

激光扩束望远镜的分析

魏光辉 朱宝亮

(北京工业学院光学系)

提要: 利用激光束的透镜变换原理, 分析了望远镜扩束后的激光束参数与望远镜光学参数的关系; 分析了目镜和物镜焦点不重合程度(失调)对输出激光束参数的影响; 给出了输出激光束参数在输出空间的变化规律。

Analysis of laser beam expanding telescope

Wei Guanghui, Zhu Baoliang

(Department of Optics, Beijing Institute of Polytechnology)

Abstract: The parameter relation between the transformed laser beam and the telescope are analyzed by using the lense frausforming theory of Gaussian laser beams. The influences of misadjustment of telescope (displacement of focal points of the two lenses) on the output laser beam parameters are also considered and the expressions of the laser beam parameters in the output space are given.

一、引 言

扩束望远镜广泛应用于激光束的光学变换。采用扩束望远镜可以实现:

- (1) 改善激光束的方向性;
- (2) 获得平面光波;
- (3) 准直激光束, 使变换后的激光束束腰位于准直区中心或工程需要的位置;
- (4) 在激光谐振腔中或干涉仪中作为模匹配元件。

二、望远镜的光学变换矩阵

采用图 1 所示的符号: f_1 为目镜的焦距; f_2 为物镜的焦距; Δd 为失调量, 即目镜与物镜焦点的不重合量。规定若使目镜与物

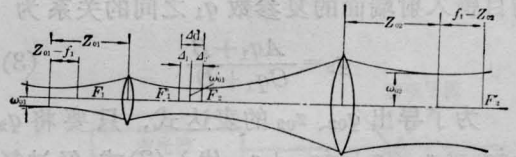


图 1 激光束通过望远镜的变换

镜间距 ($f_1 \pm f_2$) 增大, Δd 为正, 反之为负; ω_{01} 为入射激光束的束腰光斑半径, 并有 $q_{01} = \frac{\pi \omega_{01}^2}{\lambda}$; ω_{02} 为出射激光束的束腰光斑半径, 并有 $q_{02} = \frac{\pi \omega_{02}^2}{\lambda}$; z_{01} 为入射激光束束腰距目镜入射端面的距离; z_{02} 为出射激光束束腰距物镜出射端面的距离; z_2 为望远镜输出端空间光轴上任一点至物镜出射端面的距离; Δ_1 为经目镜变换后的激光束束腰距目镜后焦点 F_1' 的距离; Δ_2 为束腰距物镜前焦点

收稿日期: 1981年7月31日。

的距离; ω_{01} 为经目镜变换后的激光束束腰光斑半径。

各量的符号规则是,沿光束传播方向,发散光束的波面曲率半径为正,反之为负;以束腰位置为原点沿光束传播方向 z 、 Δ 取正值,反之为负。

图 1 望远系统的光学变换矩阵为^[1]

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_2 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & f_1+f_2+\Delta d \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_1 & 1 \end{pmatrix} \\ = \begin{pmatrix} -\frac{f_2}{f_1}\left(1+\frac{\Delta d}{f_2}\right) & f_1+f_2+\Delta d \\ \Delta d/f_1f_2 & -\frac{f_1}{f_2}\left(1+\frac{\Delta d}{f_1}\right) \end{pmatrix} \quad (1)$$

若 $\Delta d=0$, 则

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{f_2}{f_1} & f_1+f_2 \\ 0 & -\frac{f_1}{f_2} \end{pmatrix} \quad (2)$$

根据激光束光学变换的 $ABCD$ 法则^[2], 扩束望远镜物镜出射端面的光束复参数 q_2 与目镜入射端面的复参数 q_1 之间的关系为

$$q_2 = \frac{Aq_1 + B}{Cq_1 + D} \quad (3)$$

为了导出 q_{02} 、 z_{02} 的表达式, 只要将 $q_2 = iq_{02} + z_{02}$, $q_1 = iq_{01} + z_{01}$ 代入(3)式, 经过复数运算使等式两端的虚部及实部分别相等便可导出所求结果。

若将 $q_2 = q(z_2) + z_2$ 代入(3)式, 利用

$$1/q(z_2) = 1/R(z_2) - i\lambda / \frac{\pi\omega(z_2)}{\lambda}$$

的关系并经过与上述过程相同的复数运算可求得 $\omega(z_2)$ 及 $R(z_2)$ 的表达式。

三、结果分析

1. 不失调情况 ($\Delta d=0$)

在不失调情况下有

$$q_{02} = M^2 q_{01} \quad (4)$$

$$\omega_{02} = M \omega_{01}$$

$$f_2 - z_{02} = -M^2 (f_1 - z_{01}) \quad (5)$$

$$\frac{\pi\omega^2(z_2)}{\lambda} = M^2 q_{01} \times \left\{ 1 + \left[\frac{M^2 (f_1 - z_{01}) + (f_2 - z_2)}{M^2 q_{01}} \right]^2 \right\} \quad (6)$$

$$R(z_2) = -[M^2 (f_1 - z_{01}) + (f_2 - z_2)] \times \left\{ 1 + \left[\frac{M^2 q_{01}}{M^2 (f_1 - z_{01}) + (f_2 - z_2)} \right]^2 \right\} \quad (7)$$

式中, $M=f_2/f_1$ 为望远镜的角放大率。

公式(4)~(7)引出的结论是:

(1) 用不失调望远镜扩展激光束, 出射光束束腰光斑增大 $M=f_2/f_1$ 倍, 与激光器相对望远镜的位置无关。因此, 出射光束远场发散角压缩 M 倍, 准直区增大 M^2 倍。

(2) 出射光束束腰相对物镜后焦点的位置与入射光束束腰相对目镜前焦点的位置总是位于同侧, 即入射光束束腰若位于目镜前焦点之左侧, 则出射光束束腰亦位于物镜后焦点之左侧, 反之亦然。且距离增大 M^2 倍。

(3) 若 $z_{01}=f_1$, 即入射激光束束腰位于目镜前焦点, 则 $z_{02}=f_2$, 出射光束束腰将位于物镜后焦点上。

2. 失调情况 ($\Delta d \neq 0$)

根据公式(1)、(3)可导出:

$$q_{02} = \frac{M^2 q_{01}}{\left[1 + \frac{\Delta d}{f_1} \left(1 - \frac{z_{01}}{f_1} \right) \right]^2 + \left(\frac{\Delta d}{f_1} \frac{q_{01}}{f_1} \right)^2} \quad (8)$$

$$z_{02} = \frac{f_2 + M^2 (f_1 - z_{01}) + 2M \Delta d \left(1 - \frac{z_{01}}{f_1} \right) + M^2 \left(1 + \frac{\Delta d}{f_2} \right) \Delta d \left[\left(1 - \frac{z_{01}}{f_1} \right)^2 + \left(\frac{q_{01}}{f_1} \right)^2 \right]}{\left[1 + \frac{\Delta d}{f_1} \left(1 - \frac{z_{01}}{f_1} \right) \right]^2 + \left(\frac{\Delta d}{f_1} \frac{q_{01}}{f_1} \right)^2} \quad (9)$$

$$f_2 - z_{02} = \frac{-M^2(f_1 - z_{01}) - M^2 \Delta d \left[\left(1 - \frac{z_{01}}{f_1}\right)^2 + \left(\frac{q_{01}}{f_1}\right)^2 \right]}{\left[1 + \frac{\Delta d}{f_1} \left(1 - \frac{z_{01}}{f_1}\right)\right]^2 + \left(\frac{\Delta d}{f_1} \frac{q_{01}}{f_1}\right)^2} \quad (10)$$

$$\frac{\pi\omega(z_2)}{\lambda} = M^2 q_{01} \left\{ \left[1 + \frac{\Delta d}{f_2} \left(1 - \frac{z_2}{f_2}\right)\right]^2 + \left[\frac{(f_2 - z_2) + M^2(f_1 - z_{01}) \left[1 + \frac{2\Delta d}{f_2} \left(1 - \frac{z_2}{f_2}\right)\right]}{M^2 q_{01}} \right]^2 \right\} \quad (11)$$

$$R(z_2) = \frac{-\left\{ (f_2 - z_2) + M^2(f_1 - z_{01}) \left[1 + \frac{2\Delta d}{f_2} \left(1 - \frac{z_2}{f_2}\right)\right] \right\}^2 - \left\{ M^2 q_{01} \left[1 + \frac{\Delta d}{f_2} \left(1 - \frac{z_2}{f_2}\right)\right] \right\}^2}{(f_2 - z_2) + M^2(f_1 - z_{01}) \left[1 + \frac{2\Delta d}{f_2} \left(1 - \frac{z_2}{f_2}\right)\right]} + M^2 \Delta d \left[1 + \frac{\Delta d}{f_2} \left(1 - \frac{z_2}{f_2}\right)\right] \left[\left(1 - \frac{z_{01}}{f_1}\right)^2 + \left(\frac{q_{01}}{f_1}\right)^2 \right] \quad (12)$$

公式(8)~(12)的表达形式不很简明,若采用入射光束在目镜前焦点处的光束参数

$$R_{F_1} = -\frac{(f_1 - z_{01})^2 + q_{01}^2}{f_1 - z_{01}} \quad (13)$$

$$\frac{\pi\omega_{F_1}^2}{\lambda} = \frac{(f_1 - z_{01})^2 + q_{01}^2}{q_{01}} \quad (14)$$

作自变量,上述各公式的表达形式能够更加简明,并能将失调量的影响归结为一个单一变量。用 $q_1 = q_{F_1} + f_1$ 代入(3)式,化简后可得下列出射光束参数的表达式

$$q_{02} = \frac{M^2}{1 + K^2} \left(\frac{\pi\omega_{F_1}^2}{\lambda} \right) = \frac{M^2}{1 + K^2} \frac{(f_1 - z_{01})^2 + q_{01}^2}{q_{01}} \quad (15)$$

$$f_2 - z_{02} = -\frac{KM^3}{1 + K^2} \frac{(f_1 - z_{01})^2 + q_{01}^2}{q_{01}} \quad (16)$$

$$\frac{\pi\omega^2(z_2)}{\lambda} = \left\{ \left[M \left(\frac{\pi\omega_{F_1}^2}{\lambda f_1} \right) + K \left(1 - \frac{z_2}{f_2} \right) \right]^2 + \left(1 - \frac{z_2}{f_2} \right)^2 \right\} \frac{\lambda f_1}{\pi\omega_{F_1}^2} \quad (17)$$

$$R(z_2) = \frac{\left[M^2 \left(\frac{\pi\omega_{F_1}^2}{\lambda} \right) + K (f_2 - z_2) \right]^2 + (f_2 - z_2)^2}{M^2 K \left(\frac{\pi\omega_{F_1}^2}{\lambda} \right) + (1 + K^2) (f_2 - z_2)} \quad (18)$$

式中

$$K = \left(\frac{\Delta d}{f_1} - \frac{f_1}{R_{F_1}} \right) \left(\frac{\pi\omega_{F_1}^2}{\lambda f_1} \right) \quad (19)$$

为一无量纲数值,是长度的比值,可称为失调系数。对失调系数 K 的物理意义可作如下说明,根据单透镜光学变换公式^[3]易知,

$$\frac{\pi\omega_{F_1}^2}{\lambda f_1^2} = \frac{\lambda}{\pi\omega_{01}^2} \quad \frac{f_1^2}{R_{F_1}} = -\frac{f_1^2 (f_1 - z_{01})}{(f_1 - z_{01})^2 + q_{01}^2} = -\Delta_1$$

代入(19),则

$$K = (\Delta d + \Delta_1) / \left(\frac{\pi\omega_{01}^2}{\lambda} \right) = \Delta_2 / \left(\frac{\pi\omega_{01}^2}{\lambda} \right) \quad (20)$$

可知,失调系数 K 乃是入射激光束经目镜变换后的束腰 ω_{01} 距望远镜物镜前焦点 F_2 的距离 Δ_2 与 $\frac{\pi\omega_{01}^2}{\lambda}$ 的比值。所以,望远镜失调量对出射激光束参数的影响并不在于 Δd 的绝对数值,而是主要看以 $\frac{\pi\omega_{01}^2}{\lambda}$ 量度的 ω_{01} 与望远镜物镜前焦点 F_2 的重合程度。一般情况下,尤其对于高倍望远镜, $\frac{\pi\omega_{01}^2}{\lambda}$ 是个小量,所以望远镜的微小失调可能使 K 值的取值很大,从而引起出射激光束参数的很大变化。用失调系数 K 表征望远镜的失调程度,比采用失调量 Δd 更能表达失调对出射激光束参数的影响。如果入射激光束参数已知,

它相对于扩束望远镜的位置已定, 则出射光束的参数唯一地随 M 及 K 值变化。

上述(4)~(7), (8)~(12), (15)~(18)三组公式全面地描述了扩束望远镜对激光束的变换规律。公式(4)~(7)是(8)~(12), (15)~(18)的特殊情况, 这只要将 $\Delta d=0$ 代入(8)~(12), 将

$$K = \Delta_1 / \left(\frac{\pi \omega_{01}^2}{\lambda} \right) = - \frac{\pi \omega_{F_1}^2}{\lambda R_{F_1}}$$

代入(15)~(18)各式而得到证明。上述三组公式的正确性还可以由(7), (12), (18)三个 $R(z_2)$ 的表达式中使 $R(z_2) = \infty$ (束腰光斑 ω_{02} 的位置)的条件相应地导出公式(5)、(9)和(16)。令 $z_2 = f_2$, 由公式(6), (7); (11), (12); (17), (18)求出的 $\omega(F'_2)$, $R(F'_2)$ 的表达式具有完全的一致性。

分析(4)~(7), (8)~(12), (15)~(18)三组公式可得以下结论。

(1) 扩束望远镜的失调量 Δd 对出射激光束参数的影响很大, 用失调系数 K 表征其影响。由公式(15)知, 当失调系数 $K=0$, 扩束望远镜有最大的扩束比。 $K=0$ 的情况相当于 $\Delta d = -\Delta_1$, $\Delta_2 = \Delta d + \Delta_1 = 0$ 。这就是说, 最大扩束比并不出现在完全不失调的时候, 而是在望远镜有一定的失调, 使物镜前焦点 F_2 与 ω'_{01} 相重合的情况下, 扩束比最大。由公式(8)求 $\frac{d\omega_{02}}{d(\Delta d)} = 0$ 也可以得到此结论。

如前所述, 望远镜的扩束性能并不完全决定于失调量的绝对值。当入射激光束的发散角较小, 采用高倍望远镜扩束时(主要是 f_1 取值小), 扩束性能受失调影响大。此时虽然决定 K 值的各量都是一些小量, 但失调系数 K 却可能并不很小。失调量 Δd 的微小变化都会使失调系数有较大的变化, 从而使出射激光束参数发生很大的变化。相反, 当入射激光束的发散角较大, 采用低倍望远镜扩束(主要是 f_1 较大), 扩束性能对失调量不敏感。此时, 即使 Δd 有较大取值, 但 K 值并

不一定取值大。

(2) 望远镜物镜后焦面处的激光束光斑半径与失调无关, 为一仅与入射光束参数及望远镜参数有关的常量。将 $z_2 = f_2$ 代入(11)、(17)有

$$\begin{aligned} \frac{\pi \omega_{F_2}^2}{\lambda} &= M^2 \left(\frac{\pi \omega_{F_1}^2}{\lambda} \right) \\ &= M^2 \frac{(f_1 - z_{01})^2 + q_{01}^2}{q_{01}} \end{aligned} \quad (21)$$

但 R_{F_2} 与失调量有关, 即

$$R(F'_2) = - \frac{M^2}{K} \left(\frac{\pi \omega_{F_1}^2}{\lambda} \right) \quad (22)$$

(3) 出射激光束参数 (ω_{02} , z_{02}) 可利用失调系数 K 的变化进行调整。由公式(15)、(16)及(20)可知

$$\begin{aligned} \frac{f_2 - z_{02}}{q_{02}} &= -K \\ &= -(\Delta d + \Delta_1) / \left(\frac{\pi \omega_{01}^2}{\lambda} \right) \end{aligned}$$

所以, 移动物镜(变化 Δd)、移动目镜(变化 Δd , Δ_1 及 ω'_{01})或者相对激光器移动整个望远镜都能够改变出射激光束参数。

移动物镜时, 失调量 Δd 与入射、出射激光束参数的关系为

$$\begin{aligned} \Delta d &= - \left[\frac{f_2 - z_{02}}{q_{02}} + \frac{f_1 - z_{01}}{q_{01}} \right] \frac{f_1^2 \lambda}{\pi \omega_{F_1}^2} \\ &= - \frac{f_2 (f_2 - z_{02})}{(f_2 - z_{02})^2 + q_{02}^2} - \frac{f_1^2 (f_1 - z_{01})}{(f_1 - z_{01})^2 + q_{01}^2} \end{aligned} \quad (23)$$

移动目镜时, 失调量 Δd , Δ_1 及 ω'_{01} 都发生变化, 出射激光束参数与目镜移动量的关系为

$$\begin{aligned} \frac{f_2 - z_{02}}{q_{02}} &= - \Delta d \frac{(f_1 - z_{01} - \Delta d)^2 + q_{01}^2}{f_1^2 q_{01}} \\ &\quad - \frac{f_1 - z_{01} - \Delta d}{q_{01}} \end{aligned} \quad (24)$$

相对激光器移动整个望远镜时, 认为失调量 $\Delta d=0$, 并假设望远镜移动量为 ΔD , 此时

$$\frac{f_2 - z_{02}}{q_{02}} = - \frac{(f_1 - z_{01} - \Delta D)}{q_{01}} \quad (25)$$

对于一个已知角放大率的望远镜, 失调

系数 $K=0$, 可获得最大扩束比; $K=\pm 1$, 出射激光束束腰位于距 F'_2 最远距离处。

四、几点意见

(1) 望远镜对激光束的变换规律完全不同于对单一平面波的变换, 用几何光学方法分析激光扩束望远镜是不正确的。

(2) 望远镜的调整对其扩束性能影响很大。工程实践中望远镜扩束性能常劣于设计值的原因在很大程度上可能源于此。但是失

调能够作为在一定范围内改变出射激光束参数的手段。

(3) 文中的分析仅对理想光学系统是正确的, 实际光学系统在激光束变换中引入的畸变是值得进一步考虑的问题。

参 考 文 献

- [1] H. Kogelnik; Selected Papers on Laser Resonators, 1975, 1, 217.
- [2] A. Yariv; Introduction to Optical Electronics, 1976.
- [3] H. Kogelnik; Selected Papers on Laser Resonators, 1975, 1, 2.

(上接第 605 页)

的因素较多。例如干板乳胶膜厚的不均匀性、曝光量、处理过程中的温度控制等。因此在制备过程中即使严格按上述步骤进行也还会存在误差。我们在实验时发现, 在 $\Delta N \sim I_0 t$ 曲线制备以后, 按干板乳胶涂布方向切取离制备曲线的干板越近的部分, 制备滤波器的成功率越高。因此在切干板时要心中有数并可以适当多制备一些参考曲线。这一点对取样点较多的滤波器尤为重要。我们在实验中经干涉仪检查, 挑选相位的控制精度可达 $1/10$ 波长以上。

附 录

1. 处理过程

- 1) 显影 D_{19} 显影液, 温度 20°C , 显影 3 分钟;
- 2) 停显 冰醋酸停显液, 时间 30 秒钟;
- 3) 水洗 流动自来水, 冲洗 2 分钟;
- 4) 定影 F_5 定影液, 时间 3 分钟;
- 5) 水洗 同 3);
- 6) 漂白 溴化铜漂液, 处理 7 分钟, 配方见附录 2;

7) 水洗 同 3);

8) 去污 在 Kodak S-13A 去污液中浸泡 1 分钟, 配方见附录 3;

9) 水洗 同 3)

10) 清洁 在 Kodak S-13B 清洁液中浸泡 1 分钟, 配方见附录 4;

11) 水洗 在流动自来水中冲洗 5~10 分钟。

12) 干燥 室温下自然干燥。

2. 漂白液配方

溴化铜 50 克, 加蒸馏水至 1000 毫升。

3. Kodak S-13A

高锰酸钾 2.5 克;

浓硫酸 8 毫升, 加水至 1000 毫升。

4. Kodak S-13B

亚硫酸钠 10 克, 加蒸馏水至 1000 毫升。

参 考 文 献

- [1] 王玉堂等;《激光》, 1981, 8, No. 1, 30.
- [2] J. W. 顾德门;“傅里叶光学导论”, 科学出版社出版, 1976 年, 176.
- [3] L. B. Burekhardt, E. T. Doherty; *Appl. Opt.*, 1969, 8, 2479.
- [4] J. Uputnieks, C. Leonard; *Appl. Opt.*, 1969, 8, 85.