

# $N$ 个衰减片杂斑特性表征及抑制方法

向洪刚<sup>1,2,3</sup>, 王睿<sup>1,2,3\*</sup>, 奚加超<sup>1,2,3</sup>, 侯孝成<sup>1,2,3</sup>, 刘利纯<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>国防科技大学前沿交叉学科学院, 湖南 长沙 410073;

<sup>2</sup>脉冲功率激光技术国家重点实验室, 湖南 长沙 410073;

<sup>3</sup>高能激光技术湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410073

**摘要** 在分析单个衰减片、一对类 V 字型排列的衰减片、一对平行型排列的衰减片光斑分裂特征的基础上, 给出  $N$  个衰减片使用时, 光斑能量分裂、分裂光斑各级中心间距及重叠部分的表征方法。探寻出 2 种有效的解决方案, 并给出详细的设计方法、使用方法。研究表明: 存在最优入射角, 可使各级杂斑间距最大, 对于折射率为 1.4~1.7 的常用的衰减片介质材料, 最优入射角为  $48^\circ \sim 50^\circ$ ; 充分利用类 V 字型、平行型组合衰减片的光路传输特点, 合理摆放衰减片、科学使用光阑, 可有效去除各级杂斑, 获得理想的单一主光斑。

**关键词** 几何光学; 激光功率衰减; 杂光表征; 衰减片排列; 抑制方法

中图分类号 O439

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0508001

## Characterization of Speckles in $N$ -Attenuators and Methods for Their Suppression

Xiang Honggang<sup>1,2,3</sup>, Wang Rui<sup>1,2,3\*</sup>, Xi Jiachao<sup>1,2,3</sup>, Hou Xiaocheng<sup>1,2,3</sup>, Liu Lichun<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China;

<sup>2</sup>State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Changsha, Hunan 410073, China;

<sup>3</sup>Hunan Key Laboratory of High Energy Laser Technology, Changsha, Hunan 410073, China

**Abstract** Based on the analysis of the characteristics of the beam splitting when a laser beam passes through a single attenuator, a pair of attenuators with V-type and parallel arrangement, methods are given for the characterization of the beam energy splitting, beam center spacing, and their overlapping parts for  $N$ -attenuators. Two effective solutions are explored, and details of the design and application methods are presented. The results show that there is an optimal incidence angle that can maximize the spacing of all levels of speckles. For common attenuating materials with a refractive index in the range of 1.4 to 1.7, the optimal incidence angle is in the range of  $48^\circ$  and  $50^\circ$ . Therefore, by making full use of the optical transmission characteristics of attenuators with V-shaped and parallel-shaped arrangement, rationally placing the attenuators, and using the beam stop scientifically, speckles at all levels can be effectively removed and an ideal single beam spot can be obtained.

**Key words** geometric optics; laser power attenuation; characterization of speckles; attenuator arrangement; suppression method

**OCIS codes** 080.1510; 290.2648; 080.2740; 120.6150

收稿日期: 2020-09-09; 修回日期: 2020-10-12; 录用日期: 2020-10-21

基金项目: 国家自然科学基金(61805279)

\* E-mail: XI\_G\_Z@126.com

# 1 引言

功率衰减是激光应用过程中面临的重要问题之一,目前最常采用的激光功率密度衰减的方式是采用吸收型衰减片或干涉型衰减片,采取多个衰减片堆叠的方式,形成“衰减片堆”,通过不同衰减率的衰减片组合,可以得到特定的衰减功率<sup>[1-10]</sup>。但当激光照射在空气-衰减片界面上时,会在一定厚度的衰减片内部形成多次反射,而后产生能量逐步递减的多个杂散光斑。加之激光具有很好的相干性,光斑间还会产生干涉,在空间形成干涉条纹,特别是当光能量较强时,将严重影响成像质量和测量结果,掩盖重要信息<sup>[11-14]</sup>,因此如何消除杂散光斑是需要解决的重要现实问题。本文针对平行平板型衰减片引起的杂斑问题进行定量系统的研究,指出衰减片最优摆放角度的确定依据,提出两种简便有效的解决方案,并进行实验验证。

## 2 主要问题及典型实验结果

### 2.1 实验设计

实验使用干涉型衰减片,激光的能量等于衰减片反射能量、透射能量以及玻璃基片介质( $\text{GaF}_2$ )吸收能量三者之和,通过多个衰减片的叠加组合,可以实现对激光能量的步进式衰减。由于玻璃基片均存在着一定的厚度 $h$ ,且通常是多数量使用(设数量为 $N$ )、与光轴存在一定的倾角 $\alpha$ 等,激光经过衰减片后分裂为多个光斑,如图 1 所示。

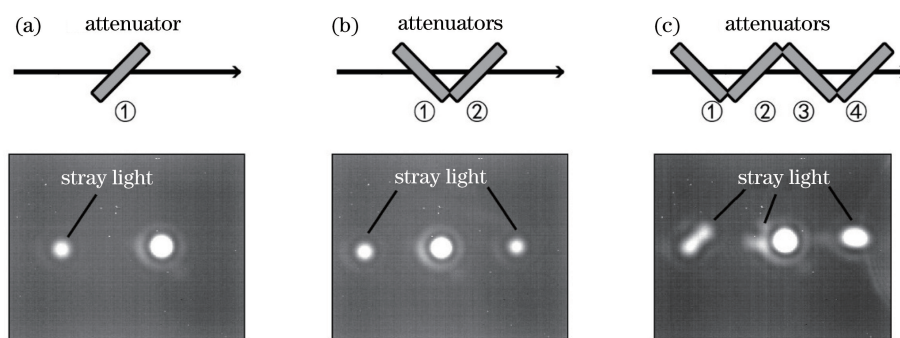


图 3 不同的衰减片摆放方式所致的光斑分布图。(a)实验 1;(b)实验 2;(c)实验 3

Fig. 3 Distribution of light spots caused by different placement of attenuators.

(a) Experiment 1; (b) experiment 2; (c) experiment 3

需要说明的是,在衰减片内部的多次反射会在主光斑的两侧形成多个功率越来越小的杂光斑。由于探测器的孔径限制,一侧最多只能观察到一个杂斑。在实验 1 中,放置一片与光轴成  $45^\circ$  夹角的衰减

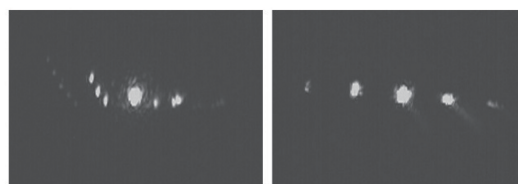


图 1 杂光示意图

Fig. 1 Schematic of speckles

相邻各级杂散光斑的中心间距 $d$ 与衰减片厚度 $h$ 、入射角 $\alpha$ 、衰减片折射率 $n$ 等直接相关,为了具体展示衰减片与杂光位置关系,设计了如图 2 所示的实验光路。A 为实验光源,B 为面阵探测器,用于测量经衰减片后的分裂光斑。

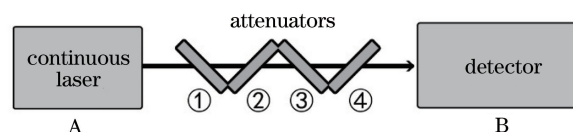


图 2 实验光路示意图

Fig. 2 Schematic of experimental optical path

实验分三组展开,分别测量经过衰减片后的光斑分布状况,为了更好地展示问题,实验中每片衰减片与光轴夹角为  $45^\circ$ 。

实验 1:放置①号衰减片;

实验 2:放置①、②号衰减片;

实验 3:放置①、②、③、④号衰减片。

### 2.2 典型实验结果

图 3 为激光经过 3 种不同的衰减片摆放方式后的光斑分布图,可以看到,在强度最大的主光斑一侧或者两侧均出现了杂斑。

片,主光斑向右侧发生了偏移,并在左侧形成了一个强度稍弱的杂光斑;在实验 2 中,第二片衰减片与第一片衰减片呈类 V 字排列,与光轴成  $45^\circ$  夹角,主光斑没有产生偏移,两侧均产生了杂光斑;在实验 3

中,在主光斑的两侧仍然有杂光,并且观察到了杂光斑与主光斑的叠加、杂光斑与杂光斑的叠加。

### 3 多个衰减片杂光特性表征

#### 3.1 单个衰减片的杂光分布特点表征

如图 4 所示,设衰减片前介质折射率为  $n_1$ , 衰减片折射率为  $n_2$ , 衰减片厚度为  $h$ , 入射光的入射角为  $\alpha$ , 入射光在衰减片内的折射角为  $\gamma$ , 入射光斑直径为  $D$ , 经衰减片后主光斑中心出射位置设为  $A$ , 一级次斑中心出射点位置为  $B$ , 直线  $AB$  间距为  $l$ , 直线  $AB$  在入射方向的投影距离为  $d$ , 则得到的方程为

$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \gamma, \quad (1)$$

$$l = 2h \tan \gamma, \quad (2)$$

$$d = l \cos \alpha. \quad (3)$$

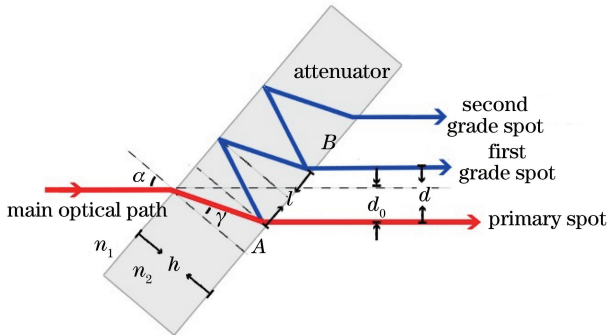


图 4 单个衰减片的光路

Fig. 4 Optical path of a single attenuator

##### 3.1.1 各级光斑功率密度分析

光从介质  $n_1$  进入  $n_2$  的反射率为  $\rho_0$ , 衰减片在入射面的内反射率为  $\rho_1$ , 衰减片在出射面上的内反射率为  $\rho_2$ , 激光作用于介质的透过率为  $\tau$ , 由于衰减片制造工艺需单侧镀膜, 因此通常  $\rho_1 \neq \rho_2$ 。设入射光功率密度为  $P$ , 探测器的最小探测功率密度为  $P_{\min}$ , 主光斑为 0 级, 用下标表示。则主光斑出射功率密度  $P_0$  为

$$P_0 = P\tau(1 - \rho_0)(1 - \rho_2). \quad (4)$$

一级次光斑的出射功率密度为

$$P_1 = P\tau(1 - \rho_0)(1 - \rho_2)\tau^2\rho_1\rho_2 = P_0\tau^2\rho_1\rho_2. \quad (5)$$

以此类推, 则  $N$  级次光斑的出射功率密度  $P_N$  为

$$P_N = P_0(\tau^2\rho_1\rho_2)^N. \quad (6)$$

当  $P_N < P_{\min}$  时, 杂斑影响可以忽略不计。设  $N+1$  级光斑与  $N$  级光斑强度的比值为  $K$ , 则有

$$K = \frac{P_{N+1}}{P_N} = \tau\rho_1\rho_2, N = 0, 1, 2, 3. \quad (7)$$

例如取  $\tau = 99\%$ ,  $\rho_1 = \rho_2 = 4\%$ , 则有  $K = 1.6 \times 10^{-3}$ , 当  $P_N < P_{\min}$  时,  $N+1$  级杂斑影响可忽略不计。假定  $P_{\min} = 10^{-12} \text{ W/cm}^2$ , 当测试光源的功率密度为  $1 \text{ W/cm}^2$  时, 通常 4 级以上的杂斑可以忽略。

##### 3.1.2 各级光斑中心间距分析

根据(1)~(3)式, 相邻各级杂散光斑的中心间距  $d$  可以表示为

$$d = 2h \tan \gamma \cos \alpha = \frac{hn_1 \sin 2\alpha}{\sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \alpha}}, \quad (8)$$

从(8)式可以看到, 当衰减片厚度  $h$ 、介质折射率  $n$ 、入射角  $\alpha$  不变时, 相邻各级杂散光斑的中心间距  $d$  不随光斑级数发生改变。

##### 3.1.3 主光斑与次级光斑重叠情况分析

在考虑光斑直径的情况下, 次级出射光斑与主光斑是否重叠, 由主光斑与次级光斑中心间距  $d$  和光斑直径  $D$  决定, 如图 5 所示。当  $d > D$  时, 次级出射光斑与主光斑不重叠; 当  $d = D$  时, 次级出射光斑与主光斑相接; 当  $d < D$  时, 次级出射光斑与主光斑重叠, 重叠大小等于  $D - d$ 。

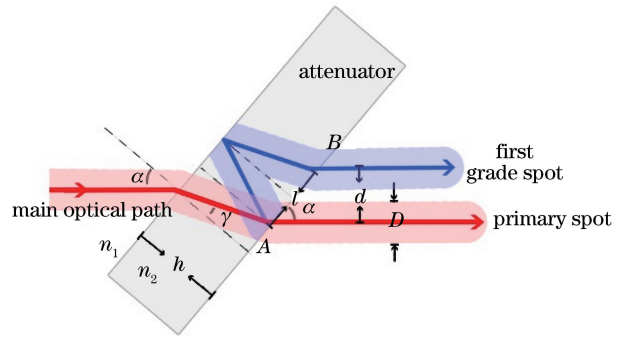


图 5 主光斑与一级次光斑重叠分析

Fig. 5 Analysis of overlap between primary spot and first grade spot

#### 3.2 V 型放置衰减片的杂光分布特点表征

当加上第二片衰减片时, 使衰减片呈 V 型放置, 第二片衰减片折射率  $n_2$ , 厚度  $h$ , 入射光的入射角  $\alpha$ , 入射光在衰减片内的折射角  $\gamma$ , 相邻各级杂散光斑的中心间距  $d$ , 入射光斑直径  $D$  等参数均与第一片衰减片相同。设第二片衰减片的透过率为  $\tau'$ , 光从介质  $n_1$  进入  $n_2$  的反射率为  $\rho'_0$ , 衰减片入射面的内反射率为  $\rho'_1$ , 衰减片出射面的内反射率为  $\rho'_2$ , 如图 6 所示, 可得出如下结论。

1) 次级杂斑以主光斑为中心向二侧扩展, 主光斑上有重叠的杂光斑, 主光斑没有偏移出初始的入射光路。

2) 相邻各级杂散光斑的中心间距  $d$  不变,可用(4)式表征。

3) 用  $P_{N+Q}$  表示经第一片衰减片的  $N$  级光斑在经过第二片衰减片后衍生出的  $Q$  级次斑的出射功率密度。则光透射第一片、第二片衰减片后均为主光斑,其功率密度为

$$P_{0+0} = P_0 \tau' (1 - \rho'_0) (1 - \rho'_2) \quad (9)$$

第一片衰减片产生的主光斑经过第二片衰减片

产生的一级次光斑的功率密度为

$$P_{0+1} = P_{0+0} \tau'^2 \rho'_1 \rho'_2 \quad (10)$$

第一片衰减片产生的一级次光斑经第二片衰减片产生的主光斑的功率密度为

$$P_{1+0} = P_0 \tau^2 \rho_1 \rho_2 \tau' (1 - \rho'_0) (1 - \rho'_2) = P_{0+0} \tau^2 \rho_1 \rho_2 \quad (11)$$

由此推广可知,  $P_{Q+N}$  为

$$P_{N+Q} = P_{0+0} (\tau^2 \rho_1 \rho_2)^N (\tau'^2 \rho'_1 \rho'_2)^Q \quad (12)$$

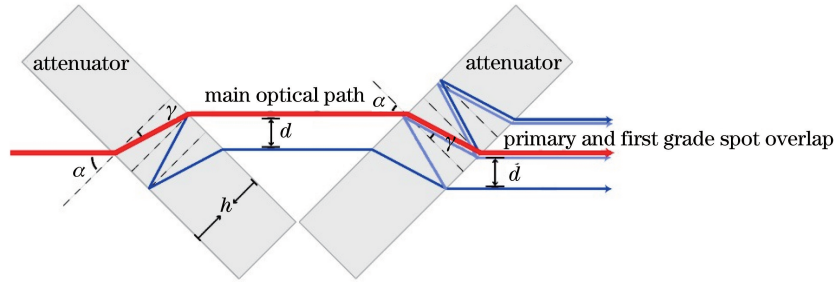


图 6 类 V 字型放置衰减片光路

Fig. 6 Optical path for attenuators showing V-shape

### 3.3 平行型放置衰减片的杂光分布特点表征

当衰减片呈平行型放置时,如图 7 所示,可得出如下结论:

1) 次级杂斑向同一侧扩展,主光斑没有重叠的杂斑,但主光斑发生了偏移,并随着衰减片数量的增

加而增大偏移量;

2) 相邻各级杂散光斑的中心间距  $d$  不变;

3) 光斑各级功率密度表征同类 V 字型衰减片,见(12)式。

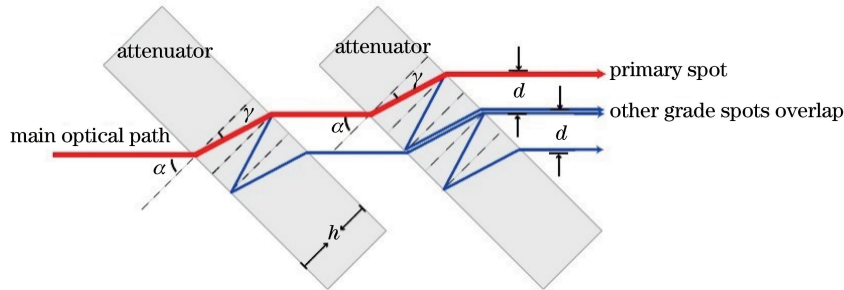


图 7 平行型放置衰减片光路

Fig. 7 Optical path for parallel attenuators

### 3.4 小结

综合上述分析,可以推广到  $N$  对衰减片的情况:

1) 使用类 V 字型成对放置的衰减片,主光路经过由 2 个相同参数  $(h, n, \alpha)$  的衰减片组成一对衰减片时,主光斑出射方向与入射方向相同,不会发生偏移;次级杂斑以主光斑为中心向光轴二侧扩展,主斑上有重叠的杂斑,主光斑没有偏移出初始的入射光路;

2) 使用平行型放置的衰减片,主光路经过多次相同方向的偏移,主光斑出射光会发生平移;

3) 当入射角  $\alpha$  固定时,相邻各级杂散光斑的中心间距  $d$  保持不变;

4) 使用类 V 字型成对放置的衰减片,部分次斑会与主光斑完全重叠,当两次入射角不能精确相同时,便会发生主光斑和次斑一部分重叠而不是完全重叠的情况,如图 3(b)展示了主光斑和部分杂光斑的完全重叠,图 3(c)展示了主光斑和部分杂光斑的部分重叠;

5) 经过  $N$  个衰减片后,主光斑的功率密度为

$$P_N = P_0 \prod_i^N [\tau^i (1 - \rho_0^i) (1 - \rho_2^i)] \quad (13)$$

### 4 杂光抑制方法研究

衰减片引起的杂光是客观存在的,要解决这个问题中心目标是使衰减片引起的杂光无法进入探测视场。但通常杂光间距很小,混杂其中又难以区分,因此合理设计衰减片的摆放方案及合理使用光阑是关键。

#### 4.1 入射角度的影响分析

根据 3.1.3 中的分析可知,增大相邻各级杂散光斑的中心间距  $d$ ,并使其大于光斑直径,可使次光斑与主光斑分离,便于采取其他措施消除杂斑。

由(8)式可知,当  $h$  确定时, $d$  最大值即为极大值, $d$  取得极大值时有

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1} = \sqrt{\sin^2 \alpha - \frac{\sin^2(2\alpha)}{4\cos(2\alpha)}} \quad (14)$$

图 8 为当  $d$  取得最大值时,入射角  $\alpha$  随相对折射率  $n_{21}$  变化的曲线,对于折射率为 1.4~1.7 的介质,入射角取 48°至 50°之间,可以保证  $d$  取得最大值。

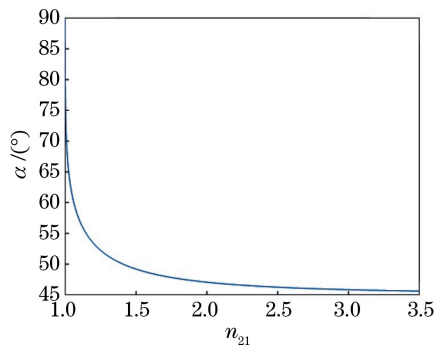


图 8 当  $d$  取得最大值时,入射角随相对折射率的变化曲线

Fig. 8 When  $d$  reaches the maximum value, the incidence angle varies with the relative refractive index

对于 GaF<sub>2</sub> 材质的衰减片,取  $n_1=1, n_2=1.42$ ,并代入(8)式,得出不同  $h$  下,相邻各级杂散光斑的中心间距  $d$  与入射角  $\alpha$  之间的关系,如图 9 所示,当  $\alpha=49.95^\circ$  时, $d$  取最大值。

对于 K9 玻璃材质的衰减片,取  $n_1=1, n_2=1.52$ ,并代入(8)式,得出不同  $h$  下各级光斑中心距离  $d$  与入射角  $\alpha$  之间的关系,如图 10 所示,当  $\alpha=49.05^\circ$  时, $d$  取最大值。

由图 9、10 可以看出,入射角均在 48°和 50°之间,和图 8 推算的结果吻合。实际使用条件下  $h、n_1、n_2$  是固定的,都存在一个固定的入射角  $\alpha$ ,使得光斑间距  $d$  存在最大值。

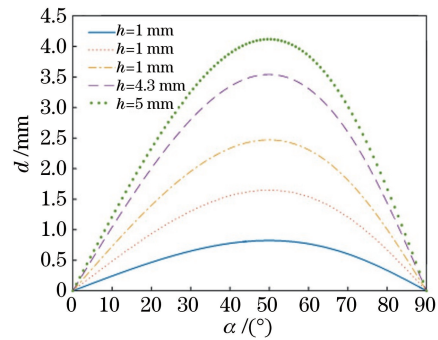


图 9 GaF<sub>2</sub> 介质中,光斑中心间距随入射角的变化曲线

Fig. 9 Change curve of spot center spacing with incident angle in GaF<sub>2</sub> medium

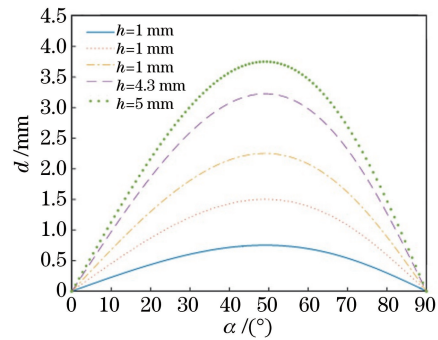


图 10 K9 玻璃介质中,光斑中心间距随入射角的变化曲线

Fig. 10 Change curve of spot center spacing with incident angle in K9 glass medium

#### 4.2 衰减片厚度的影响分析

图 11、12 分别为在 GaF<sub>2</sub> 材质、K9 玻璃材质介质中,相邻各级杂散光斑的中心间距  $d$  与衰减片厚度  $h$  之间的关系曲线,可以看出,当  $\alpha、n_1、n_2$  固定时, $d$  随  $h$  增大而线性增大。

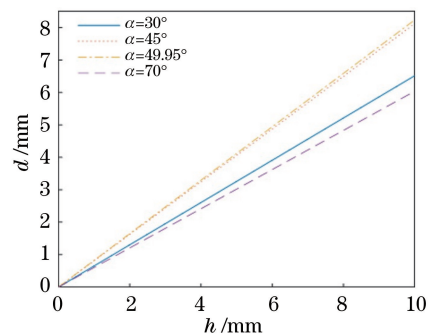


图 11 GaF<sub>2</sub> 介质中,光斑中心间距随衰减片厚度的变化曲线

Fig. 11 Change curve of spot center spacing with attenuator thickness in GaF<sub>2</sub> medium

为了方便加工放置衰减片的金属架,实际使用时,设计衰减片  $\alpha=45^\circ$ ,此时  $d=3.492$  mm。其后控制光源光斑直径的大小,使得  $d>D$ ,最终能够分离主光斑和次级杂斑。在其他不同参数下,入射角  $\alpha$  的

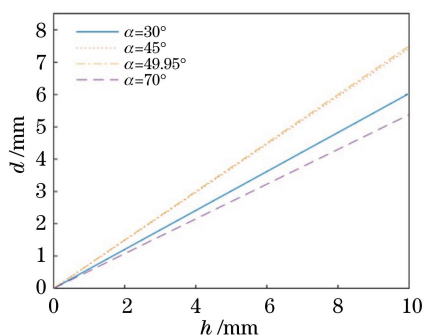


图 12 K9 玻璃介质中, 光斑中心间距随衰减片厚度的变化曲线

Fig. 12 Change curve of spot center spacing with attenuator thickness in K9 glass medium

极值可根据实际使用的衰减片参数, 利用(8)式得到。

### 4.3 杂光抑制光路设计

类 V 字型摆放的衰减片引入的杂光会与主光斑重叠, 无法通过光阑得到无杂斑的主光斑, 而平行型摆放的衰减片则会使主光光路不断发生偏移。为了解决这两个问题, 需要设计合理的光路, 并在合理的位置加上光阑阻挡杂光, 最终可以得到不含杂斑的主光斑, 如图 13 所示。

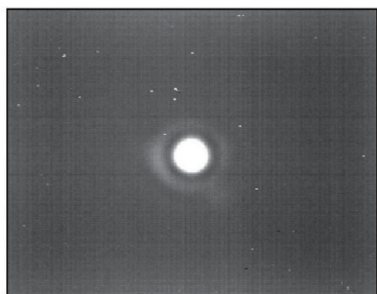


图 13 不含杂斑的主光斑

Fig. 13 Main spot without speckles

衰减片具体摆放的技术要求如下。

- 1) 按衰减倍率, 确定需要使用的衰减片数量。
- 2) 摆放衰减片的总数必须是偶数, 且保证衰减片的厚度相同。

3) 摆放方法 1: 使用类 V 字型周期结构, 如图 14 所示, 在类 V 字型摆放的衰减片中, 第一片摆放角度  $\beta$ , 即衰减片表面与光轴的夹角  $\beta = 90^\circ - \alpha$ , 第二片衰减片与第一片衰减片呈类 V 字型, 以  $\beta$  角摆放, 每一片衰减片后方都加入去除杂光斑的光阑, 如此两片类 V 字型摆放的衰减片为一组杂斑抑制衰减单元, 更多衰减片的使用可重复该衰减单元结构。

4) 摆放方法 2: 使用双平行对称结构, 如图 15 所示, 使用类 V 字型与平行型组合方案将相同厚度

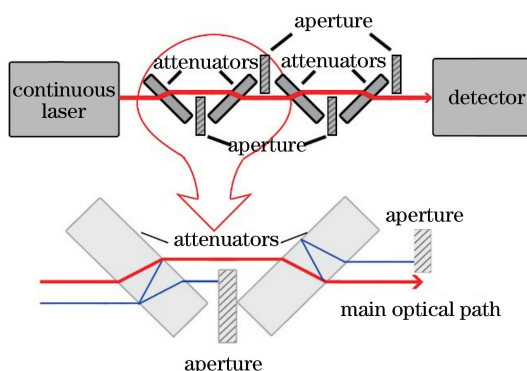


图 14 摆放方法 1 及部分细节放大

Fig. 14 Placement method 1 and amplification of some details

的衰减片分为不同的两组, 每组全部以同一方向摆放, 摆放角度  $\beta$ , 即衰减片表面与光轴的夹角  $\beta = 90^\circ - \alpha$ , 另一组在另一方向上以  $\beta$  角摆放, 光阑安放在每组最后一块衰减片后方。

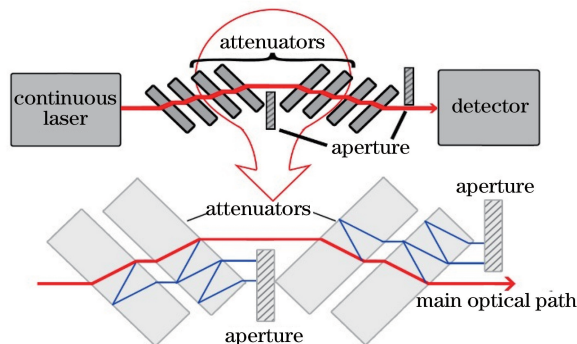


图 15 摆放方法 2 及部分细节放大

Fig. 15 Placement method 2 and amplification of some details

图 16 为实验中所使用的双平行对称结构, 共使用了 6 片衰减片和 2 个阻挡光阑。

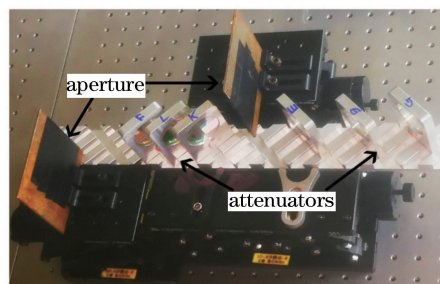


图 16 双平行对称结构结合放置的两组衰减片

Fig. 16 Two groups of attenuators are placed in a double parallel symmetric structure

## 5 结 论

定量、系统地分析了平板光学衰减片杂光产生

的原理和效果,并提出了一种有效、简便易行的杂光抑制方法。选择合适的入射角度 $\alpha$ ,使得各级光斑的间距 $d$ 大于光斑直径 $D$ ,就能确保次级出射光斑与主光斑不重叠;当相邻各级杂散光斑的中心间距 $d$ 取最大值时,入射角 $\alpha$ 与相对折射率 $n_{21}$ 存在固定的对应关系,对于折射率为1.4~1.7的常用的衰减片介质材料,入射角取 $48^\circ$ 至 $50^\circ$ ,能够使各级杂斑间距最大。杂光抑制光路的衰减片和挡板摆放方法有两种:类V字型周期结构和双平行对称结构。这两种方式都能够有效去除各级杂斑并获得理想的单一主光斑。

### 参 考 文 献

- [1] Jin X Z, Wang X. Summary for technology development of variable optical attenuator [J]. Optical Communication Technology, 2003, 27(12): 29-32.  
金锡哲, 王曦. 可调光衰减器(VOA)技术发展综述[J]. 光通信技术, 2003, 27(12): 29-32.
- [2] Zhang J F. Research on preparation metal/SiO<sub>2</sub> optical attenuation slice by green coating technology [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2011.  
张剑峰. 基于绿色镀膜技术制备金属/SiO<sub>2</sub>光衰减片研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2011.
- [3] Wang Z B, Feng G B, Yang P L, et al. Numerical simulation and applications of a method for attenuating laser power density [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(2): 022201.  
王振宝, 冯国斌, 杨鹏翎, 等. 一种激光功率密度衰减方法的数值模拟及应用[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(2): 022201.
- [4] Li M X, Wang L, Dong L H. Development of a novel optical variable attenuator in lithography exposure system [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(1): 0103002.  
李美萱, 王丽, 董连和. 光刻曝光系统中新型光可变衰减器的研制[J]. 中国激光, 2018, 45(1): 0103002.
- [5] Wang J Y, Wu Q N. Metamaterial terahertz broadband reflector with double-layer grid [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(6): 0614002.  
王建扬, 吴倩楠. 基于双层格栅的超材料太赫兹宽频反射器[J]. 中国激光, 2020, 47(6): 0614002.
- [6] Li F Q, Zhang X H, Cai W J, et al. Parameter calculation of splitting mirrors in optical-butting focal plane [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(13): 1308001.  
李富强, 张孝弘, 蔡伟军, 等. 光学拼接焦平面中拼接反射镜参数的计算[J]. 光学学报, 2020, 40(13): 1308001.
- [7] Chen Z X, Liang B M, Zhuang S L. Temperature-controlled optical attenuator based on two-dimensional photonic crystals [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(15): 152301.  
陈之厦, 梁斌明, 庄松林. 基于二维光子晶体的温控光衰减器[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(15): 152301.
- [8] Chen X, Tang S X, Guo Y J, et al. Attenuation of high rate in parameter measurement of high power laser [J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(S1): S106002.  
陈欣, 唐顺兴, 郭亚晶, 等. 高功率激光参数测量中高倍率衰减方案[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(S1): S106002.
- [9] Wei R, Cai X J, Lin Z Q. Effect of angular variable mirror on light beams of "SHENGUANG II" laser system [J]. Acta Optica Sinica, 2001, 21(7): 869-873.  
魏荣, 蔡希洁, 林尊琪. 变角度衰减片对“神光II”激光系统光束的影响[J]. 光学学报, 2001, 21(7): 869-873.
- [10] Ma J Y, Lin Z P, Lü F, et al. Design of temperature adaptive tunable optical attenuator control [J]. Electro-Optic Technology Application, 2019, 34(4): 60-63.  
马洁云, 林兆培, 吕方, 等. 温度自适应可调光衰减器控制设计[J]. 光电技术应用, 2019, 34(4): 60-63.
- [11] Cen Z F, Li X T, Zhu Q H. Stray light analysis for optical system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(3): 300-304.  
岑兆丰, 李晓彤, 朱启华. 光学系统杂散光分析[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(3): 300-304.
- [12] Zhong X, Zhang L, Jin G. Stray light removing of reflective optical system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(2): 316-318.  
钟兴, 张雷, 金光. 反射光学系统杂散光的消除[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(2): 316-318.
- [13] Lü Y, Wang D, Wang Z G, et al. Optical path of laser detection and stray light suppression for multiple thermal fluids [J]. Chinese Optics, 2019, 12(2): 310-320.  
吕妍, 王迪, 王志国, 等. 多元热流体激光检测及杂光抑制光路[J]. 中国光学, 2019, 12(2): 310-320.
- [14] Chen F, Gao C, Xu P M. Analysis of stray light influence to modulation on Fourier transform spectrometer [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2018, 38(9): 2966-2970.  
陈芳, 高超, 徐彭梅. 傅里叶变换光谱仪多次反射杂光对调制度的影响分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(9): 2966-2970.