

X射线激光及等离子体物理 研究中的X光光学进展

徐至展 陈时胜 张正泉

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

近十年来, X射线技术的发展很快, 用途日益扩展。激光核聚变、X光激光及激光等离子体研究的发展对X光光学提出了新的要求。X光诊断技术也在激光等离子体、X激光以及激光核聚变研究中处于重要地位。本文分别介绍X射线光谱和XUV诊断光学技术、X光成像系统、编码成像、X激光腔反射镜等方面的X光光学进展。

一、引 言

自1895年伦琴发现X射线以来, X射线技术的发展经历了漫长的历程; 近十年来, 一些新的技术进展, 加快了它的发展步伐。X射线作为科学和技术的有力工具, 用途日益扩展。过去在可见光波段常用的技术, 现在正扩展到非常短波长的X射线波段。多层介质镜已用于从材料和表面“光学”探测, 到日冕动力学过程的研究, 高分辨的X射线透镜(菲涅耳波带板)使X射线显微镜的空间分辨率比可见光波段的提高了10倍, X射线激光在推向更短的波长上进展神速, 振荡器同步辐射得到了高亮度、部分相干的输出。已有人制作出X射线全息图。

与普通光学系统一样, X光光学包括(透射、反射系统)成像、色散、干涉及偏振等元件及其组合而成的仪器(显微镜、望远镜及各种谱仪)。

和普通的可见光不同的是X射线光子能量大于物质原子内电子的约束能, 因而物质对X光的折射系数小于1或接近1, 物质表面对X光反射系数非常小。因此, 只有以掠入射的小角度入射到介质表面时才发生全反射, 而临界角的大小和X光子能量成反比。例如, 波长为 1.54\AA 的X光在铜表面的掠入射角为 $13'$, 这使仪器的收集角太小因而收集X光效率太低, 且会产生严重的像散。

近年来, 由于超光滑表面制造技术以及X光学薄膜技术的进展, 现在人们已成功制造出性能良好的旋转曲面掠入射镜, 旋转抛物面镜并能较好地消球差、彗差和像散。这类装置已成功用于X射线天体物理研究中。

激光核聚变、X光激光及激光等离子体研究的发展对X光光学提出了新的要求。X光诊断技术也在激光等离子体、X激光以及激光核聚变研究中处于重要的地位。

二、X射线光谱和XUV诊断光学技术

激光聚变高密度等离子体物理、X射线激光诊断及天体物理观测涉及到的X射线光学系

统大致归为两类：一类是时间分辨光谱测量和时空分辨成像，另一类是纯粹的空间分辨成像系统。

时间分辨光谱测量系统主要由平场光栅谱仪或透射光栅谱仪与 X 射线扫描相机或者多道 X 射线探测器结合而成，光谱测量范围 5—250 Å。较短的波长范围的时间分辨测量采用平晶、圆柱形或者圆锥形弯晶作为色散元件，不仅能得到良好的光谱和时间分辨率，而且收集光的效率较平晶高 50—100 倍。普通的透射型光阴极扫描相机由于吸收，能测量的波长限制在 100 Å 左右，反射型光阴极可望使波长扩展到 VUV 波段，后者与透射光栅结合已得到良好实验结果。

带亚纳秒开关的逸通 MCP X 射线相机，可得到 100ps (FWHM) 开关时间，阴极直径 25mm，空间分辨率 0.1mm^{-1} ；另一种带光电导开关的皮秒 X 射线分幅相机时间分辨率为 50ps，像平面 $18.6 \times 12.8\text{mm}^2$ ，空间分辨率为 $22\mu\text{m}$ ，与 22 倍 Wolter X 射线显微镜结合，可在靶平面 $\sim 500 \times 500\mu\text{m}^2$ 全视场上得到 $5\mu\text{m}$ 的分辨率。

光导探测器 (PCD) 具有快速响应 (FWHM $\sim 100\text{ps}$) 和使用简便的特点，可对 100eV—100keV 范围的 X 射线进行测量，得到等离子体发射的 X 射线产额、冕区温度和热电子等信息。

三、X 光成像系统

由于激光等离子体 X 光源的尺度大约为 $100 \sim 500\mu\text{m}$ ，因此，此种成像系统事实是 X 光显微镜。等离子体 X 光发射分布在 4π 立体角内，其成像不可能像用高单色度同步辐射光 ($\lambda/\Delta\lambda \sim 100$) 照明成像所得到的分辨那样好。而且，排除使用接触显微镜、扫描显微镜的可能。

因此，可供使用的成像系统只有针孔，反射镜，掠入射或正入射显微镜系统。

1. 针孔像机

针孔像机由于结构简单，且覆盖能量范围大 (高达 140keV)，在等离子体诊断中仍是一种普遍被采用的工具，但缺点是焦深太长，分辨率低。如图 1 所示，针孔成像满足下面的卷积

$$I(\vec{r}) = O(\vec{r}) * h(\vec{r}) \quad (1)$$

其中， $I(\vec{r})$ 为像照度； $r(x, y)$ 为位置矢量； $O(\vec{r})$ 物照度； $h(\vec{r})$ 为针孔的脉冲响应函数。

针孔的脉冲响应函数表示为：

$$h(\vec{r}) = K |\exp\{ikr^2/2p\}C(\vec{r}) * \exp\{ikr^2/2Mp\}|^2 \quad (2)$$

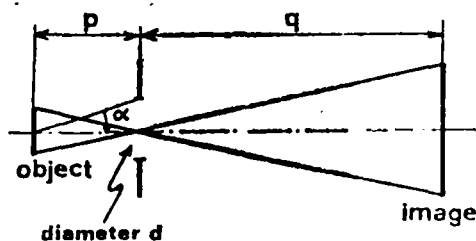


Figure 1 Pinhole configuration

其中， $C(\vec{r})$ 为直径为 d 的针孔圆函数，满足 $C = 1 (r \leq d)$ ， $C = 0 (r > d)$ ， p 为物—针孔距离； q 为针孔—像距离； $M = q/p$ 为放大倍数， K 为常数。方程 (2) 的富氏变换功率谱的主极大宽度就是仪器的分辨率。在几何近似的条件下，所得到的最小分辨为：

$$e_{几何} = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{1}{M} \right] d \quad (3)$$

在衍射近似下, (Fraunhofer衍射) 对应的分辨为:

$$\varepsilon_d = 1.22 \frac{\lambda^p}{d} \quad (4)$$

当几何近似与衍射近似持平, 即(2) = (3)式时, 最佳的针孔直径为:

$$d_{opt} = 1.6 \left[\frac{\lambda^p}{1 + 1/M} \right]^{1/2} \quad (5)$$

当 $M \gg 1$ 时, $d_{opt} = 1.6(\lambda P)^{1/2}$ 。例如, $M = 20$, $\lambda = 0.1 \mu\text{m}$, $P = 1 \text{cm}$ 时, $d_{opt} \approx 2 \mu\text{m}$, 如此小的针孔制作及调整困难, 一般实验中选取 $d \approx 10 \mu\text{m}$, 因此, 相应的分辨率大约为 $10 \mu\text{m}$ 。

在针孔上覆盖不同的 X 光滤片, 可以得到不同波长相应的等离子体发光尺度, 这种像机普遍应用于等离子体诊断中。

2. 反射镜光学

过去, 光学反射镜只能以临界角掠入射, 由于近年来在多层介质 X 光膜技术的进展, 使入射角可以远大于临界角, 并且已有较高反射率的正入射 X 光反射镜可供使用。不过, 迄今人们仍普遍采用掠入射而不是正入射 X 光反射镜, 从物理上考虑这是由于单原子层的厚度 t 大约只有 3\AA , 因此, 其极限波长满足 $t \approx \lambda/4$, 即最短的反射波长大约为 12\AA , 而目前实际最短波长 $\lambda \approx 30 \sim 40 \text{\AA}$ 。

但对掠入射时的布拉格衍射满足: $2T \sin \theta = \lambda/2$, 其中, $T = 2t$ 为多层介质的周期。因此, 在小角度 θ 情况下, 仍可在更短波长上反射。

应当强调的是利用掠入射工作, 由于几何光学上的像差, 因而不能得到良好的像质。

(1) 掠入射光学系统

有两类掠入射光学系统是较成功的, 即 Wolter 型及 Kirkpatrick-Baez (KB) 系统。

Wolter I 显微镜, 通常由两个共焦表面组成 (椭球面 E 双曲面 H), 公共焦点在 F (见图 2), 物点位于焦点 F_H (双曲镜焦点) 并被成像于焦点 F_E 上。

在此系统中, 在小角度 ϕ_H 内, 阿贝正弦条件完全得到满足, 即 $\sin F_H = \sin F_E$ 。

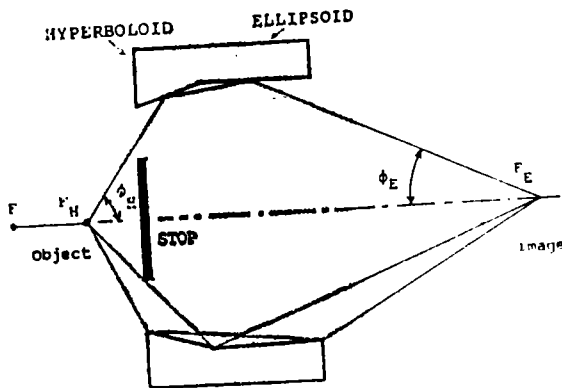


Figure 2 Wolter I microscope

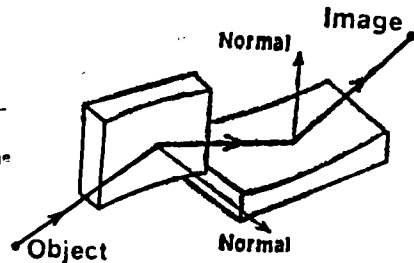


Figure 3 Kirkpatrick-Baez microscope

(2) Kirkpatrick-Baez (KB) 显微镜 (图 3)

此系统发展始于 1948 年, 利用两只交叉的柱面反射镜, 因此消除了单个凹面镜系统中普遍遇到的像散。弧矢光线由第一面反射镜弱聚焦, 这种弱聚焦光束对第二面镜说来却是子午束并被第二面镜强聚焦。这种系统等效于一个具有长焦距的球面反射镜。KB 显微镜获得的是略

微畸变的像。

在激光聚变应用中, KB 显微镜的物距大约从 25cm 到 60cm, 相应的分辨为 $1\mu\text{m}$ 到 $10\mu\text{m}$, 放大倍率从 3~10 不等, 典型的接受角为 $10^{-6}\sim 10^{-7}$ 弧度。能量范围为 $200\text{eV}\sim 4.5\text{keV}$ 。例如, 用镀镍反射镜, 在掠入射角为 $\sim 1^\circ$ 时, 短波截止波长为 3.5keV 。为了将波长推到 15keV , 掠入射角要处在几十分之一度, 此时像散加大且接收孔径变小。但是, 用多层介质镜作反射镜时, 掠入射角大于临界角且像差减小, 接收孔径增大。

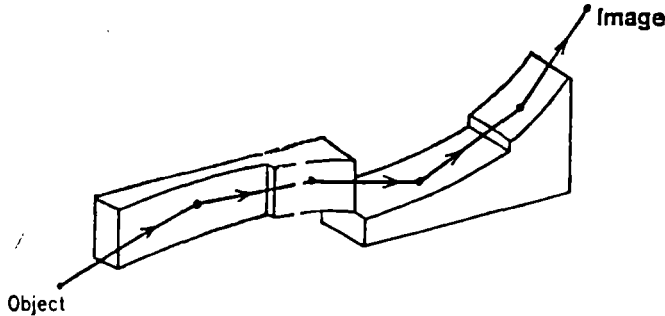


Figure 4 4-mirror Kirkpatrick-Baez microscope

KB 显微镜只能消像散而不能消彗差, 为此, 发展起了由四面镜构成的系统 (见图 4),

它可大大减小彗差。理由非常简单, 每两块又构成一个类似于 KB 系统中的球面镜, 因此它是由两个球面镜组成的系统。图 5 给出了 KB 系统与四面镜系统的像质的比较。从图中表明, 这种改进是显而易见的。四面镜的改进型 KB 系统的具体参数为孔径: $2a = 2.1\text{mrad}$; 倍率 $M = 10$; 半径 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 23\text{m}$; 物距 210mm , 物一像距 2.75m , 掠入射角 2° ; 工作范围 $\lambda = 5\text{\AA} \sim 100\text{\AA}$ (由反射镜材料确定)。

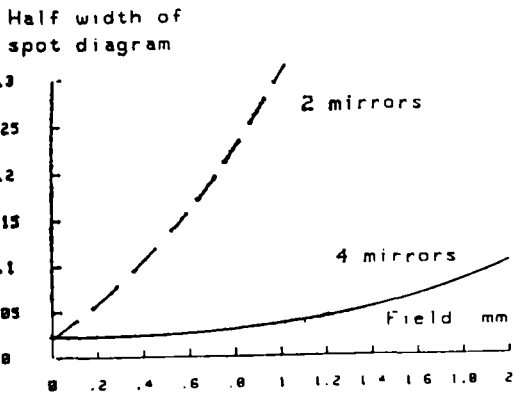


Figure 5 2-mirror and 4-mirror Kirkpatrick-Baez microscope. Comparison of aberrations.

(3) 正入射光学系统

Schwarzschild 显微镜 (S.M) (见图 6)。

它由二个共心或近共心系统组成。

第一台多层介质 S.M 显微镜是为同步辐射研制的扫描显微物镜。这里介绍的是为激光

等离子体研制的 S.M 系统, 工作孔径 $f/2.5$, 视场达 1mm , 倍率为 20 倍, 工作波长 60\AA , 分辨率 1000\AA 。多层介质镜采用 Si/Re-W 体系, 传输系数约 1%。

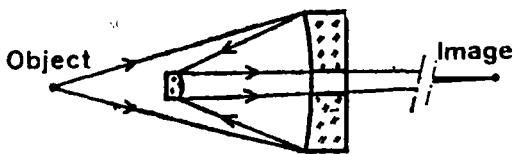


Figure 6 Schwarzschild microscope.

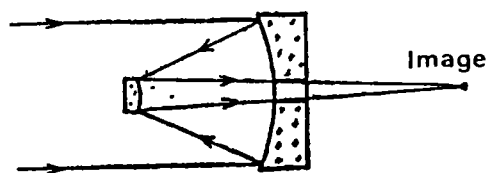


Figure 7 Aspheric Ritchey-Chretien telescope

(4) Ritchey-Chretien 望远镜 (RCT)

这是为天体物理尤其是太阳辐射的氢线 30.4nm 而研制的 (见图 7)。两面反射镜为非球面双曲面镜, 两者皆加工到 $\lambda/10$ 精度并镀以 10 层 Si/Re-W 膜系, 总膜层厚度为 200nm。多层膜的周期是在镀膜期间应用软 X 光反射计检测的, 而表面粗糙度是在镀膜完成后利用掠入射 X 光反射计监测的。正入射情况下, 在 30.4nm 上 Si 的粗糙度大约为 7 Å rms, 对 ReW 为 10 Å rms, 每面镜的反射率为 10%。用于 RCT 望远镜的多层膜反射镜的有效面积已达 $\sim 17\text{cm}^2$ 。

四、编码成像

所有的编码像都包含两个过程: ①对物体编码及记录; ②解码及再现。这一般是计算机完成的。近年来, 采用旋转狭缝方法 (在医疗分层成像中采用此技术) 已将这种再现过程转化为一维问题处理。这种编码是由许多相同的狭缝按不同取向并等角度分布安排而成, 如图 8 所示, 其编码像是由 N 个狭缝产生的不同的分立的 N 个像组成的, 像的放大率为 $M = q/p$ 。

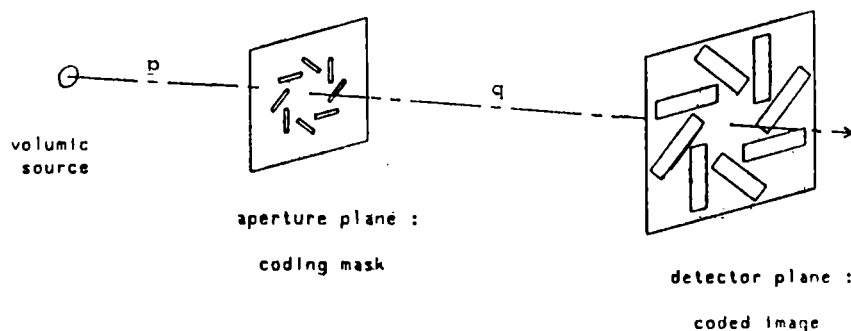


Figure 8 Coded aperture imaging. General coding configuration

最早使用的编码孔是费涅耳波带片, 以 Si 片作基底的波带片的衍射效率高达 18%, 它需要进行二维再现, 因此要用大容量的计算机及较长的计算时间。

1. 径向编码 (如图 9a)

其中, 每一个狭缝的作用如图 10a 所示。令 $R = 0$ (即径向编码), 此时, 沿狭缝宽度方向上其作用同针孔一样, 而在沿缝长度方向上它只起到积分器的作用 (Integrator)。由于狭缝位于轴上, 两个处于不同物面 P^1 及 P^2 的物体产生叠加的像, 因此得不到分层的作用。此种径向编码产生的是沿不同狭缝取向上的一组分立的投影像, 再现过程中, 只需对每一个编码像作绕轴的一维计算机处理, 所得到的只是二维像。

2. 非径向编码 (如图 9b 所示)

此时只是将狭缝移到 R 位置上。(见图 10b) 在物面上间距为 z 的 P_1 及 P_2 的两物点投影将位于两个不同像面上。其间距 X'' 表示为: $X'' = R(1 + q/p)$ 。其投影位移量 X'' 与物面 P_1 到编码孔的距离 P_1 有关。因此, 沿着 z 轴可以

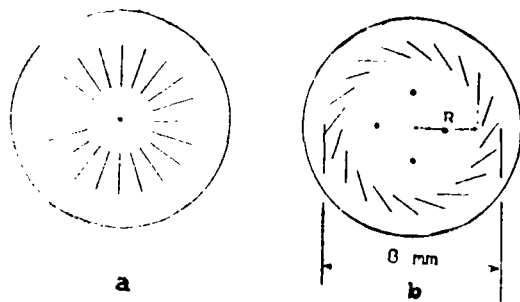


Figure 9 Multislit codes a) on-axis, b) off-axis

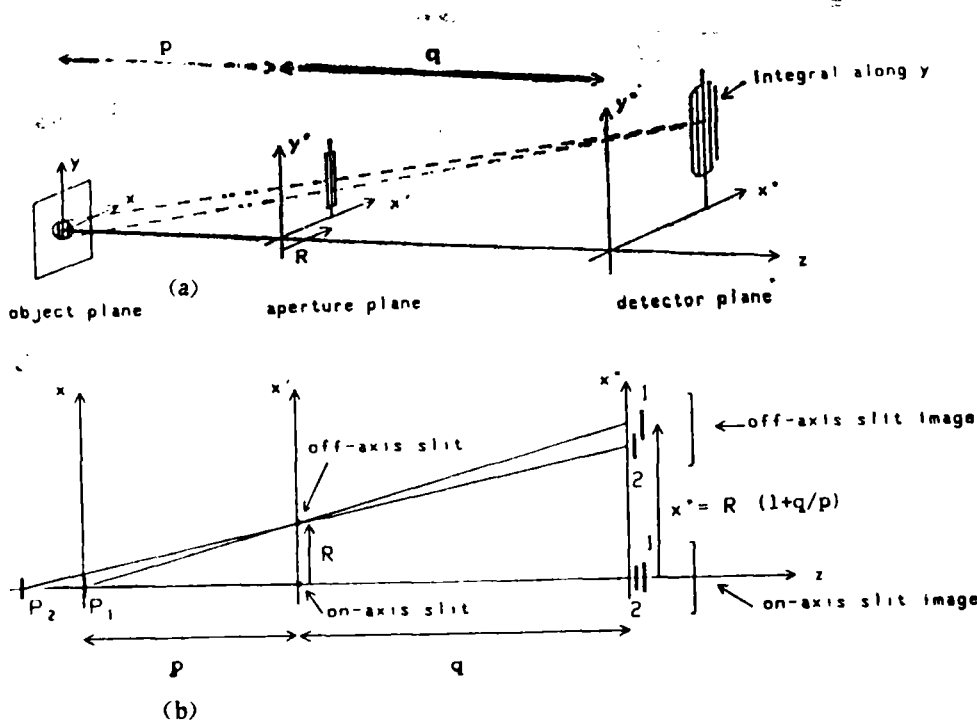


Figure 10 Coding by a single slit

再现出物体的分层像。这只要对每一个狭缝沿 z 轴位移一个大小为 X'' 的量就可得到分层再现像。

下面给出一组非径向编码成像的数据。

物距	$p = 10\text{mm}$
物大小 (半径)	$R_{ob} = 50\mu\text{m}$
放大率	$M = q/p = 15$
缝数	$N = 40$
缝长	$L = 0.39\text{mm}$
缝宽	$W = 5\mu\text{m}$
狭缝位移	$R = 3\text{mm}$
横向分辨率	$e^*T/L = 5\mu\text{m}$
分层分辨率	$e_s = 15\mu\text{m}$

五、X 激光腔反射镜

在LLNL, 正入射的多层X光反射镜的研制在X激光研究中占着重要地位, 反射率 $R > 25\%$ (206 \AA) 的多层膜镜已制成, 并已成功地应用于类 Ni 的 Se 离子 $3P \rightarrow 3S$ 跃迁的 X 激光演示实验中 (206.3 \AA 及 209.6 \AA)。

实验中用的 Mo/Si 膜系, 参数为:

- 高 Z 材料 Mo,
- 低 Z 材料 Si,
- 高 Z 材料比 (f) 0.38,

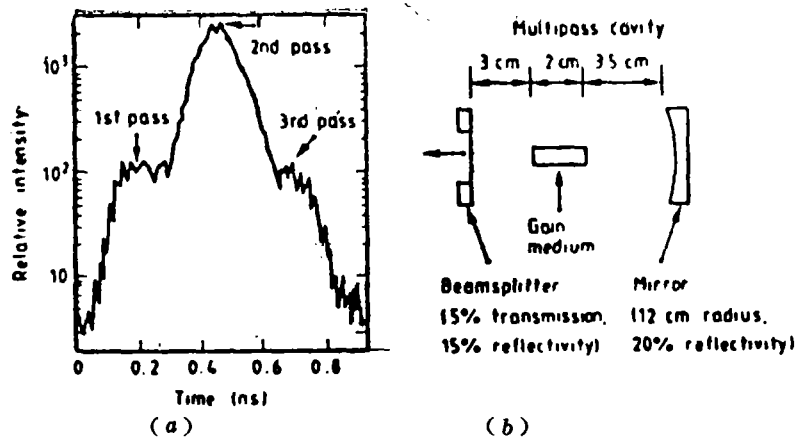


Figure 11 (a) Time-resolved multipass cavity output at 206.4 Å for the cavity shown in (b) The nominal selenium target and irradiance conditions as discussed in the text were used in this experiment.

层数(n) 20,
 单层Mo/Si厚度115 Å
 层周期(d)
 保护层 (Overcoat) C ,
 保护层厚度10 Å,
 基底 Si圆片。

设计参数:	输出镜	后腔
	Mo	Mo
	Si	Si
f	0.1	0.4
n	20	20
Mo/Si厚	107 Å	112 Å
保护层	C , 50 Å	C , 5 Å
基底	Nore	石英

此外, W/C 膜系制作的多层膜反射镜 (15层, 反射率15%) 已应用于10.57nm 波长的 X激光腔实验中。

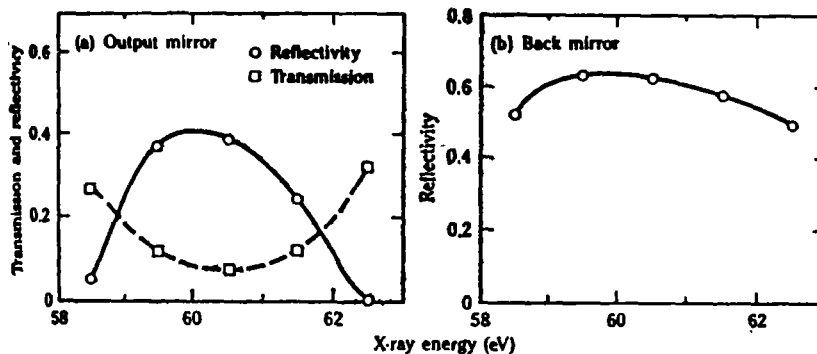


Figure 12 Calculated reflectivity and transmission for the two mirrors of the XRL cavity described by Table.

X激光腔输出反射镜

LLNL已有关于X激光腔输出反射镜的概念设计及部分成功应用。图13中给出某些有代表意义的输出反射镜的结构。其中，最简单的是图13(a)所示的针孔耦合输出。输出的透射率只是针孔面积与X激光全斑在该镜上尺度相应的面积比，如下所示的实例。

针孔面积	$\Phi 75\mu\text{m}$
X激光在输出镜上的尺寸	$250\mu\text{m}$
输出镜反射率(针孔处)	0.6
输出镜端反射率	0.55
透过率	0.09

针孔输出镜结构简单、易制作，但由于X激光非常短时间的瞬态增益特性的限制，这种镜很难实际应用。

图13(b)是一种部分反射镜。优点是空间反射均匀，但不易制作。

图13(c)可能是一种最好结构的输出镜。它是利用光刻技术在多层膜上制作而成，这种光栅式结构将光束衍射输出，而 R_0 将直接反射回腔内。计算表明，利用光腔可以显著提高X激光输出并可能使振荡器工作在饱和状态。在非饱和工作状态下，X激光输出的增加倍数 F 可表示为：

$$F = T \sum_{k=0}^N R_0^k R_i^j e^{k\alpha L}$$

式中， T —输出镜耦合系数； R_0 —输出镜反射率； R_i —后腔镜反射率； α —放大介质增益系数； N —增益介质寿命期间光束在腔内来回反射次数； L —增益介质长度； $K = i + j$ (当 K 为偶数时， $i = j$ ；当 K 为奇数时， $i = j + 1$)。

LLNL已在类Ni的Se离子 ($3P \rightarrow 3S$ 跃迁 波长 206.3 \AA 及 209.6 \AA) 的X激光增益中，利用双通放大已得到如下结果： $T = 1$ ， $N = 1$ ， $i = 1$ ， $j = 0$ ， $R_0 = 0.25$ ， $\alpha_L = 6$ ， $F = 100$ 。

目前，LLNL正在设计新的介质镜。 $f_1^{Mo} = 17.0$ ， $f_2^{Mo} = 2.5$ ， $f_1^{Si} = 3.8$ 以及 $f_2^{Si} = 0.5$ 。预期有如下参数： $T = 0.09$ ， $R_0 = 0.4$ ， $R_i = 0.6$ ， $\alpha_L = 6$ ， $L = 2\text{cm}$ ，增益介质寿命 $t > 200\text{ps}$ ， $N = 3$ ，这时可得 $F = 10^5$ ，并达到饱和增益。

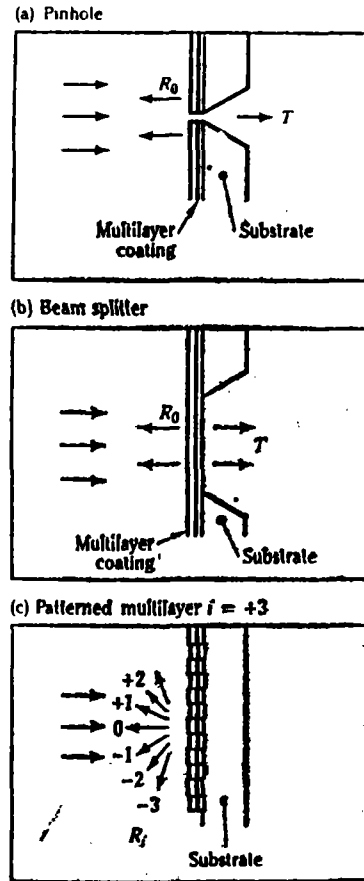


Figure 13 Concepts for output coupling from a XRL cavity.

六、结 论

近年来，X光光学已取得长足进展。随着超光滑表面技术的发展将为X光学提供具有更精良光学表面(约 2 \AA 的表面光洁度)的元件，随着X光刻及微制造技术的进展，将为X光

提供具有更精细周期的X光衍射元件。虽然正入射X光多层介质反射镜取得很大的成就,但在X光波段物质的光学常数的资料仍很缺乏,为发展X光学多层介质镜,需要在物质光学常数及在制备及检测波长范围在 $20\text{ \AA} \sim 300\text{ \AA}$ 范围内的正入射介质镜方面做更大努力。

● 考 文 献

- [1] N. De Heaoudrey et al., SPIE, 831 (1987), 142
- [2] N. N. Zorev, SPIE, 1140 (1989), 214
- [3] T. W. Phillips, Laser Program Annual Report, Lawrence Livermore National Laboratory, UCRL-50021-85, 4-45
- [4] P. Jaegbo et al., Generation and Application, 2, 1988, 21

The Progress of X-ray Optics in Researches of X-ray Laser and Plasma Physics

Xu Zhizhan Chen Shisheng Zhang Zhengquan

Abstract

In the past decade X-ray optics had made great progress which is extremely important for the development of many scientific and technological fields. This paper summarizes some of up-to-date results of X-ray optics, particularly the results of X-ray imaging systems and multilayered mirrors for X-ray laser cavity, and the applications of these results in the researches of X-ray laser, laser fusion, and laser produced plasma.