

文章编号: 0258-7025(2010)04-0923-06

双平行平板分光特性的数值模拟与分析

杨静蕊^{1,2,3} 侯霞^{1,2}

¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800
² 上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800; ³ 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 分析了双平行平板的分光特性,并提出了优化其分光特性的方法。平行放置的平行平板可将入射光束同时分为多个峰值功率密度不同的光束出射,应用电荷耦合器件(CCD)相机接收出射光斑,出射光斑的峰值功率密度差异(DMPF)要保证小。分析了平行平板板间距和光束入射角对出射光斑的峰值功率密度差异的影响,结果表明,合理选取板间距和入射角可使光斑的峰值功率密度差异减小。当平板膜特性和入射激光中心波长确定时,最优板间距与光束的瑞利长度呈递增关系,最优入射角保持稳定,相应条件下的光斑峰值功率密度差异随瑞利长度的变化有轻微浮动。

关键词 测量;光束质量;实时测量;分光;双平行平板;数值模拟

中图分类号 TN247 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL20103704.0923

Numerical Simulation and Analysis on Beam Splitting Performance of Two Parallel Plates

Yang Jingrui^{1,2,3} Hou Xia^{1,2}

¹ Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China
² Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Laser and Applied Techniques, Shanghai 201800, China
³ Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Splitting performance of two parallel plates is analyzed and a design method is presented to optimize their splitting performance. Two parallel plates parallel to each other split one incident laser beam into multiple beams which are detected by a CCD camera. Because of the use of CCD camera, difference of maximum power density between received laser faculae (DMPF) should be made as little as possible. Effect of distance between plates and incident angle on difference of laser faculae is analyzed. And the calculation results show that reasonable selection of distance between plates and incident angle can minimize DMPF. The optimum distance between plates increases as Rayleigh length of laser beam increases while the optimum incident angle keeps stable under the condition of fixed coated film and fixed central wavelength of laser beam. And DMPF under corresponding optimum conditions fluctuates as Rayleigh length increases.

Key words measurement; beam quality; real-time measurement; beam splitting; two parallel plates; numerical simulation

1 引言

激光束质量的测量是伴随着激光器的研究和工业应用产生的^[1,2]。国际化标准组织将 M^2 因子作为描述光束质量的参数,最新的国际标准(ISO11146:2005)说明,可通过双曲线拟合法测得 M^2 因子,并规定“至少要测量 10 个点,其中至少有半数应该是在光腰两侧的一个瑞利长度内,并至少有一半分布在离开

光腰 2 个瑞利长度内”^[3]。通常的做法是,移动光束或探测器进行逐点测量,但该方法耗时,为非实时测量。若可在实际测量过程中同时得到不同位置处的多个光斑,就可实现实时测量,达到对光束质量实时监测的要求。1992 年 Ruff 等^[4]利用分光镜将光束分为强度一样的 3 束,分别用 3 个电荷耦合器件(CCD)进行光斑采集,实现了脉冲激光的光束质量评价。

收稿日期: 2009-06-11; 收到修改稿日期: 2009-07-07

作者简介: 杨静蕊(1985—),女,硕士研究生,主要从事激光参数测量方面的研究。E-mail: snowboyandgirl@163.com

导师简介: 侯霞(1975—),女,研究员,硕士生导师,主要从事固体激光技术及激光器应用等方面的研究。

E-mail: hxlf@tom.com(通信联系人)

2004年 Lambert 等^[5]使用两块正交叠放的偏心菲涅耳光栅在 CCD 接收面上得到 9 个光斑,完成了单个 CCD 对多个光斑的同时采集,实现了脉冲激光光束质量的测量。但由于光栅分光^[6,7]后会引入较大的像差,且不能正面接受光斑以致接收到的光斑能量分布失真及光栅的能量破坏阈值低等问题,使得它的应用存在一定的限制。2007 年于永爱等^[8]利用双平行平板作为分光装置,在 CCD 接收面上同时得到了 10 个光斑,实现了高能激光束的质量因子的实时测量,但文献^[8]的工作并没有给出双平行平板分光特性的详细说明。本文利用数值模拟的方法,分析了板间距、光束入射角对双平行平板出射光斑的峰值功率密度差异(DMPF)的影响,得到了光斑峰值功率密度差异最小时所对应的最优板间距和入射角度值,并简要分析了激光光束的瑞利长度对最优板间距和入射角度值的影响。

2 平行平板分光原理

在实际实验中,激光束的瑞利长度越小就越节省实验空间,因此可用一高质量成像的聚焦透镜对光束的瑞利长度进行压缩,并对变换后的光束进行分光、测量。设定聚焦透镜焦距为 2000 mm,压缩后的光束瑞利长度为 75 mm,光腰半径为 0.112 mm,远场发散角为 3 mrad。用于分光的两平板如图 1 所示平行放置,板间距为 H ,其中下平板内侧镀高反膜(反射率大于 0.999),外侧不镀膜,上平板内侧镀高反膜(反射率约为 0.95),外侧镀增透膜。激光束以 α 角入射到装置的下平板上,入射点到聚焦透镜的距离为 P_0 ,光束经双平板多次反射后在反射点 A, B, C 等处以不同的功率密度出射,被垂直于光束放置的探测系统接收(这里用 CCD 相机接收光斑)。由像差理论可知,平面反射镜是无像

差的理想光学系统,因此可认为探测器正面接收到的双平行平板所分光束是无失真的^[9],且由于双平板所镀膜的反射率不同,使得该装置对光束能量的要求不高,即可以对高能的光束进行分光。

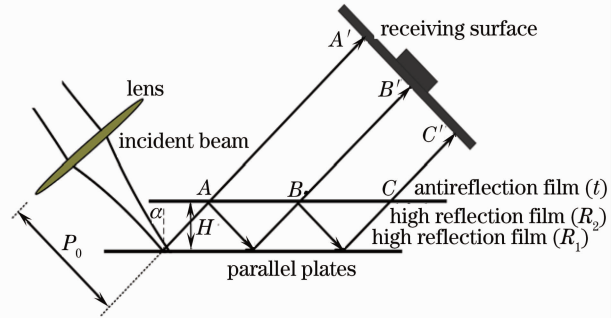


图 1 分光系统装置图

Fig. 1 Schematic diagram of splitting system

设入射光束为理想高斯基模光束(TEM_{00} 模),忽略与光束截面功率密度分布无关的相位项,只考虑其振幅分布^[10],则有

$$U_{00}(x, y, z) = U_0 \frac{\omega_0}{\omega(z)} \exp\left[-\frac{x^2 + y^2}{\omega^2(z)}\right], \quad (1)$$

式中 U_0 为振幅常数, ω_0 为光腰半径, $\omega(z)$ 为光束在 z 处的半径

$$\omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + \frac{z^2}{Z_R^2}}, \quad (2)$$

式中 Z_R 为光束瑞利长度,它与 ω_0 的关系为 $\omega_0^2 = \lambda Z_R / \pi$, λ 为激光中心波长。因此(2)式也可写为

$$\omega(z) = \sqrt{\frac{\lambda Z_R}{\pi} \left(1 + \frac{z^2}{Z_R^2}\right)}. \quad (3)$$

要计算接收面上各光束的功率密度,需知道两平板所镀膜的反射和透射特性。针对本文工作设计的平行平板系统,其对应工作波长的反射、透射特性随入射角度的变化^[11]如图 2 所示。在入射角小于 25° 时,膜的反射、透射特性随角度变化不明显。

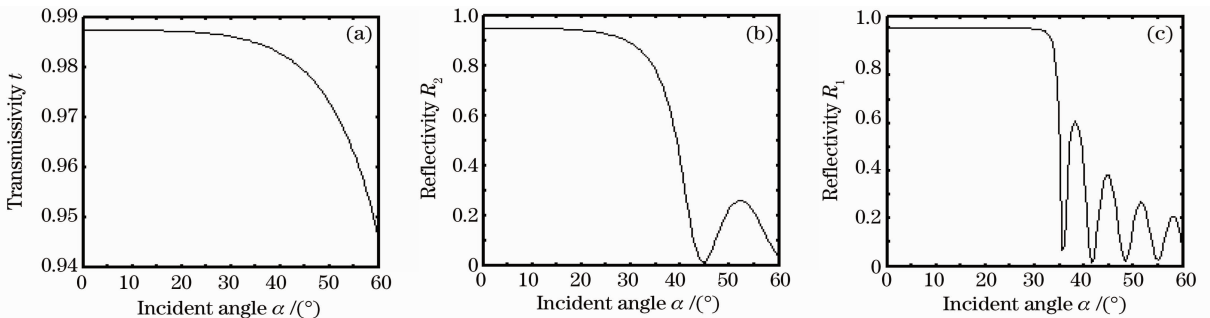


图 2 上平板增透膜的透射率(a)、高反膜的反射率(b)及下平板高反膜的反射率(c)随入射角的变化关系

Fig. 2 Change of transmissivity of antireflection film of the upper plate (a), reflectivity of high reflection film of the upper plate (b) and reflectivity of high reflection film of the lower plate (c) versus incident angle

由图 1 可以得到光束在各出射点的总透射率 $T(\alpha)$

$$\begin{cases} T_A(\alpha) = R_1(\alpha)[1 - R_2(\alpha)]t(\alpha) \\ T_B(\alpha) = R_1(\alpha)R_2(\alpha)R_1(\alpha)[1 - R_2(\alpha)]t(\alpha) \\ T_C(\alpha) = R_1(\alpha)R_2(\alpha)R_1(\alpha)R_2(\alpha)R_1(\alpha)[1 - R_2(\alpha)]t(\alpha) \\ \vdots \end{cases}, \quad (4)$$

可将 A', B', C' 各处的光斑看作是同一出射光束(该光束的束腰半径、瑞利长度等参数与入射光束相同)不同位置处的光斑, 光斑半径 $w(z)$ 满足(2)式, 且由图 1 可知 z 的取值是分立的, 取值间隔也即光斑的采样间隔为 $2H\cos\alpha$ 。

综合(1), (4)式可得到接收面处光波场的振幅分布

$$U'_0(x, y, z) = U_0 \frac{w_0}{w(z)} T(\alpha) \exp\left[-\frac{x^2 + y^2}{w^2(z)}\right], \quad (5)$$

从而可知出射光斑的功率密度分布

$$I(x, y, z) = |U'_0(x, y, z)|^2 = T^2(\alpha) \left| U_0 \frac{w_0}{w(z)} \right|^2 \exp\left[-2\frac{x^2 + y^2}{w^2(z)}\right], \quad (6)$$

忽略常量 U_0 和 w_0 , 由(6)式可知出射基模光斑的峰值功率密度满足关系式

$$I_{\text{peak}}(z) \propto \frac{T^2(\alpha)}{w^2(z)}. \quad (7)$$

再对圆形镜共焦腔最初的几个横模(TEM_{10} , TEM_{20} , TEM_{01} , TEM_{11})的峰值功率密度进行计算, 发现各个横模光斑的峰值功率密度都满足(7)式。

由前面讨论知, $T(\alpha)$ 由 α 决定, 激光中心波长 λ 为定值时 $w(z)$ 由 Z_R 和 z 决定, z 的取值又受取样间隔 $2H\cos\alpha$ 中 α 和 H 的限制, 因此出射光斑的峰值功率密度 $I_{\text{peak}}(z)$ 受到 α , H 和 Z_R 三个参数的影响。

另外因 α , H 与激光束无关, Z_R 只与激光腔参数有关, 对基模和高阶横模是没有区别的, 因此仿真中只需考虑理想基模光斑的情况便可达到分析出射光斑峰值功率密度的目的。

3 平行平板分光特性的数值分析

考虑到接收系统为数字 CCD 相机, 要保证它的光电响应维持在线性区域, 需将入射功率密度限制在一定范围内(CCD 的动态范围)。当光斑的峰值功率密度接近 CCD 线性响应的最大功率密度值时, 可充分利用 CCD 的动态范围, 提高光束质量计算的精度。实际上, 各光斑的峰值功率密度是存在差异的。以自然传输的激光束为例(忽略 α 相关项), 由

(7)式可知激光束 3 倍瑞利长度处($z = 3Z_R$)的峰值功率密度是光腰处($z = 0$)峰值功率密度的 0.1 倍

$$\left[\frac{I_{00}(0, 0, z = 3Z_R)}{I_{00}(0, 0, z = 0)} \propto \left| \frac{w_0}{w(z = 3Z_R)} \right|^2 = \frac{1}{10} \right],$$

若光腰处的峰值功率密度正好为动态范围的上限, 则 3 倍瑞利长度处的光斑只能利用相机动态范围的 10%, 该处光斑的尺寸测量值就偏小, 且光斑尺寸的测量值会随动态范围利用率的进一步减小而急剧下降^[4, 12]。若能降低 CCD 接收面上各光斑峰值功率密度的差异, 尽可能充分地利用相机的动态范围, 便可实现光斑尺寸测量及光束质量计算精度的提高。

以 Matlab 为平台, 通过计算接收面上各光斑峰值功率密度的差异分析了板间距、光束入射角对平行平板分光特性的影响。仿真中对光斑取样范围要求如下: 所取光斑位于理想高斯光束束腰两侧, 取样数 15; 光腰与光束传播方向相反的一侧(以下简称左侧)2~3 倍瑞利长度之间至少有 4 个光斑分布, 其中第一个光斑应紧挨 3 倍瑞利长度处, 光腰两侧 1 倍瑞利长度内都有光斑分布, 且总数不得小于 5, 光腰与光束传播方向相同一侧(以下简称右侧)1 倍瑞利长度之外可无光斑分布。

3.1 光束入射角

用所采集光斑最小峰值功率密度与最大峰值功率密度的比值($R_{\text{min/max}}$)表示光斑的峰值功率密度差异, 差异越小($R_{\text{min/max}}$ 越大), CCD 可利用的动态范围就越大, 光束质量的计算精度就越高。由前面讨论知, 入射角 α 影响出射光斑的峰值功率密度, 因而也会影响光斑的峰值功率密度差异 $R_{\text{min/max}}$ 。以中

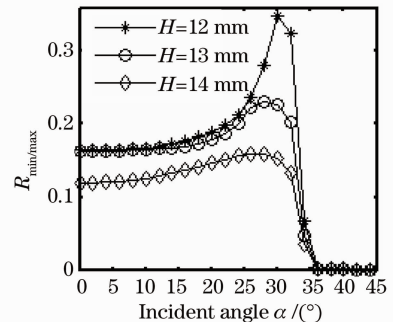


图 3 光斑峰值功率密度差异随光束入射角变化的关系

Fig. 3 Change of DMPF versus incident angle

心波长 532 nm, 瑞利长度 75 mm 的高斯基模光束为例, 定板间距分别为 12, 13 和 14 mm, 观察 α 与 $R_{\min/\max}$ 之间的关系, 如图 3 所示。可看到, 二者不满足简单的递增或递减关系。以 $H = 12$ mm 为例, 在 $\alpha = 30^\circ$ 时 $R_{\min/\max}$ 有最大值 0.350, 即最小峰值功率密度为最大峰值功率密度的 0.350 倍。前面提到, 自由传输激光束 3 倍瑞利长度处的峰值功率密度是光腰处峰值功率密度的 0.1 倍, 与之相比, 使用平行平板所分光束的峰值功率密度差异大大减小了, 而

表 1 接收面上各光斑的归一化峰值功率密度(1)

Table 1 Normalized maximum power density of laser faculae (NMPF) on receiving surface (1)

Position of faculae /mm	1776.9	1797.6	1818.4	1839.2	1860.0	1880.8	1901.6	1922.3
NMPF /%	36.2	38.1	40.7	44.1	48.6	54.7	62.6	72.8
Position of faculae /mm	1943.1	1963.9	1984.7	2005.5	2026.3	2047.1	2067.8	
NMPF /%	84.6	95.7	100	91.6	72.5	51.6	35.0	

3.2 板间距

若定光束入射角分别为 29° , 30° 和 31° , 激光束参数同上, 观察光斑峰值功率密度差异 $R_{\min/\max}$ 随板间距变化的关系, 如图 4 所示。图 4 的 3 条曲线表明当入射角确定时, $R_{\min/\max}$ 随 H 减小而增大, 但不能因此就说 H 越小越好。由于 H 决定光斑的取样间隔, H 过大(过小)会造成取样光斑超出前面所述取样范围(小于取样范围)而导致取样无效。以 $\alpha = 30^\circ$ 的情况为例, 板间距为 11~13.5 mm 时得到的光斑组都良好地满足光斑取样范围要求, 将其选为有效光斑组。由图 4 可知, 在有效光斑组内, 板间距取值为 11 mm 时, 出射光斑的峰值功率密度差异最小 ($R_{\min/\max}$ 有最大值 0.405), 这表明入射角 $\alpha = 30^\circ$ 时的最佳板间距。

当 $H = 11$ mm, $\alpha = 30^\circ$ 时取样光斑的分布情况

表 2 接收面上各光斑的归一化峰值功率密度(2)

Table 2 NMPF on receiving surface (2)

Position of faculae /mm	1775.7	1794.8	1813.8	1832.9	1851.9	1871.0	1890.0	1909.1
NMPF /%	40.5	41.9	43.9	46.6	50.2	54.9	61.0	68.8
Position of faculae /mm	1928.1	1947.2	1966.2	1985.3	2004.3	2023.4	2042.4	
NMPF /%	78.3	88.8	97.7	100	91.5	74.0	54.4	

表 1 和表 2 数据的共同点是, 峰值功率密度分布呈先增后减的趋势(如图 5 所示), 结合各光斑的位置发现, 峰值功率密度最大的光斑(最强光斑)往往出现在出射光束的束腰附近(束腰位置为 2000 mm, 表 1, 表 2 中的最强光斑分别出现在 1984.7, 1985.3 mm 处)。还发现, 两表中最强光斑的左侧光斑的峰值功率密度差异要远小于右侧光斑的差异。这也容易解释, 由(7)式可知峰值功率密度

CCD 动态范围的利用率也得到了提高。

当 $H = 12$ mm, $\alpha = 30^\circ$ 时取样光斑的分布情况为: 光腰两侧 1 倍瑞利长度内光斑数为 7, 光腰左侧 2~3 倍瑞利长度之间光斑数为 4。以取样光斑中峰值功率密度的最大值为标准, 将接收面上各光斑的峰值功率密度进行归一化处理, 结果如表 1 所示。表中光斑位置指的是光斑到图 1 中聚焦透镜的距离, 并认为出射光束的束腰出现在透镜焦点处, 即束腰光斑位置为 2000 mm。

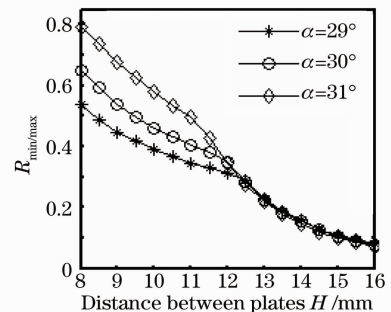


图 4 光斑峰值功率密度差异随板间距变化的关系

Fig. 4 Change of DMPF versus distance between plates

为光腰左侧 2~3 倍瑞利长度内光斑数为 4, 光腰两侧 1 倍瑞利长度内光斑数为 7。此时接收面上各光斑的归一化峰值功率密度如表 2 所示, 归一化标准为取样光斑中峰值功率密度的最大值, 束腰光斑位于 2000 mm 处。

与 $T^2(\alpha)$ 成正比, 与 $w^2(z)$ 成反比关系。在由光腰左侧 3 倍瑞利长度处向光腰趋近时, 光斑半径 $w(z)$ 递减, $T(\alpha)$ 也递减, 但前者的作用更强, 使得光斑峰值功率密度呈平稳的增长趋势; 由光腰向光腰右侧发展时, 光斑半径 $w(z)$ 增大, $T(\alpha)$ 仍递减, 造成光腰右侧光斑的峰值功率密度快速衰减, 相邻光斑衰减幅度变大, 差异加大。这也是为什么将多数采样光斑定位在光腰左侧而只保证光腰右侧 1 倍瑞利长度

内存在光斑的原因。

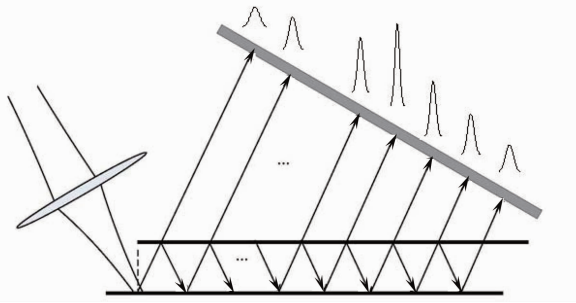


图 5 接收面上各光斑的功率密度分布

Fig. 5 Distribution of power density of laser faculae on receiving surface

3.3 最优板间距和光束入射角组合

为在保证光斑取样范围的前提下获得峰值功率密度差异最小的光斑组,计算了不同入射角和板间距情况下各出射光斑组的峰值功率密度差异。计算中将光斑取样长度定为 3.5~4.5 倍瑞利长度,其中光腰左侧占 3 倍瑞利长度,右侧占 0.5~1.5 个瑞利长度,以之作为取样光斑有效的条件。取样光斑数仍为 15。计算表明,瑞利长度为 75 mm 的理想高斯基模光束在板间距 $H=11$ mm,光束入射角 $\alpha=31.25^\circ$ 时,各出射光斑的峰值功率密度差异达到最小 ($R_{\min/\max}$ 有最大值 0.532),光斑取样范围也满足要求:该条件下,光腰左侧 2~3 倍瑞利长度内有 4 个光斑,光腰两侧 1 倍瑞利长度内有 7 个光斑。

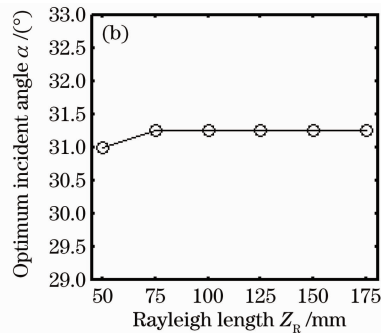
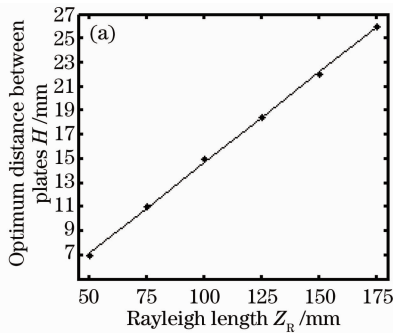


图 7 最优板间距(a)及光束入射角(b)随光束瑞利长度的变化关系

Fig. 7 Change of optimum distance between plates (a) and optimum incident angle (b) versus Rayleigh length

表 3 不同瑞利长度的激光束对应的最优板间距和入射角及相应的最小峰值功率密度差异

Tabel 3 Optimum distance between plates (a) and optimum incident angle (b) under different Rayleigh length conditions and corresponding value of DMPF

Rayleigh length /mm	50	75	100	125	150	175
H /mm	7.5	11	15	18.5	22	26
α /($^\circ$)	31	31.25	31.25	31.25	31.25	31.25
$R_{\min/\max}$	0.483	0.532	0.486	0.513	0.532	0.503

图 6 显示的是光斑峰值功率密度差异随板间距和入射角变化的关系,可见板间距 $H=11$ mm 并不对应最小的光斑峰值功率密度差异,之所以取它为最优板间距,是因为 $H < 11$ mm 的光斑组并不满足取样范围要求,为无效光斑组。

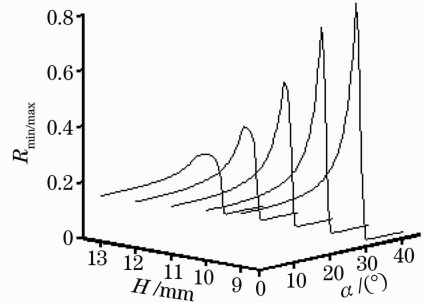


图 6 光斑峰值功率密度差异随板间距和入射角变化的关系

Fig. 6 Change of DMPF versus distance between plates and incident angle

3.4 瑞利长度

若激光束的瑞利长度改变了,为使出射光斑仍满足取样范围要求,最优板间距和入射角也要相应地改变。图 7 所示的是不同瑞利长度下的理想高斯基模光束对应的最优板间距和入射角。由图 7 可看到,最优板间距与瑞利长度近似呈线性增加关系,而最优入射角则保持相对稳定。由图 8 可看到,不同瑞利长度的激光束在最优板间距和入射角条件下的出射光斑的峰值功率密度差异有一定的浮动,其均值为 0.508,标准差为 0.021。图 7 和图 8 中的数据由表 3 给出。

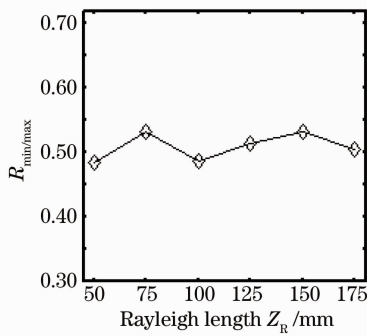


图 8 不同瑞利长度的激光束在相应最优板间距和入射角条件下的出射光斑的峰值功率密度差异

Fig. 8 DMPF under corresponding optimum conditions of laser beams with different Rayleigh lengths

对各瑞利长度下的激光束进行模拟时还发现,图 1 中的 P_0 值也会影响光斑的峰值功率密度差异,这是因为 P_0 值决定了第一个出射光斑到光腰的距离,并进一步影响了各出射光斑的峰值功率密度。图 7 和图 8 中的数据都是在考虑到 P_0 值影响情况下得到的,相应的 P_0 的取值使得第一个出射光斑位于光腰左侧 2.985 ~ 2.995 瑞利长度之间。实际操作中要提供调整 P_0 值的装置以得到最小的峰值功率密度差异。

还应注意,大的瑞利长度会要求分光用平板长度加大。如瑞利距离为 50 mm 时,最优板间距 7.5 mm,最优入射角 31° ,出射 15 个光斑所需平板长度至少为 $2H \tan \alpha \times 14 \approx 127$ mm;瑞利距离为 100 mm 时,最优板间距 15 mm,最优入射角 31.25° 所需平板长度至少为 $2H \tan \alpha \times 14 \approx 255$ mm。

4 结 论

作为一种为数字 CCD 相机提供多光斑的分光装置,平行平板出射光斑的峰值功率密度差异成了衡量其分光特性的标准。为此以取得最小峰值功率密度差异的光斑组为目的,利用数值模拟的方法得到了最优的平行平板板间距和光束入射角。对瑞利长度的分析发现,最优板间距随激光束瑞利长度的

增加而增加,最优入射角保持稳定,相应条件下的光斑峰值功率密度差异随瑞利长度的变化有所浮动。

参 考 文 献

- 1 A. E. Siegman. How to (Maybe) measure laser beam quality [C]. *OSA Annual Meeting*, 1997
- 2 A. Caprara, G. C. Reali. Time-resolved M^2 of nanosecond pulses from a Q-switched variable-reflectivity-mirror Nd:YAG laser[J]. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(6): 414~416
- 3 ISO 11146-1: 2005
- 4 J. A. Ruff, A. E. Siegman. Single-pulse laser beam quality measurements using a CCD camera system[J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(24): 4907~4909
- 5 R. W. Lambert, R. Cortes-Martinez, A. J. Waddie *et al.*. Compact optical system for pulse-to-pulse laser beam quality measurement and applications in laser machining [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(26): 5037~5046
- 6 Fang Tao, Ye Xin, Wang Zhimin *et al.*. Real-time measurement of beam quality factor M^2 based on diffraction gratings [J]. *Chinese J. Laser*, 2006, **33**(5): 650~654
房滔,叶新,王志敏等.一种基于衍射光栅光束质量 M^2 因子的实时检测技术[J]. *中国激光*, 2006, **33**(5): 650~654
- 7 Geng Yifeng, Xu Xiaojun, Xi Fengjie. Real-time measurement of beam quality factor M^2 based on defocus gratings [J]. *Chinese J. Laser*, 2008, **35**(s1): 98~100
耿义峰,许晓军,习锋杰.一种基于散焦光栅的光束质量 M^2 因子实时测量技术[J]. *中国激光*, 2008, **35**(s1): 98~100
- 8 Yu Yong'ai, Zhang Lingling, Tang Qianjin *et al.*. Real-time laser beam quality measurement technique [J]. *Chinese J. Laser*, 2007, **34**(2): 255~258
于永爱,张玲玲,唐前进等.激光束质量实时测量技术[J]. *中国激光*, 2007, **34**(2): 255~258
- 9 Gao Xuesong, Gao Chunqing, Gao Mingwei *et al.*. Investigation and evaluation of cuneiform prism and neutral glass slices used as laser attenuator [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(2): 189~192
高雪松,高春清,高明伟等.高精度激光参数测量系统中衰减系统的研究与评价[J]. *强激光与粒子束*, 2006, **18**(2): 189~192
- 10 Zhou Bingkun, Gao Yizhi, Chen Tirong *et al.*. Principle of Laser [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004. 49~64
周炳琨,高以智,陈倜嵘等.激光原理[M].北京:国防工业出版社,2004. 49~64
- 11 Shi Shunxiang, Zhang Haixing, Liu Jinsong *et al.*. Physical Optics and Applied Optics [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2000. 72~82
石顺祥,张海兴,刘劲松等.物理光学与应用光学[M].西安:西安电子科技大学出版社,2000. 72~82
- 12 Cao Yilei, Gao Chunqing. Analysis on the accuracy of beam parameter measurement by using CCD array [J]. *Optical Technique*, 2004, **30**(5): 583~586
曹一磊,高春清.基于面阵 CCD 的激光光束参数测量系统精度分析[J]. *光学技术*, 2004, **30**(5): 583~586