

用二元光学元件实现复消色差*

崔庆丰

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130022)

摘 要 将一个二元光学元件与一个折射透镜组合成混合透镜, 把这个混合透镜作为一种混合等效玻璃和另一种适当的玻璃相结合可以实现复消色差. 给出了光焦度解的求法并讨论了玻璃材料的选择.

关键词 二元光学, 光学设计, 像差.

1 引 言

一般说来, 光学系统在两个消色差波长 λ_L 和 λ_S 的像点校正重合后, 与参考波长 λ_R 的像点仍有一定偏离, 这种偏离就是二级光谱. 校正了二级光谱的系统称为复消色差系统. 一个对无穷远物面成像的双胶合透镜, 其二级光谱可表示为

$$\Delta L_{\lambda_S, \lambda_L, \lambda_R} = -f' \frac{P_1 - P_2}{v_1 - v_2} \quad (1)$$

其中 P_1 , v_1 和 P_2 , v_2 分别为两种消色差材料的相对部分色散和阿贝数, 它们均与所选择的波长有关. f' 为透镜组的焦距. 在现有常用光学材料范围内 $(P_1 - P_2)/(v_1 - v_2)$ 基本上为一个确定值, 这导致 $\Delta L_{\lambda_S, \lambda_L, \lambda_R}$ 通常难以消除. 因此在传统的以折射原理为基础的长焦距或高分辨率成像光学系统中, 二级光谱一直是制约其成像质量提高的一个严重障碍. 多年来, 人们为克服这一障碍作了多方面的努力. 光学材料工作者制造出了具有特殊色散的光学玻璃. 但使用特殊光学玻璃一般也只能在一定程度上减小二级光谱, 而不能使其得到完全的校正. 光学设计工作者为了克服二级光谱的影响, 采用了使光学系统复杂化的方法^[1~3], 但由于能够显著降低二级光谱的系统往往过于复杂, 体积、重量、成本、累积误差和透过率等种种问题随之出现, 以致于这种方法难以在实践上普遍应用. Stone 等人^[4]曾讨论过用一个全息光学元件和两个折射透镜构成类似于三胶合透镜的结构以校正二级光谱的问题, 是对传统方法的一个突破. 只是由于全息光学元件的一系列固有缺点, 这种方法难以用在实际光学系统中.

近年来随着微电子制造技术的发展, 二元光学技术^[5]日趋成熟, 二元光学元件的应用已进入光学领域的很多方面. 利用二元光学元件由于衍射作用而形成的特殊色散性质, 可以使用最普通的光学材料, 用相当简单的结构来校正二级光谱, 实现光学系统的复消色差. 本文

* 国家应用光学重点实验室基金课题.

收稿日期: 1993年5月12日; 收到修改稿日期: 1993年9月17日

首先概述了二元光学元件的色散性质, 然后采用等效玻璃的概念将一个以折射透镜为基底的二元光学元件(即混合透镜)作为一种混合等效玻璃来考虑, 再利用这种混合等效玻璃和另一种玻璃组合, 构成复消色差结构. 同时讨论了玻璃选择的问题. 最后给出了光学设计软件 CODEV 的模拟结果. 在完全校正了二级光谱之后, 三级光谱的数量与传统双胶合透镜的二级光谱相比下降了一个数量级. 在焦距为 1000 mm, 相对孔径为 1/10 的情况下, 成像质量达到了衍射极限.

2 原 理

2.1 二元光学元件的色散性质

二元光学元件(BOE)与全息光学元件(HOE)一样是一种衍射光学元件, 它的色散性质应与全息元件相同. 因此, 根据过去的讨论结果^[4,6], 可得到二元光学元件的等效阿贝数和相对部分色散为

$$\nu_{\lambda_R}^{\text{BOE}} = -\lambda_R/(\lambda_L - \lambda_S), \quad P_{\lambda_S, \lambda_R}^{\text{BOE}} = (\lambda_S - \lambda_R)/(\lambda_S - \lambda_L), \quad (2)$$

其中 λ_R 为参考波长, λ_S 和 λ_L 分别为短波和长波波长. 由以上二式可见, 二元光学元件的色散性质是由所使用的波长决定的, 与基底材料无关. 而折射元件的色散是由材料的性质所决定的. 当取参考波长为 D 谱线, 消色差波长为 C 、 F 谱线时, 可得到 $\nu_D^{\text{BOE}} = -3.46$, 以及 $P_{D,C}^{\text{BOE}} = 0.6063$. 为了更清楚地认识二元光学元件作为一种等效光学材料在光学玻璃 P - ν 图中的位置, 将 ν_D^{BOE} 和 $P_{D,C}^{\text{BOE}}$ 的值标在 P - ν 图上, 如图 1 所示. 由图 1 可见, 如果把二元光学元件的坐标点与任何一种玻璃的坐标点连起来, 其连线的斜率都大于玻璃正常线的斜率(绝对值), 因此可以得出这样的结论, 由一个二元光学元件和一个折射透镜所组成的混合透镜的二级光谱将大于任何一个双胶合透镜的二级光谱, 或者说, 混合透镜本身不能消除二级光谱.

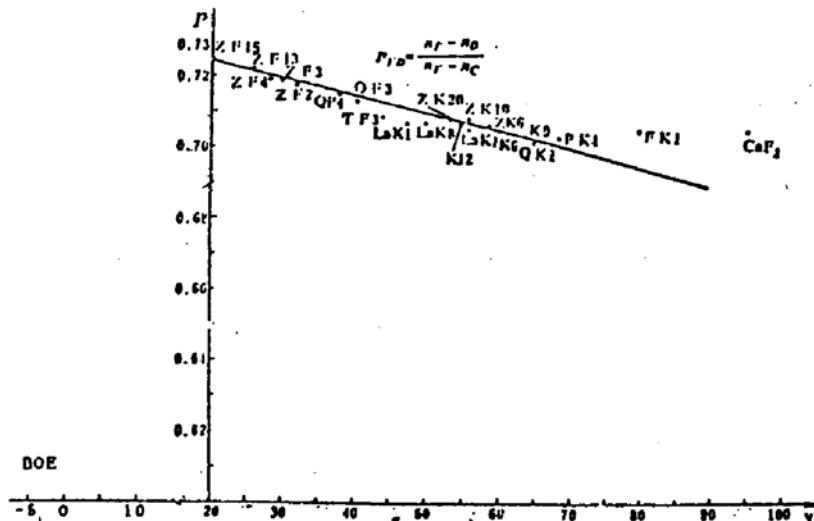


Fig. 1 Dispersive characteristics of a BOE compared with that of glasses

2.2 混合透镜作为一种混合等效玻璃

Stephens^[7]曾采用等效玻璃的概念, 把一个双透镜组看作一种具有可变 P 、 ν 值的等效玻

璃, 并把这种等效玻璃和另一种玻璃相结合实现复消色差的目的. 采用这种方法可以方便地分析混合透镜.

设光学玻璃 P - ν 图中任一种玻璃的坐标点为 $G(\nu_G, P_G)$, 如图 2 所示. 将点 BOE 和点 G 连线就得到了由二元光学元件和玻璃 G 所组成的一条混合等效玻璃线, 该直线上的任一点为 $\bar{G}(\bar{\nu}_H, \bar{P}_H)$, $\bar{\nu}_H, \bar{P}_H$ 的轨迹应不仅在 BOE 和 G 的连线上, 而且应在其延长线上. 因此有

$$(P_G - \bar{P}_H) / (\nu_G - \bar{\nu}_H) = (P_G - P_{\text{BOE}}) / (\nu_G - \nu_{\text{BOE}}), \quad (3)$$

于是得

$$\bar{P}_H = \frac{\nu_G P_{\text{BOE}} - \nu_{\text{BOE}} P_G}{\nu_G - \nu_{\text{BOE}}} + \bar{\nu}_H \left(\frac{P_G - P_{\text{BOE}}}{\nu_G - \nu_{\text{BOE}}} \right). \quad (4)$$

由密接双透镜的计算公式

$$\varphi_G + \varphi_{\text{BOE}} = \varphi_H, \quad (\varphi_G / \nu_G) + (\varphi_{\text{BOE}} / \nu_{\text{BOE}}) = (\varphi_H / \bar{\nu}_H) \quad (5)$$

得到

$$(1 / \bar{\nu}_H) = (1 / \nu_{\text{BOE}}) + (\varphi_G / \varphi_H) (1 / \nu_G - 1 / \nu_{\text{BOE}}), \quad (6)$$

φ_G 、 φ_{BOE} 和 φ_H 分别为折射透镜、二元光学元件和混合透镜的光焦度. 由此得到了混合透镜作为一种混合等效玻璃时所具有的 \bar{P}_H 和 $\bar{\nu}_H$.

2.3 用混合等效玻璃校正二级光谱

由于混合等效玻璃在适用的范围内具有连续的 \bar{P}_H 、 $\bar{\nu}_H$, 可以把它和另一种适当的玻璃 $G_1(\nu_1, P_1)$ 组合起来, 实现二级光谱的校正. 把密接双透镜系统的计算公式和光焦度公式联立, 得到

$$\varphi_H + \varphi_1 = \varphi, \quad (\varphi_H / \bar{\nu}_H) + (\varphi_1 / \nu_1) = 0, \quad (\varphi_H / \bar{\nu}_H) \bar{P}_H + (\varphi_1 / \nu_1) P_1 = 0. \quad (7)$$

选择 $\bar{P}_H = P_1$, 第三式就完全等同于第二式. 其中 $\bar{\nu}_H$ 可由 (4) 式得到. 这样就可以象求解双胶合透镜光焦度解一样求得 φ_H 和 φ_1 , 再利用 (5) 式, 可得到该复消色差系统的光焦度解.

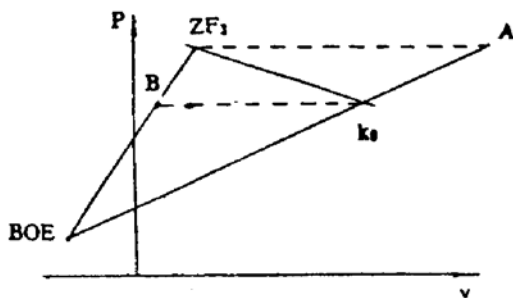


Fig. 3 Two extreme hybrid effective glass lines, the BOE- K_9 line and the BOE- ZF_3 line, with the two relative extreme selections of glass G_1 , ZF_3 and K_9 , for secondary spectrum correction. The line ZF_3 - K_9 is the normal glass line

由于上述讨论中并没有限定混合透镜的材料 $G(\nu_G, P_G)$, 因此原则上, 混合透镜的材料可在整个玻璃范围内选择. 常用玻璃范围的两端是普通冕玻璃和重火石玻璃. 例如可选择其中两种最常用玻璃 K_9 或 ZF_3 . 当选择 K_9 作为混合透镜的材料时, 将 BOE 和 K_9 的两个坐标点连起来, 得到一条混合等效玻璃线——BOE- K_9 直线, 如图 3 所示.

原则上, 选择任一种不在该直线上的玻璃 G_1 进行组合, 都能使二级光谱得到校正. 但是从获得合理光焦度解的角度, 希望选择的材料在 P_1 等于 \bar{P}_H 时, ν_1 与 $\bar{\nu}_H$ 有足够大的差值. 设这个差值为 $|\nu_1 - \bar{\nu}_H| > 20$. 从图 3 可见, 能够满足这个要求的玻璃

有相当大的选择范围, 所有的火石类玻璃都可以采用. 作为一种极端情形, 取 ZF_3 作为 G_1 . 由 ZF_3 向 BOE- K_9 直线的延长线作 ν 轴的平行线得到交点 $A(\bar{\nu}_{HA}, \bar{P}_{HA})$. $\bar{P}_{HA} = P_1$, $\bar{\nu}_{HA}$ 和 ν_1 有最大

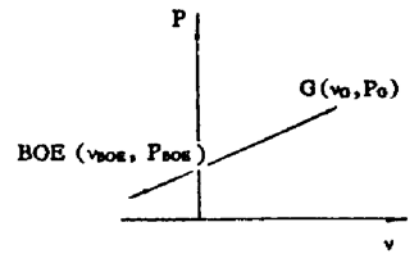


Fig. 2 Hybrid effective glass line formed with a BOE and glass G . The locus of \bar{P}_H and $\bar{\nu}_H$ is in the BOE- G line and its extension

的差值. 这时混合等效玻璃的 $\bar{\nu}_H$ 值向实际玻璃 ν 值的正方向扩展. 同样, 在另一种极端情形下取 ZF_3 作为混合透镜的材料, 选择 K_9 作为 G_1 , 得到另一条混合等效玻璃线 $BOE-ZF_3$ 直线上的 B 点. 这时混合等效玻璃的 $\bar{\nu}_H$ 值向实际玻璃 ν 值的反方向扩展.

在满足复消色差条件 $\bar{P}_H = P_1$ 时选择不同的材料组合将得到不同的单色像差结果. 从满足一定单色像差要求的角度来看, 需要更细致地考虑玻璃的选择问题. 在满足总光焦度 φ 的前提下, 将 φ_H 和 φ_1 按一定比例进行分配, 由(7)式可知, $\bar{\nu}_H$ 与 ν_1 的比例随之确定. 这时混合透镜与折射透镜的材料确定了其中之一后, 另一个也就随之确定了.

3 CODEV 模拟结果

用 ORA 的光学设计软件 CODEV^[8] 可以模拟一个二元光学元件, 进而可以模拟本文所讨论的混合复消色差透镜组的成像情况. 设计一个二元光学元件关键在于确定描述这个二元光学元件的位相多项式的系数, 正是位相多项式决定了出射波前的形状. 在 CODEV 中采用了下面的一个多项式来描述位相函数

$$\varphi(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} \sum_{i=1}^{10} \sum_{j=0}^i C_i x^{i-j} y^j \quad (8)$$

其中

$$k = \frac{i(i+1)}{2} + j$$

x 和 y 是横向坐标. 这个多项式一共有 65 项, 模拟时可根据具体情况决定取舍.

研究中用 CODEV 模拟了本文所讨论的混合复消色差透镜的成像情况. 设 $f' = 1000$, $F = 10$, 玻璃材料按上节所述的一种极端情形, 混合透镜的材料为 K_9 , 折射单透镜的材料为 ZF_3 , 并使二者胶合在一起. 利用(2)~(6)式解得 $\varphi_c = 0.00162174$, $\varphi_{BOE} = 0.000013083$, $\varphi_{G1} = -0.00063482$. 这时 $\bar{P}_H = 0.71905$, $\bar{\nu}_H = 75.97$. 考虑到微电子制造技术上的限制, 取二元光学元件的基底为平面. 图 4 是这个混合透镜组的形状, 混合透镜的光焦度为正. 另一种情形是取混合透镜的材料为火石类玻璃, 可得到其光焦度为负. 模拟过程中, 二元光学元件的位相多项式被限制到 C_{14} 项. 这对于本例情形已大体能够满足要求. 出于系统对称性方面的考虑, 除 C_3 、 C_5 、 C_{10} 、 C_{12} 和 C_{14} 以外, 其余各项系数均取零值. 图 5 给出了二级光谱的校正情况.

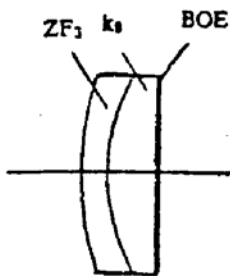


Fig. 4 Section drawing of the hybrid lens group

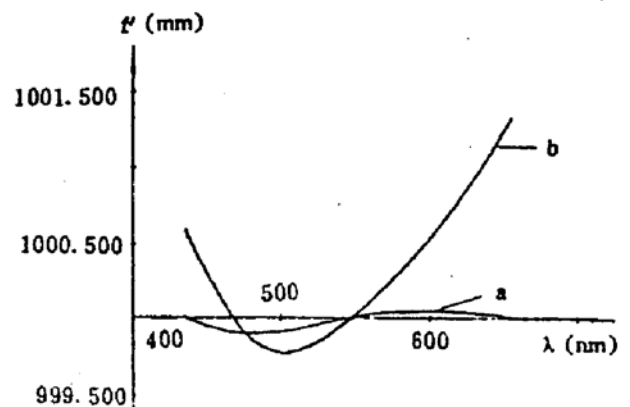


Fig. 5 Graphs of paraxial focal positions against wavelength in nanometers; curve a for the hybrid lens group, curve b for a normal achromatic doublet

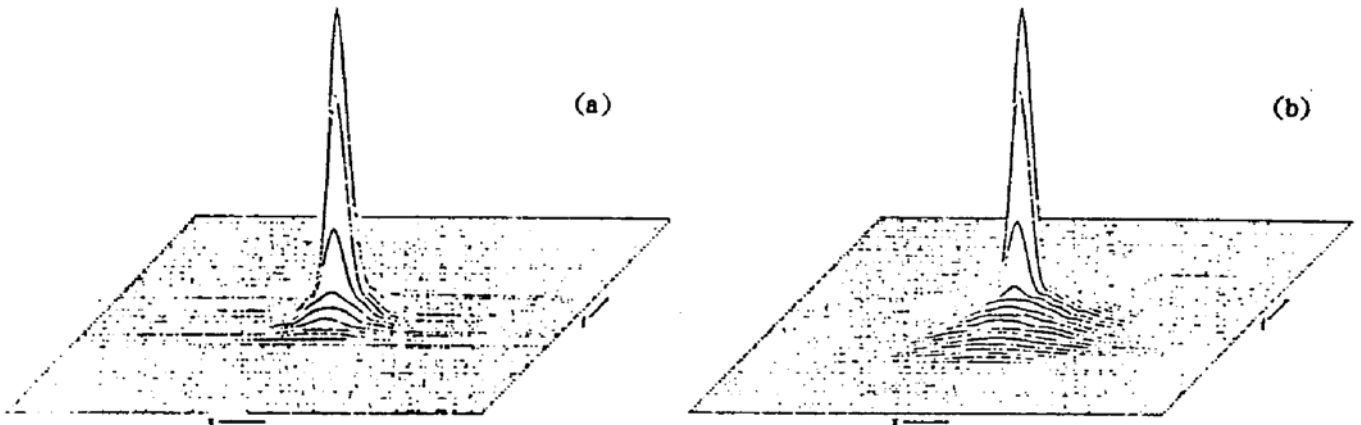


Fig. 6 Plots of the point spread function for (a) the hybrid lens group and, (b) a normal achromatic doublet

图 6 是其点扩散函数. 为了比较, 图 5 和图 6 也同时给出了同样焦距和相对孔径的一个经过仔细设计的双胶合透镜的结果. 图 5 中的曲线 b 和图 6(b) 就是双胶合透镜的结果. 该双胶合透镜的材料是 K_9-F_5 . 从图中可见, 双胶合透镜由于二级光谱的影响, 像点弥散很大, 弥散半径均方根值为 0.0137. 而采用了二元光学元件的混合透镜组由于消除了二级光谱, 像点弥散很小, 弥散半径均方根值为 0.0066, 成像质量达到了衍射极限.

结 论 用一个二元光学元件和一个折射透镜构成的混合透镜和另一个用适当材料做成的折射透镜组合起来可以实现二级光谱的校正. 其主要优点是结构简单, 不需要任何特殊材料. 用混合等效玻璃的概念来讨论其作用机理物理图像清晰, 有利于所用材料的合理选择.

致谢 作者感谢应用光学国家重点实验室工程师丛小杰在用机方面所给予的帮助.

参 考 文 献

- [1] C. G. Wynne, Secondary spectrum correction with normal glasses. *Opt. Commun.*, 1977, 21(3): 419
- [2] 史光辉, 利用本征色差校正二级光谱. *光学学报*, 1981, 1(5): 433
- [3] 姜会林, 关于二级光谱问题的探讨. *光学学报*, 1982, 2(3): 225
- [4] T. Stone, N. Geoge, Hybrid diffractive-refractive lenses and achromats. *Appl. Opt.*, 1988, 27(14): 2960
- [5] W. B. Veldkamp, T. J. McHugh, Binary Optics. *Scient. Amer.*, 1992, 266(11): 50
- [6] W. C. Sweatt, Describing holographic optical elements as lenses. *J. Opt. Soc. Am.*, 1977, 67(6): 803
- [7] R. E. Stephens, Selection of glasses for three-color achromats. *J. Opt. Soc. Am.*, 1959, 49(4): 398
- [8] CODEV Reference Manual, ORA (Optical Research Associates), 1988

Realization of Three-Color Achromats with Binary Optical Elements

Cui Qingfeng

(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Changchun 130022)

(Received 12 May 1993; revised 17 September 1993)

Abstract A hybrid lens composed of a binary optical element (BOE) and a refractive lens can be considered as hybrid effective glasses. The combinations of a proper hybrid effective glass with an appropriate glass show the ability of correcting secondary spectrum. The method of finding power solution is given and choices of glasses are discussed.

Key words binary optics, optical design, aberrations.