

激光间接驱动聚变的光束均匀化方案研究*

张 彬 吕百达 肖 峻

(四川大学激光物理与化学研究所, 成都 610064)

(1998 年 2 月 13 日收到)

针对激光间接驱动聚变, 使用广义衍射积分理论, 以随机位相板、部分相干光以及随机相位板加部分相干光入射的“二合一”光束均匀化方案为例, 进行了详细的数值计算和分析讨论. 给出了柱形腔靶注入孔以及内壁上的光强分布, 所得结果对间接驱动束匀滑方案选择有参考意义.

PACC: 4278; 4220; 4200

1 引 言

激光间接驱动惯性约束聚变是将强激光照射在用高原子序数元素制成的腔靶上并被吸收, 再由腔靶发射的强 X 射线辐照填充氘(D)氚(T)燃料的球形靶丸, 利用从燃料表面喷出等离子体的反作用超高密度地压缩燃料, 引起点火而实现核聚变反应. 黑腔靶发射的大部分 X 射线由于受腔体的约束被腔壁多次吸收和再发射, 易于实现靶面均匀辐照, 然而, 实现均匀辐照需要一个过渡时间, 在过渡时间内, 初始辐照均匀性越好, 则更易于在短时间内实现靶面的均匀辐照, 因此, 获得高均匀度的初始辐照是实现内爆的关键^[1,2]. 初始辐照均匀度由腔壁内的激光光强分布所决定, 因此, 有必要对激光在腔壁内的光强分布进行研究. 通常, 入射强激光的近场光强分布存在较大的光强起伏, 这将直接影响腔壁内的光强均匀性, 为了避免激光等离子体的不稳定性, 例如成丝和受激散射, 需要采取光束均匀化措施. 目前, 常用的光束均匀化方案包括透镜列阵系统^[3]、光楔列阵系统^[4]、随机位相板^[5,6]以及部分相干光入射^[7]等. 美国的 NOVA 装置采用了随机位相板方案以实现束匀滑^[8], 国家点火装置(NIF)拟采用相位板对激光束进行空间平滑, 并采用光谱色散对激光束进行时间平滑. 然而, 光束均匀化措施可能会引起注入孔处的光斑尺寸加宽, 导致“堵口”效应, 注入孔边缘的腔体物质将被烧蚀成等离子体, 这些等离子体会对激光的注入起阻碍作用, 最后将严重影响腔内 X 射线的转换效率. 增大注入孔尺寸是避免堵口效应的简单方法, 但这将导致腔内辐照温度降低, 并进一步影响靶面辐照均匀性, 因此, 需要对光束均匀化方案所使用的光学系统参数进行优化设计, 使入射的强激光既能有效地注入到腔中, 又能在腔壁产生均匀的光强分布. 对于光束均匀化方案进行计算模拟时, 使用广

* 国家高技术惯性约束聚变(批准号:416-2.1.2)、中国工程物理研究院重点实验室(批准号:ZD96-2)和中国工程物理研究院自然科学基金(批准号:960207)资助的课题.

衍射积分理论是较为严格而有效的方法.目前,国外用于间接驱动聚变的腔靶注入孔尺寸为毫米量级,例如,美国 NIF 的黑腔靶注入孔尺寸为 2.95 mm ,而我国的黑腔靶注入孔尺寸只有几百微米.因此,国外在选择光束均匀化方案时,对于束匀滑措施所引起光束加宽的容限较大,而我们则应在方案选择上认真研究束匀滑措施导致注入孔光斑尺寸的加宽能否满足光束进洞的要求.迄今,未见有文献报道与此相关的研究结果.本文将随机位相板、部分相干光入射以及随机相位板加部分相干光入射的“二合一”光束均匀化方案为例,使用广义衍射积分理论进行详细的数值计算,给出柱形腔靶注入孔以及内壁上的光强分布,并作了深入的分析讨论.文中所得结果对间接驱动光束均匀化方案选择有参考意义.

2 理论分析方法

在图 1 所示的单光束照射间接驱动聚变柱形腔靶的示意图中,柱形腔的直径和长度分别为 $2R$ 和 $2L$,柱形腔的两端面上各有一个直径为 $2R_0$ 的激光注入圆孔,直径为 $2r$ 的靶丸置于柱形腔中心,激光束光轴与腔轴的夹角为 i .注入孔及腔壁上的坐标系亦示于图 1 中.根据解析几何,经过繁杂的计算可得到注入孔及腔壁上的坐标与沿光轴传输方向坐标之间的变换关系表达式分别为

$$X = y', \quad Y = x' \cos i, \quad Z = x' \sin i, \quad (1)$$

$$X = R \sin(y/R), \quad Y = R \cos(y/R) \cos i - (R \cos i + x \sin i),$$

$$Z = Z_0 + \frac{R[\cos(y/R) \sin^2 i + \cos^2 i]}{\sin i} + x \cos i, \quad (2)$$

式中 (X, Y, Z) 为入射光束所在坐标系中的坐标, (x', y') 为注入孔所在坐标系中的坐标, (x, y) 为腔壁所在坐标系中的坐标, Z_0 为注入孔与光轴的交点距透镜焦点的距离.(1), (2) 式即为本文计算的关键公式,利用(1), (2) 式可简便、准确地计算出间接驱动聚变柱形腔靶注入孔以及柱形腔壁上的光强分布.

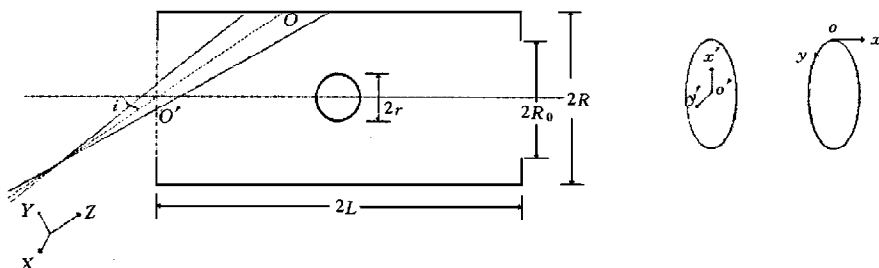


图 1 间接驱动聚变柱形腔靶示意图

假设入射光束为部分相干光束,在准单色场近似下,描述部分相干入射光束的交叉谱密度函数为^[9]

$$W_1(u_1', u_2', v_1', v_2', Z=0) = I \exp(-[(u_1' - u_2')^2 + (v_1' - v_2')^2](2l_0^2)^{-1}), \quad (3)$$

式中 I 为入射光强分布, (u_1', v_1') , (u_2', v_2') 分别为入射面上两点坐标, l_0 为相干长度.

交叉谱密度函数通过 ABCD 光学系统的传输由广义惠更斯-菲涅耳衍射积分公式描述^[10]

$$\begin{aligned} W_2(X_1, X_2, Y_1, Y_2, Z) = & \left(\frac{k}{2\pi B}\right)^2 \iiint \iiint W_1(u_1', u_2', v_1', v_2', 0) \\ & \times \exp\left\{-\frac{ik}{2B}[A(u_1'^2 - u_2'^2 + v_1'^2 - v_2'^2) \right. \\ & - 2(X_1 u_1' - X_2 u_2' + Y_1 v_1' - Y_2 v_2') \\ & \left. + D(X_1^2 - X_2^2 + Y_1^2 - Y_2^2)]\right\} du_1' du_2' dv_1' dv_2', \quad (4) \end{aligned}$$

式中 $k = (2\pi/\lambda)$ 为波数, λ 为波长, A, B, C, D 为传输矩阵元素.

假设半宽度为 a 的随机位相板与焦距为 f 的透镜紧贴, 并置于 $Z=0$ 处, 由随机位相板的透过率函数以及透镜聚焦的传输矩阵可得到部分相干光束通过随机位相板系统后的交叉谱密度函数为

$$\begin{aligned} W_2(X_1, X_2, Y_1, Y_2, Z) = & \left(\frac{k}{2\pi B}\right)^2 \sum_m \sum_n \sum_{m'} \sum_{n'} \iiint \iiint W_1(u_1', u_2', v_1', v_2', 0) \\ & \times T_{rpp}(m, n) T_{rpp}^*(m', n') \exp\left\{-\frac{ik}{2B}[A(u_1'^2 - u_2'^2 \right. \\ & + v_1'^2 - v_2'^2) - 2(X_1 u_1' - X_2 u_2' + Y_1 v_1' - Y_2 v_2') \\ & \left. + D(X_1^2 - X_2^2 + Y_1^2 - Y_2^2)]\right\} du_1' du_2' dv_1' dv_2', \quad (5) \end{aligned}$$

式中 $T_{rpp}(l, j) = e^{i\phi(l, j)}$ ($l = m, m', j = n, n'$) 为随机位相板的透过率函数, $\phi(l, j)$ 为第 (l, j) 个位相单元的位相, $*$ 表示复共轭, $A = -\Delta z$, $B = f(1 + \Delta z)$, $C = -1/f$, $D = 1$, $\Delta z = (z - f)/f$.

令(5)式中 $X_1 = X_2 = X$, $Y_1 = Y_2 = Y$, 可计算光强分布

$$I(X, Y, Z) = W_2(X_1 = X_2 = X, Y_1 = Y_2 = Y, Z). \quad (6)$$

将坐标变换公式(1), (2)代入(6)式, 可得到注入孔及腔壁上的光强分布分别为

$$I(x', y') = I(X(y'), Y(x'), Z(x')), \quad (7)$$

$$I(x, y) = I(X(y), Y(x, y), Z(x, y)). \quad (8)$$

若令 $l_0 \rightarrow \infty$, 可计算完全相干光入射时的光强分布, 若令 $T_{rpp} = 1$, 可计算无随机位相板时的光强分布.

3 数值计算与结果分析

利用计算公式(7), (8)可计算注入孔处和腔壁上的光强分布, 所得结果示于图 2—图 7. 图 2 给出计算所用的 21×21 单元随机位相板示意图. 为了便于比较, 图 3 给出不同的入射光束光强分布. 图 4 给出完全相干光束经过透镜聚焦后在腔壁处的光强分布. 图 5 给出完全相干光束经过随机位相板系统后在腔壁处的光强分布. 图 6 给出有振幅调制完全

相干光束在注入孔处的光强分布.图 7 有振幅调制部分相干光束经过随机位相板系统后在注入孔及腔壁处的光强分布.

分析比较图 3—图 7 可以得到以下结论:

1) 计算表明, 光强对称分布的入射光束经透镜聚焦后在柱形腔壁上的光强分布因光束斜入射且投影在柱形腔壁上, 其光强分布沿腔长方向呈不对称性, 但沿腔角向仍呈对称分布.

2) 由于随机位相板将激光分割成许多子束, 并将各子束的位相打乱, 聚焦透镜再把各子束会聚到同一靶面上, 产生随机的干涉分布, 因此, 入射光束经随机位相板系统后, 注入孔处以及腔壁上的光强分布均存在干涉分布(见图 5, 图 6). 对于不同分布的入射光束, 直接经透镜聚焦后

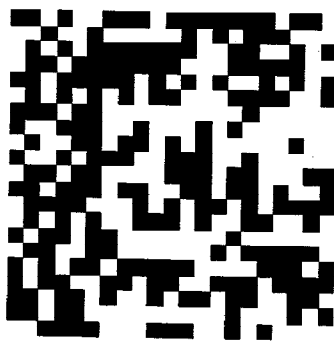


图 2 计算所用的 21×21 单元随机位相板示意图

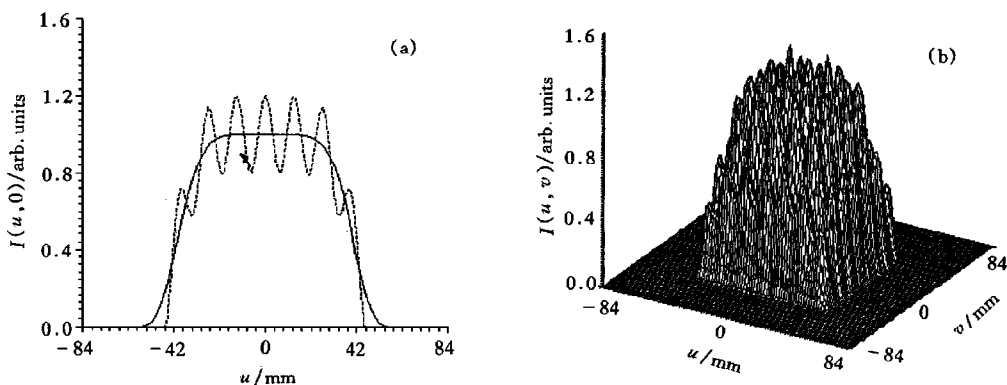


图 3 入射光束的光强分布 (a) $v=0$ 处的光强分布; (b) 振幅调制光束的三维光强分布; ——为理想光束; ----为振幅调制光束

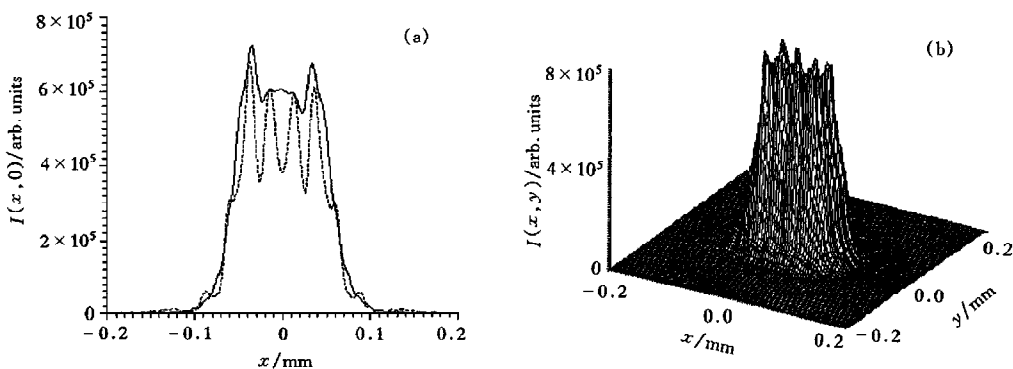


图 4 完全相干光束经过透镜聚焦后在腔壁处的光强分布 计算参量 $i=45^\circ, 2L=2800 \mu\text{m}, 2R=1600 \mu\text{m}, \lambda=0.35 \mu\text{m}, f=2000 \text{ mm}, Z_0=1.5 \text{ mm}, \omega=42 \text{ mm}, a/\omega=1$; (a) $y=0$ 处光强分布; (b) 振幅调制光束的三维光强分布; 其余图注同图 3

在柱形腔靶腔壁上的光强分布存在较大的差别,若使用了随机位相板后,腔壁上的光强分布却几乎相同,说明随机位相板对于入射光束的近场分布的大尺度不均匀性是不敏感的(比较图 4, 图 5),由此可见,随机位相板系统能有效地改善入射光束的大尺度不均匀性.

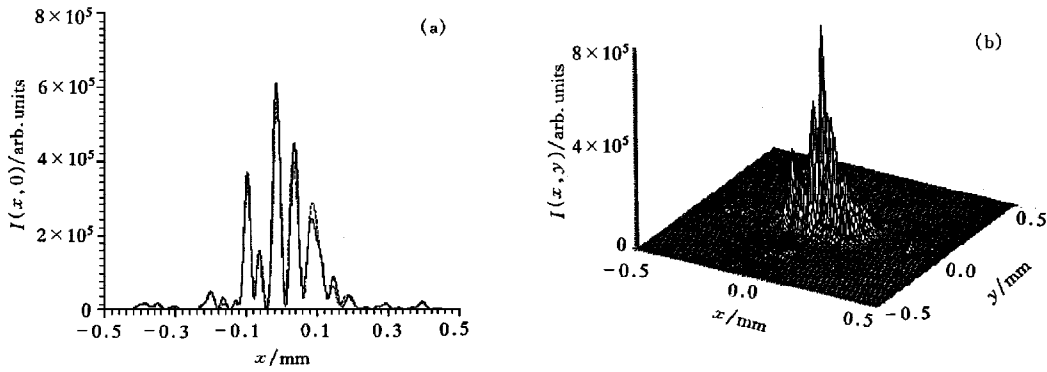


图 5 完全相干光束经过随机位相板系统在腔壁处的光强分布 (a) $y=0$ 处的光强分布; (b) 振幅调制光束的三维光强分布; 图注同图 4

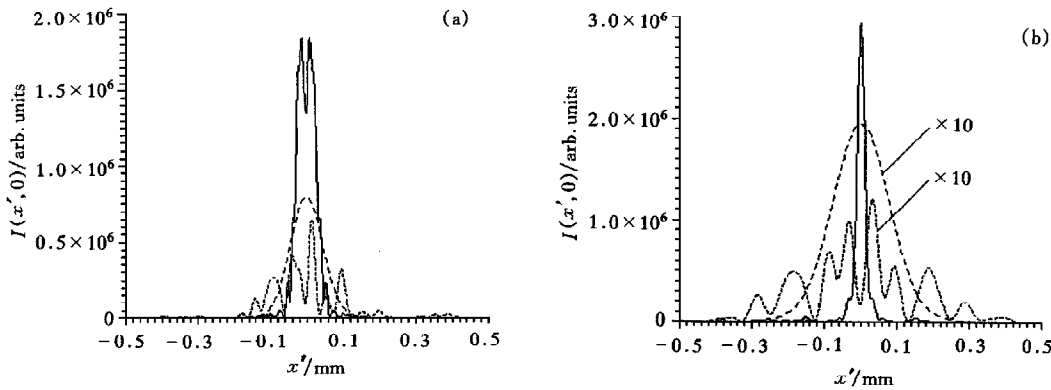


图 6 有振幅调制光束在注入孔处的光强分布 (a) $w=42$ mm, $l_0=4.2$ mm; (b) $w=21$ mm, $l_0=2.1$ mm; 其它参量同图 4; ——为完全相干光束经透镜聚焦; ---为完全相干光束经过随机位相板; - - -为部分相干光束经过透镜聚焦

3) 图 6 表明,减小随机位相板单元尺寸有利于入射光束大尺度不均匀性的改善,但是,这将使注入孔处光束尺寸进一步加宽,对光束的有效注入是不利的,因此,对于相同的入射光束,随机位相板的单元尺寸存在最佳值.

4) 图 7 表明,降低入射光束的相干性,可减小随机位相板系统所引起的干涉分布的对比度,从而有效地改善了小尺度不均匀性.

5) 采用随机位相板和部分相干光入射等光束均匀化措施,不可避免地引起注入孔处光斑尺寸加宽. 比较图 6 与图 7 可知,对于实际工作所使用的 10 倍左右衍射极限的入射光束(可近似对应于本文计算例中 $w/l_0=10$ 的部分相干光),采用随机位相板方案后注

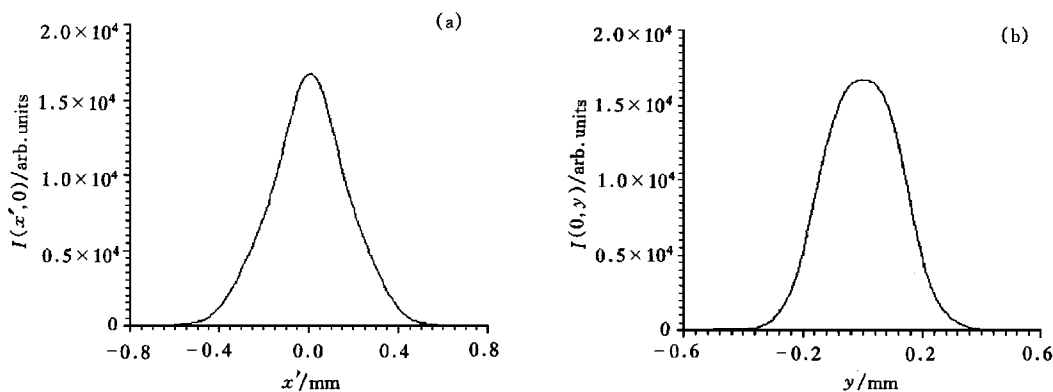


图7 有振幅调制部分相干光束经过随机位相板系统在注入孔及腔壁处的光强分布 $w=21$ mm, $l_0=2.1$ mm; 其它参量同图4;(a)注入孔;(b)腔壁

入孔处光斑尺寸将增大为不加入随机位相板时的2倍.总而言之,采用光束均匀化方案有利于光束均匀化,但同时将会导致注入孔处光斑尺寸加宽,因此,二者应兼顾,并对光束均匀化方案作优化设计.

4 结 论

本文给出了激光间接驱动聚变光束均匀化方案的计算模拟方法,以随机位相板和部分相干光入射以及“二合一”光束均匀化方案为例具体作了计算分析.研究表明,随机位相板能改善大尺寸不均匀性,部分相干光能改善小尺度不均匀性,只有采用“二合一”的方案才能有效地实现光束的均匀化.但是,采用光束均匀化措施必然使注入孔处的光束尺寸加宽,因此,只有合理选取光束均匀化方案参量,才能使入射的强激光既能有效地注入到腔中(进洞要求),又能在腔壁产生均匀的光强分布(均匀化要求).本文的特点是使用广义衍射积分理论研究了随机位相板加部分相干光入射的“二合一”技术.与随机位相板方案或部分相干光入射的研究相比较,计算由双重积分和双重求和变为四重积分和四重求和,并且,在该方案的计算模拟中变量是不可分离的,不能简单地简化为两个双重积分和双重求和,或四个单重积分和单重求和的问题,这样,使计算难度大为增加,必须使用专门计算技巧解决.已有的用随机位相板和部分相干光实现束匀滑的研究结果^[11]与本文在物理结论上是一致的,说明本文提出的方法和所得结果的正确性.文中给出的坐标变换公式(1),(2)和广义衍射积分方法对其它光束均匀化方案,例如,透镜列阵、光楔列阵和光谱角色散等,都是适用的,对使用衍射光学元件的束匀滑方案还需使用波前恢复的迭代算法^[12].特别是,本文方法能直接推广用于任意振幅和位相分布入射光束的均匀化研究.针对间接驱动聚变实验的计算模拟,可用实测入射光束的复振幅分布代入公式计算和进行比较分析.对光束进洞问题,则需结合等离子体运动方程,将计算结果与实验作比较分析,才能给出满意的结果.

- [1] G. D. Tsakiris, *Phys. Fluids*, **B4**(1992), 992.
- [2] Y. Xu, D. Lai, *High Power Laser & Particle Beams*, **10**(1996), 421(in Chinese).
- [3] X. Deng, *J. Chin. Laser*, **12**(1985), 257(in Chinese).
- [4] B. Lü, B. Cai, Z. Liu and B. Zhang, *Opt. Commun.*, **125**(1996), 48.
- [5] Y. Kato, K. Mima *et al.*, *Appl. Phys.*, **B29**(1982), 186.
- [6] Y. Kato, K. Mima *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **53**(1985), 1057.
- [7] R. H. Lehmberg and S. P. Obenschain, *Opt. Commun.*, **46**(1983), 27.
- [8] J. D. Lindl, Development of the Indirect-drive Approach to Inertial Confinement Fusion and the Target Physics Basis for Ignition and Gain, UCRL-JC-19901L-19821-preprint, (1995), p. 99.
- [9] A. T. Friberg, J. Tureunen, *J. Opt. Soc. Am.*, **A5**(1988), 713.
- [10] T. Shirai, T. Asakura, *Optik*, **94**(1993), 1.
- [11] D. A. Pepler, C. N. Danson *et al.*, *Proc. SPIE*, **1870**(1993), 76.
- [12] Y. Chen, *Chin. J. Quant. Electron.*, **13**(1996), 193(in Chinese).

STUDY OF BEAM UNIFORMITY METHODS IN INDIRECT-DRIVEN LASER FUSION*

ZHANG BIN 张 斌 BAI-DA XIAO JUN

(Institute of Laser Physics & Chemistry, Sichuan University, Chengdu 610064)

(Received 13 February 1998)

ABSTRACT

Some methods for beam uniformity, such as random phase plate, partially coherent light and "two in one" used in indirect-driven laser fusion, have been studied and analyzed numerically by using the generalized diffraction integral theory. The intensity distributions at the entrance hole and on the wall of a cylindrical hohlraum have been given. The results are useful for the choice of laser uniformity schemes in indirect-driven laser fusion.

PACC: 4278; 4220; 4200

* Project supported by the National ICF Committee Foundation of China(Grant No. 416-2.1.2), by the Key Laboratory Foundation of China Academy of Engineering Physics(Grant No. ZD96-2) and the Science Foundation of China Academy of Engineering Physics(Grant No. 96207).