

漫谈发展中的 X 射线光学

王开安 梁静国

(北京大学物理系)

在伦琴发现 X 射线的最初几年里,人们满以为能用处理可见光的一般办法使 X 射线聚焦和成象,但是他们很快就意识到这个问题是非常棘手的。因为,常见的光学器件(如反射镜、稜镜和透镜等)是利用光在媒质界面产生明显的反射和折射效应来使可见光聚焦乃至成象的,然而 X 射线的波长很短($10^{-4} \sim 8 \times 10^2 \text{ \AA}$),它对所有物质的折射率都非常接近于 1(比 1 小 10^{-5}),因此它在媒质界面的折射是微乎其微的,当它穿过界面时,几乎不改变它原来的方向。如果困难仅此一个,也还好办,我们可以增大透镜的曲率,让 X 射线聚焦。但是在实际中,所有物质对 X 射线都存在着吸收效应,因此即使选用最佳的设计方案,会聚凹透镜(请注意对 X 射线,除真空以外,所有媒质的折射率均小于 1)的边缘也肯定会把入射的 X 射线全部吸收掉。此外,我们还发现, X 射线对物质的穿透力很强,它在常规光学反射镜面上的反射率是极低的(典型值为 10^{-8}),实际上可以忽略。所以,自 1895 年发现 X 射线以后的三十多年中,人们认为要实现 X 射线的成象几乎是不可能的。

然而,随着材料科学的发展和各种加工工艺的长足进步,科学家们已经在 X 射线光学领域内取得了很大的成就,发明了多种类型的 X 射线聚焦和成象器件,特别是近十几年来出现的 X 射线多层介质反射镜和 X 射线菲涅耳波带片以及高质量的同步辐射光源,更使 X 射线光学大大地向前迈了一步。

X 射线光学器件的发展是 X 射线光学的一大内容,它是从研制掠射式 X 射线光学器件开始的。

一、掠射式 X 射线光学器件

早在 1922 年,康普顿就从实验上证实了 X 射线也存在着类似于可见光的掠射现象,即当 X 射线从光密介质(如真空)以大于某一临界值的角度入射到光疏介质(任何折射率小于 1 的物质)时,其能流会全部返回光密介质。当时人们已经意识到利用这一效应可做出相应的曲面镜来聚焦 X 射线,但是这种装置存在严重的象散,尤其是在掠射的情形下,它可使一个点的象变成一条线。

1948 年,Stanford 大学的 P. Kirkpatrick 和 A. V. Baez 首先找到一种消除象散的办法:将两个旋转轴方向彼此垂直的凹面镜前、后放置,使它们互相消除对方的象散。后来,人们又发现,若做成一个曲面镜,使它在一个方向的曲率远大于在其正交方向的曲率(自行车内胎上的任一区域就具有这种几何性质),也能消除象散。基于这些光学元件,西德 Kiel 大学的 H. Wolter 于 1952 年发明了三种实用的 X 射线成象系统:单抛物面型、Wolter 式 I 型和 II 型。这些系统的光路设计都利用了回转圆锥曲面的几何性质。前者结构最为简单,只用一个抛物面镜就成功地消除了球差,但它存在着自身结构无法克服的彗差;后两种作了结构上的改进,运用两个不同的回转圆锥曲面(抛物和双曲)减小了彗差。

掠射式器件是所有 X 射线成象技术中最成熟的一类。它们在同步辐射、激光热核反应以及 X 射线天文学中已经得到重要应用。迄今世界上最大的 X 射线望远镜安装在美国的

Einstein 天文站, 并已于 1978 年底投入使用。它由四个独立的 Wolter-I 型成象系统组成, 尺寸由小至大, 套在一起, 共有一个焦点。最大的那个直径为 58cm, 焦距为 344cm, 对软 X 射线的总采光面积为 400cm²。尽管这台望远镜只对整个天穹的 1% 作了观测, 它也已经显示了强大的生命力。天文学家通过它得到了很多新的、有价值的天文资料。近几年发展起来的高精尖磨制和抛光工艺在提高掠射式 X 射线器件的分辨率中起了非常重要的作用。

二、干涉式多层介质 X 射线反射镜

人们正期望这类研制中的新型 X 射线光学器件能取代掠射式器件, 至少能弥补它的不足。随着近年来真空蒸镀技术的发展, 现在已能在光洁的衬底上镀出均匀的、原子尺度上的超薄膜(厚度约 10 Å)。这使得人们可以利用类似于可见光学中多层薄膜的干涉现象, 制成 X 射线波段的增反膜。由于 X 射线在层间的相长干涉, 只要有 100 层用折射率不同的两种材料相间蒸镀而成的介质层, 就可使该增反膜的反射率接近于 1。若 d 是相邻两种材料的总厚度, 则在特定的掠射角 θ 下, 第 n 级反射的峰值波长 λ 可由熟知的布喇格定律大致给出:

$$2d \sin \theta = n\lambda.$$

用两种折射率相差甚远的材料如钼和碳, 可制成带通较宽的增反膜; 反之, 若用两种折射率相近的轻元素材料, 则可得到较窄的带通。前者的 $\lambda/\Delta\lambda$ 值约为 10—100, 后者一般为 1000。在制作这些多层膜时必须注意要选用恰当的两种材料, 除满足折射率的要求之外, 还要避免层间过分的互扩散和可能发生的化学反应, 因为各镀层只有几个原子层的厚度, 所以这个问题是非常敏感的。

多层介质 X 射线反射镜可应用于窄带反射式滤波器、分束器、起偏器以及作为光谱仪和单色仪中的低分辨率色散元件。可以设想, 若在前面谈及的掠射式器件上镀上这种增反膜, 那么将会在特定的波长和掠射角下提高它们的反

射率, 这样做可以增大 X 射线望远镜或 X 射线显微镜中的光通量, 显然具有非常实用的意义。由于多层介质 X 射线反射镜在技术上还不如掠射式器件成熟, 因此目前尚未进入实用阶段。但是, 工作是有进展的。三年前, 美国的 Hawaii 大学、NASA (国家宇航局) 和 Lawrence Berkeley 实验室已经利用多层介质反射镜做出了工作波长为 68 Å、角分辨率达弧秒量级的软 X 射线望远镜。更早一些时间, 在 1980 年就有报道称, IBM 公司已经造出了工作在 68 Å 的扫描式 X 射线显微镜。

三、衍射式 X 射线成象技术

为了提高 X 射线成象系统的分辨率, 人们想方设法。Baez 首先重新考虑了古老的菲涅耳波带片。菲涅耳波带片的衍射效率是很低的, 仅有 10%, 在可见光学中, 它的成象功能很自然地各种性能优越的透镜取代了。长期以来, 波带片除了在光学教科书上被用作讨论菲涅耳衍射的例子之外, 在实际应用中, 它似乎已经被人们遗忘了。然而, 在 X 射线光学中, 波带片的分辨率几乎能达到理论分辨率的极限(即由于光波衍射效应所限制的固有分辨率)。据估计, 用波带片衍射成象, 有可能使 X 射线显微镜的分辨率达到 100 Å, 这是普通光学显微镜永远无法达到的, 因此波带片在 X 射线显微学上占有非常重要的地位。我们知道, 波长一定时, 波带片的分辨率与其最窄(即最靠外)波带的宽度成正比。西德的 Göttingen 大学、美国的麻省理工学院和 IBM 公司的研究人员采用光学干涉法和电子束刻绘技术, 已使最窄波带的宽度接近 1000 Å。目前, 美国和西德的几个小组在着手研制以波带片作为成象元件的 X 射线微探针和 X 射线显微镜。Göttingen 大学三年前在同步辐射光源上利用这类 X 射线显微镜得到了分辨率为 700 Å 的硅藻显微象。以后努力的方向是继续提高它的分辨率, 并且进一步减少波带片的非衍射辐射背景, 以提高它的效率。

比菲涅耳波带片更为有趣的是所谓的接触

