

透射衍射光栅内全反射级次

邬融 田玉婷 赵东峰 李大为 华能 邵平

Total internal reflection orders in transmission grating

Wu Rong Tian Yu-Ting Zhao Dong-Feng Li Da-Wei Hua Neng Shao Ping

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 054202 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.054202

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.054202>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I5>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

折射率正负梯度交替表面的研究

Study of positive and negative gradient refractive index alternant surface

物理学报.2015, 64(8): 084202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.084202>

折射率梯度表面机理的研究

Studies on the mechanism of refractive index gradient surface

物理学报.2014, 63(21): 214201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.214201>

基于聚合物支撑形貌液晶/聚合物光栅的低阈值分布反馈式激光器

Low threshold distributed feedback laser based on scaffolding morphologic and holographic polymer dispersed liquid crystal gratings

物理学报.2014, 63(19): 194202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.194202>

HfO<sub>2</sub> 顶层多层介质膜脉宽压缩光栅的离子束刻蚀

Ion beam etching for multilayer dielectric pulse compressor gratings with top layers of HfO<sub>2</sub>

物理学报.2013, 62(23): 234202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.234202>

基于相干粒子数囚禁的电磁诱导光栅研究

Electromagnetically induced grating based on the coherent population trapping

物理学报.2013, 62(22): 224205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.224205>

## 透射衍射光栅内全反射级次\*

邬融<sup>1)†</sup> 田玉婷<sup>2)</sup> 赵东峰<sup>1)</sup> 李大为<sup>1)</sup> 华能<sup>1)</sup> 邵平<sup>1)</sup>

1)(中国科学院上海光学精密机械研究所, 高功率激光物理联合实验室, 上海 201800)

2)(中国科学院大学, 北京 100049)

(2015年10月15日收到; 2015年11月12日收到修改稿)

当前高功率激光装置系统中, 国内使用透射式衍射光栅进行光束采样, 国外甚至使用光栅聚焦并同时结合谐波分离和采样功能. 高功率激光辐照下, 除了0级透射打靶光以及目标取样光外, 其他级次衍射光的影响也不可忽视, 可能造成诸如鬼像聚焦破坏、时间脉宽测量不稳定、近远场测量噪声等问题. 尤其是透射衍射光栅内部全反射级次会导致光栅出射一系列规律的衍射花样, 造成上述干扰和危害. 首先理论上针对透射式光栅(包括取样光栅和聚焦光栅)进行了相应的计算和分析, 然后从实验上观察并测量了取样光栅内部全反射级次的现象, 并且结合镀减反膜前后的衍射现象进行了讨论, 最后分析并给出了如何消除或规避全反射级次和其他冗余级次影响的方法.

**关键词:** 衍射光栅, 全内反射, 光束取样光栅, 鬼像

**PACS:** 42.40.Eq, 42.25.Gy, 42.25.Fx, 42.15.-i

**DOI:** 10.7498/aps.65.054202

## 1 引言

衍射光栅作为一类精密刻槽的光学器件, 在光谱色散、分光、计量和光通信等方面有着广泛应用. 从衍射方向划分来看, 有透射光栅和反射光栅, 常用作光谱色散元件. 取样光栅 (beam sample grating, BSG) 和聚焦光栅兼具光栅采样和光束会聚功能<sup>[1-3]</sup>, 制作成反射光栅, 能基于其独特的反射谱特性, 用于分子器件如DBR激光器、波分复用和光插分复用器; 制作成透射光栅, 可用在高功率激光装置上, 对指定波长激光进行采样和聚焦. 美国国家点火装置中, 每束激光的末端, 都有一块BSG, 用于大口径光束取样, 在基本不影响主光束的前提下, 为激光能量、近场分布、时间波形提供诊断用的取样光束. 法国兆焦耳装置, 使用深刻蚀的BSG对光束同时进行色分离和取样, 一方面将剩余杂光从三倍频紫外光路中分离, 另一方面也能提供三倍频激光能量、光强和波形的诊断功能<sup>[1]</sup>. 本文

重点研究适用于高功率激光装置中透射光栅体内各衍射级次的行为和影响, 在超强激光辐照下, 本可忽略的低能量衍射级次, 会聚为鬼像<sup>[4,5]</sup>后却会对光栅周边器件产生破坏, 甚至干扰探测结果.

自光栅出现以来, 无论是采用经典标量衍射理论, 还是利用矢量衍射理论中的严格耦合波理论, 光栅各级次的衍射角、衍射效率等理论分析和计算已经相当成熟<sup>[2,6-10]</sup>. 20世纪90年代末期傅克祥等<sup>[11-13]</sup>也对透射光栅体内级次进行了相关理论分析, 并指出了全反射级次的存在, 不过由于当时激光系统能量很低, 物理实验也还没进行到如今这样的精细程度, 故忽略了这些级次. 随着激光系统能量上升了1—2个量级, 且各种精密探测设备的出现, 它们的危害性就逐渐显现, 比如上海高功率激光装置终端光学组件中, 装夹BSG的铝框内侧就曾被全反光打毛并溅出粉末造成危害<sup>[14]</sup>, 此外时间波形探测设备的脉冲后沿也出现了较明显的旁瓣起伏, 干扰影响了探测结果. 因此对于应用于高功率激光系统, 除了关注光栅自身的抗激光破坏

\* 国家科技重大专项 (批准号: GFZX0205010405.2) 和国家自然科学基金青年科学基金 (批准号: 11204331) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: 46438131@qq.com

阈值 [15,16], 还要关注光栅衍射级次对周边的影响, 以便最大程度地使用好光栅. 本文对透射光栅体内各衍射级次尤其是全反射级次开展理论分析和相应的实验研究, 并结合了减反膜镀制前后的实验探测, 结果表明这些级次在光栅两侧呈现规律性分布, 在高功率激光辐照下具有相当的危害性, 最后给出了规避和降低其影响的设计方法和对策.

## 2 透射光栅体内全反射级次的理论计算和分析

设光栅基体介质折射率为  $n$ , 空气折射率近似为 1, 光栅置于出射面, 入射角为  $\theta$ , 如图 1 所示. 图中红线所示是遵循普通平面光学元件的折射和反射光线 ( $T_0$  和  $R_0$ ), 自光栅出射的高衍射级次  $T_m$  用蓝线表示, 光栅介质内部背反衍射级次  $R_m$  用绿线表示. 衍射光栅中各级次 (以  $m$  表示) 的衍射角  $\theta_m$  遵循经典光栅方程 [17,18]:

$$n \sin \theta' + \sin \theta_m^{\text{air}} = m \frac{\lambda}{d}, \quad (1)$$

$$n \sin \theta' + n \sin \theta_m^R = m \frac{\lambda}{d}, \quad (2)$$

(1) 式描述了自光栅介质透射到空气的衍射级次, (2) 式描述了在介质内背向反射的衍射级次, 其中上标  $R$  表示背反,  $\theta'$  为经前表面折射后在介质中的入射角, 满足折射关系  $n \sin \theta' = \sin \theta$ .

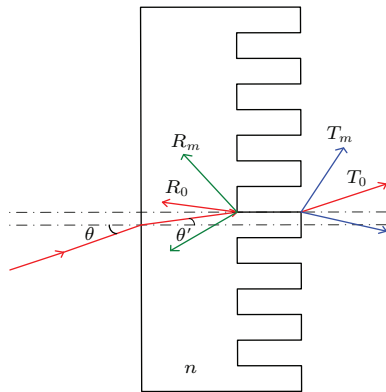


图 1 (网刊彩色) 光栅面透射和反射级次示意图  
Fig. 1. (color online) Transmitted and reflected diffraction orders around the grating surface.

显然,  $R_0$  大部分能量从基体入射面折射出去, 高级次  $R_m$  在满足全反射角度时才会出现在介质内出现全反射现象. 有别于普通平板元件, 对于光栅来说, 一旦全反光每次回到光栅面, 其反射和透射规律仍要遵循上述光栅方程 (1) 和 (2) 式 [11-13], 也就意味

着少量激光会通过透射和背反衍射到介质两侧空气中.

### 2.1 取样光栅

图 2 简化展示了厚约 8 mm、平均刻线密度约 1930 线/mm 的取样光栅在  $10^\circ$  紫外激光辐照情况下, 各衍射级次的反射和折射情况. 令基底熔石英  $n = 1.47$ , 紫外光波长  $\lambda = 0.351 \mu\text{m}$ , 则共有 4 个背反级次和 3 个透射级次满足光栅方程, 结合该图以及 (1) 和 (2) 式计算和分析各级衍射光的光学过程如下.

1)  $R_0$ :  $\theta_0^R = -6.78^\circ$ , 大部分能量折射到入射面空气中, 少量反射回到光栅面 (减反膜影响折反比). 橙色反射光线由于与粗红色主激光角度完全一样, 故它会产生类似的衍射级次, 不过由于能量相对主激光  $T_0$  较低, 且偏离  $T_0$  不到 2 mm, 故实验上几乎就隐藏在  $T_0$  中.

2)  $R_{-1}$ :  $\theta_{-1}^R = -35.71^\circ$ , 类似  $R_0$ , 不过因反射角较大, 故折反比相对  $R_0$  要小一些. 再根据几何关系可算得其橙色反射光的 0 级透射相对主激光  $T_{-1}$  偏离约 11.5 mm, 故在 Screen $_{-1}$  上将能清晰分辨  $R_{-1}$  部分反射光的 0 级透射斑.

3)  $R_1$ :  $\theta_1^R = 20.33^\circ$ , 类似上述分析, 其折反比处于  $R_0$  和  $R_{-1}$  之间, 同样可算得其部分反射光的 0 级透射相对主激光  $T_1$  偏离约 5.9 mm, 故在 Screen $_1$  上也能清晰分辨  $R_1$  部分反射光的 0 级透射斑.

4)  $R_2$ :  $\theta_2^R = 54.4^\circ$ , 显然大于全反角  $42.87^\circ$ , 故将在熔石英基体中不停全反直至溢出边界. 光栅面全反射属于 0 级背反光 (占据绝大部分能量), 其他透射和背反衍射级次 (橙线) 仍遵从光栅方程, 代入公式可算得透射 1 级等间距分布在  $T_1$  某侧, 透射 2 级等间距分布在  $T_0$  某侧, 背反级次自前表面折射出等间距分布在  $R_1$  某侧. 回到光栅面的全反射次数由下式计算确定,  $d$  为自入射光中心到光栅边缘尺寸,  $h$  为介质厚度. 代入厚度  $h = 8 \text{ mm}$ , 分子部分对应光栅面全反点间距约为 22.35 mm.

$$N = \lfloor d / (2h \cdot \tan \theta_2^R) \rfloor. \quad (3)$$

5)  $T_{-1}$ :  $\theta_{-1}^T = -59.1^\circ$ , 将出射到 Screen $_{-1}$  接收屏所在区域.

6)  $T_1$ :  $\theta_1^T = 30.72^\circ$ , 将出射到 Screen $_1$  接收屏所在区域.

7)  $T_0$ :  $\theta_0^T = 10^\circ$ , 出射聚焦打击到 Screen<sub>0</sub> 接收屏上.

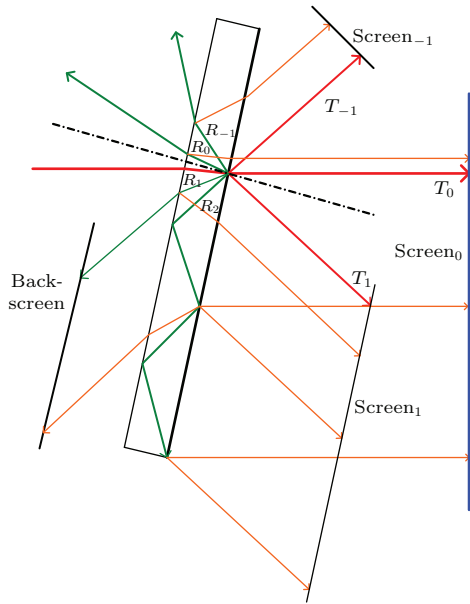


图2 BSG中各级衍射光的走向, Screen<sub>0</sub>置于焦平面附近垂直光轴, Screen<sub>-1</sub>置于  $T_{-1}$  附近, Screen<sub>1</sub>置于  $T_1$  附近, Back-screen置于  $R_1$  附近

Fig. 2. The light path of each detraction order for BSG, Screen<sub>0</sub> placed around focal plane, Screen<sub>-1</sub> placed around  $T_{-1}$ , and Back-screen placed around  $R_1$ .

图2中用光线追迹描述, 已简化BSG的变周期圆环带刻痕为等间距平行刻痕; 实际上, 对于变周期圆环带来说,  $T_1$ 为汇聚波,  $T_{-1}$ 为发散波<sup>[1,2]</sup>, 此外4个观察屏到光栅面的距离并不相同, 故  $R_2$  出现周期性透射、反射斑的间距也将因为聚焦传输而

有所变化, 距离越远, 间距越大. 由图2可见  $R_{-1}$  和  $R_1$  少量部分反射光以及全反级次  $R_2$  会在主激光  $T_0$ ,  $T_{-1}$  和  $T_1$  等区域附近重现有规律的衍射光, 甚至是背反端 Back-screen 区域也会等间距重现能量很低的背反衍射光, 全反级次  $R_2$  大部分能量最后从基体侧壁射出. 故实验上将会在介质两侧展现独属于光栅的美丽、规律的衍射现象, 只是在高功率激光辐照下, 这些现象是有害的. 具体而言, 由于光栅附近有透镜, 无论透射还是背反端, 都无形中增加了很多有规律的聚焦鬼像点分布, 对附近其他光学元件甚至是机械侧壁造成伤害. 故首先必须优化光路排布设计以避免这些鬼像点, 然后还要在机械套筒侧壁包括固定光栅装夹件内侧相应位置增加杂散光散射或吸收器件, 这无疑对光学元件空间排布以及侧壁散射或吸收陷阱额外提出了很多要求. 另外, 对于取样光栅来说, 其目标取样光附近受到其他衍射级次的干扰, 一旦分离不干净, 就可能影响能量和时间波形测量的准确性.

理论计算未镀膜各级次的能量占比<sup>[19-22]</sup>如表1所列, 表中未计入前表面约3.5%的反射损失, 因此如果计入前表面反射损失, 则0级透射会降低为约92%, 其他级次相应稍有降低. 镀减反膜后<sup>[23]</sup>, 其透射  $T_0$  会增强,  $T_1$  和  $T_{-1}$  因光栅槽型被膜层不规则填充故会稍有降低, 背反衍射级次  $R_m$  则会相应减弱. 后续实验上会进一步测量镀膜前后的光强状况.

表1 未镀膜光栅后表面各衍射级次能量份额

Table 1. Energy proportion of each diffraction order for uncoated grating.

级次	$R_{-1}$	$R_0$	$R_1$	$R_2$	$T_1$	$T_0$	$T_{-1}$
能量份额	0.78%	2.97%	0.43%	0.02%	0.3%	95.2%	0.3%

## 2.2 聚焦光栅

法国LMJ激光装置采用聚焦光栅来对紫外激光聚焦, 并分离剩余绿光和红外光<sup>[3,24]</sup>. 实际上该聚焦光栅算是深刻蚀的取样光栅, 以将绝大部分能量聚焦到高衍射级次上, 本节稍做类似的简单理论分析. 为达到色分离目标, 光栅槽深约700 nm左右, 刻线密度约2400线/mm, 使得紫外激光绝大部分能量自  $T_1$  透射光聚焦到靶面, 背反  $R_1$  作为取样

光、剩余绿光和红外光则全部从  $T_0$  透射, 从而利用单块元件即获得聚焦、色分离和取样等3种功能, 如图3所示.

设计上采用 Littrow 角度入射, 即  $T_1$  出射角与入射角相同,  $\theta = 25^\circ$ , 且居于光栅法线同侧, 背反  $R_1$  沿入射光返回. 聚焦光栅面位于入射前表面, 其光栅方程相应变为(4)和(5)式, 以此分析各波长衍射级次情况.

$$\sin \theta + n \sin \theta_m^{\text{glass}} = m \frac{\lambda}{d}, \quad (4)$$



$$\sin \theta + \sin \theta_m^R = m \frac{\lambda}{d}. \quad (5)$$

1)  $3\omega$  紫外激光: 根据光栅方程, 背反端有  $R_0$  和  $R_1$ , 其中  $R_0$  是为杂散光,  $R_1$  沿原入射角反向聚焦作为诊断取样光; 透射端  $T_1$  集中了绝大部分能量, 沿 Littrow 角  $\theta = 25^\circ$  出射聚焦到靶点; 少量沿原入射方向  $T_0$  出射, 少量  $T_2$  和  $T_{-1}$  在光栅法线两侧产生全反射 (衍射角均约为  $59.64^\circ$ ).

2)  $1\omega$  红外光、 $2\omega$  绿光: 根据光栅方程,  $m \neq 0$  时没有解, 故透射端、背反端都没有高级衍射, 只有透射  $T_0$  和背反  $R_0$ .

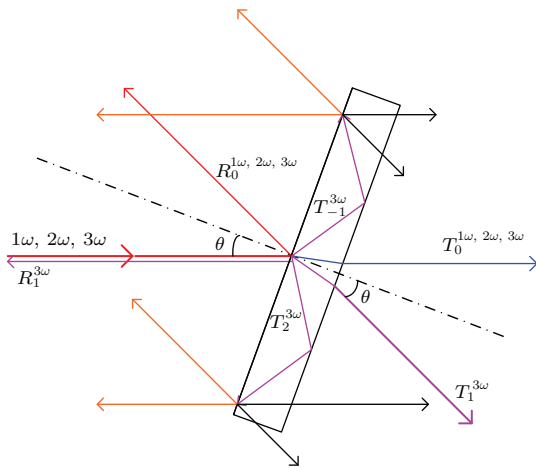


图3 (网刊彩色) 前表面辐照聚焦光栅的各衍射级次走向  
Fig. 3. (color online) The light path of each diffraction order for focus grating irradiated from input surface.

根据光栅方程,  $T_2, T_{-1}$  每次到达光栅面时会有 2 个级次的透射光, 由于光栅刻蚀很深, 故透射能量份额相对 BSG 来说会更多些, 故可预见会在取样光和透射光的聚焦点附近呈现一系列等间距的衍射斑. 类似分析发现, 光栅面全反射次数取决于聚焦光栅厚度、元件宽度尺寸和全反射角, 相比于取样光栅, 聚焦光栅厚度约 15 mm, 且两个级次衍射角也大, 故间距分布相对稀疏, 可由 (3) 式分母部分算得约为 51.22 mm. 从光路走向来看, 对  $T_0$  聚焦靶点和  $R_1$  取样探测点可能存在的影响主要是  $T_2$  在光栅两侧的透射斑.

### 3 取样光栅全反射级次的实验测量

我们使用上海高功率激光装置上 BSG 取样光栅进行离线实验测量, 采用如图 4 所示的类似在线系统的末端光路, BSG 元件尺寸约 360 mm, 其光栅刻蚀面约 340 mm. 首先需要指出, BSG 制作完

毕后, 经过短时氢氟酸刻蚀以提高抗激光破坏阈值, 酸蚀后占空比变小故取样率实测约为 0.2%, 相对设计值降低了约 0.1%. 根据取样光栅衍射特点, 绝大部分能量由  $T_0$  级透射打击到目标靶点,  $T_1$  级次为汇聚光束将,  $T_{-1}$  为发散光束, 分别在这 3 个出射区域设置功率计探头和单反相机, 对各级次进行功率测量和光斑拍摄. 为考察镀膜反膜的影响, 对同一块光栅镀膜前后分别进行了测量. 图 4 中, 激光光源使用的是 CrystalLaser 公司的 QL-351 紫外激光器, 激光头附近出射功率约 25 mW, 功率计使用的是量程 2.3  $\mu$ W—230 mW 的 Thorlabs 功率计组件, 佳能单反相机拍摄暗场照片, 扩束器输出约  $\phi 40$  mm 平行光辐照在透镜和 BSG 元件中心附近. 虽然 BSG 背反衍射级次未在图中标明, 不过后续仍会进行探测和分析.

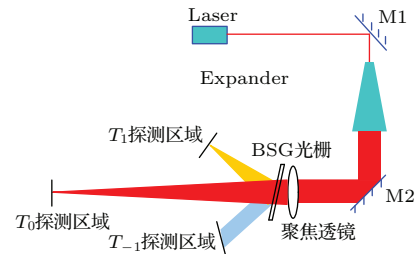


图4 (网刊彩色) BSG 取样光栅实验测试光路图  
Fig. 4. (color online) The optical path diagram and scheme for testing BSG.

### 3.1 镀膜前取样光栅各衍射斑测量

$R_0$  与前表面反射斑相距太近, 故无法使用功率计分辨测定;  $R_{-1}$  从前表面折出后, 附近无其他衍射级次, 功率计测得出射光功率为 31.65  $\mu$ W. 设置的 4 个接收屏上各光斑功率测量结果如表 2 所列. 因 2 块反射镜、扩束器、透镜和 BSG 等 5 个器件的反射损耗, 故 BSG 取样后主激光  $T_0$  测得约 16 mW, 低于激光头附近出射功率 25 mW. 衍射斑间距采用钢尺测量即能反映光栅衍射规律.

图 5 (a), (b), (c) 分别为  $T_1, T_{-1}$  和  $R_1$  附近三个接收屏. 因  $\phi 40$  mm 激光聚焦辐照在 BSG 中心附近, 故  $d \sim 170$  mm, 代入 (3) 式计算  $R_2$  将会在光栅体内发生  $N = 7$  次全反射. 图 5 (a) 为 Screen<sub>0</sub> 拍摄光斑图片, 最左的强斑为目标取样光斑  $T_1$ , 距其右约 6 mm 的次强斑显然是  $R_1$  部分反射回到光栅面的透射斑, 其后约 24 mm 等间距分布 7 组衍射

斑,较清晰的斑点由图2分析可知为 $R_2$ 透射斑.仔细观察附近仍有一个弱斑,计算分析来看,由于光栅未镀膜导致 $R_1$ 强度偏大,再加上前表面反射回来的份额也有不少,故计算可知 $R_1$ 部分反射光在光栅面会产生与 $R_2$ 走向完全平行的全反级次,因此附近呈现有规律的弱斑,能被单反相机20—30 s积分拍摄到.图5(b)为Screen<sub>-1</sub>拍摄图,最右强斑为 $T_{-1}$ ,次强斑易知为 $R_{-1}$ 部分反射回到光栅面的透射斑;类似地,未镀膜时 $R_{-1}$ 在介质内会存在多次强度递减的反射,故左端弱斑为 $R_{-1}$ 第二

次从前表面折回到光栅面后的透射斑.图5(c)为Back-screen拍摄图,最右端强点为 $R_1$ 折射出前表面的光斑,后7个为全反级次 $R_2$ 在光栅面产生背向衍射并折射出前表面的光斑(对应图2自前表面出射的橙线),还隐约拍摄到最左有一个模糊点,分析可知此时全反级次 $R_2$ 大部分辐照到光栅有效边界外部,故背反衍射轮廓有缺失并相当微弱.此外,沿BSG表面方向平移元件使得 $\phi 40$  mm激光辐照偏离BSG中心,能观测到衍射斑数 $N$ 随 $d$ 变化而相应变大或变小.

表2 镀膜前4个接收屏上各斑点的功率和间距  
Table 2. The power and distance of each spot in 4 screens for uncoated grating.

接收屏	主级次功率/ $\mu\text{W}$	全反级次 $R_2$ 透射功率/ $\mu\text{W}$	全反级次 $R_2$ 透射间距/mm	部分反射光透射功率/ $\mu\text{W}$	部分反射光透射距离/mm
Screen <sub>0</sub>	( $T_0$ ) $15.96 \times 10^3$	No response	35	NA	NA
Screen <sub>1</sub>	( $T_1$ ) 32.53	0.12	26	( $R_1$ ) 2.38	( $R_1$ ) 6
Screen <sub>-1</sub>	( $T_{-1}$ ) 31.87	NA	NA	( $R_{-1}$ ) 0.77	( $R_{-1}$ ) 7
Back-screen	( $R_1$ ) 24.00	0.22	24	NA	NA

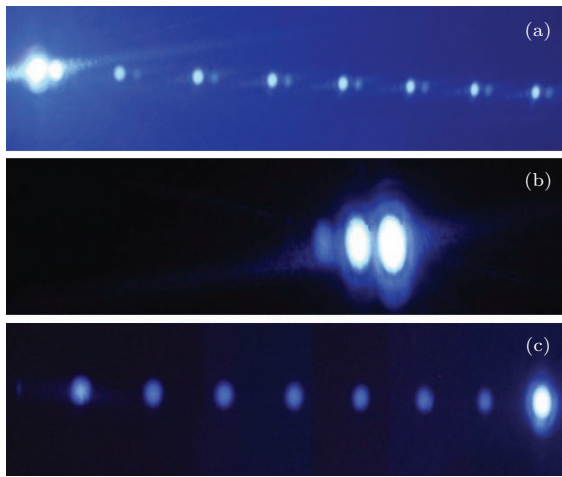


图5 单反相机暗场拍摄三个接收屏的衍射斑 (a) Screen<sub>1</sub>; (b) Screen<sub>-1</sub>; (c) Back-screen

Fig. 5. Three dark-field photos taken by SLR camera: (a) Screen<sub>1</sub>; (b) Screen<sub>-1</sub>; (c) Back-screen.

### 3.2 镀Sol-Gel减反膜后取样光栅各衍射斑测量

光栅镀减反膜已有相关理论研究工作<sup>[23]</sup>,镀膜后光学件单面透射率能提高到 $>99.5\%$ ,不过减反膜会填充后表面的光栅刻槽.理想情况下,槽深和槽型都不变,仅仅是占宽比会因填充而有改变.但是实际上,Sol-Gel膜镀制过程中,因为表面张力等影响,覆盖在光栅面膜层从微观上来看,并不均匀,甚至可以说有些随机的小波纹.首先光栅狭缝

谷底被填充多,其次光栅脊线两侧膜层也是越深越厚,原陡峭矩形刻槽会被填充为梯形或正弦型,同时细节上会有随机起伏,如图6所示镀三倍频减反膜后,槽深从约40 nm变浅为约20 nm,脊线变宽且不规则,陡边性变差,故取样率必然会降低.

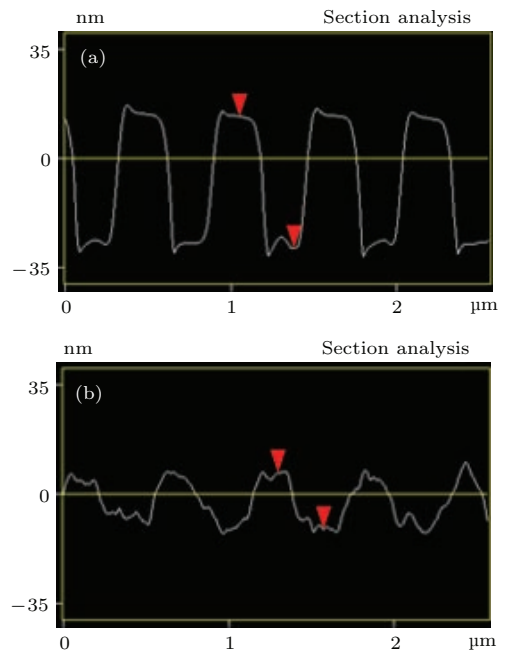


图6 镀三倍频减反膜前(a)和后(b)小样光栅的原子力显微镜槽型结果

Fig. 6. The sample grating groove image taken by atomic force microscope, before (a) and after (b)  $3\omega$  AR film coated.

图 7(a), (b), (c) 分别为  $T_1$ ,  $T_{-1}$  和  $T_0$  附近三个接收屏. 镀膜后 Back-screen 拍摄光斑除了强度低, 形态分布基本与图 5(c) 类似, 故这里不再给出. 图 7(a) 与未镀膜图 5(a) 比较可见, 距  $T_1$  约 6 mm 的  $R_1$  部分反射光变弱很多, 另外 7 个  $R_2$  全反射斑附近不再有弱斑, 源于镀膜后  $R_1$  变弱且前表面折反比增大, 故大部分  $R_1$  首次折射到前表面外部, 几乎不再发生多次折反; 此外可以发现, 激光在每个全反点透射出去意味着不同的光程, 故透射斑聚焦形态也有差异, 从竖直椭圆渐变为圆形, 再渐变为水平椭圆, 类似于焦前到焦后过程, 这与 BSG 取样光的聚焦特性是符合的. 图 7(b) 与未镀膜图 5(b) 比较可见, 只有 2 个透射斑, 原左端斑点已不可见, 也是源于镀膜后  $R_{-1}$  变弱且前表面折反比增大. 图 7(c) 展示了焦点附近接收屏 Screen<sub>0</sub> 拍摄图, 已使用光阑挡住了主激光  $T_0$ . 如前所述  $R_2$  的透射 2 级仍会在焦点附近呈现等间距分布, 尽管暗场环境中视觉模糊可见或者单反相机积分拍摄

到, 但是其透射强度过于微弱, 功率计无法响应, 根据表 1 推算, 其相对主激光  $T_0$  的对比度约为  $10^{-8}$ .

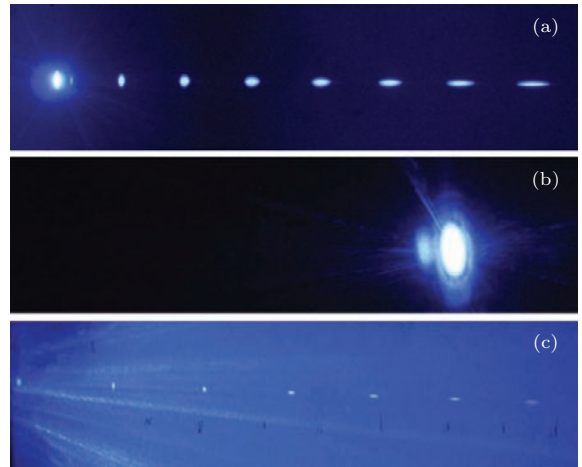


图 7 镀膜后, 单反相机暗场拍摄三个接收屏的衍射斑 (a) Screen<sub>1</sub>; (b) Screen<sub>-1</sub>; (c) Screen<sub>0</sub>  
 Fig. 7. Three dark-field photos taken by SLR camera after  $3\omega$  AR coated: (a) Screen<sub>1</sub>; (b) Screen<sub>-1</sub>; (c) Screen<sub>0</sub>.

表 3 镀膜后 4 个接收屏上各斑点的功率和间距  
 Table 3. The power and distance of each spot in 4 screens after coated by AR film.

接收屏	主级次功率/ $\mu\text{W}$	全反级次 $R_2$ 透射功率/ $\mu\text{W}$	全反级次 $R_2$ 透射间距/mm	部分反射光透射 功率/ $\mu\text{W}$	部分反射光透射 距离/mm
Screen <sub>0</sub>	( $T_0$ ) $17.28 \times 10^3$	No response	35	NA	NA
Screen <sub>1</sub>	( $T_1$ ) 16.80	0.09	26	( $R_1$ ) 0.38	( $R_1$ ) 6
Screen <sub>-1</sub>	( $T_{-1}$ ) 16.13	NA	NA	( $R_{-1}$ ) 0.44	( $R_{-1}$ ) 7
Back-screen	( $R_1$ ) 4.50	No response	24	NA	NA

综合光学元件的双面透射, 镀膜后打靶  $T_0$  级主激光能量约 98.5%—99%, 相比未镀膜的约 92%, 有效打靶激光能量得到较大幅度提高, 不过镀膜也带来了槽深变浅、占空比变小、槽型变平缓等影响. 根据槽型对取样效率影响的理论分析可知 [1,2,19,23], 衍射到高级次的能量也即目标取样效率会下降. 实验测量来看, 镀膜后取样效率下降为约为 0.1%. 功率计探测结果表明,  $R_{-1}$  为  $6.12 \mu\text{W}$ , 相比未镀膜时  $31.65 \mu\text{W}$  下降很多. 4 个接收屏测量结果如表 3 所列, 各衍射斑的相对距离没有变化, 比较表 2 和表 3 镀膜前后的功率探测结果有:

- 1) 透射  $T_0$ , 镀膜后功率增加约 1.32 mW, 相比镀膜前提升 8.27%, 与理论预测约 7.5% 相比在测量误差范围内;
- 2) 透射  $T_1$ , 功率从镀膜前约  $32.5 \mu\text{W}$  下降到约  $16.8 \mu\text{W}$ , 几乎下降约 1 倍, 与理论分析接近;

- 3) 透射  $T_{-1}$ , 与  $T_1$  类似, 下降约 1 倍, 与理论分析接近;
- 4) 反射  $R_1$ , 功率从镀膜前  $24 \mu\text{W}$  下降为  $4.5 \mu\text{W}$ , 事实上镀膜前表面  $R_1$  折反比会更高, 因此从数据上估计镀膜后背反衍射效率下降约为 5—6 倍;
- 5) 全反  $R_2$ , 其透射到 Screen<sub>1</sub> 上的强度稍有下降.

#### 4 降低全反级次影响的优化设计和对策

首先镀减反膜是一必备对策, 能大幅提高打靶主激光透射率接近 99%. 此外, 无论是 NIF 和 LMJ 上非光栅面的单面镀膜, 还是上海高功率激光装置



上BSG的双面镀膜,都是降低全反级次和部分折反级次能量的有效办法, >5倍能量降低对于附近其他光学元件或散射吸收器件来说都是有利的,并且能减少对目标取样光探测能量和时间波形的干扰. 此外,双面镀Sol-Gel三倍频膜时可先估计光栅槽型填充的影响,比如在设计制作时特意刻深约20 nm,镀膜填充完毕刻槽相应变浅约20 nm,如此光栅取样率就能与目标需求值接近.

其次,最容易想到的是增大刻线密度使得光栅周期为亚波长,将只有0级光,但无法满足BSG和聚焦光栅的功能需求. 因此需要优化设计光栅尽量避免出现全反射级次或者使得这些级次尽量偏离目标靶点或者探测点,同时也要使得部分折反级次也能有一定偏离距离. 对于浅刻蚀BSG取样光栅来说,若刻线密度基本不变,由光栅方程可算得入射角为 $21.8^\circ$ 时,背反衍射级次 $R_2$ 自前表面折射出去,此时 $R_{-1}$ 将成为全反级次,不过因为它在另外Screen $_{-1}$ 一侧,故不会影响布置在 $T_1$ 附近的探测设备. 若同时允许选择角度和刻线密度,那么使得只存在 $R_1$ 和 $R_{-1}$ 的便利条件是正入射 $\theta = 0$ ,且刻线密度 $> 2100$ 线/mm,此时 $R_1$ 和 $R_{-1} > 30^\circ$ ,8 mm厚度条件下与目标探测点分开 $> 9.2$  mm. 对于深刻蚀聚焦光栅来说,由于需要采用Littrow角度入射,能方便调节的参数是光栅厚度,再结合细微调节光栅刻线密度和入射角,使得可能有影响的 $T_2$ 透射斑偏离靶点和探测点有一定安全距离比如 $> 5$  mm.

最后,优化光路结构设计以规避高级次聚焦鬼像点,并相应地设置散射或吸收器件. 对于高功率激光装置上光栅应用而言,通过本文理论分析和实验探测来看,除了目标级次,必然还会有其他衍射级次存在. 对于会聚打靶而言,这些级次同样会聚到附近某些位置形成鬼像点,从而对其他光学元件或者机械侧壁造成破坏. 全反级次透射斑和部分折反级次都会有影响,故一方面在光路设计排布上尽量避开这些级次的聚焦点,另一方面在机械侧壁相应位置设置激光散射或吸收器件以避免打击金属溅射杂质颗粒污染光学元件. 如果系统设计实在无法规避全反级次,由于全反级次绝大部分能量终究会从光栅侧面溢出,其危害比透射斑要大,我们可使用两种方法来进行防护: 1) 在光栅基体加工时,对应侧边打磨成磨砂面,酸蚀处理后成为平滑的毛玻璃形态,即可散射掉辐照到侧边的全反光,比如

BSG光栅 $R_2$ 传输方向的侧边,聚焦光栅 $T_{-1}$ 和 $T_2$ 两侧边; 2) 若光栅侧边都是抛光的,那么就要在光栅装夹框内侧设置散射或吸收器件,将溢出全反光散射或吸收掉,避免破坏装夹框的金属材料.

## 5 结 论

本文针对高功率激光装置上所用的透射光栅,对其体内各衍射级次尤其是全反射级次做了理论分析和实验研究,发现了全反级次有规律、等间距的在光栅两侧出现多套衍射斑. 由此分析阐明了高功率激光辐照下引发侧壁金属框破坏以及影响取样探测的缘由,最后给出了如何消除或规避全反射级次和其他冗余级次影响的方法,为光栅在高功率激光装置上更好地使用打下了良好基础.

感谢苏州大学和中国科技大学制作刻蚀BSG取样光栅.

## 参考文献

- [1] Liu Q, Wu J H, Li C M 2005 *Laser Technol.* **29** 398 (in Chinese) [刘全, 吴建宏, 李朝明 2005 激光技术 **29** 398]
- [2] Chen D W 2006 *Laser J.* **27** 28 (in Chinese) [陈德伟 2006 激光杂志 **27** 28]
- [3] Luce J 2011 *Proc. SPIE* **8130** 813002
- [4] Liu H F 2006 *M. S. Dissertation* (Hangzhou: Zhejiang University) (in Chinese) [留浩飞 2006 硕士学位论文 (杭州: 浙江大学)]
- [5] Liu H J, Liu L Q, Su J Q, Hu D X, Zhou W, Zhao J P, Wang W Y, Mo L, Jiang X Y, Jiang X J, Zhang K, Zhu Q H, Yu H W, Jing F 2008 *Acta Opt. Sin.* **28** 976 (in Chinese) [刘红婕, 刘兰琴, 粟敬钦, 胡东霞, 周维, 赵军普, 王文义, 莫磊, 蒋新颖, 蒋学军, 张昆, 朱启华, 於海武, 景峰 2008 光学学报 **28** 976]
- [6] Li L F 1996 *J. Opt. Soc. Am. A* **13** 1870
- [7] Li L F 1997 *J. Opt. Soc. Am. A* **14** 2758
- [8] Bay Anheshig 2004 *Ph. D. Dissertation* (Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics) (in Chinese) [巴音贺希格 2004 博士学位论文 (长春: 长春光机所)]
- [9] Wang X D, Wang X, He Y L, Zheng H B, Tan J C, Ding D Y, Zheng G W 2010 *Chin. Phys. B* **19** 074215
- [10] Liu Y D, Gao C Q, Gao M W 2008 *Chin. Phys. B* **17** 1769
- [11] Fu K X, Wang Z H, Wen J, Zhou C H 1998 *Acta Opt. Sin.* **18** 870 (in Chinese) [傅克祥, 王植恒, 文军, 周传宏 1998 光学学报 **18** 870]
- [12] 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]



- [13] Wang Z H, Fu K X, Wen J, Yuan J H 1998 *Chin. J. Lasers* **A25** 270 (in Chinese) [王植恒, 傅克祥, 文军, 袁景和 1998 中国激光 **A25** 270]
- [14] Zhao D F, Wang L, Lin Z Q, Shao P, Ji L L, Cai Z J, Wu R, Dai Y P, Zhu J Q 2011 *Chin. J. Lasers* **38** 0702001 (in Chinese) [赵东峰, 王利, 林尊琪, 邵平, 季来林, 蔡志坚, 郭融, 戴亚平, 朱健强 2011 中国激光 **38** 0702001]
- [15] Rao H L 2013 *Ph. D. Dissertation* (Hefei: University of Science and Technology of China) (in Chinese) [饶欢乐 2013 博士学位论文 (合肥: 中国科学技术大学)]
- [16] Rao H L, Liu Z K, Liu Y, Jiang X L, Qiu K Q, Xu X D, Hong Y L, Fu S J 2013 *High Power Laser and Particle Beams* **25** 1609 (in Chinese) [饶欢乐, 刘正坤, 刘颖, 蒋晓龙, 邱克强, 徐向东, 洪义麟, 付绍军 2013 强激光与粒子束 **25** 1609]
- [17] Anheshig B, Qi X D, Tang Y G 2003 *J. Optoelectron. Laser* **14** 1021 (in Chinese) [巴音贺希格, 齐向东, 唐玉国 2003 光电子·激光 **14** 1021]
- [18] Fu K X, Wang Z H, Zhang D Y, Wen J, Tang J 1997 *Acta Opt. Sin.* **17** 1652 (in Chinese) [傅克祥, 王植恒, 张大跃, 文军, 唐晋 1997 光学学报 **17** 1652]
- [19] Shang W L, Yang J M, Zhao Y, Zhu T, Xiong G 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 094212 (in Chinese) [尚万里, 杨家敏, 赵阳, 朱托, 熊刚 2011 物理学报 **60** 094212]
- [20] Shan W L, Zhu T, Xiong G, Zhao Y, Zhang W H, Yi R Q, Kuang L Y, Cao L F, Gao Y L, Yang J M, Zhao Y D, Cui M Q, Zheng L, Han Y, Zhou K J, Ma C Y 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 034216
- [21] Chai L Q, Yang L M, Xu Q 2002 *High Power Laser and Particle Beams* **14** 270 (in Chinese) [柴立群, 杨李茗, 许乔 2002 强激光与粒子束 **14** 270]
- [22] Gao F H 2003 *Ph. D. Dissertation* (Chengdu: Sichuan University) (in Chinese) [高福华 2003 博士学位论文 (成都: 四川大学)]
- [23] Liu Q, Wu J H 2007 *High Power Laser and Particle Beams* **19** 75 (in Chinese) [刘全, 吴建宏 2007 强激光与粒子束 **19** 75]
- [24] Cavailler C, Fleurot N, Di-nicola J M 2005 *Proc. SPIE* **5580** 443

# Total internal reflection orders in transmission grating\*

Wu Rong<sup>1)†</sup> Tian Yu-Ting<sup>2)</sup> Zhao Dong-Feng<sup>1)</sup> Li Da-Wei<sup>1)</sup> Hua Neng<sup>1)</sup> Shao Ping<sup>1)</sup>

1) (National Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

2) (University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

( Received 15 October 2015; revised manuscript received 12 November 2015 )

## Abstract

In a current high-power laser system, transmission grating has been used to sample, separate and focus laser beam. Under high power laser irradiation, besides the 0-order shooting beam and target sampling beam, the detrimental influence of other diffraction orders should be taken into consideration seriously. These useless orders may damage other nearby optical elements and mechanical devices, disturb and confuse the measurement of time pulse and near/far-field intensity. Especially the total internal diffraction order will lead to some series diffraction patterns, causing the above problems. First, relevant theoretical calculation and analysis are carried out for transmission grating (including beam sample grating and focusing grating), which can predict and indicate these inconspicuous diffraction orders. These orders appear on four receiving screens regularly and periodically, and the periodic distance between them is determined by ray-tracing draft. Second, the phenomenon of total internal reflection order is observed and measured by combining with anti-reflection film. The measured periodic spacings on three screens are 24 mm, 26 mm and 35 mm, respectively. Moreover, energy intensities of these redundant orders are measured finely, which shows that their contrasts or SNRs to 0-order main laser is in a range of  $10^{-8}$ – $10^{-4}$ ). Finally, some appropriate and effective approaches to eliminating or avoiding total internal reflection and other useless orders are proposed and discussed, which include 1) coating by anti-reflection film with pre-deep etching; 2) optimizing the grating design to make redundant orders far from target spot; 3) placing laser scattering or absorbing devices at corresponding position to avoid being damaged by the side-leakage energy and ghost image of total internal reflection and other redundant orders.

**Keywords:** diffraction grating, total internal reflection, beam sampling grating, ghost image

**PACS:** 42.40.Eq, 42.25.Gy, 42.25.Fx, 42.15.-i

**DOI:** 10.7498/aps.65.054202

---

\* Project supported by Major Project of the National Science and Technology of the Ministry of Science and Technology of China (Grant No. GFZX0205010405.2) and the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11204331).

† Corresponding author. E-mail: [46438131@qq.com](mailto:46438131@qq.com)