

文章编号: 1001-3806(2005)04-0398-03

取样光栅的设计及衍射行为研究

刘 全, 吴建宏, 李朝明

(苏州大学 信息光学工程研究所, 苏州 215006)

摘要: 设计了用于惯性约束核聚变系统的取样光栅。利用光全息学的基本原理, 设计了记录全息取样光栅掩模的消像差光学系统, 并使用光学设计软件 ZEMAX 分析了它的像差; 还利用严格耦合波理论对取样光栅的衍射效率问题进行了深入的研究。研究发现, 在占宽比和槽深这两个光栅结构参量中, 槽深的变化对衍射效率更敏感。这些都为取样光栅的实际制作提供了有意义的结果。

关键词: 衍射光学; 取样光栅; 光学设计; 衍射效率; 严格耦合波理论

中图分类号: O436.1; O438.1 **文献标识码:** A

Design of beam sampling grating and study on its diffraction action

LIU Quan, WU Jian-hong, LI Chaoming

(Information Optics Engineering Institute, Soochow University, Suzhou 215006, China)

Abstract: The beam sampling grating (BSG) used in the inertial confinement fusion system is designed by means of optical holographic theory, achromatic optical system recording holographic BSG mask is designed. Its aberration is analyzed with ZEMAX. Meantime, the diffraction efficiency of the BSG is discussed based on rigorous coupled-wave theory. The results show: the groove depth is more important for diffraction efficiency than the duty cycle, which is useful for fabrication of the BSG.

Key words: diffractive optics; beam sampling grating; optical design; diffraction efficiency; rigorous coupled-wave theory

引 言

在惯性约束核聚变 (inertial confinement fusion, ICF) 系统中, 为了满足其所需的强能量, 目前主要是采用多光束对称均匀照明的方式^[1], 同时为了提高靶场的性能, 还要求这些光束的能量之间的偏差非常小, 因此, 需要使用光束取样的元件来对入射的三倍频光 (351 nm) 取样, 进行能量诊断, 以达到光束控制的目的。为此, 各国的科研工作者提出了不少巧妙的取样方案。例如美国的劳伦斯利弗莫尔国家实验室 (LLNL) 的 NOVA 装置就是使用透镜进行光束取样^[2]。当前国际上光束取样元件的主流是采用衍射光栅, 且有两种取样方式。一种是直接使用深刻蚀深度的光栅对光束同时进行色分离和取样^[3]; 另一种是使用浅刻蚀深度的光栅对色分离后的三倍频光进行取样^[4], 由于前一种像差问题难以解决, 故当前主要是采用浅刻蚀深度的光栅进行取样。

浅刻蚀深度的取样光栅 (beam sampling grating,

基金项目: 国家八六三高技术发展计划资助项目 (2003AA804923)

作者简介: 刘 全 (1978-), 男, 研究实习员, 目前主要从事衍射光学的研究工作。

E-mail: lquan_z@sohu.com

收稿日期: 2004-08-24; 收到修改稿日期: 2004-11-04

BSG) 是一种位相型的变周期光栅, 这种光栅结构能使取样光束从主光路中分离出来并聚焦, 如图 1 所示。

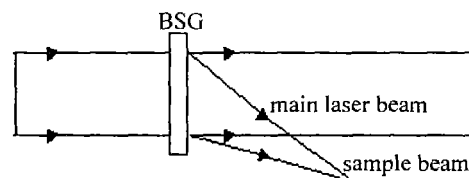


Fig 1 Sampling principle of BSG

制作它的方法如下: 首先是用全息干涉曝光的方法在光致抗蚀剂 (光刻胶) 上形成所需的全息光栅掩模; 然后通过离子刻蚀的方法将掩模图案转移到熔石英基片上。其中第 1 步形成所需的全息光栅掩模是最关键的一步, 它的好坏直接影响着后续步骤的进行。

1 BSG的记录光学系统的设计

根据 BSG 的工作要求, 设计了记录全息取样光栅掩模的消像差光学系统, 并使用光学设计软件 ZEMAX 分析了它的像差。BSG 的工作波长是 351 nm, 取样角度是 11.5° 左右, 取样距离在 3600 mm 左右, 口径是 320 mm × 320 mm, 拍摄时使用的是输出波长为 413.1 nm 的激光器。

对于这个大口径的全息光学元件, 在使用时, 必须关心它的像差情况。

由于工作波长与记录波长不同, 故根据三级像差

理论^[5]和 BSG 的工作要求,设计了消彗差和像散的消像差光路,如图 2 所示。

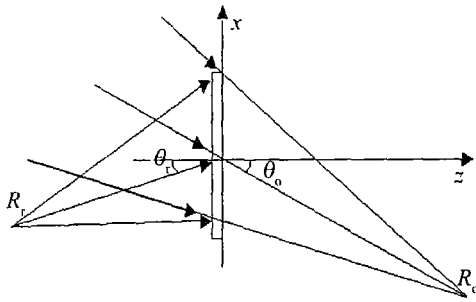


Fig 2 Achromatic optical system

其记录参数满足以下的方程:

$$\frac{\sin^2 \theta_c}{R_c^2} - \frac{\sin^2 \theta_i}{R_i^2} + \mu \left(\frac{\sin^2 \theta_o}{R_o^2} - \frac{\sin^2 \theta_r}{R_r^2} \right) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\sin^2 \theta_c}{R_c} - \frac{\sin^2 \theta_i}{R_i} + \left(\frac{\sin^2 \theta_o}{R_o} - \frac{\sin^2 \theta_r}{R_r} \right) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{1}{R_c} - \frac{1}{R_i} + \mu \left(\frac{1}{R_o} - \frac{1}{R_r} \right) = 0 \quad (3)$$

$$\sin \theta_c - \sin \theta_i + \mu (\sin \theta_o - \sin \theta_r) = 0 \quad (4)$$

式中, $\mu = \lambda_2 / \lambda_1$, λ_1 为记录波长, λ_2 为再现波长, R_q ($q = o, r, c, i$) 分别表示物光源, 参考光源, 再现光源和像点的位置, θ_q 表示过原点的光线与 z 轴的夹角。从以上 4 个方程得到消像差的记录条件: $R_o = 3422.9 \text{ mm}$, $\theta_o = 12.15^\circ$, $R_r = -29690 \text{ mm}$, $\theta_r = -1.39^\circ$ 。使用光学设计软件 ZEMAX 对上面得到的记录参数进行光线追迹分析, 得到其点列图, 如图 3 所示。弥散斑均方根半径为 $9.45 \mu\text{m}$, 其 Airy 斑的直径是 $6.9 \mu\text{m}$ 。由此可见, 此光路记录的 BSG 的一级衍射光的光斑大小已很接近 Airy 斑的大小了, 达到了设计要求。

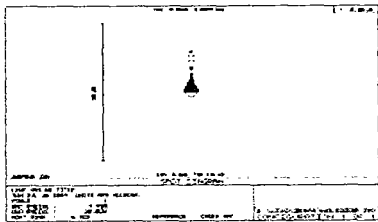


Fig 3 Spot diagram of achromatic optical system

2 BSG 的衍射行为研究

取样光栅是一种衍射光学元件, 即是一种衍射光栅。衍射光栅最重要的指标之一是衍射效率, 故这里利用严格耦合波理论^[6~9]对其衍射效率问题进行了深入地研究, 以达到指导取样光栅实际制作的目的。在做具体的理论分析的时候, 把一级衍射光的衍射效率具体到 1% 。

根据上节消像差光路设计, 计算了周期的变化范围, 在实际工作中往往使用空间频率 (空频) 来代替周

期, 故这里给出光栅空间频率的分布图, 如图 4 所示。这里的 x 指的是消像差光路中的 x 轴。空频 $\nu = (\sin \theta_1 + \sin \theta_2) / \lambda_1$, 式中, θ_1 和 θ_2 表示过 x 轴的光线与 z 轴的夹角。

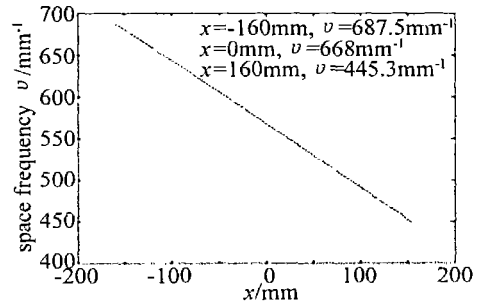


Fig 4 Distribution diagram of space frequency in BSG

2.1 衍射效率与空频变化之间的关系

下面使用严格耦合波理论来分析取样光栅的衍射效率与空频变化之间的关系。这里的取样光栅是矩形的表面浮雕型光栅, 入射光是 351 nm 的紫外光, 熔石英基底的折射率为 1.4715 , 垂直入射。光栅的空频是变化的, 其变化是有规律的, 与 x 轴的坐标相关, 如图 4 所示。为了满足一级衍射光的衍射效率在 1% 左右, 所以在不同的占宽比下, 槽深是不同的。这里计算了占宽比为 $0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7$ 情况下的衍射效率与空频变化之间的关系, 不同的占宽比所对应的槽深是 $14.65 \text{ mm}, 12.50 \text{ mm}, 11.90 \text{ mm}, 12.55 \text{ mm}, 14.80 \text{ mm}$ 。计算结果如图 5 所示, 亦即衍射效率在光栅表面的分布。

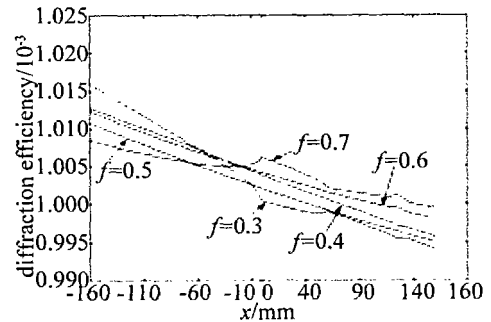


Fig 5 Distribution diagram of diffraction efficiency in BSG

从图 5 可以看出, 不同的占宽比下, 衍射效率对空频变化的敏感程度是不同的, 在整个光栅表面上, 当 $f = 0.3$ 时, 衍射效率的变化 $\Delta \eta = 0.022\%$; 当 $f = 0.4, 0.5, 0.6$ 时, 衍射效率的变化 $\Delta \eta = 0.016\%$; 当 $f = 0.7$ 时, 衍射效率的变化 $\Delta \eta = 0.009\%$ 。

由以上分析可知, 空频的变化对衍射效率的影响几乎可以忽略。

2.2 衍射效率与占宽比的关系

在同一光栅面积上由于全息掩模制作时, 不同区域的槽宽比或曝光量不同, 在显影过程中难免会出现占宽比不一致的情况, 这一情况将导致光栅面上的衍射效率不均匀。

为了简单起见,使用 $x=0$ 坐标处的空频 568mm^{-1} , 占宽比为 0.5 时,一级衍射光的衍射效率在 1% 左右,求得槽深 $d=12\text{nm}$ 。然后,分别使用 $x=160\text{mm}$, 80mm , 0mm , -80mm , -160mm 坐标处的空频,在槽深 $d=12\text{nm}$ 情况下,计算衍射效率与占宽比变化之间的关系,结果如图 6 所示。

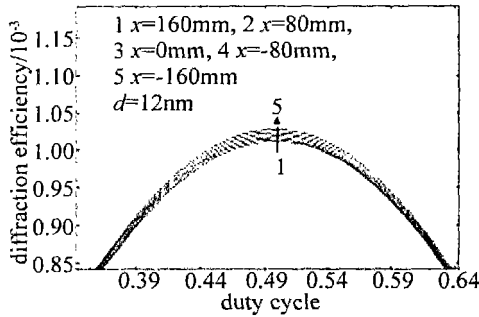


Fig 6 Diffraction efficiency as a function of duty cycle

从图 6 可以看出,在占宽比 $f=0.5$ 的附近,衍射效率取最大值。设衍射效率 $\eta_0=1\%$,那么,对于图 6 中的曲线 1,当衍射效率 η 变化的幅度是 $5\%\eta_0$ 时,占宽比 f 的变化范围是 $0.43\sim 0.57$;当衍射效率 η 变化的幅度是 $10\%\eta_0$ 时,占宽比 f 的变化范围是 $0.4\sim 0.6$;当衍射效率 η 变化的幅度是 $20\%\eta_0$ 时,占宽比 f 的变化范围是 $0.35\sim 0.65$ 。对于图 6 中的其它 4 条曲线,基本上也是同样的情况。

2.3 衍射效率与槽形深度之间的关系

由于离子刻蚀的不均匀性会带来刻蚀深度的不均匀。这一不均匀将直接影响到衍射效率的不均匀。

使用严格耦合波理论,计算占宽比 $f=0.5$,空频分别是 $x=160\text{mm}$, 80mm , 0mm , -80mm , -160mm 坐标处所对应的值时,衍射效率与槽深变化之间的关系,结果如图 7 所示。

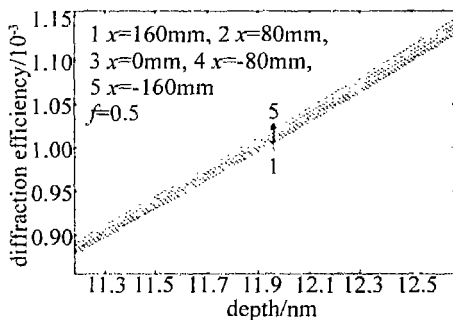


Fig 7 Diffraction efficiency as a function of groove depth

从图 7 可以看出,槽深的变化对衍射效率的影响是相当的明显的,如设衍射效率 $\eta_0=1\%$ 时,所对应的槽深是 d_0 ,那么,当衍射效率 η 变化的幅度是 $\pm 5\%\eta_0$ 时,槽深 d 的变化范围是 0.2nm ,亦即 $\pm 0.84\% d_0$;当衍射效率 η 变化的幅度是 $\pm 1\%\eta_0$ 时,槽深 d 的变化范围是 0.5nm ,亦即 $\pm 2.1\% d_0$;当衍射效率 η 变化的幅度是 $\pm 10\%\eta_0$ 时,槽深 d 的变化范围

是 1.1nm ,亦即 $\pm 4.7\% d_0$ 。

综上所述,由于全息掩模制作和离子刻蚀同时带进占宽比和槽深变化,且槽深变化对衍射效率更加敏感。

以上分析的都是矩形的表面浮雕型光栅,由于在实际的制作中是不可能做到绝对的矩形结构,因此,有必要对不同的槽形结构下的光栅进行计算,对于浅槽的取样光栅,经过离子刻蚀以后的槽形为近似矩形或近似梯形。故这里假定其为如图 8 所示的梯形截面,

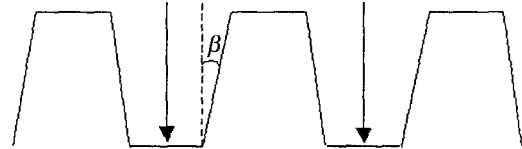


Fig 8 Geometry of the trapezoidal surface-relief grating

并计算了衍射效率与梯形倾角 β 的关系,结果见图 9。当 $\beta=0$ 时,就是一个矩形光栅,设此时的结构参数是:空频是 $x=0$ 坐标处的空频为 568mm^{-1} ,占宽比为 0.5,槽深是 12nm , 351nm 的入射光垂直入射,其一级衍射效率为 1.019% 。

从图 9 可以看出,刻槽的梯形倾角的大小对衍射效率基本上没有影响。所以,使用上述矩形的表面浮雕型光栅的结论是可信、可行的。

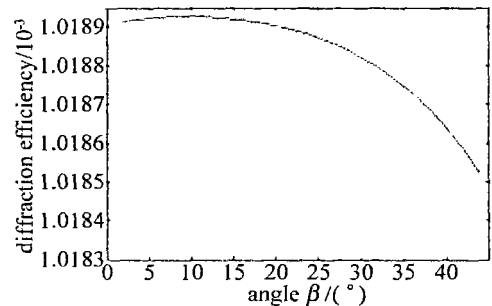


Fig 9 Diffraction efficiency of order 1 as a function of angle β for a trapezoidal surface-relief grating

3 结论

分析了取样光栅的特点和使用要求,设计了记录全息取样光栅掩模的消色差光学系统,并使用光学设计软件 ZEMAX 分析了它的像差,结果表明:使用该光学系统记录的 BSG,其一级衍射光的光斑大小已很接近 Airy 斑的大小,聚焦性能近似达到衍射极限。利用严格耦合波理论对取样光栅的衍射效率问题进行了深入地研究,研究表明:BSG 空频的变化对衍射效率的影响几乎可以忽略,全息掩模制作和离子刻蚀会同时带进占宽比和槽深的变化,其中槽深的变化对衍射效率更敏感,故在取样光栅的加工制作过程中必须对深度加以特别的注意。

Table 2 Total attenuation coefficients of human bladder cancer tissue at six wavelengths of laser and their linearly polarized laser irradiation are determined using the direct and indirect methods

λ/nm	μ_{t1}/cm^{-1}	μ_{t2}/cm^{-1}	μ_{t3}/cm^{-1}	μ_{t4}/cm^{-1}
476.5	491 ± 1.3	50.5 ± 0.32	467 ± 0.9	46.6 ± 0.25
488	422 ± 0.2	49.5 ± 0.29	412 ± 0.23	49.2 ± 0.30
496.5	368 ± 0.2	47.2 ± 0.27	345 ± 0.22	50.4 ± 0.31
514.5	351 ± 0.1	48.7 ± 0.28	321 ± 0.13	47.8 ± 0.24
532	312 ± 0.71	85.9 ± 0.48	302 ± 0.61	79.7 ± 0.41
808	111 ± 0.12	22.1 ± 0.12	99.1 ± 0.371	21.7 ± 0.10

3 讨论

从实验结果可见,采用直接测量法和间接测量法所得到的人正常膀胱或人膀胱癌组织样品的总衰减系数在这6个激光波长范围内均有明显差异($P < 0.05$),以激光与其相应波长的线偏振激光辐照人正常膀胱或人膀胱癌组织样品所得的总衰减系数在这6个激光波长范围内均有明显差异($P < 0.05$),在这6个激光波长范围内,以激光辐照人正常膀胱或人膀胱癌组织样品的总衰减系数在直接法与间接法之间的差值,均明显较其相应波长的线偏振激光辐照人正常膀胱或人膀胱癌组织样品的总衰减系数在直接法与间接法之间的差值要大($P < 0.05$)。在这6个波长范围内采用直接法所测得人正常膀胱或人膀胱癌组织样品的总衰减系数是随着波长的减小而明显增大,而采用间接法所得到的人正常膀胱或人膀胱癌组织样品的总衰减系数在这6个波长范围内,除了532nm的总衰减系数之外,是随着波长的减小而明显增大的。可见,在这6个激光波长范围内,采用直接法与间接法所得到的人正常膀胱或人膀胱癌组织样品的总衰减系数是有明显差异的,这是由于直接法其本质上就是采用 Beer-Lambert定理,它是在忽略了样品组织内的漫射光的情况下获得样品组织的总衰减系数的。而间接法是采用 Kubelka-Munk二流模型,它是在忽略了样品组织内的

相干光的情况下获得样品组织的总衰减系数的,因而导致所得结果产生了差异。而以线偏振激光辐照这两种组织样品能缩小两种测量方法所得结果之间的差异。这是由于线偏振光通过薄的生物组织时,在光轴上所产生的散射光比非偏振光入射要少^[3],提高测量准直透射光的精确度,导致所得结果的准确度提高了。

参考文献

- [1] GHOSH N, MOHANTY S K, MAJUMDER S K. Measurement of optical transport properties of normal and malignant human breast tissue [J]. *Appl Opt*, 2001, 40(1): 176~184.
- [2] 李步洪,谢树森,陆祖康. 光动力学疗法新型光敏剂的光谱特性研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2002, 22(6): 902~904.
- [3] 陈荣,谢树森,陈艳娇 *et al* 中国人血液的组织光学参数 [J]. *光电子·激光*, 2002, 13(1): 92~93, 97.
- [4] SANKARAN V, EVERETT M J, MAHILAND D J *et al* Comparison of polarized-light propagation in biological tissue and phantoms [J]. *Opt Lett*, 1999, 24(15): 1044~1046.
- [5] QU J, MACAULAY C, LAM S *et al* Optical properties of normal and carcinomatous bronchial tissue [J]. *Appl Opt*, 1994, 33(31): 7397~7405.
- [6] 魏华江,邢达,巫国勇 *et al* 532nm和808nm激光及其线偏振激光辐照人正常膀胱癌组织光学特性 [J]. *生物化学与生物物理进展*, 2003, 30(2): 209~215.
- [7] FLOCK S T, WILSON B C, PATTERSON M S. Total attenuation coefficients and scattering phase functions of tissues and phantom materials at 633nm [J]. *Med Phys*, 1987, 14(5): 835~841.
- [8] GRAAFF R, AARNOUDSE J G de MUL F FM. Light propagation parameters for anisotropically scattering media based on a rigorous solution of the transport equation [J]. *Appl Opt*, 1989, 28(12): 2273~2279.
- [9] SEIYAMA A, CHEN S S, KOSAKA H *et al* Microspectroscopic measurement of the optical properties of rat liver in the visible region [J]. *Journal of Microscopy*, 1994, 175(1): 84~89.
- [10] VOGEL A, DLUGOS C, NUFFER R *et al* Optical properties of human sclera, and their consequences for transscleral laser applications [J]. *Lasers Surg Med*, 1991, 11(10): 331~340.
- [11] CHEONG W F, PRAHL S A, WELCH A J. A review of the optical properties of biological tissues [J]. *IEEE J Q E*, 1990, 26(12): 2166~2185.
- [12] 魏华江,李晓原,刘小星 *et al* KM模型下的兔血管对Ar⁺激光的散射与吸收特性 [J]. *光电子·激光*, 2001, 12(4): 421~424.

(上接第400页)

参考文献

- [1] 谢永杰,刘晶儒,赵学庆. ICF中光束平滑及靶面辐照均匀性技术评述 [J]. *激光技术*, 2001, 25(6): 454~459.
- [2] LAUMANN C W, CARL J A, SMITH J R *et al* Development of third harmonic output beam diagnostics on Nova [J]. *Proc SPIE*, 1991, 1414: 151~160.
- [3] TOUZET B, FLAMAND J, THEVENON A *et al* Focusing transmission gratings for high energy lasers [J]. *Proc SPIE*, 1999, 3492: 151~160.
- [4] BRITTON J A, BOYD R D, PERRY M D *et al* Low efficiency gratings for 3rd harmonic diagnostics applications [J]. *Proc SPIE*, 1995, 2633: 121~128.
- [5] 于美文. 光全息学及其应用 [M]. 北京:北京理工大学出版社, 1996. 88~90.
- [6] 刘全,吴建宏. 光栅的数量衍射理论与耦合理论的分析比较 [J]. *激光杂志*, 2004, 25(2): 31~34.
- [7] MOHARAM M G, GAYLORD T K. Rigorous coupled-wave analysis of planar-grating diffraction [J]. *J O S A*, 1981, 71(7): 811~818.
- [8] MOHARAM M G, GAYLORD T K. Diffraction analysis of dielectric surface-relief gratings [J]. *J O S A*, 1982, 72(10): 1385~1392.
- [9] MOHARAM M G, GRANN E B, POMMET D A *et al* Formulation for stable and efficient implementation of the rigorous coupled-wave analysis of binary gratings [J]. *J O S A*, 1995, A12(5): 1068~1076.