

利用消衍射透镜列阵及光谱色散平滑 实现焦斑均匀辐照*

江秀娟^{1)†} 周申蕾¹⁾ 林尊琪¹⁾ 朱 俭²⁾

1) 中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理国家实验室, 上海 201800)

2) 中国工程物理研究院上海激光等离子体研究所, 上海 201800)

(2006 年 1 月 7 日收到, 2006 年 3 月 27 日收到修改稿)

提出将空间域的透镜列阵法和时间域的光谱色散平滑法结合起来实现靶面的均匀辐照. 消衍射型透镜列阵能获得边缘陡峭且顶部较平坦的准近场焦斑, 光谱色散平滑则能有效地抹平焦斑内部由多光束干涉引起的细密条纹. 数值结果显示, 通过该方案能获得均匀性较好的焦斑. 进一步分析了光谱色散平滑单元中位相调制和光栅的参数对辐照均匀性的影响, 发现参数的选取要在焦斑均匀性和能量利用率之间取得合理平衡, 以在整体上获得最佳的均匀辐照效果.

关键词: 光谱色散平滑, 透镜列阵, 衍射, 多光束干涉

PACC: 4225B, 4230K

1. 引 言

在惯性约束聚变(ICF)实验中, 要求激光对特定的靶面实现均匀辐照, 理想的焦斑是光强呈矩形分布, 即顶部平坦, 边缘陡峭. 现有的激光均匀辐照技术大体可分为两类, 一类是空间域均匀辐照技术, 如随机相位板法(RPP), 分布相位板法(DPP), 透镜列阵法(LA)等, 它们在控制焦斑包络形状方面具有优势; 另一类是时间域均匀辐照技术, 如感应空间非相干法(ISI), 光谱色散平滑法(SSD)和自发辐射光放大法(ASE)等, 它们在改善焦斑内部小空间周期的强度调制方面具有优势^[1,2]. 研究表明, 在空间域均匀辐照技术中, 透镜列阵法得到的焦斑处于激光束的准近场区, 具有比较接近于矩形的光斑包络, 同时对入射光近场的强度和相位不均匀性具有较大的宽容度^[3]. 但是该技术存在两个主要问题, 一是入射光束通过透镜单元时产生硬边衍射, 导致焦斑有中小空间尺度的强度调制, 不能得到平顶的光强分布; 二是入射光束被透镜列阵分成多个子光束, 它们在靶面上叠加时产生干涉条纹, 非常细密的条纹可以通过等离子体的热传导效应抹平, 但空间周期稍大

的干涉调制很难消除. 因此, 实际使用透镜列阵时, 总是令靶平面离开聚焦透镜焦面一定的距离, 以削弱硬边衍射及干涉引起的不均匀性, 但是离焦量难以精确控制. 为此, 丘悦等人提出用消衍射方法提高透镜列阵的辐照均匀性^[4], 结果表明该方法能较好地改善焦斑中小空间周期的强度调制. 而在消除小空间尺度强度调制方面, SSD 是一种可以应用到高功率大能量玻璃激光系统的有效方法^[5], 它在美国罗切斯特大学的 OMEGA 装置和日本 GEKKO XII 装置上使用, 取得了很好的光束平滑效果^[6-8]. 但在已有的报道中, SSD 都是与 RPP 等结合使用, 获得的是接近于爱里斑的远场焦斑, 往往需要特殊的设计才能得到具有一定平顶的光强分布. 而如前文所述, 利用 LA 得到的焦斑处于激光束的准近场区, 能相对容易地获得平顶范围较大而且包络陡峭的光斑结构. 基于此, 本文提出将消衍射型 LA 和 SSD 结合起来实现焦斑的均匀辐照, 通过理论计算分析了采取该方案后焦斑均匀性的改善情况, 发现 SSD 对准近场焦斑同样具有较好的平滑效果, 文中还进一步讨论了 SSD 单元中位相调制和光栅参数对辐照均匀性的影响.

* 国家 863 计划批准号 2003AA842070 资助的课题.

† E-mail: jiang_x_j913@sohu.com

2. 理论分析

在激光驱动器中,从振荡器出来的窄带激光通过 SSD 单元后频谱得到展宽,并在空间上产生色散.宽带激光束经过多级放大和空间滤波,在终端实现变频,然后通过透镜列阵和聚焦透镜系统辐照到靶面,形成大小约为几百个微米的焦斑.

2.1. 光谱色散平滑

SSD 单元主要由电光位相调制器和光栅组成^[5],见图 1. 设入射激光的中心圆频率为 ω_0 , 横向空间分布为 $A_0(x, y)$, 经过该单元后的光场具有如下形式:

$$E_0(x, y, t) = A_0(x, y) \sum_n J_n(\delta) e^{i\omega_0 t + i n (\omega_m t + \alpha x)}, \quad (1)$$

其中 J_n 为 n 阶第一类贝塞尔函数, δ 和 ω_m 分别是电光调制器的调制深度和圆调制频率, 调制带宽可表达成 $\Delta\nu = 2\delta\nu_m$, 其中 $\nu_m = \frac{\omega_m}{2\pi}$, $\alpha = 2\pi \cdot \frac{\Delta\theta}{\Delta\lambda} \cdot \frac{\omega_m}{\omega}$, 它是决定空间色散程度的参量, 式中 $\frac{\Delta\theta}{\Delta\lambda}$ 为光栅的色散系数 (本文只考虑一维 SSD 的情况).

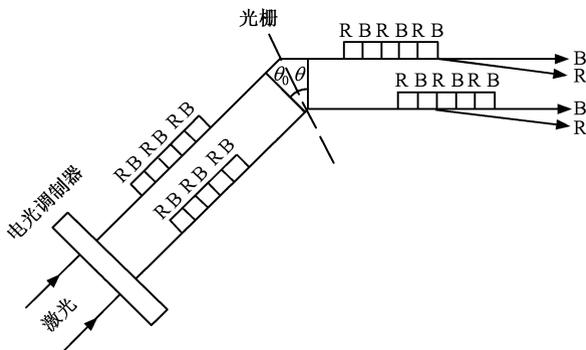


图 1 SSD 单元的示意图 (图中 B 和 R 分别表示宽带光束中的高频和低频成分, θ_0 和 θ 分别为光束照射到光栅时的入射角和衍射角)

2.2. 透镜列阵

透镜列阵系统的构成见图 2, 其中 B 为透镜列阵, A 为主聚焦透镜, C 为靶面, a 为焦斑大小^[3]. 设透镜元的个数为 $M \times M$ (取 M 为奇数), 透镜元口径为 d , 焦距为 f_e , 则透镜列阵的复透过率函数可写成^[9]

$$t_1(x, y) = \sum_{m_1 m_2} P(x - m_1 \cdot d, y - m_2 \cdot d) \cdot \exp\left\{-i \frac{k}{2f_e} [(x - m_1 \cdot d)^2 + (y - m_2 \cdot d)^2]\right\}, \quad (2)$$

其中 k 是入射光波数, m_1, m_2 均为整数, 且有 $-\frac{M-1}{2} \leq m_1, m_2 \leq \frac{M-1}{2}$, 位于第 m_1 行第 m_2 列的透镜元的中心坐标为 $(m_1 \cdot d, m_2 \cdot d)$. P 是透镜元的振幅透过率函数, 对于一般的硬边透镜元, 有

$$P(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{透镜口径内,} \\ 0, & \text{透镜口径外.} \end{cases} \quad (3)$$

当采用振幅型边缘软化透镜元, 则有^[4]

$$P(x, y) = \exp\left[-\left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{d/2}\right)^p\right], \quad (4)$$

其中 p 为超高斯指数.

同理可得口径为 D , 焦距为 f_a 的主聚焦透镜的复透过率函数

$$t_2(x, y) = P(x, y) \cdot \exp\left[-i \frac{k}{2f_a} \cdot (x^2 + y^2)\right]. \quad (5)$$

这里我们将主透镜中心取在 z 轴上, 且主透镜采用一般的硬边透镜.

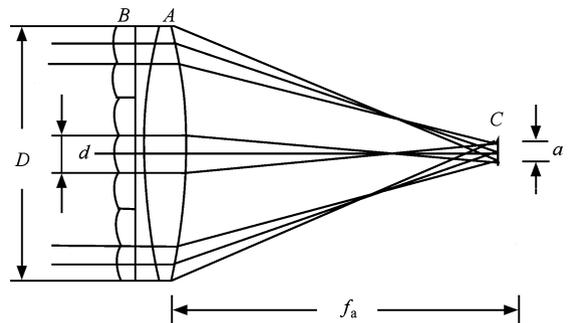


图 2 透镜列阵系统

2.3. 宽带激光传输

从 (1) 式可知, 经过 SSD 后的激光包含一系列频率分立的光波分量, 其中频率为 $(\omega_0 + n\omega_m)$ 的光波分量的复振幅是

$$E_{0n}(x, y) = J_n(\delta) A_0(x, y) e^{in\alpha x}, \quad (6)$$

该光波分量经过 LA 及主透镜后, 复振幅变为

$$E_n(x, y) = E_{0n}(x, y) \cdot t_1(x, y) \cdot t_2(x, y), \quad (7)$$

光波按菲涅耳衍射规律传输,即^[10]

$$E_n(x, y, z) = \frac{ik}{2\pi z} \cdot e^{-ikz} \int_{-\infty}^{\infty} E_n(x_0, y_0, 0) \times e^{-\frac{ik}{2z}[(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2]} dx_0 dy_0, \quad (8)$$

当传输距离 $z = f_a$ 时,就可得该光波分量在靶面上的复振幅.总光场为各光波分量的叠加,即

$$E(x, y, z, t) = \sum_n E_n(x, y, z) e^{i(\omega_0 + n\omega_m)t}, \quad (9)$$

在一定时间内平均的光强分布为

$$I(x, y, z) = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} |E(x, y, z, t)|^2 dt. \quad (10)$$

某一瞬时靶面上的光强分布是具有高度空间强度调制的干涉图样,但该图样会随时间发生变化,所以在一段时间内的平均光强将在一定程度上抹平干涉结构,得到小尺度均匀性较好的焦斑,这就是 SSD 的基本原理.

3. 数值计算结果及讨论

基于上述理论,我们用数值方法计算了靶面的光强分布.为简单起见,本文只给出一维计算结果.设入射到 SSD 单元的初始光场横向空间分布为六阶超高斯型,电光调制器的调制频率为 3GHz,下文提到的调制带宽都是对波长为 1053nm 的基频光而言的.入射到 LA 的激光束口径 350mm,波长 $\lambda = 526.5\text{nm}$ (二倍频光);一维 LA 包含 7 个透镜元,透镜元口径 $d = 50\text{mm}$,焦距 $f_e = 62.5\text{m}$;主聚焦透镜口径等于入射光束口径,焦距 $f_a = 0.75\text{m}$,靶面放置在聚焦透镜的后焦面上,形成的焦斑大小为 $600\mu\text{m}$.焦斑光强在 1ns 内取平均值.

为了定量地描述焦斑的均匀性,引入焦斑不均匀度 σ_{ms} 和焦斑能量利用率 η 两个参量,它们的定义分别为^[4]

$$\sigma_{\text{ms}}^2 = \frac{(\langle I(x, y) \rangle - \bar{I})^2}{\bar{I}^2}, \quad (11)$$

$$\eta = \frac{\text{光强大于 } 0.9\bar{I} \text{ 部分的能量}}{\text{焦斑总能量}}, \quad (12)$$

其中 $\langle I(x, y) \rangle$ 和 \bar{I} 分别为焦斑各点的光强及其平均值(11)式中的尖括号“ $\langle \rangle$ ”表示对括号内的物理量取平均.

图 3(a)是单色激光通过由硬边透镜元构成的 LA 后的焦斑,呈受衍射包络调制的多光束干涉图样.焦斑内的细密条纹可以通过等离子体的热传导效应消除.在数值计算中采用空间滤波技术滤去空

间光强分布中的高频成分,可近似地模拟出考虑热传导平滑效果后的焦斑,如图 3(b)所示,其强度分布类似于近场菲涅耳衍射图样,有大幅度的衍射峰,不均匀度约达 17%,能量利用率为 95.7%.

图 4 是单色激光通过由振幅型边缘软化透镜元组成的 LA 时的焦斑.由图 4(b)可见,采取消衍射措施后焦斑的中小尺度不均匀性得到很大的改善,虽然衍射峰依然存在,但其幅度大为减小,焦斑的不均匀度降低到 5.7%,能量利用率为 93.4%.由振幅型边缘软化透镜元组成的 LA 可以用镀变透射率膜等方法实现^[4],在实际设计时,要选择合适的超高斯指数 p ,因为 p 太大,消衍射效果不明显, p 太小,焦斑会出现“塌边”现象,边缘下降变缓,能量利用率降低.

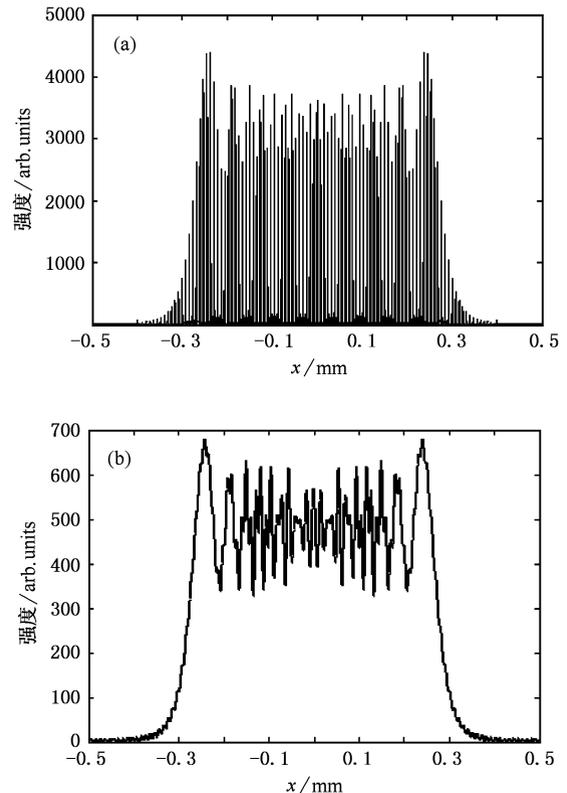


图 3 (a)单色光通过由硬边透镜元构成的 LA 后的焦斑;(b)考虑热传导平滑效果后的光强分布

图 5(a)是经过 SSD 后的激光束通过消衍射 LA 后的焦斑.光谱色散后的激光束包含多种频率成分,不同频率光波的干涉图样在靶面上叠加,由于各个干涉图样有所差异,而且图样中心位置不重合,它们叠加后会使强度大和强度小的地方互补,在一定程度上抹平干涉结构.干涉结构的消除程度取决于

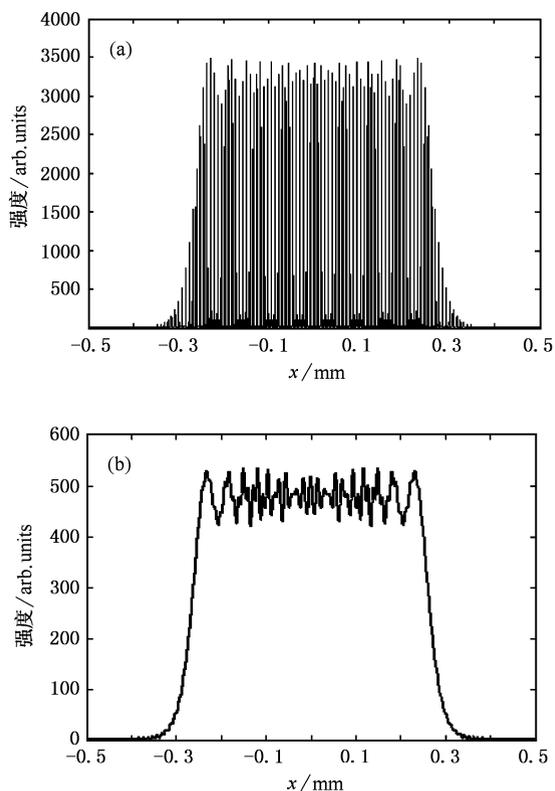


图 4 (a)单色光通过由振幅型边缘软化透镜元构成的 LA 后的焦斑 (超高斯阶数 $p = 14$);(b)考虑热传导平滑效果后的光强分布

SSD 及 LA 系统的参数选择,即使这种结构不能被直接地完全消除 (细密的光强起伏 (连同由衍射引起的中小周期强度调制)也将被 SSD 引向更小的空间尺度,它们通过靶面等离子体的横向热传导效应可以自然消除。考虑热传导效应后的光强分布如图 (b) 所示,这时顶部的不均匀度降低到 0.98%,能量利用率 82.7%。

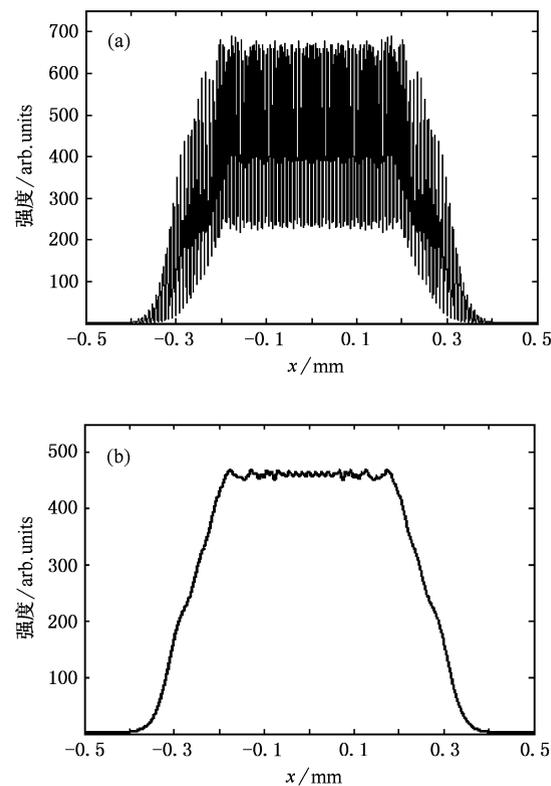
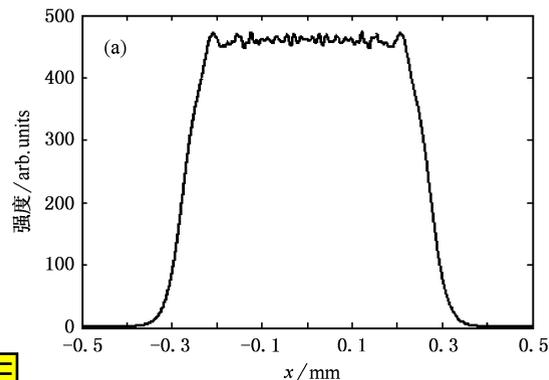


图 5 (a)经过 SSD 后的激光通过消衍射 LA 后的焦斑 (b)考虑热传导平滑效果后的光强分布。SSD 单元中调制带宽 $\Delta\nu = 30\text{GHz}$,光栅色散系数 $\frac{\Delta\theta}{\Delta\lambda} = 1.6 \times 10^6 \text{rad/m}$

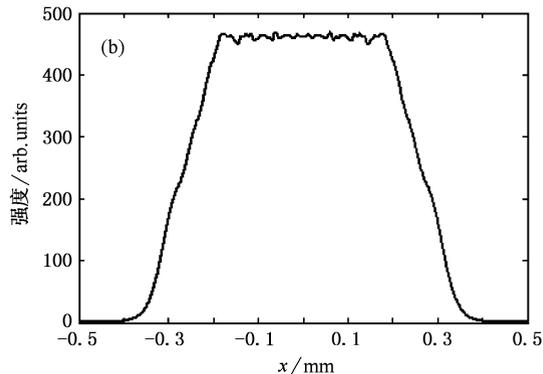


图 6 SSD 取不同条件时焦斑的比较 (a)调制带宽 $\Delta\nu = 30\text{GHz}$,光栅色散系数 $\frac{\Delta\theta}{\Delta\lambda} = 0.8 \times 10^6 \text{rad/m}$ (b)调制带宽 $\Delta\nu = 60\text{GHz}$,光栅色散系数

$$\frac{\Delta\theta}{\Delta\lambda} = 0.8 \times 10^6 \text{rad/m}$$



由上面计算结果可见,引入 SSD 后焦斑的小尺度强度调制能有效地被消除,中小尺度不均匀性也进一步得到改善,但是焦斑边缘不如先前陡峭,能量利用率有所下降. SSD 单元中调制带宽和光栅色散系数的选择将直接影响到焦斑的均匀照明效果. 一般而言,大的调制带宽和色散系数能使焦斑内部的光强分布更为均匀,但是能量利用率较低. 所以参数的选取要在焦斑内部均匀性和能量利用率之间取得较为合理的平衡.

4. 结 论

为了实现靶面的均匀辐照,将空间域的透镜列阵法和时间域的光谱色散平滑法结合起来. LA 能获得边缘陡峭的准近场焦斑,采用边缘软化透镜元

等消衍射措施将降低焦斑的中小尺度强度调制,得到顶部较平坦的光强分布,SSD 则能在很大程度上抹平多光束干涉引起的细密条纹. 数值计算显示,两者结合起来可以获得顶部不均匀度小于 1%,能量利用率大于 80% 的焦斑. 由于计算时没有考虑输入光束强度和相位畸变,以及倍频过程引起的不均匀性等因素,实际所能达到的光束匀滑效果会劣于理论值,但从理论结果可以预见,SSD + 消衍射 LA 方案能较好地实现焦斑的均匀照明. 在应用该方案时,SSD 及 LA 系统的参数要合理选取,以在焦斑均匀性和能量利用率之间取得合理平衡,从整体上获得最佳的均匀辐照效果. 两个系统参数的优化问题,值得进一步深入探讨,结果将另文给出. 本文所得结论对“神光 II”装置中光束匀滑的实际设计提供了有用的理论参考.

- | | | | |
|-------|--|--------|---|
| [1] | Rothenberg J E 1997 <i>J. Opt. Soc. Am.</i> B 14 1664 | [6] | Regan S P, Marozas J A, Kelly J H <i>et al</i> 2000 <i>J. Opt. Soc. Am.</i> B 17 1483 |
| [2] | Xiao J, Lü B D, Zhang B 1999 <i>Acta Phys. Sin.</i> 48 1891 (in Chinese) [肖峻、吕百达、张彬 1999 物理学报 48 1891] | [7] | Laboratory for Laser Energetics (LLE) Review 1996 69 1 |
| [3] | Deng X M, Liang X C, Chen Z Z <i>et al</i> 1986 <i>Appl. Opt.</i> 25 377 | [8] | Miyana N, Nakatsuka M, Kanabe T <i>et al</i> 1995 <i>Laser Interaction with Matter. Proceedings of the 23rd European Conference</i> : 81—84 |
| [4] | Qiu Y, Qian L J, Huang H Y <i>et al</i> 1995 <i>Chinese Journal of Lasers</i> 22 27 (in Chinese) [丘悦、钱列加、黄宏一等 1995 中国激光 22 27] | [9] | Goodman J W 1968 <i>Introduction to Fourier Optics</i> (San Francisco: McGraw-hill Book Company) p83 |
| [5] | Skupsky S, Short R W, Kessler T <i>et al</i> 1989 <i>J. Appl. Phys.</i> 66 3456 | [10] | Siegman A E 1986 <i>Lasers</i> (California: University Science Books) p634 |

Improving of the irradiation uniformity on targets with a diffraction-weakened lens array and spectral dispersion smoothing^{*}

Jiang Xiu-Juan^{1)†} Zhou Shen-Lei¹⁾ Lin Zun-Qi¹⁾ Zhu Jian²⁾

1) *National Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Shanghai 201800, China*

2) *Shanghai Institute of Laser Plasma, Shanghai 201800, China*

(Received 7 January 2006; revised manuscript received 27 March 2006)

Abstract

A scheme employing a lens array and the technique of smoothing by spectral dispersion is presented for uniform irradiation on targets in inertial confinement fusion. Quasi-near field spots with a profile of sharp edge and flat top can be obtained with a diffraction-weakened lens array, while the speckles imposed on the spot by beamlets interference can be smoothed by spectral dispersion. Simulation results indicate that this scheme is a good candidate for improving the irradiation uniformity. The dependence of the smoothing performance on the characteristics of phase modulation and dispersion is further discussed, and it is found that parameters of the system of spectral dispersion and lens array must be chosen carefully to make optimal compromise between uniformity and usable energy of the laser beam.

Keywords: smoothing by spectral dispersion, lens array, diffraction, beamlets interference

PACC: 4225B, 4230K

^{*} Project supported by the National 863 Project (Grant No. 2003AA842070).

[†] E-mail: jiang_x_j913@sohu.com