

记录 X 光全息图的新设想

陈建文 徐至展 王之江 朱佩平 肖体乔 寇雷刚

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

X 光全息术是一个两步成像过程, 第一步是含有物体信息的物束和参考束重叠并产生干涉记录在全息图上, 第二步是用光学或数字方法完整地重现这个信息. 然而自 1948 年 Gabor 发明全息术以来, 尽管光学全息和电子全息获得了迅猛的发展, X 光全息术却进展缓慢.

80 年代中期, Brookhaven 实验室将 Undulator 等插入件引入到同步辐射源中, 使 X 射线源的亮度比 70 年代末提高 8~12 量级; 几乎是同期, 美国 Lawrence Livermore 国家实验室成功地运转了 X 射线激光器, 我国上海光学精密机械研究所徐至展领导的研究小组, 在该领域也取得了丰硕的成果. 这些都为 X 射线全息的发展提供了初步的实验条件. 由于高亮度的 X 射线源的出现, 也掀起了一阵 X 射线全息的热潮, 迄今最好的结果是 1990 年, Jacobsen 等人在 Brookhaven 国家实验室, 采用波长为 2.57 nm 的同步辐射源, 以生物为样品, 用光刻胶记录同轴全息图, 数字法重现, 横向分辨率达到 56 nm; 1992 年 McNulty 等人在 National Synchrotron Light Source, 采用 3.4 nm 的同步辐射, 以金箔(厚 250 nm)制成的波带板和辐条靶做样品, 用 CCD 记录, 数字法再现, 横向分辨率为 60 nm. 显然这两个结果与 X 光极限分辨率相差一个数量级.

X 光全息分辨率提高缓慢的原因很多, 主要是缺乏高亮度相干的 X 光光源以及高分辨率、高灵敏度的记录介质, 另外由于 X 光的穿透性极强, 其折射率又略小于 1, 因此缺乏适当的材料作 X 光分束器和 X 光透镜, 使 X 光的记录方式仅限于同轴记录和无透镜傅里叶变换全息记录方式. 对于前者, 优点是装置简单, 样品与 X 光共轴, 缺点是需要高分辨率记录介质以及孪生像的干扰; 后者, 参考源到记录介质的距离与物体到全息记录介质距离相等, 因此无透镜傅里叶变换全息图相当于记录了两平面波干涉的全息图, 干涉条纹是互相平行的直条纹, 类似于杨氏干涉实验的条纹. 条纹空间频率可以通过改变参考源和样品间的距离或改变记录平面到样品的距离加以调整.

迄今无论是同步辐射源或是 X 激光, 相干性都比较差. 就 X 激光而言, 它是以放大自发辐射方式工作, 缺乏模式限制措施. 特别要指出的是 X 激光是高增益、短脉冲体系, 即使加上谐振腔, 也很难控制模式. 但是, 人们可以把它视为一个部分相干光源, 而用小孔选其中相干的部分, 以提高其空间相干性.

事实上, 只要 X 光空间相干长度大于待测样品尺寸就可以. 一个行之有效的措施是, 将待测样品放置在一个发散的 X 光束中, 使得它距离 X 光源足够远, 这意谓着待测样品对 X 光源

的张角为衍射极限角. 在同步辐射源中, 可以采用一个光管改善 X 光束相干性, 光管的直径与其长度之比满足衍射极限条件即可. 然而这个方法产生的 X 光的单色亮度低, 为了获得足够的曝光量, 必须延长曝光时间.

为了克服上述不足, 降低低频衍射光的强度, 提高 X 光全息图的信噪比, 本文建议采用一种新的记录 X 光全息图的方法, 它类似于比累(Billet)剖开透镜, 在本文的方法中, 是用两块波带板代替透镜. 显然, 这是一个改进的无透镜傅里叶变换全息装置, 它具备傅里叶变换全息术的所有特点. 在物理上, 它也类似于杨氏双缝干涉实验装置. 假定 X 光源是一个准单色源, 那么在干涉区域干涉条纹间距: $S = a\lambda/d$, 式中 d 为两波带板中心之间的距离, λ 为记录波长, a 为两焦点连线到记录平面间的距离, 显然, 通过调整 a, d 的尺寸, 可以改变干涉条纹间距, 以与记录介质的分辨率相匹配, 实现无冗余记录.

由于现有同步辐射亮度较低, 拍摄一张全息图往往需要曝光几分钟, 甚至几十分钟, 因此对系统的防震要求相当苛刻. 采用本文建议的方法, 可以将波带板制作在同一屏上, 而两波带板的两个焦点设置在开孔的同一屏上, 一个作参考束, 另一个将样品贴在小孔上作物束, 这样大大降低了对系统的稳定性要求. 本系统的分辨率与波带板的焦斑或滤波小孔的半径相关, 这一点作者已在其它文章中作了讨论.

本文所介绍的方法, 除可以用来记录 X 光全息图以外, 还能用来测试 X 光源的时间相干性, 或相干长度(包括 X 光激光器和同步辐射源). 以往常常是借助杨氏双缝实验, 或者近年来由 Fenimore 等人发展起来的多狭缝装置, 显然采用狭缝时, 大部分 X 光被阻挡在狭缝外侧, 而采用本文所建议的方法, 则可克服这个缺点, 缩短曝光时间.