

软 X 激光反射输出镜的近似理论设计

袁利祥 范正修

(中国科学院上海光机所, 上海 201800)

提要 本文采用标量区近似理论设计软 X 激光反射输出镜, 分析其衍射特性, 对影响输出效率的因素进行了讨论和分析。

关键词 软 X 激光输出镜, 软 X 光光栅, 多层膜, 近似理论

Design of soft X-ray laser reflective output multilayer mirror using an asymptotic theory

Yuan Lixiang, Fan Zhengxiu

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800)

Abstract The asymptotic theory of diffraction gratings in the scalar domain is used to design the soft X-ray laser reflective output multilayer mirror, whose diffractive characters are analysed. The factors affecting the output efficiency are also analysed and discussed.

Key words soft X-ray laser output mirror, X-ray gratings, multilayer films, asymptotic theory

1 引言

软 X 激光腔由软 X 增益介质与垂直入射多层膜反射镜和分光镜组成。软 X 激光输出镜通常是两种形式, 如图 1(a)、(b) 所示, 由于 X 波段的吸收损耗很大, 图 1(a) 的输出光效率比图 1(b) 要低得多, 但前者工艺上较易实现。后者由光栅和多层膜组成, 有振幅调制型和位相调制型两种, 位相型的衍射效率比振幅型高。位相型是先在基底上刻蚀光栅, 再在上面镀多层反射膜得到, 因此我们选择设计由位相型光栅和多层膜构成的软 X 激光输出镜。

微分法是研究 X 波段衍射光栅的唯一严格可行的电磁理论^[1,2], 但微分法处理光栅时仍然显得相当复杂, 计算上也很费时间。Erwin G. Loewen 等人^[3]针对金属光栅提出了一种适用于 X 波段的标量区近似理论。所谓标量区即是这个区域内近似理论与严格电磁理论有完全相同的结论, P 偏振态与 S 偏振态的特性也完全一致。近似理论适用条件是: (1) 近正入射; (2) 光栅深度 $h \rightarrow 0$; (3) λ/d 很小 (d 为光栅周期)。我们利用这种近似理论设计了几种类型的软 X 光光栅, 分析以此形成的激光输出镜的衍射特性, 讨论工艺上实现的可能性, 并分析影响衍射效率的误差。

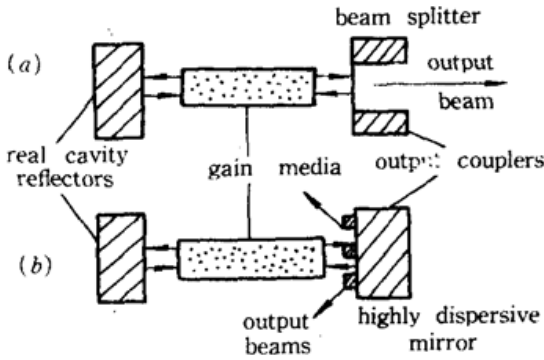


Fig. 1 Two new X-ray optical components, the X-ray beamsplitter, and the HDMM, can be used as X-ray laser output coupler

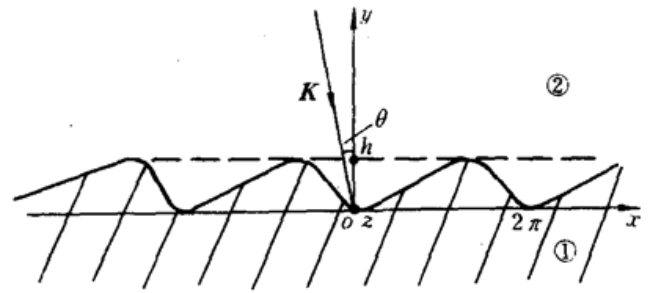


Fig. 2 Schematic representation of the grating and notations

2 近似理论

模型见图 2。选 xyz 坐标, 光栅截面满足 $y = h \cdot g(x)$, $\max[g(x)] - \min[g(x)] = 1$ 。

为方便起见, 光栅周期设为 2π (不影响衍射效率)。区域(1) 为理想导电光栅, (2) 为真空。设入射平面波为单位振幅, 波矢 K ($k = |K| = 2\pi/\lambda$) 位于 xoy 平面内, P 偏振态 ($E // z$)。

$$E^i_{(x,y)} = \exp\{ik[(x\sin\theta - y\cos\theta)]\} \quad (1)$$

在光栅槽上部产生的衍射场可表示成瑞利展开式

$$E^d_{(x,y)} = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} B_n \exp(i\beta_n y) \exp(i\alpha_n x) \quad (2)$$

其中

$$\alpha_n = n + k\sin\theta \quad (3)$$

$$\beta_n = (k^2 - \alpha_n^2)^{1/2} \quad \text{或} \quad i(\alpha_n^2 - k^2)^{1/2} \quad (4)$$

当 $h \rightarrow 0$ 时, 不管什么外形的光栅瑞利展开式在光栅表面上部均有效^[3]。

利用边界条件: 当 $y = h \cdot g(x)$ 时 $E(x, y) = 0$, 可得:

$$E^i_{(x, h \cdot g(x))} + E^d_{(x, h \cdot g(x))} = 0$$

$$\sum_{n=-\infty}^{+\infty} B_n \exp[inx + i\beta_n \cdot hg(x)] = -\exp[-i\beta_0 hg(x)]$$

设 $\omega = k \cdot h$, 对于一给定的 n , 因为 θ 很小, β_0 和 β_n 基本上都等于 k , 所以上式变为:

$$\sum_n B_n \exp(inx) = -\exp[-i2\omega g(x)]$$

这样, B_n 可以看成是一个已知函数的傅里叶展开式系数, 所以

$$B_n = -1/2\pi \int_0^{2\pi} \exp\{-i[nx + 2\omega g(x)]\} dx \quad (5)$$

衍射效率 $\zeta_n = |B_n|^2$ 。

说明: (1) 关于 S 偏振态, 同样可求得 B_n , 这时 B_n 与 P 偏振态时符号相反, 表达式一致, 因此效率 ζ_n 等于 ζ_n ; (2) 虽然是近似理论, 但它是从麦克斯韦方程组开始推出的, 因此它在所属标量区内是严格的。

3 多层膜光栅的设计与特性

金属光栅的绝对反射效率由光栅的衍射效率乘上反射率得到, 而在 X 波段所有金属的反

射率极低，故在光栅上需镀多层反射膜，以提高反射率，光栅和多层膜可以分别考虑^[4]。

相位光栅作为 X 激光反射输出镜，要求它除输出光以外，还要反馈部分光回到腔内，以使之继续增益放大，形成双程、叁程、四程放大输出。简单的计算表明，当每次输出光效率与返回光效率相当时，总输出光能量达到最大。

我们不妨针对类氦锗等离子体 3P - 3S 跃迁产生激光 23.2 nm 和 23.6 nm 两强峰，设中心波长 λ 为 23.4 nm，考虑光栅具体结构。

3.1 正弦形光栅

轮廓曲线 $y = (h/2)\sin x$, $g(x) = (1/2)\sin x$ 。有资料表明 $h/d < 0.1426$ 时，瑞利展开式是有效的。此时 d 为实际光栅周期。

$$\text{若用 } -1 \text{ 级, } B_{-1} = - (1/2\pi) \int_0^{2\pi} \exp[i(x - \omega \sin x)] dx = - J_1(\omega),$$

$J_1(\omega)$ 为一阶贝塞尔函数。 $\zeta_{-1} = |B_{-1}|^2 = |J_1(\omega)|^2$ 。

当 $\omega = 1.8412$ 时, $\zeta_{-1} = \zeta_{-1\max} = 33.8\%$, 同时 $\zeta_0 = |J_0(1.8412)|^2 = 9.97\%$ 。

若用 -2 级, $\zeta_{-2\max} = 23\%$, 此时 $\zeta_0 = 10\%$, $\zeta_{-1} \approx 10\%$ 。

正弦形的衍射效率偏低，且短波长正弦形光栅制作也困难，因此一般不以正弦形作激光输出镜。

3.2 矩形光栅 (lamellar gratings)

当 $h/d < 0.05$ 时，近似理论与严格电磁理论解精确一致^[3]。如图 3 所示，轮廓外形满足

$$\begin{cases} g(x) = 0, & \text{当 } 0 < x < c \text{ 时} \\ g(x) = 1, & c < x < 2\pi \end{cases}$$

代入 (5)，可得 $\zeta_{-n} = |B_{-n}|^2 = (4/n^2\pi^2)\sin^2[n(c/2)]\sin^2(\omega)$ (当 $n \neq 0$ 时) 及 $\zeta_0 = |B_0|^2 = (1/4\pi^2)|c + (2\pi - c)\exp(-i2\omega)|^2$ (当 $n = 0$ 时)。

若用 -1 级，为使 ζ_{-1} 与 ζ_0 相当，且 ζ_{-1}, ζ_0 尽可能大，可取 $c = \pi, \omega = 1.32\pi$ ，即 $h = 15.44$ nm，此时 $\zeta_0 = 28.8\%, \zeta_{-1} = 28.8\%, \zeta_{+1} = 28.8\%, \zeta_{-1} : \zeta_0 = 1 : 1$ ，作腔合理。

光栅参数： $h = 15.44$ nm，线空比 1 : 1，若选实际光栅周期， $d = 500$ nm，即 2000 条 /mm，一级衍射角 $\theta = 2.68^\circ$ ； $d = 1 \mu\text{m}$ ，即 1000 条 /mm，一级衍射角 $\theta = 1.34^\circ$ 。光栅周期 d 的大小只影响衍射角，不影响衍射效率。

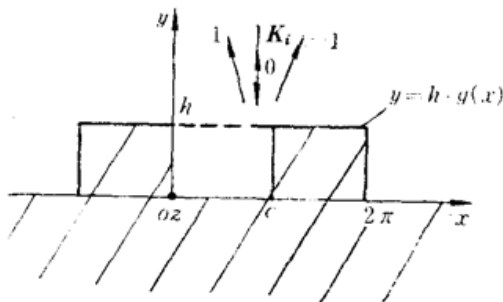


Fig. 3 Schematic representation of the profile of a lamellar grating, with groove width c and height h

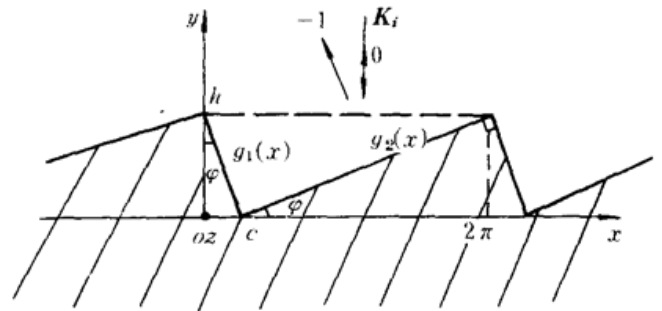


Fig. 4 Schematic representation of profile of a blazed grating, with blazed angle 1° and apex 90°

3.3 阶梯形闪耀光栅 (blazed gratings)

当 $h/d < 0.018$ 时，近似理论精确成立。如图 4 所示，

$$\begin{cases} g_1(x) = 1 - x/c & 0 < x < c \\ g_2(x) = (x - c)/(2\pi - c) & c < x < 2\pi \end{cases}$$

代入(5)式,可得

$$\zeta_n = [2 - 2\cos(nc - 2\omega)]\{2\omega/[(nc - 2\omega)(2n\pi - cn + 2\omega)]\}^2$$

若使用-1级及零级,取闪耀角 $\psi = 1^\circ$,只须 $\omega = \pi/2$,即 $h = \lambda/4 \approx 5.8 \text{ nm}$,可得 $\zeta_{-1} = 40.57\%$, $\zeta_0 = 40.57\%$, $\zeta_{-2} = 4.32\%$, $\zeta_{+1} = 4.69\%$, $\zeta_{-1} : \zeta_0 = 1 : 1$ 。

阶梯形光栅顶角为 90° ,从几何关系可得实际光栅周期 $d = 335.2 \text{ nm}$ 。

由上面三种情况可以看出,闪耀阶梯光栅的效率最高。当闪耀光栅使用在激光腔中时,入射光如图4所示 K_i 方向入射(注意-1级并不是主闪耀级),由 $d(\sin\theta + \sin i) = m\lambda$ 可得 $\theta_{-1} = -4^\circ$, $\theta_0 = 0^\circ$ 。故利用零级光作为反馈,-1级衍射光作为输出光。

为提高反射率,在光栅上需镀多层高反射膜,这里膜系材料的选择很重要,因为材料的光学常数是影响反射率最直接的因素。一般说来,为使反射率高,两种材料的折射率差应尽可能大,在折射率不能满足的条件下,可选择消光系数差大的材料对。我们选择W和Si,从衍射动力学角度出发,遵循布拉格定理,对薄膜厚度比进行优化,得到对于20层周期性结构,当 $D = d_w + d_{\text{Si}} = 12.67 \text{ nm}$, $d_w/D = 0.28$ 时,有正入射最大反射率 $R_{\text{max}} = 21.82\%$ 。多层膜最大反射率值对激光输出镜的设计思想并不是最主要的,选择不同材料的多层膜,反射率值就不同,有最新光学常数表明,Mo/Si多层膜在23.4 nm反射率最大值可达25.35%。反射效率为膜系反射率与光栅衍射效率的乘积^[4,5]。于是,对于上述矩形结构的光栅零级和-1级反射效率为 $\eta_0 = \eta_{-1} = 21.82\% \times 28.8\% = 6.28\%$ 。对于闪耀阶梯光栅,零级和-1级反射效率为 $\eta_{-1} = \eta_0 = 8.85\%$ 。但根据目前国内实验条件,刻蚀闪耀角 1° 、深度为6.0 nm左右的闪耀阶梯光栅极其困难。国外对于X波段正入射闪耀光栅也只见理论,器件结果也未见报道。

4 误差分析

软X激光反射输出镜主要由光栅和多层膜构成,所以误差也主要来自这两个方面。影响激光输出镜反射效率的主要因素有光栅制作的深度误差、线空比误差、图形畸变、光栅表面及多层膜的表面粗糙度及薄膜的界面渗透和厚度误差。

4.1 由于X光波长很短,故深度误差对衍射特性影响很大。几种 h 误差对光栅衍射效率的影响计算结果见表1。当 $\Delta h = 2.0 \text{ nm}$ 时,衍射特性已面目全非,所以如何控制 h 精度是软X激光腔成败关键之一。

Table 1 Effect of h error on the diffractive efficiency of gratings

Δh	+1.0 nm	-1.0 nm	+2.0 nm	-2.0 nm	+3.0 nm	-3.0 nm
h	16.5 nm	14.5 nm	17.5 nm	13.5 nm	18.5 nm	12.5 nm
ζ_0	7.82%	53.2%	0	7.92%	6.1%	95.5%
$\zeta_{\pm 1}$	37.4%	18.9%	40.56%	8.8%	38.0%	1.8%

4.2 正入射软X光光栅由全息曝光和离子束刻蚀达到,图形畸变及线空比误差往往与全息掩膜的高度有关,太薄或太厚都会使刻蚀后光栅轮廓发生畸变,刻蚀方向不正确也会使图形发生畸变。刻蚀前应清楚知道掩膜形状。对正弦形光栅的研究表明,即使很小的图形畸变,都会使反射率影响60%左右。

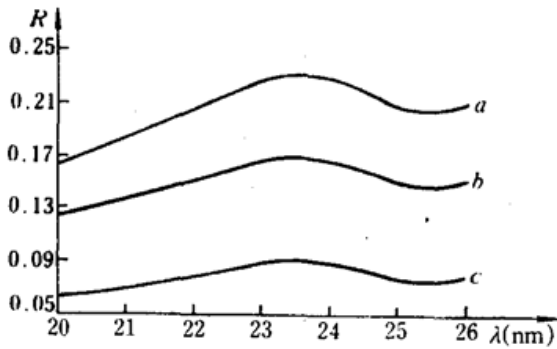


Fig. 5 Effect of the surface roughness on the reflectance R . (a) : $\sigma = 0$, (b) : $\sigma = 1.0 \text{ nm}$, (c) : $\sigma = 1.8 \text{ nm}$, $N = 20$

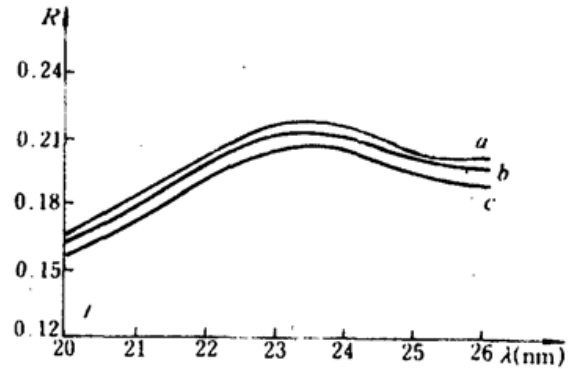


Fig. 6 Effect of the permeation interface on the reflectance R of X-ray multilayers. (a) : $d_p = 0$, (b) : $d_p = 1.0 \text{ nm}$, (c) : $d_p = 1.8 \text{ nm}$, $N = 20$

4.3 粗糙度在短波长光学中是影响非常大的因素。但实际表面总是粗糙的,它来自几个方面:基底抛光不够、光栅刻蚀及薄膜生长过程中形成的附加粗糙度、表面还有吸附污染造成的附加粗糙度。这些综合因素造成实际反射系数下降。我们对 20 层 W/Si 膜系的影响结果的研究见图 5,对波长 23.4 nm,当粗糙度为 1.0 nm 时,反射率下降为原来的 3/4,而粗糙度为 1.8 nm 时,下降为原来的 40%。

4.4 由于实际的两种薄膜材料之间总是存在相互扩散,因此多层膜间的界面并不是尖锐的,而是一个光学常数渐变的区域,称为过渡层。X 光薄膜本来就很薄,只有几个纳米,因此几个纳米的界面效应对总反射率影响很大,图 6 给出了几种过渡区对薄膜反射率的影响的研究结果。另外,多层膜之间的粗糙度也可作为界面渗透处理,因为两者效果都是进入相邻薄膜界面。

4.5 厚度的随机误差在多层薄膜制备中总是存在的,这与控厚技术与经验有关,在膜层厚度中引入随机误差,计算结果如图 7,可见它对反射率的影响也相当大。

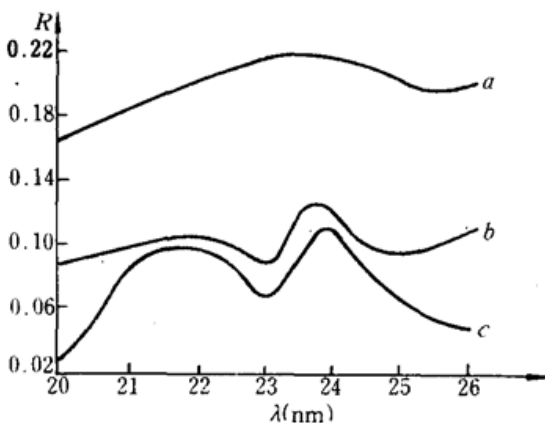


Fig. 7 Effect of the random variance of thickness on the reflectance of X-ray multilayer. (a) : $\Delta d = 0$, (b) : $\Delta d = 0.3 \text{ nm}$, (c) : $\Delta d = 0.7 \text{ nm}$, $N = 20$

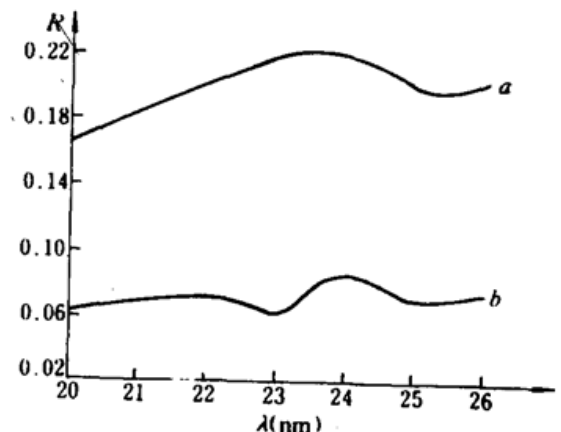


Fig. 8 Effect of several errors on the reflectance of X-20 ray multilayers. (a) : $\sigma = \Delta d = d_p = 0$, (b) : $\sigma = 1.0 \text{ nm}$, $\Delta d = 0.3 \text{ nm}$, $d_p = 1.0 \text{ nm}$, $N =$

综合几个方面,导致光栅衍射特性误差的因素和导致薄膜反射率误差的因素最后均导致总输出特性发生变化。以所设计的矩形光栅为例,假设光栅为理想时,薄膜几种主要误差对总输出效率的影响见图 8。

感谢殷功杰与邵建达同志经常有益的讨论和帮助。

参 考 文 献

- 1 R. Petit, *Electromagnetic Theory of Gratings*, Springer-Verlay, New York, 1980
- 2 M. Neviere *et al.*, *SPIE*, **1545**, 116(1991)
- 3 Erwin G. Loewen *et al.*, *J. Opt. Soc. Am.*, **68**(4), (1978)
- 4 B. Vidal *et al.*, *SPIE*, **563**, 142(1985)
- 5 M. Neviere *et al.*, *J. Opt. Soc. Am. A*, **8**(9), 1468(1991)

力科光电有限公司向国内外用户致意

力科光电有限公司是经营光电产品为主的专业公司,公司以优质的技术服务,最佳的品质服务于国内外用户,一个电话或一封信,您的需要就得到满足。

力科公司向您提供:

1. 非线性晶体: KTP, ADP, KDP, DKDP, LI, LBO 等和这些晶体制作的二倍频器、三倍频器、四倍频器、Q 开关等;
2. 用于微电子和光电子器件的衬底和外延片 (MOCVD 和 MBE);
3. 激光晶体: Nd: YAG, Nd: YVO₄, Nd: YAP, Cr: Mg₂SiO₄, Ti: Al₂O₃;
4. 声光晶体: LN, PbMoO₄, LT, TeO₂, Li₂B₄O₇;
5. 光学材料: CaF₂, BaF₂, MgF₂, NaCl, KBr, KCl;
6. 各种光学调整架,各种光学元件的夹具,激光电源,超微光摄像机, ZJD-003 型激光打孔机,激光图像通讯机, TXK 人体死后时间测定仪,便携式激光痕迹检查仪,便携式多波段激光痕迹检查仪,半导体激光报警器;
7. 提供您在济南的各种服务,如住宿,车票,接待。车票请提前四天电告 831365。力科公司将在全国各地招聘业务员,愿者请来信来电,待遇从优。
8. 力科公司愿与各界同仁通力合作,可为厂矿、企业推销产品,请寄说明书和合作意向。

力科光电有限公司
 济南市七里河路 32 号
 邮 编: 250100
 联系人: 祁建平
 传 真: 0531-837760
 电 话: 0531-831365

上海联系电话: 4701390-207 陈以超

北京联系电话: 7711177-463 李 港
 传真: 7714088