

# 光束取样光栅强激光近场调制及 诱导损伤研究\*

姚欣<sup>1)</sup> 高福华<sup>1)†</sup> 李剑峰<sup>1)</sup> 张怡霄<sup>1)</sup> 温圣林<sup>2)</sup> 郭永康<sup>1)</sup>

1) 四川大学物理科学与技术学院, 成都 610064)

2) 成都精密光学工程研究中心, 成都 610041)

(2007 年 11 月 16 日收到, 2008 年 2 月 25 日收到修改稿)

光束取样光栅(BSG)是一种重要的用于光束取样诊断的衍射光学元件.在惯性约束聚变(ICF)终端光学系统中所使用的BSG,强激光产生的近场调制可能导致其自身的激光诱导损伤而造成元件不能继续正常工作.为了对其在强激光条件下的正常运行提供分析的依据,采用傅里叶模式理论对BSG内部的近场调制特性进行了模拟计算.计算结果表明,BSG基片内部调制度较小,但仍然存在光强分布不均的情况,增加了这些位置产生激光诱导损伤的风险.另外,通过对BSG制作误差分析得出了其近场调制随各种制作误差的变化关系.结果表明BSG刻槽深度误差比占空比误差对光束近场调制的影响更大,但只要刻槽深度误差不超过一定值,其调制度仍然保持在较小的水平,因此BSG仍能较好地工作在ICF驱动器中工作.

关键词:光束取样光栅,激光诱导损伤,惯性约束聚变,傅里叶模式法

PACC:4225,2410H,0365G

## 1. 引言

20 世纪 60 年代初,随着调  $Q$  激光器的出现,激光诱导光学元件的损伤就被发现<sup>[1]</sup>.此后,随着高功率激光器的出现,科研人员意识到系统中元件本身的抗激光损伤能力已成为限制激光器发展的重要因素之一.对于惯性约束聚变(ICF)激光驱动器这样的大型激光系统,激光束具有非常高的能量和峰值功率(例如美国 NIF 激光器的总能量达到 1.8 MJ),所以其终端光学系统中应用的光学元件的强激光诱导损伤已经成为一个十分重要的问题.光学元件激光诱导损伤的原因涉及元件的材料性质、表面状况等诸多因素,而光学元件的微结构是诱导强激光损伤的一个新因素.目前,国内外对此研究已有报道<sup>[2-6]</sup>,但他们大多是从实验进行研究,或用材料学、热力学以及标量衍射理论进行分析,分析也主要集中在材料性质、热传导和光束远场调制等方面.但是,元件激光诱导损伤的概率与其体内以及表层区域的电磁场强度有着最为直接的联系.场强越大损

伤的可能性越大,场强越小损伤的可能性越小.因为衍射光学元件表面的微细结构会对入射激光产生调制,使得元件体内和表面附近的电磁场重新分布,在某些区域场强增强,从而造成这些区域损伤的概率增大.因此深入研究衍射光学元件近场调制特性,分析微细结构对元件强激光诱导损伤的影响规律,可降低衍射光学元件强激光损伤风险,提高使用寿命,减小系统运行成本.

光束取样光栅(BSG)是目前 ICF 驱动系统中普遍采用的一种衍射光学元件(DOE),本文利用严格模式理论计算和模拟了应用于 ICF 的 BSG 在强激光作用下元件内部及邻近区域光场场强的分布情况,得到了其各部分的光场调制度.由于近场调制与 DOE 的结构特性有关,而加工误差必将改变近场调制的分布.本文综合考虑实际加工制作情况,建立了 BSG 结构的加工误差模型,通过模拟计算系统地分析了各种结构参数误差对 BSG 内部光场调制度的影响,最后结合 ICF 驱动器的要求提出了 BSG 的制作误差容限,可为避免激光诱导损伤的发生提供分析依据.

\* 国家自然科学基金(批准号:30376019)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: mender\_gao@263.net

## 2. 物理模型与计算方法

通常情况下,DOE 的设计及其对入射光束的调制特性可采用标量衍射理论进行分析.但是由于 BSG 的口径大、线宽小,其特征尺寸与使用波长接近,标量衍射理论的假设和近似不再成立,而必须采用基于严格电磁场理论的矢量衍射计算方法<sup>[7-10]</sup>.对各向同性介质光栅而言,模式法是目前被广泛使用的一种矢量衍射计算方法.它将相位调制区(光栅区域)的电磁场按本征模式展开,建立起本征矩阵方程,然后利用边界条件求解本征模式的系数,从而求得整个电磁场的分布.模式法理论严谨、数值计算简洁且计算难度相对较小,但我们不能简单地将其用于 BSG 这种非周期性微结构.由于 BSG 相邻线宽变化十分微小,本文提出将 BSG 划分成许多小分区,并将每一分区看成为线宽不变的周期光栅.采用这种近似的物理模型,利用严格模式理论对其衍射特性进行分析,这样既保持了模式理

论数值计算速度快的优点,又可获得接近实际的结果.

如图 1 所示,BSG 的微浮雕结构刻蚀在基片的背面,单位振幅单色平面波由基片上表面正入射.按照傅里叶模式法的计算要求将其分为 4 层,第 1 层和第 4 层为空气层,第 2 层为基底层,厚度为  $h_{\text{SUB}}$ ,第 3 层为 BSG 结构层,厚度为  $h_{\text{BSG}}$ .在  $x$  方向上,BSG 结构在一个分区内近似看成以周期  $T_b$  变化,其光栅槽沿  $y$  方向,入射平面平行于  $x-z$  平面.在 BSG 第 3 层中一个周期  $T_b$  内的介电常数  $\epsilon_3$  和磁导率  $\mu_3$  分别为

$$\epsilon_3, \mu_3 = \begin{cases} \epsilon_0 \epsilon_r, \mu_0 \mu_r & x \in (T_{3l}, T_{3r}), \\ \epsilon_0, \mu_0 & x \in (0, T_{3l}) \cup (T_{3r}, T_b), \end{cases} \quad (1)$$

其中  $\epsilon_0$  和  $\mu_0$  分别为真空中的介电常数和磁导率,  $T_{3l}$  和  $T_{3r}$  分别表示第 3 层光栅介质一个周期内沿  $x$  轴方向与空气在左边和右边的分界面坐标,BSG 的周期  $T_b$  沿着  $x$  非常缓慢地变化.

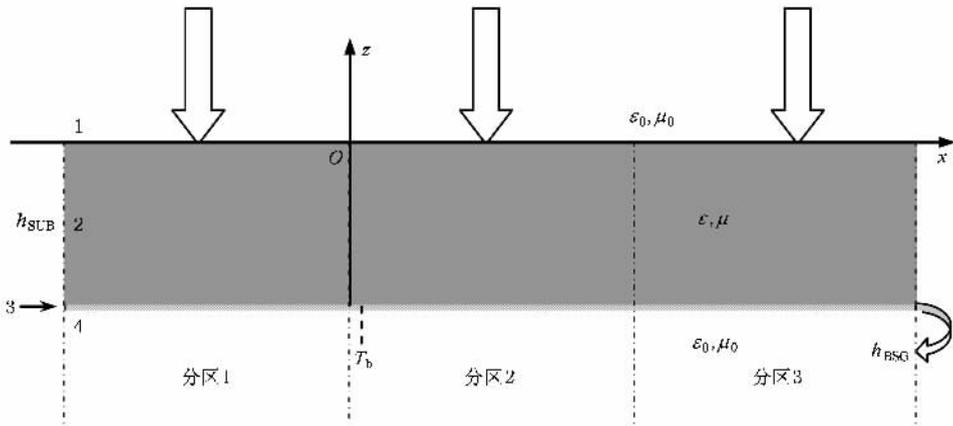


图 1 BSG 分层分区结构示意图

在每一分层中的电磁场必须满足麦克斯韦方程组

$$\begin{aligned} \nabla \times \mathbf{H} &= \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}, \\ \nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}. \end{aligned} \quad (2)$$

因为每一分区中 BSG 已近似认为具有周期性,为求解每一分层中的电磁场,将第  $n$  层中电磁基本模式场用傅里叶模级数展开为

$$\begin{aligned} [\sigma \mathbf{E} \ \mathbf{H}]_n^{\top} &= [E_{xm} \ E_{ym} \ E_{zm} \ ; \ -H_{xm} \ -H_{ym} \ -H_{zm}]^{\top} \\ &\times \exp\{ik_0[(m\lambda/T)x + \gamma(z - z_n)]\}, \end{aligned} \quad (3)$$

其中  $n$  代表层号;  $m$  代表傅里叶模编号,  $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm M$ ,  $M$  为计算所取的模式数,  $M$  应在兼顾收敛性与效率的基础上选取一个合适的值,而  $\gamma$  是待求参量,它对应于波矢量的  $z$  分量.

将 (3) 式代入 (2) 式经化简消去  $E_z$  和  $H_z$  得到两矩阵方程,并继续化简消去  $H_x$  和  $H_y$  后所得

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & 0 \\ 0 & C_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} \gamma^2, \quad (4)$$

其中

$$AB = \begin{bmatrix} [\mu_r] \left[ \frac{1}{\epsilon_r} \right]^{-1} - \alpha [\epsilon_r]^{-1} \alpha \left[ \frac{1}{\epsilon_r} \right]^{-1} & 0 \\ 0 & \left[ \frac{1}{\mu_r} \right]^{-1} [\epsilon_r] - \left[ \frac{1}{\mu_r} \right]^{-1} \alpha [\mu_r]^{-1} \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & 0 \\ 0 & C_{22} \end{bmatrix},$$

这里  $\alpha, \gamma$  分别是由  $(0, \alpha_{\pm 1}, \alpha_{\pm 2}, \dots, \alpha_{\pm M})$  ( $\gamma_0, \gamma_{\pm 1}, \gamma_{\pm 2}, \dots, \gamma_{\pm M}$ ) 所组成的  $(2M+1) \times (2M+1)$  的对角阵,  $E_x, E_y, E_z, H_z$  均为  $(2M+1) \times 1$  的列阵,  $[\epsilon_r], \left[ \frac{1}{\epsilon_r} \right]$  和  $[\mu_r], \left[ \frac{1}{\mu_r} \right]$  分别是  $\epsilon_r$  和  $\mu_r$  根据傅里叶因式分解原理<sup>[11]</sup>按照两种不同形式展开得到的系数矩阵。

直接解本征方程(4)求得本征值  $\gamma^n$  和本征矢矩阵  $W_e^n$ , 然后再求出磁本征矢矩阵  $W_h^n$ , 这样各分层电磁模式场就完全确定了。求得电磁模式场后, 电磁场的通解就是这些模式场的线性叠加。因此第  $n$  层电磁场的横向  $x, y$  分量表示为

$$\begin{aligned} E_{x,y}^n &= W_e^n \exp[i k_0 \alpha x] \{ \exp[i \gamma^n (z - z_n)] u_+^n \\ &\quad + \exp[-i \gamma^n (z - z_n)] d_+^n \}, \\ H_{x,y}^n &= W_h^n \exp[i k_0 \alpha x] \{ \exp[i \gamma^n (z - z_n)] u_+^n \\ &\quad - \exp[-i \gamma^n (z - z_n)] d_+^n \}, \end{aligned} \quad (5)$$

其中  $u_+^n$  和  $d_+^n$  分别表示模式场的上行波和下行波在第  $n$  层上界面  $z_n$  处的振幅系数的列矩阵。而在实际的数值求解过程中, 为使得数值计算结果稳定、可靠和收敛, 必须选择优秀的递推算法, 我们利用常用的反射透射系数阵递推算法(RTCM)<sup>[12,13]</sup>, 可求出各层的透射振幅系数阵和反射振幅系数阵  $u_+^n$  和  $d_+^n$ , 从而分区内光场电磁场分布可以完全确定。最后, 把各个分区组合起来就可以较真实地反映大口径 BSG 内部及附近实际的光场分布情况。

### 3. BSG 近场衍射数值模拟计算结果及分析

我们知道, BSG 的结构是变周期的, 但因为 BSG

取样距离和取样角度都较大, 其周期变化很缓慢。例如, 对于取样角度  $\theta = 11.5^\circ$ 、取样距离  $f = 2600$  mm、刻线区范围  $320$  mm  $\times$   $320$  mm 的 BSG, 其周期从其一端的  $1.3$   $\mu\text{m}$  缓慢变化到另一端的  $2.5$   $\mu\text{m}$ 。采用上述模型把 BSG 划分为周期近似为  $1.3, 1.9, 2.5$   $\mu\text{m}$  的三个分区, 用傅里叶模式法模拟每个分区一个周期范围内元件内部及其表面附近区域的光场分布。BSG 主要工作参数如下: 入射光波长  $\lambda = 0.351$   $\mu\text{m}$ , 偏振态为 TE, 入射角  $\theta = 0^\circ$ , 周期  $T_b = 1.3, 1.9, 2.5$   $\mu\text{m}$ , 熔石英基片折射率  $n = 1.4715$ , 空气折射率  $n_0 = 1$ , 第二层(基底层)厚度  $h_{\text{SUB}} = 9.999980$  mm, 第三层(BSG 结构层)厚度  $h_{\text{BSG}} = 20$  mm, 第三层中介质占空比  $\sigma_{\text{BSG}} = (T_{3r} - T_{3l})/T_b = 0.5$ 。同时, 为了描述光束宏观的近场分布均匀性, 定义光强调制度

$$M = \frac{I_{\text{max}}}{I_{\text{avg}}},$$

其中  $I_{\text{max}}$  为光强最大值,  $I_{\text{avg}}$  为光强平均值。从元件可能被破坏的角度看, 调制度可用于判断系统运行的安全性。

由于激光诱导损伤一般发生在光学元件表面附近, 所以我们计算了 BSG 三个分区内上、下表面近场区域光场电矢量振幅的空间分布情况, 计算结果如图 2 所示。图 2 横坐标标识与图 1 中的  $x$  轴相同, 图 2(a)(c)(e) 和图 2(b)(d)(f) 中纵坐标零点分别在距离基底层上表面  $0.5$   $\mu\text{m}$  的空气层和基底层上表面之下  $9.99948$  mm 处, 图中各图右边的灰度条深浅代表元件内光场电矢量振幅的相对大小。从图中还可看出基底层上表面与空气层以及基底层下表面与 BSG 结构层、BSG 结构层与空气层的分界面。计算各层中振幅的平方得到光强, 找出最大值后计算得到的该层调制度大小和位置列于表 1, 由图 2

可以看出,受 BSG 光栅刻槽对入射激光调制的影响,入射区、基底层、BSG 结构层和出射区的光场分布不均匀.但从表 1 每一层的调制情况可知,BSG 对入射光影响很小,在每个分区内 BSG 内部调制

度均小于 1.37,  $0.5 \mu\text{m}$  的入射区和  $0.5 \mu\text{m}$  的出射区调制度也都小于 1.58.这都是因为 BSG 刻槽深度非常浅(仅为  $20 \text{ nm}$ ),对入射激光影响很小的缘故.

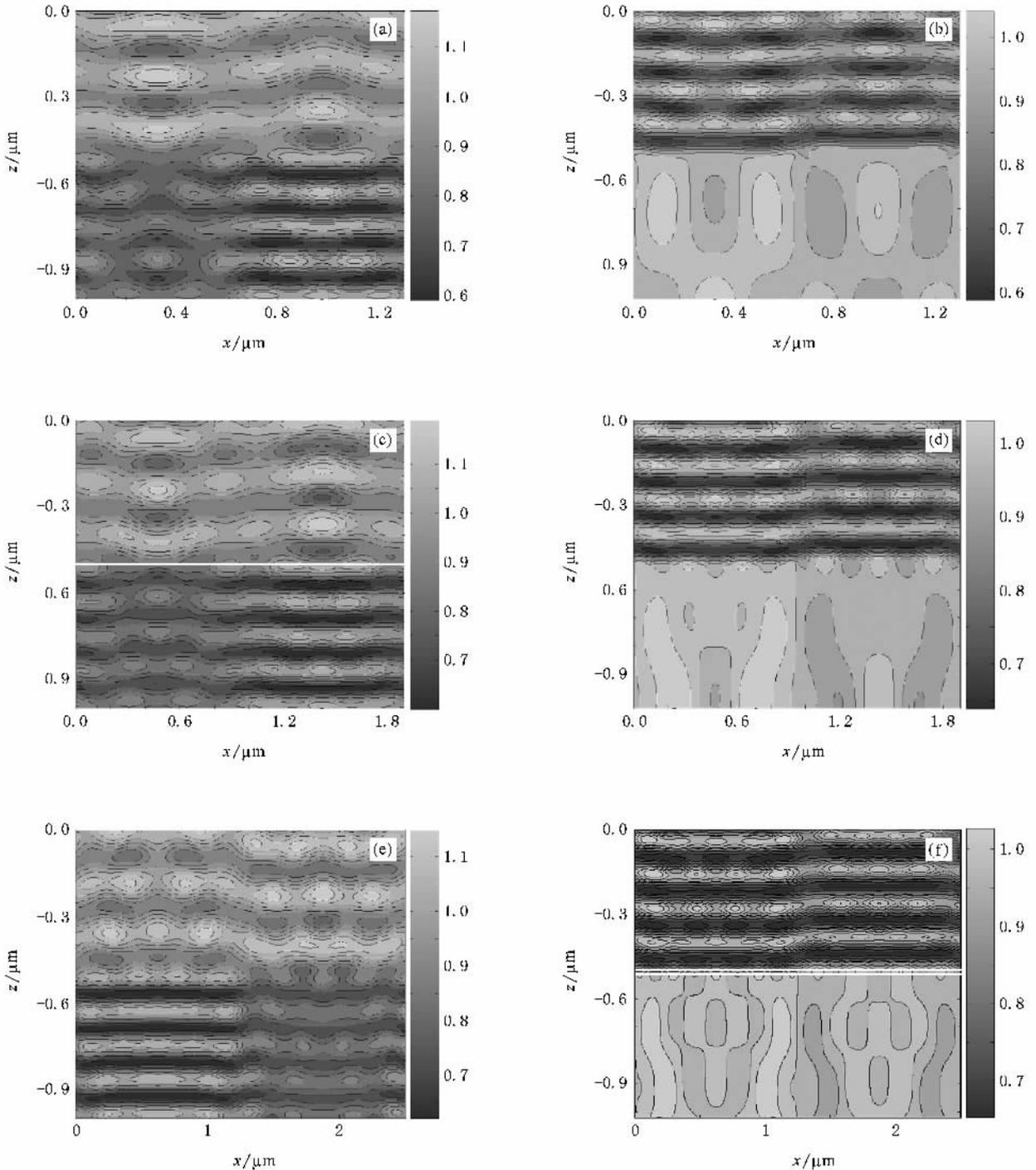


图 2 BSG 上(入射区)下(出射区)表面近场区域光场电矢量振幅相对分布 (a)周期  $1.3 \mu\text{m}$  BSG 上表面 (b)周期  $1.3 \mu\text{m}$  BSG 下表面 (c)周期  $1.9 \mu\text{m}$  BSG 上表面 (d)周期  $1.9 \mu\text{m}$  BSG 下表面 (e)周期  $2.5 \mu\text{m}$  BSG 上表面 (f)周期  $2.5 \mu\text{m}$  BSG 下表面

表 1 BSG 各层各区调制度及其位置

分 层	周期 1.3 $\mu\text{m}$			周期 1.9 $\mu\text{m}$			周期 2.5 $\mu\text{m}$		
	$z/\mu\text{m}$	调制度 $M$	$x/\mu\text{m}$	$z/\mu\text{m}$	调制度 $M$	$x/\mu\text{m}$	$z/\mu\text{m}$	调制度 $M$	$x/\mu\text{m}$
第 1 层(入射区)	1.5299	0.33583	-0.22750	1.5758	1.4408	-0.36170	1.4566	1.89580	-0.22150
第 2 层(基底层)上表面	1.3640	0.98583	-0.63050	1.2697	1.2983	-0.63070	1.2318	0.27083	-0.98780
第 2 层(基底层)下表面	1.1912	0.33583	-0.04740	1.1301	0.11083	-0.03600	1.1377	1.12500	-0.15910
第 3 层(BSG 结构层)	1.0556	0.61750	-0.51860	1.0851	0.64917	-0.51880	1.0809	0.31250	-0.51840
第 4 层(出射区)	1.1723	0.33583	-1.02000	1.1538	0.25333	-1.00410	1.1183	0.27083	-0.91090

## 4. BSG 制作误差对近场影响的模拟计算结果及分析

由于现有加工技术的限制,实际制作的 BSG 结构与理论设计总是存在一定的误差,这种误差会引起 BSG 近场调制度的增加,从而可能增加其强激光诱导损伤的风险.一般情况下,对于不同的光学系统其元件损伤阈值也不相同.对于 ICF 系统中特定的入射光强和光学元件材料,通常假设光强调制度  $M < 2.0$  时不会损伤光学元件.以下计算模拟 BSG 三个分区(周期  $T_b$  分别为 1.3, 1.9, 2.5  $\mu\text{m}$ )的深度误差和占空比误差对近场调制的影响.

### 4.1. BSG 深度误差对近场调制的影响

从现有的 DOE 制作工艺看,深度误差主要是由刻蚀过程中刻蚀系统工作参数控制不准确引起的,在不考虑其他误差存在的情况下,我们模拟了 BSG 刻槽深度变化时钕玻璃激光器的三倍频光(波长为 0.351  $\mu\text{m}$ )在 BSG 基底层下表面和结构层的调制度变化情况,结果如图 3 所示.由图 3 可见,刻槽深度在 20 nm 附近时基底层下表面和结构层的调制度变化都较缓慢,而随着深度的加大,BSG 下表面的调制度急剧上升.这是由于 BSG 的光栅刻槽深度对取样效率影响较大,光场能量分布也因此发生很大的变化,从而在 BSG 基底层下表面产生强调制.模拟结果表明:对于 BSG 中周期  $T_b = 1.3, 1.9, 2.5 \mu\text{m}$  的三个分区,要满足基底层和 BSG 结构层调制度  $M < 2.0$  的要求,所对应的刻槽深度应该不超过 54, 71, 77 nm.因此,在 ICF 系统中要保证 BSG 既能安全工作又能实现低效率取样,刻槽深度不应该超过 54 nm.

### 4.2. BSG 占空比误差对近场调制的影响

在 BSG 制作过程中,基片上光刻胶的曝光量如

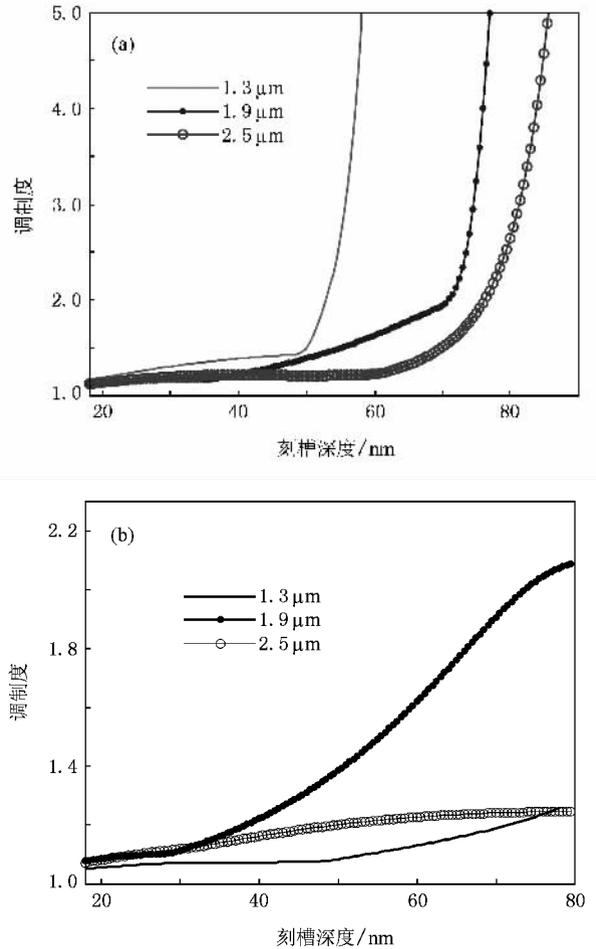


图 3 BSG 刻槽深度对基底层下表面和 BSG 结构层调制度的影响 (a)基底层下表面 (b)BSG 结构层

果出现偏差,在显影过程中难免会出现占空比误差.我们模拟了刻槽深度为 20 nm、占空比在 0.4—0.6 范围内变化时,三个分区基底层下表面和 BSG 结构层调制度的变化情况,结果如图 4 所示.从图 4 可以看出,占空比在 0.4—0.6 范围内变化时,每一层调制度都有较小变化,但均没有超过 ICF 系统中产生激光诱导损伤的调制度限制,因此在元件内发生激光诱导损伤概率也较小.

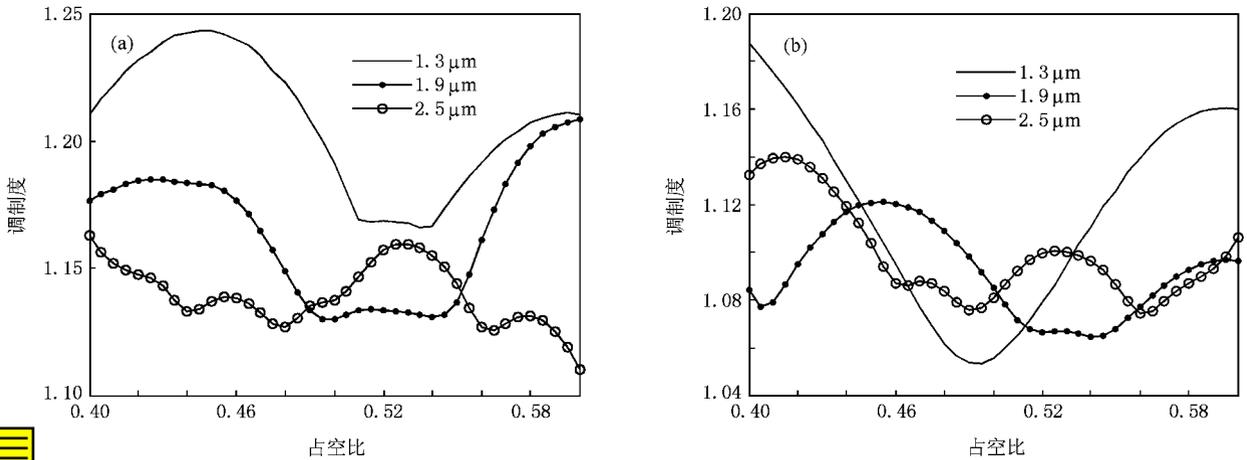


图 4 BSG 占空比对基底层下表面和 BSG 结构层调制度的影响 (a)基底层下表面 (b)BSG 结构层

## 5. 结 论

采用傅里叶模式法,分析了 BSG 光学元件近场调制特性.计算结果表明,由于 BSG 刻槽深度很小(20 nm),其内部及出射近场区域调制度总体上比较小,因此 BSG 元件用于 ICF 系统的激光损伤风险较小.

分析了 BSG 刻槽深度和占空比存在误差的情

况下对光束近场调制的影响.深度误差在 20 nm 附近时,其对调制度的影响很小.随着刻槽深度误差的加大,调制度也急剧增加.占空比在 0.4—0.6 范围变化时,基底层和 BSG 结构层调制度均没有超过 2.0.所以,为了满足 ICF 系统中 BSG 调制度小于 2.0 的要求,其误差容限为刻槽深度不超过 54 nm.另外,对两种误差的比较可以得出,刻槽深度误差对 BSG 近场调制度的影响比占空比误差对 BSG 近场调制度的影响大.

- [ 1 ] Giuliano C R 1964 *Appl. Phys. Lett.* **5** 137
- [ 2 ] Hopper R W, Uhlmann D R 1970 *J. Appl. Phys.* **41** 4023
- [ 3 ] Britten J A, Herman S M, Summers L J, Rushford M C, Auyang L, Barton I M, Shore B W, Dixit S N, Parham T G, Hoaglan C R 1999 *Proc. SPIE* **3578** 337
- [ 4 ] Whitman P K, Bletzer K 1999 *Proc. SPIE* **3578** 681
- [ 5 ] Demos S G, Staggs M 2002 *Opt. Express* **10** 1444
- [ 6 ] Bertussi B, Natoli J Y 2004 *Opt. Commun.* **242** 227
- [ 7 ] Li J L, Lü B D 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5772 (in Chinese) [ 李建龙、吕百达 2007 物理学报 **56** 5772 ]
- [ 8 ] Liu M M, Zhang G P, Zou M 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 4608 (in Chinese) [ 刘敏敏、张国平、邹明 2006 物理学报 **55** 4608 ]
- [ 9 ] Liu S J, Shen J, Shen Z C, Kong W J, Wei C Y, Jin Y X, Shao J D, Fan Z X 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 4588 (in Chinese) [ 刘世杰、沈健、沈自才、孔伟金、魏朝阳、晋云霞、邵建达、范正修 2006 物理学报 **55** 4588 ]
- [ 10 ] Fu K X, Zhang D Y, Wang Z H, Zhang Q Z, Zhang J 1998 *Acta Phys. Sin.* **47** 1278 (in Chinese) [ 傅克祥、张大跃、王植恒、张奇志、张靖 1998 物理学报 **47** 1278 ]
- [ 11 ] Li L F 1996 *J. Opt. Soc. Am. A* **13** 1870
- [ 12 ] Tang X G, Fu K X, Wang Z H, Liu X C 2002 *Acta Opt. Sin.* **22** 774 (in Chinese) [ 唐雄贵、傅克祥、王植恒、刘细成 2002 光学学报 **22** 774 ]
- [ 13 ] Zeng Y S, Tang X G, Fu K X, Wang Z H 2003 *Acta Opt. Sin.* **23** 95 (in Chinese) [ 曾阳素、唐雄贵、傅克祥、王植恒 2003 光学学报 **23** 95 ]

# Study on the near field modulation and laser induced damage of beam sampling grating<sup>\*</sup>

Yao Xin<sup>1)</sup> Gao Fu-Hua<sup>1)†</sup> Li Jian-Feng<sup>1)</sup> Zhang Yi-Xiao<sup>1)</sup> Wen Sheng-Lin<sup>2)</sup> Guo Yong-Kang<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> *College of Physics Science and Technology, Sichuan University, Chengdu 610064, China*

<sup>2)</sup> *Chengdu Fine Optical Engineering Research Center, Chengdu 610041, China*

( Received 16 November 2007 ; revised manuscript received 25 February 2008 )

## Abstract

The beam sampling grating (BSG) is one kind of important diffractive optical elements which is used in sampling and diagnosis. In terminal optical system of the inertial confinement fusion (ICF) system, the modulation produced by strong laser in the near field, may cause laser induced damage to the BSG. It makes the element work abnormally. In order to provide the theoretical basis for protecting this kind of optical element from laser induced damage under the strong laser condition, this paper uses the Fourier modal theory to carry on the numerical simulation of the interior modulation for BSG in near field. The results indicate that the interior modulation of BSG is weak, but the optical field distribution is still not even, thus in these areas the damage probability is higher than in other positions. Moreover, through the fabrication error analysis of BSG, the relationship between modulation in near field and fabrication error was obtained. The computed results indicate that the depth error and the duty cycle error of grooves affect the modulation of the light beam in near field, but the influence of groove depth error is larger than the duty cycle error. However, if the groove depth error does not exceed a definite value, its modulation also remains on a lower level. Therefore the BSG can still work in the ICF driver normally.

**Keywords** : beam sampling grating, laser induced damage, inertial confinement fusion, Fourier modal method

**PACC** : 4225, 2410H, 0365G

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant No. 10376019 ).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail : mender\_gao@263.net