为 ≥ 1 的整数。

求解最佳球面基底是二元微结构衍射光学表面能否替代非球面的关键之一，同时也决定了其结合二元微结构衍射光学表面替代非球面可能达到的程度，即二元微结构衍射光学元件的推广性。由于受到目前技术条件的制约，微加工

的最小线宽很难突破深亚微米（0.1 微米）量级，如果不使用其他方法如谐衍射等，可实现的二元微结构衍射光学元件的最小线宽就成为限制它提供非球面度的重要参数之一，同时也是最佳球面基底的选择判据条件之一。

对光程差方程(4)式求导，获得光程差表示函数的梯度分布函数：

$$S_{\lambda_0}(r, c_0) = [n(\lambda_0) - 1] \left\{ (c - c_0)r + \sum_{i=2}^{\infty} \left[\frac{(2i-3)!}{2^{i-1} \times (i-1)!} (c^{2i-1} - c_0^{2i-1}) + \alpha_i \right] r^{2i-1} \right\} \quad (9)$$

在 $r \in [0, R]$ 区间内求取 $|S_{\lambda_0}(r, c_0)|$ 的最大值变化函数，通常要考虑 $S_{\lambda_0}(r, c_0)$ 在区间内的极值点函数值和边界上的最值，获得 $|S_{\lambda_0}(r, c_0)|$ 的最大值点 r_c ，是与 c_0 相关的函数 $r_c = f(c_0)$ ，然后将该式代入方程(9)即可得到光程差梯度分布函数最大值随 c_0 变化函数 $S_{\lambda_0}(r_c, c_0)$ ，然后在 c_0 变化区间内求取 $S_{\lambda_0}(r_c, c_0)$ 的最小值点，得到 c_{0e} ，最后用该点的光程差梯度函数值，即光程差梯度关于球面基底曲率为最小值且关于元件径向半径为最大值位置的值——球面基底到非球面之间的光程差梯度函数的鞍点值，用该鞍点值的绝对值与最佳球面基底判据比较，如果

$$|S_{\lambda_0}(r_c, c_{0e})| \leq \frac{\lambda_0}{LT} \quad (10)$$

则表示利用最佳球面基底结合二元微结构表面构成的衍/折混合光学元件可以实现对非球面的替代，式中 T 为最小线宽， L 为相位台阶数。公式(10)是判断利用二元微结构衍射光学元件提供非球面度的充分条件，利用参考波长与最小加工线宽乘上相位台阶数积的比值限制非球面与等效球面之间光程差表示函数的梯度，使得相位压缩后二元微结构衍射光学元件最小周期间隔大于最小加工线宽，保证衍射光学元件的加工可能性和多台阶量化的适用性，实现对非球面的替代。图 5 是对比了利用一般球面基底与最佳球面基底结合二元微结构衍射光学表面实现对非球面的替代的示意图。

实施例 1

图 6 是利用球面基底结合二元微结构表面构成的衍/折混合光学元件替代激光束准直非球面透镜的实例。此非球面的结构参量为：曲率 $c = 0.5483$ ，二次曲面系数 $k = 0$ ，高次非球面系数 $\alpha_2 = -0.0114$ ， $\alpha_3 = -0.0036$ ，经计算，用球面基底二元微结构表面构成的衍/折混合光学元件取代此非球面时，最佳球面基底与二元微结构衍射光学元件的结构参量为：最佳球面曲率 $c_0 = 0.5051$ ，二元微结构表面周期为 27，连续三个最小周期间隔分别为： $24\mu\text{m}$ ， $22\mu\text{m}$ 及 $21\mu\text{m}$ 。考虑边缘或中间部分可能出现非整周期环带，设计程序列出连续三个最小周期及其位置，用来判断最小线宽是否在加工范围之内，因此用目前的微加工技术条件下此提供

非球面度的球面基底二元微结构表面衍/折混合光学元件是可以加工出来的。

实施例 2

图 7 表示的是利用球面基底结合二元微结构表面构成的衍/折混合光学元件实现对口径 $\Phi = 90\text{mm}$ 光学系统中的较大非球面替代的实例。此非球面的非球面度较大，为高次非球面，曲率 $c = 0.007612$ ，二次曲面系数 $k = -5.463953$ ，高次非球面系数 $\alpha_2 = 1.3416435e^{-7}$ ， $\alpha_3 = -4.2867228e^{-11}$ 。经计算最佳球面基底与二元微结构衍射光学元件的结构参量为：等效球面曲率 $c_0 = 0.006835$ ，二元微结构表面周期为 483，连续三个最小周期间隔分别为： $22\mu\text{m}$ ， $21\mu\text{m}$ 及 $20\mu\text{m}$ ，也是在可微加工范围之内的，因此只要选择适当的最佳球面基底，绝大多数非球面都是可以用球面基底结合二元微结构衍射光学表面构成的衍/折混合光学元件替代的。

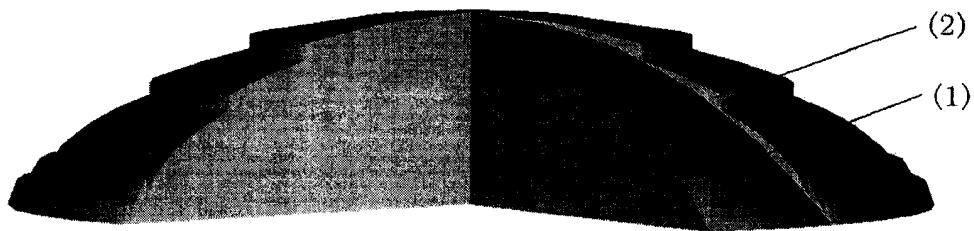
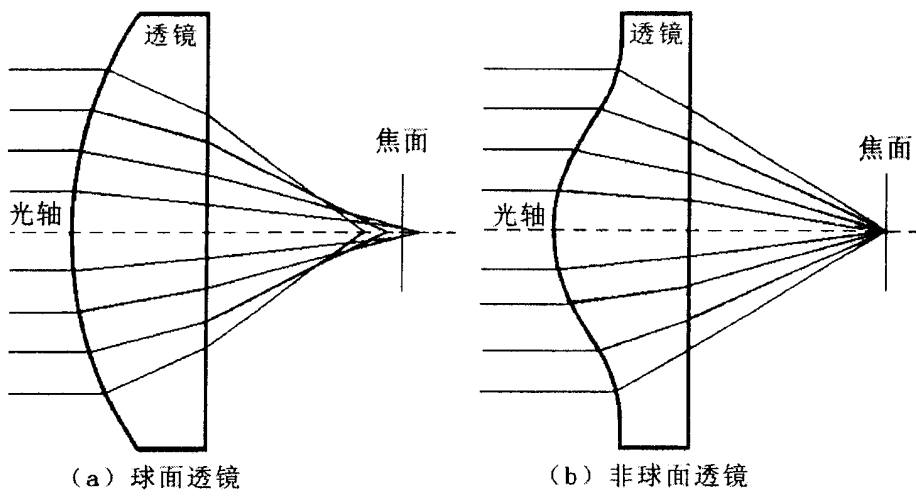
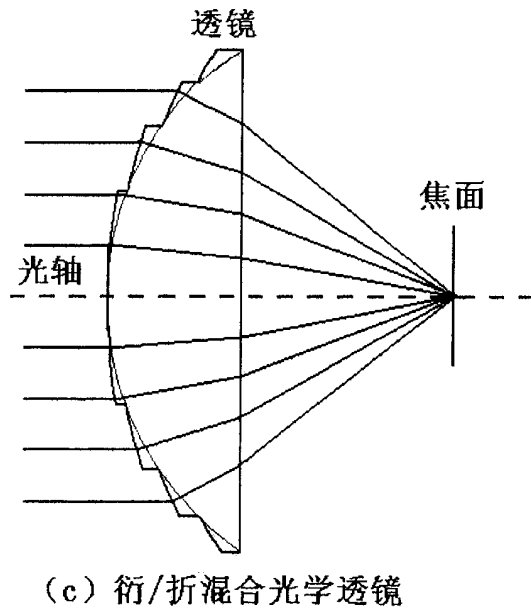


图 1.



(a) 球面透镜

(b) 非球面透镜



(c) 衍/折混合光学透镜

图 2.

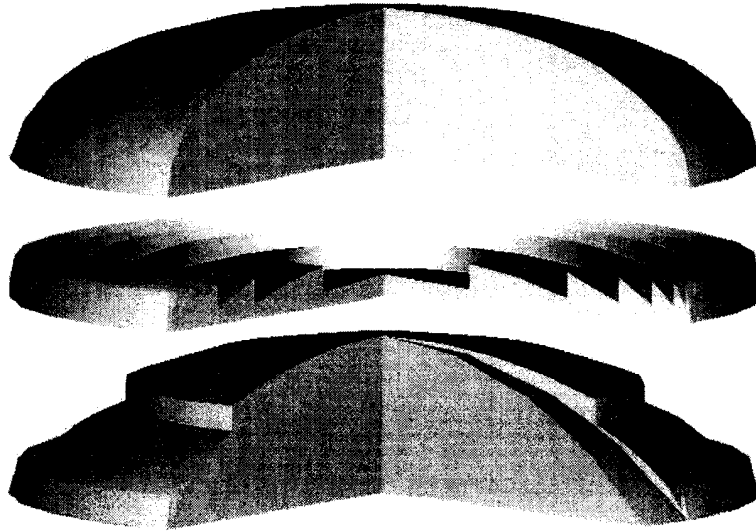


图3.



图4.

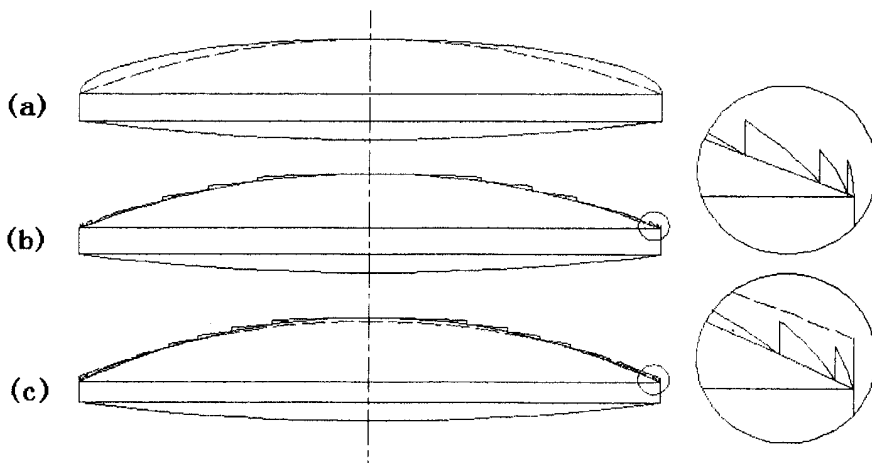


图5.

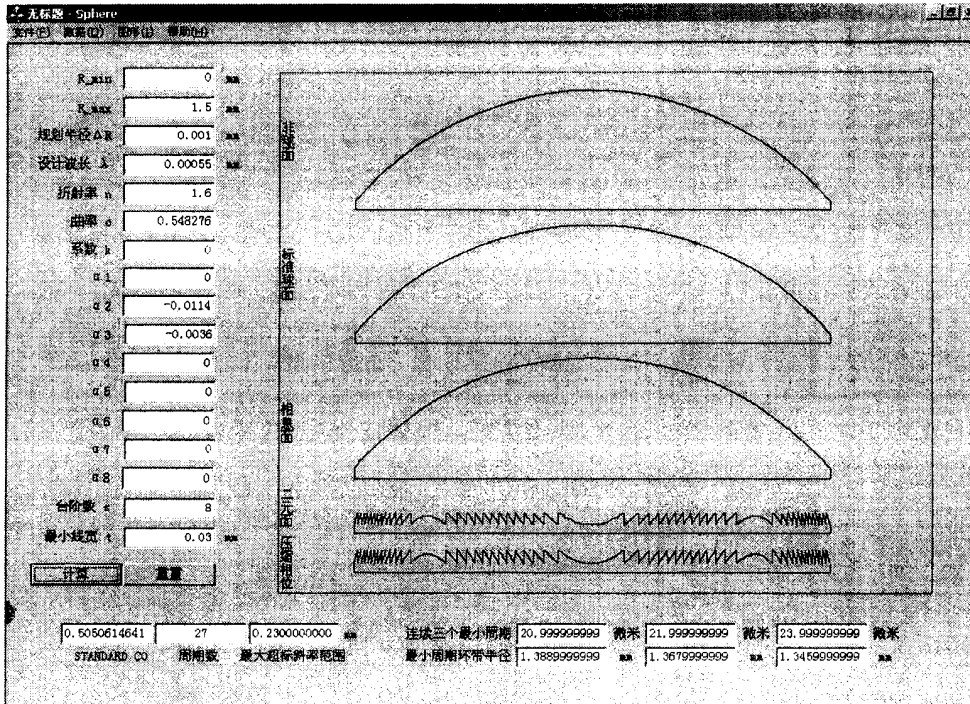


图 6.

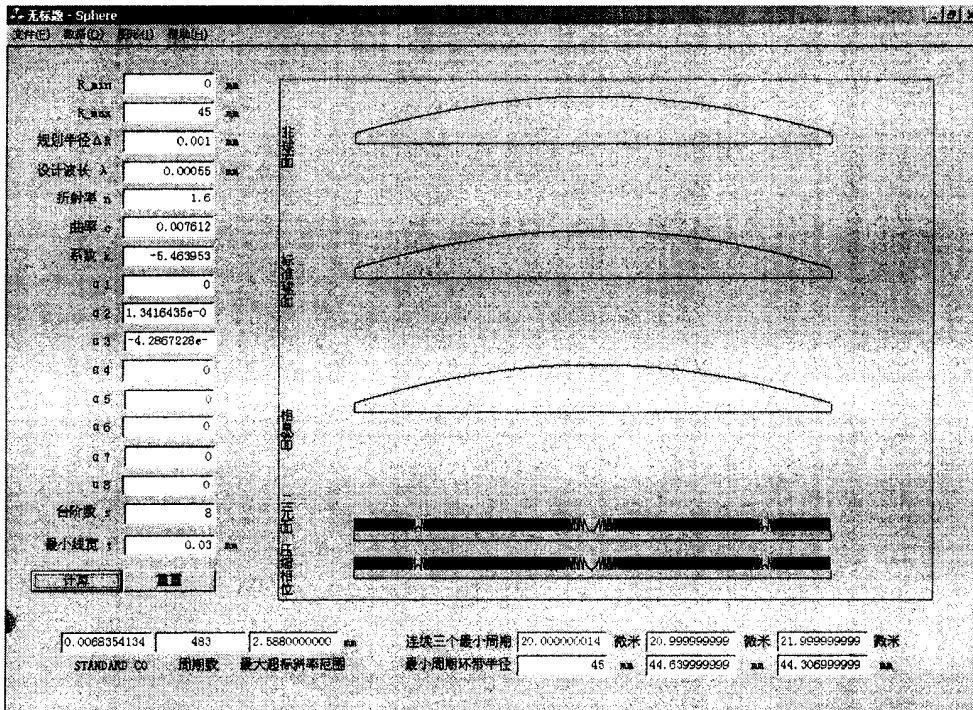


图 7.