

# 高功率固体激光装置光学元件“缺陷”分布 与光束近场质量的定量关系研究\*

周丽丹 栗敬钦<sup>†</sup> 李平 王文义 刘兰琴 张颖 张小民

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

(2010年3月9日收到; 2010年4月18日收到修改稿)

基于光传输理论, 获得了弱调制情况下光学元件“缺陷”分布功率谱密度 (power spectral density, PSD) 与光束近场强度分布 PSD 之间的定量关系; 通过数值模拟的方法, 针对高功率固体激光装置的基本单元 (线性介质、非线性介质以及空间滤波器) 对获得的理论关系进行了具体的验证和讨论. 研究表明, 弱调制下, 只存在振幅型或位相型“缺陷”分布时, 光学元件“缺陷”分布 PSD 与光束近场强度分布 PSD 通过近场强度分布 PSD 的系统传输因子联系, 传输因子与系统的构型和运行状态有关. 研究结果为光学元件“缺陷”分布指标的获得提供了理论基础, 对高功率固体激光装置负载能力的提升起到了一定的指导作用.

**关键词:** “缺陷”分布, 功率谱密度, 光学元件, 光束质量

**PACS:** 42.25.-p, 42.65.-k

## 1. 引言

惯性约束聚变 (inertial confinement fusion, ICF) 物理实验对高功率固体激光驱动器的负载能力提出了很高的要求. 加工工艺及运行环境的限制导致光学元件上必然存在着杂质、划痕、麻点、亚表面缺陷、灰尘等“缺陷”, 它们尺度小 (微米至毫米级)、数量多 (使用多次后的光学元件其“缺陷”密度可达到  $1000/\text{cm}^2$  的量级<sup>[1]</sup>), 使大量中高频调制引入到光场中, 是破坏光束近场均匀性, 制约系统负载能力提升的主要因素. 由于“缺陷”的完全消除并不现实, 因此研究清楚光学元件的“缺陷”分布状况需控制在什么水平才能满足系统高通量稳定运行的要求, 即获得光学元件的“缺陷”分布指标就具有非常重要的实际意义. 为此必须完成两个主要工作: 选择合理的参量来表征光学元件的“缺陷”分布; 研究此表征参量与光束近场质量的定量关系.

由于中高频调制的衍射和非线性效应很强, 各单个“缺陷”对光场的影响会相互交叉, 因此具有集体效应, 必须将“缺陷”分布作为一个整体进行研究

才科学合理. 基于此思想, 2009年我们提出了采用功率谱密度 (power spectral density, PSD) 作为光学元件“缺陷”分布的定量表征参量, 完成了两个主要工作中的第一个<sup>[2]</sup>. 为了完成第二个主要工作即表征参量与光束近场质量的定量关系, 结合光束近场质量的 PSD 表征方法<sup>[3]</sup>, 本文基于光传输理论, 建立了弱调制情况下光学元件“缺陷”分布 PSD 与光束近场强度分布 PSD 之间的定量关系; 并通过数值模拟的方法, 针对线性介质、非线性介质以及空间滤波器的情况, 对获得的理论关系进行了具体的验证和讨论.

## 2. 定量关系

光学元件“缺陷”种类繁多, 性质各异, 但从对光场影响的角度看, 可归结为对光场的振幅和位相引入调制: 对振幅的调制通过影响光学元件的振幅透过率分布来实现, 仅考虑此影响的“缺陷”称为振幅型“缺陷”; 对位相的调制通过影响光学元件的光学厚度分布来实现, 仅考虑此影响的“缺陷”称为位相型“缺陷”. 一般地, 光学元件“缺陷”为振幅与位

\* 国防科技重点实验室基金 (批准号: 9140C6803010904) 资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯联系人. E-mail: sujingqin@hotmail.com; ldzhou@caep.ac.cn

相混合型. 定义无畸变光场经过“缺陷”分布元件后还未进行传输的调制场为初始光场  $E_i(x, y, z)$ , 则初始光场的空间分布为

$$E_i(x, y, z) = E_{i0}(z)(1 - h(x, y, z))e^{j\phi(x, y, z)}, \quad (1)$$

其中  $h(x, y, z)$  为“缺陷”元件振幅挡光率的空间分布,  $\phi(x, y, z)$  为“缺陷”元件位相畸变的分布,  $E_{i0}(z)$  为无畸变光场.

若光场在传输前后均满足弱调制假设, 则可将光场处理成一个强的本底场加上一个弱的调制场的形式, 本底场在横向是均匀的, 与  $x, y$  无关, 光场的起伏全体现在调制场上

$$E(x, y, z) = E_0(z)[1 + e(x, y, z)], \quad (2)$$

其中  $E(x, y, z)$  为总光场,  $E_0(z)$  为本底场,  $e(x, y, z)$  为归一化调制场, 写成实部与虚部的形式为  $e(x, y, z) = u(x, y, z) + jv(x, y, z)$ . 当满足弱调制假设时,  $|e| = |u + jv| \ll 1$ , 总光场对应的光强分布  $I(x, y, z)$  为

$$\begin{aligned} I(x, y, z) &= |E(x, y, z)|^2 \\ &\approx |E_0(z)|^2 [1 + 2u(x, y, z)] \\ &= I_0(z) [1 + S(x, y, z)], \end{aligned} \quad (3)$$

$I_0(z)$  为本底光强,  $S(x, y, z) = 2u(x, y, z)$  为归一化强度调制分布, 近场质量就通过  $S(x, y, z)$  的 PSD 来表征<sup>[3]</sup>. 根据 PSD 的计算公式,  $S(x, y, z)$  的功率谱密度  $P_s$  为

$$P_s(f_x, f_y, z) = \frac{|\tilde{S}|^2}{A} = \frac{4|\tilde{u}(f_x, f_y, z)|^2}{A}, \quad (4)$$

$A$  为光场面积,  $\tilde{u}(f_x, f_y, z)$  为归一化调制场的实部频谱. 可见当光场满足弱调制条件时,  $P_s$  就只与归一化调制场的实部频谱有关, 研究传输过程中光场 PSD 的变化规律就等效于寻求传输前后归一化调制场的实部频谱的关系. 根据矩阵光学, 弱调制下传输前后的归一化调制场的实部频谱关系可通过求解系统的归一化调制谱传输矩阵  $\mathbf{T}$  获得

$$\begin{pmatrix} \tilde{u}_o \\ \tilde{v}_o \end{pmatrix} = \mathbf{T} \begin{pmatrix} \tilde{u}_i \\ \tilde{v}_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_{11} & t_{12} \\ t_{21} & t_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{u}_i \\ \tilde{v}_i \end{pmatrix}, \quad (5)$$

其中  $\tilde{u}_i, \tilde{v}_i$  分别表示初始归一化调制场的实部和虚部频谱,  $\tilde{u}_o, \tilde{v}_o$  分别表示传输后归一化调制场的实部和虚部频谱, 则传输后的近场强度 PSD 就为  $P_{\text{sout}}$

$$P_{\text{sout}} = \frac{4|t_{11}\tilde{u}_i + t_{12}\tilde{v}_i|^2}{A}, \quad (6)$$

又在弱调制条件下, (1) 式可写成

$$\begin{aligned} E_i(x, y, z) &= E_{i0}(z)(1 - h(x, y) \\ &\quad + j\phi(x, y)), \end{aligned} \quad (7)$$

则

$$P_{\text{sout}} = \frac{4| -t_{11}\tilde{h}(f_x, f_y, z) + t_{12}\tilde{\phi}(f_x, f_y, z) |^2}{A}, \quad (8)$$

$\tilde{h}(f_x, f_y, z)$  为振幅挡光率分布的傅里叶变换,  $\tilde{\phi}(f_x, f_y, z)$  为位相畸变分布的傅里叶变换. 特殊情况下

1) 只考虑振幅型“缺陷”分布时, 初始场只有振幅调制,  $\tilde{h}(f_x, f_y, z) \neq 0; \tilde{\phi}(f_x, f_y, z) = 0$

$$P_{\text{sout}} = 4|t_{11}|^2 P_{\text{defectsamp}}, \quad (9)$$

其中  $P_{\text{defectsamp}} = \frac{|\tilde{h}(f_x, f_y, z)|^2}{A}$  为振幅型“缺陷”分布的 PSD. 一般来说, 更容易检测到的是强度的透过率, 因此在弱调制条件下, (9) 式可改写为

$$P_{\text{sout}} = |t_{11}|^2 P_{\text{defectsl}}, \quad (10)$$

$P_{\text{defectsl}}$  为“缺陷”元件强度挡光率分布的 PSD.

2) 只考虑位相型“缺陷”分布时, 初始场只有位相调制,  $\tilde{h}(f_x, f_y, z) = 0; \tilde{\phi}(f_x, f_y, z) \neq 0$

$$P_{\text{sout}} = 4|t_{12}|^2 P_{\text{defectsp}}, \quad (11)$$

其中  $P_{\text{defectsp}} = \frac{|\tilde{\phi}(f_x, f_y, z)|^2}{A}$  为位相型“缺陷”分布的 PSD.

由此可见, 只考虑振幅型或位相型“缺陷”时, 光学元件“缺陷”分布 PSD 与光束近场强度 PSD 由因子  $4|t_{11}|^2$  (或  $|t_{11}|^2$ ) 或  $4|t_{12}|^2$  联系.  $4|t_{11}|^2$  (或  $|t_{11}|^2$ ),  $4|t_{12}|^2$  是只与光学系统构型和运行参数有关的量, 为明确起见, 将它们定义为近场强度分布 PSD 的系统传输因子, 简称传输因子, 用  $R$  表示,  $R$  就反映了光学元件“缺陷”分布对光束近场引入的各种调制频率在传输过程中的演化规律. 不同光学系统的传输因子不同, 同样的“缺陷”分布对光束近场的影响也就不一样, 需结合系统的传输因子  $R$  进行具体的分析.

至此, 对于光学元件“缺陷”分布与光束近场质量, 我们就提炼出了关于传输因子  $R$  的理论关系.

### 3. 验证与分析

为了验证上述理论关系的正确性, 以振幅型“缺陷”分布元件(采用文献[4]的方法产生)为例, 针对高功率固体激光装置的线性介质、非线性介质以及空间滤波器等基本传输单元, 通过数值模拟的方法进行了验证和讨论. 物理模型如图 1 所示, 均匀入射光经过输入面具有振幅型“缺陷”分布的光学系统传输, 图中的系统分别指线性介质、非线性

介质以及空间滤波器. 首先采用数值模拟方法获得传输后光场的空间分布, 然后根据 PSD 计算公式对此光场强度分布 PSD 进行数值计算<sup>[3]</sup>, 并与采用 (10) 式求得的 PSD 进行比较, 以验证理论的正确性. 为了初步获得此理论适用的条件, 对不同调制程度的输出场进行了验证, 光场调制的强弱用强度对比度  $C$  表示. 为了便于比较, 我们将光场的二维 PSD 进行了方位平均得到径向 PSD.

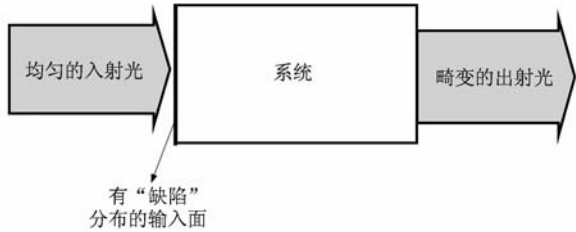


图1 物理模型

基于采样精度和计算时间的考虑, 基本模拟参数如下: 取样口径为 4 cm, 光束口径为 2 cm, 采样点数为 512, “缺陷”尺寸范围为几十微米至几毫米, 初始场平均光强为  $\text{GW}/\text{cm}^2$  量级, 激光波长为 1053 nm, 光强选择为高功率固体激光器运行的 GW 量级.

### 3.1. 线性介质

根据傍轴近似下线性介质中的标量波动方程

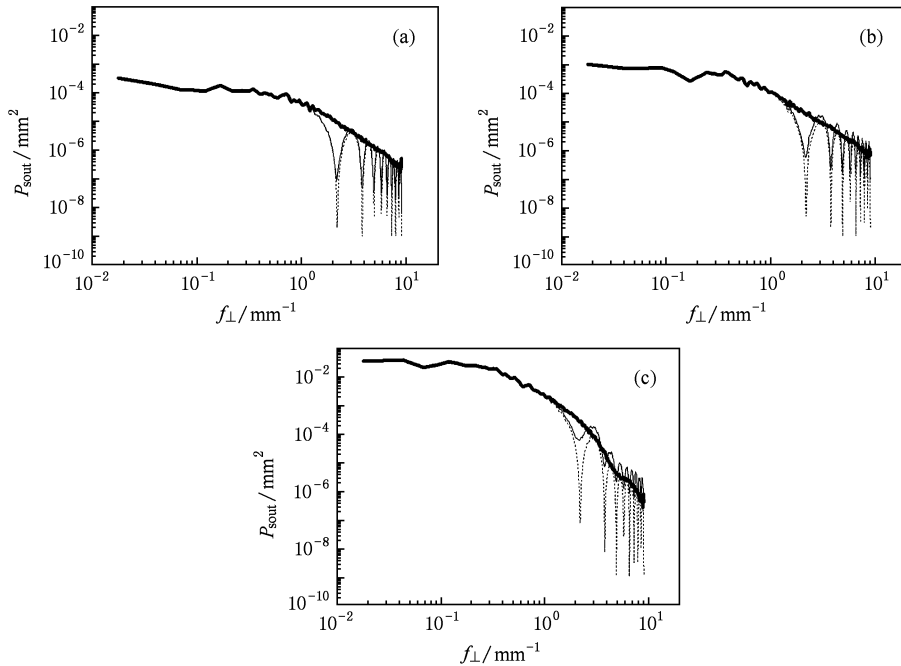


图2 线性介质验证结果 (图中粗实线表示初始调制光场的 PSD, 细实线表示数值模拟得到的输出场 PSD, 虚线表示由理论关系得到的输出场 PSD). (a)  $C=0.07$ , (b)  $C=0.13$ , (c)  $C=0.50$

可得到线性介质的归一化调制场频谱传输矩阵为

$$T = \begin{pmatrix} \cos(g_0 z) & \sin(g_0 z) \\ -\sin(g_0 z) & \cos(g_0 z) \end{pmatrix}, \quad (12)$$

其中  $g_0 = \frac{q_{\perp}^2}{2k}$ ,  $q_{\perp} = 2\pi f_{\perp}$ ,  $k$  为介质中的波数,  $f_{\perp}$  为光场横向调制频率  $f_{\perp}^2 = f_x^2 + f_y^2$ ,  $z$  为线性介质长度. 那么对于振幅型“缺陷”分布

$$R = |\cos(g_0 z)|^2, \quad (13)$$

$$P_{\text{sout}} = |\cos(g_0 z)|^2 P_{\text{defects}}, \quad (14)$$

线性介质以真空为例, 传输后光场的空间分布采用傍轴条件下的近场算法来获得<sup>[5]</sup>, 验证结果如图 2 所示.

可见, 当调制较小时, 理论值与数值模拟的结果符合得较好, 当输出近场的对比度  $C=0.50$  时, 理论值与数值模拟值出现一定的差距, 但理论值仍能在一定程度上正确反映传输后光场与“缺陷”分布的关系特征.

进一步分析传输因子  $R = |\cos(g_0 z)|^2 = \frac{1}{2}(1 + \cos(2g_0 z))$ , 可知不同频率的光场在传输过程中演化不同(见图 3), 随着在线性介质中的传输距离  $z$  作余弦变化(见图 4). 由于某些频率成分随着传输距离会周期性地趋于零, 因此可利用此特性来选择合适的介质长度以抑制工程中不必要的光场频率

成分,提高光场的均匀性.

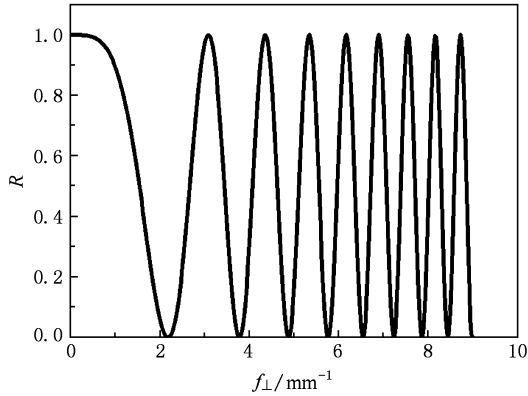


图3 传输因子  $R$  随  $f_{\perp}$  的变化 ( $z = 10$  cm)

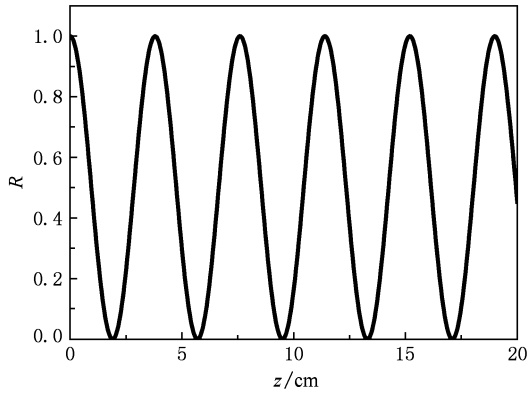


图4 传输因子  $R$  随  $z$  的变化 ( $f_{\perp} = 5$  mm<sup>-1</sup>)

### 3.2. 非线性介质

根据 BT 理论,无增益非线性介质中的归一化调制谱传输矩阵为<sup>[6,7]</sup>

$$T = \begin{pmatrix} \cosh(gL) & \frac{q_{\perp}^2}{2kg} \sinh(gL) \\ \frac{2kg}{q_{\perp}^2} \sinh(gL) & \cosh(gL) \end{pmatrix}, \quad (15)$$

其中  $L$  表示非线性介质长度,  $g$  为增长因子  $g^2 = \left(\frac{q_{\perp}}{2k}\right)^2 (q_c^2 - q_{\perp}^2)$ ,  $q_{\perp} = 2\pi f_{\perp}$ ,  $f_{\perp}$  为光场横向调制频率,  $q_c$  为临界频率  $q_c^2 = \frac{2\pi I_0}{W_1}$ ,  $W_1 = \frac{\lambda_0^2 c}{32\pi^2 n_2}$ ,  $\lambda_0$  为真空波长,  $k = \frac{2\pi n_0}{\lambda_0}$  为介质中的波数,  $n_0$  为线性折射率,  $n_2$  为非线性折射率系数,  $I_0$  为平均光强. 对于振幅型“缺陷”分布

$$R = |\cosh(gL)|^2, \quad (16)$$

$$P_{\text{out}} = |\cosh(gL)|^2 P_{\text{defectsl}}, \quad (17)$$

非线性介质以钨玻璃为例,不考虑其增益,  $n_0 = 1.528$ ,  $n_2 = 1.15 \times 10^{-13}$  esu (esu 表示高斯制单位), 传输后光场的空间分布采用分步傅里叶变换算法求解非线性近轴波动方程来获得<sup>[5,8,9]</sup>, 验证结果如图 5 所示.

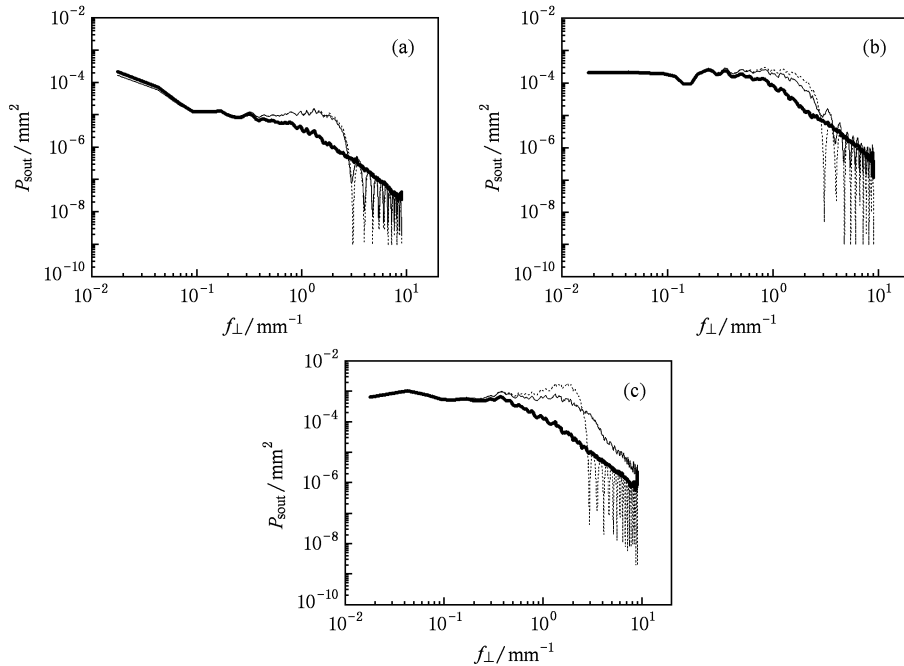


图5 无增益非线性介质的验证结果 (图中粗实线表示初始调制光场的 PSD, 细实线表示数值模拟得到的输出场 PSD, 虚线表示由理论关系得到的输出场 PSD). (a)  $C = 0.04$ , (b)  $C = 0.14$ , (c)  $C = 0.30$

可见,当调制较小时,数值模拟结果和理论结果符合得很好,当输出近场的对比度  $C=0.3$  时,理论值与数值模拟值出现了较大的差距.

进一步分析光场各频率的传输因子  $R = |\cosh(gL)|^2$ ,  $R$  与介质的种类(主要涉及线性折射率,非线性折射率)、介质长度以及传输光强等有关(见图6,图7). 根据 BT 理论,由于非线性增长的频率选择性,传输因子会在某一频率处达到最大值,导致传输后的光场强度就在此频率附近出现大幅度的增长(见图5). 最快增长频率  $f_m$  与介质长度无关(见图6),随着传输光强的增加而增大(见图7),

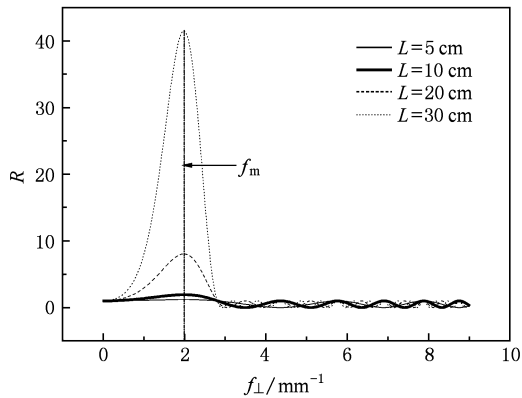


图6 不同介质长度时的  $R$  (平均光强为  $4.6 \text{ GW/cm}^2$ )

增长幅度均随介质长度和传输光强的增加而增加,其增长的具体数值就通过传输因子  $R$  进行量化.

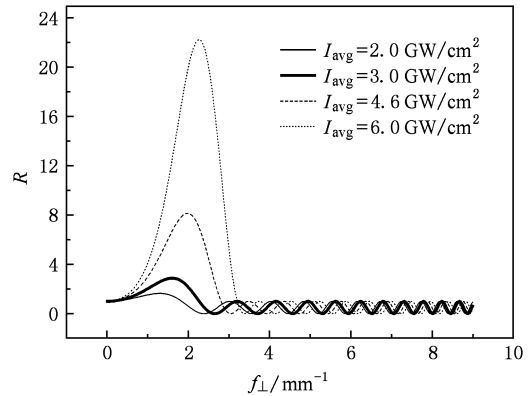


图7 不同平均光强时的  $R$  ( $L=20 \text{ cm}$ )

### 3.3. 空间滤波器

空间滤波器的归一化调制谱传输矩阵为<sup>[10]</sup>

$$T = G(-\lambda_0 F_2 f_x, -\lambda_0 F_2 f_y) \begin{pmatrix} \cos(\Theta) & \sin(\Theta) \\ -\sin(\Theta) & \cos(\Theta) \end{pmatrix}, \quad (18)$$

其中  $\Theta = -\pi\lambda_0 \frac{F_2}{F_1} (F_1 + F_2) f_{\perp}^2$ ,  $G(-\lambda_0 F_2 f_x, -\lambda_0 F_2 f_y)$  为光阑的光瞳函数

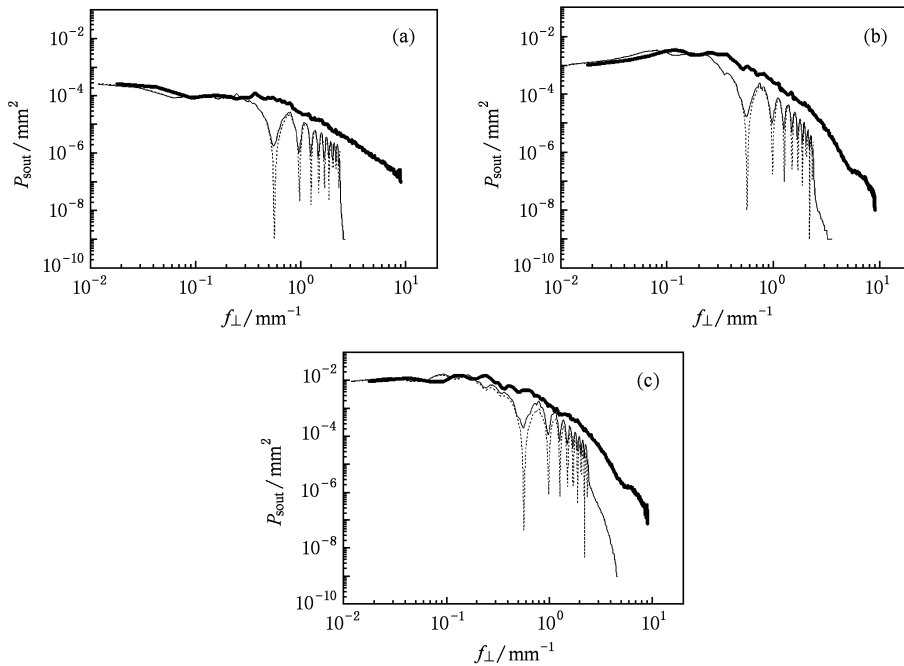


图8 空间滤波器验证结果 (图中粗实线表示初始调制光场的 PSD,细实线表示数值模拟得到的输出场 PSD,虚线表示由理论关系得到的输出场 PSD). (a)  $C=0.05$ , (b)  $C=0.15$ , (c)  $C=0.40$

$$G(-\lambda_0 F_2 f_x, -\lambda_0 F_2 f_y) = \begin{cases} 1 & |f_{\perp}| < \frac{r}{\lambda_0 F_1} \\ 0 & |f_{\perp}| \geq \frac{r}{\lambda_0 F_1} \end{cases}, \quad (19)$$

$f_{\perp}^2 = f_x^2 + f_y^2$  为光场横向调制频率,  $F_1, F_2$  分别为输入、输出透镜焦距,  $\lambda_0$  为真空波长,  $r$  为滤波小孔半径. 对于振幅型“缺陷”分布

$$R = |G(-\lambda_0 B_2 f_x, -\lambda_0 B_2 f_y) \cos(\Theta)|^2, \quad (20)$$

$$P_{\text{sout}} = |G(-\lambda_0 B_2 f_x, -\lambda_0 B_2 f_y) \cos(\Theta)|^2 \times P_{\text{defectsl}}(Mf_x, Mf_y), \quad (21)$$

$M = -\frac{F_2}{F_1}$  反映空间滤波器的缩放. 经过空间滤波器传输后的光场横向分布采用文献[5]的方法进行数值求解, 空间滤波器的结构参数取为:  $F_1 = 40 \text{ cm}$ ,  $F_2 = 60 \text{ cm}$ ,  $r = 0.15 \text{ cm}$ , 验证结果如图 8 所示.

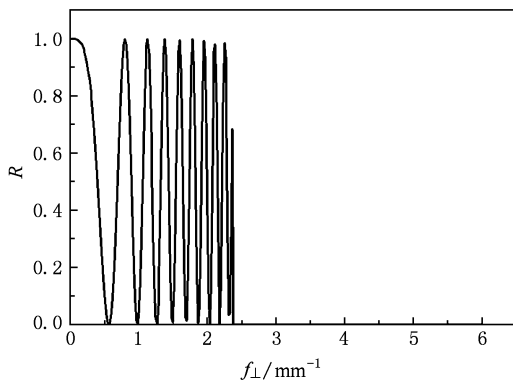


图9 图8(a)对应的传输因子  $R$

可见,对于空间滤波器,在较强调制下理论结果与数值模拟结果仍能符合得较好. 能够通过小孔的频率成分具有自由传输的特点(图9),这与空间滤波器的物理性质相符合.

至此,我们对光学元件“缺陷”分布与光束近场质量的理论关系进行了验证和讨论. 结果表明,当光场强度调制满足  $C < 0.1$  时,此理论关系能较好地成立.

#### 4. 结 论

光学元件上的杂质、划痕、麻点、亚表面“缺陷”、灰尘等“缺陷”是破坏光束近场均匀性、制约系统负载能力提升的主要因素,研究光学元件缺陷分布与光束近场质量的定量关系是获得光学元件“缺陷”分布指标的理论基础. 本文基于光传输理论,在弱调制假设的基础上,获得了光学元件“缺陷”分布 PSD 与光束近场强度分布 PSD 的理论关系. 并基于高功率固体激光器的基本单元(线性介质、非线性介质以及空间滤波器)对此理论关系进行了验证和讨论. 结果表明:当满足弱调制假设,只考虑振幅或位相型“缺陷”分布时,光学元件“缺陷”分布 PSD 与传输后的光束近场强度分布 PSD 由近场强度分布 PSD 的系统传输因子  $R$  联系,  $R$  与系统的构型和运行状态相关. 理论关系成立的大致条件为近场强度对比度  $C < 0.1$ . 此量化结果对高功率固体激光装置光学元件“缺陷”分布指标的最终获得以及系统构型的优化都具有指导意义,对系统负载能力提升有重要参考价值.

[1] Simmons W W, Hunt J T, Warren W E 1981 *IEEE J. Quantum Electron.* **17** 1727

[2] Zhou L D, Su J Q, Li P, Liu L Q, Wang W Y, Wang F, Mo L, Cheng W Y, Zhang X M 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6279 (in Chinese) [周丽丹、粟敬钦、李平、刘兰琴、王文义、王方、莫磊、程文雍、张小民 2009 物理学报 **58** 6279]

[3] Peng Z T, Jing F, Liu L Q, Zhu Q H, Zhang B, Zhang K, Liu H, Zhang Q Q, Cheng X F, Jiang D B, Liu H J, Peng H S 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 0087 (in Chinese) [彭志涛、景峰、刘兰琴、朱启华、张波、张昆、刘华、张清泉、程晓峰、蒋东滨、刘红婕、彭翰生 2003 物理学报 **52** 0087]

[4] Zhou L D, Su J Q, Liu L Q, Wang W Y, Wang F, Mo L, Li P, Zhang X M 2009 *High Power Laser and Particle Beams* **21** 326 (in Chinese) [周丽丹、粟敬钦、刘兰琴、王文义、王方、莫磊、李平、张小民 2009 强激光与粒子束 **21** 326]

[5] Su J Q 2003 *Post Doctorate Dissertation* (Mianyang, Sichuan: China Academy of Engineering Physical) (in Chinese) [粟敬钦 2003 博士后出站报告(四川绵阳:中国工程物理研究院)]

[6] Bespalov V I, Talanov V I 1966 *JETP Lett.* **3** 307

[7] Wen S C, Qian L J, Fan D Y 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1640 (in Chinese) [文双春、钱列加、范滇元 2003 物理学报 **52** 1640]

[8] Williams W H, Renard P A, Manes K R 1996 UCRL-LR-105821-96-1

[9] Sacks R A, Henesian M A, Haney S W, Trenholme J B 1996 UCRL-LR-105821-96-4 207

[10] Fan D Y 1981 *Acta Opt. Sin.* **1** 395 [范滇元 1981 光学学报 **1** 395]

# Quantitative relation between “defects” distribution on optics and near-field quality in high power solid-state laser system \*

Zhou Li-Dan Su Jing-Qin<sup>†</sup> Li Ping Wang Wen-Yi Liu Lan-Qin Zhang Ying Zhang Xiao-Min  
(Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

(Received 9 March 2010; revised manuscript received 18 April 2010)

## Abstract

Based on beam propagation theory, the quantitative relation between PSD (power spectral density) of “defects” distribution on optics and that of near field intensity was studied. Its validity was discussed on linear medium, nonlinear medium and spatial filter. The results show that PSD of “defects” distribution on optics and PSD of near field intensity are connected by a system propagation factor when the modulation is weak, which is determined by system architecture and operation state. These results provide a theoretical basis for specifications of “defects” distribution on optics, and also a guidance to enhancing the power of high power solid-state laser system.

**Keywords:** “defects” distribution, power spectral density, optics, beam quality

**PACS:** 42.25.-p, 42.65.-k

---

\* Project supported by the Science and Technology Foundation of State Key Laboratory, China (Grant No. 9140C6803010904).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: sujingqin@hotmail.com; ldzhou@caep.ac.cn