

## X 射线毛细管光学透镜在医疗中的应用

孟宪文<sup>1</sup>, 彭振居<sup>2</sup>

中图分类号: R454.2 文献标识码: B 文章编号: 1004-714X(2006)04-0462-02

【摘要】目的 研究 X 射线毛细管光学透镜在医疗中的应用。方法 查阅大量国外专利及文献, 并实际调研。结果 论述了 X 射线毛细管光学主要理论及其发展过程, 着重介绍了 X 射线毛细管光学透镜在医学中的应用, 并对其应用研究前景进行了展望。结论 毛细管光学透镜在医疗领域中有广泛应用。

【关键词】毛细管光学; 全反射; X 射线聚焦; 准直; X 射线衍射

由于 X 射线波长短、能量大而且能够穿透物质, 在医疗、材料分析、无损检测、天文学研究等领域应用十分广泛。但是 X 射线是高速电子流撞击金属靶产生的, 发出的射线是发散且不规则的, 严重削弱了射线束的能量, 给 X 射线的应用带来了很大的难度; 同时, 医疗中发散的 X 射线会对人体造成一定伤害。另外 X 射线能量大, 穿过不同介质时折射角很小, 一般的光学透镜很难使之聚焦、准直。因此, 研制一种准直、聚焦 X 射线的光学器件对于 X 射线在医疗领域中的应用有很重要的意义。

X 射线毛细光学的提出和 X 射线毛细管光学透镜的研制是 X 射线准直和聚焦问题的重大突破。上世纪 80 年代出现了毛细管光学, 在此理论基础上研制出了 X 射线毛细管光学透镜, 透镜可以聚焦和准直 X 射线, 有效控制射线的传播方向。随着该技术的发展, 其应用领域已经拓展到 X 射线领域。

## 1 毛细管光学(Capillary Optics)及 X 射线毛细管光学透镜

1984 年, 库马霍夫(Muradin A. Kumakhov)在莫斯科提出毛细管光学这一新兴光学<sup>[1]</sup>。毛细光学基于全反射原理: 当 X 射线以掠入射角(入射射线与管壁表面之间的夹角)不大于全反射临界角  $\theta_c$  入射到 3~50 $\mu$ m 的空心玻璃毛细管光滑内管壁上,

射线将以全反射在管壁之间传输, 传输原理如图 1 所示。在 X 射线毛细管中, 空心玻璃毛细管起波导作用, X 射线在其中进行多次反射传输, 而不像其它掠入射反射镜系统中只有一到两次反射, 从而可以有效地控制 X 射线的方向。全反射的临界角  $\theta_c = \omega_m / \omega$ ,  $\theta_c$  的单位是 rad,  $\omega_m$  是毛细管材料的特征函数, 主要取决于反射材料的密度  $\rho$ ,  $\omega$  为粒子的能量, 主要取决于 X 射线波长  $\lambda$ 。将多根毛细管按照特殊方式排列加工后, 可以聚焦发散的 X 射线束或将发散的射线束变成准平行射线束。经过毛细管传输可以减小射线的衰减, 在管内传输的辐射能量正比于  $L^{-1}$ , 而在自由空间中, 辐射能量正比于  $L^{-2}$  ( $L$  是射线传输距离)。此 X 射线传输原理同样适用于中子束, 毛细管光学器件可以有效地控制热中子束, 在实验中采用中子毛细管器件可以获得高能量中子流, 从而促进中子光学在医学及其它科研领域中的发展。<sup>[2~3]</sup> 根据毛细管光学理论, 1985 年库马霍夫研制出了第一个毛细管光学透镜, 此后 20 多年内毛细管光学器件发展十分迅速, 出现了许多基于毛细管器件的 X 射线分析仪器, 例如 X 射线分光计(X-ray spectrometers)、X 射线显微镜(X-ray microscopes)、X 射线衍射计(X-ray diffractometers)等, 下面主要介绍其中最重要的光学器件—毛细管光学透镜。



图 1 管内全反射示意图

X 射线毛细管器件分类 X 射线毛细管光学器件主要分为两大类, 即: X 射线毛细管光学透镜(聚合 X 射线毛细管光学器件)和单根 X 射线毛细管光学器件。前者可在较短工作距离下对发散较大的 X 射线束( $\sim 500\mu$ m)聚焦, 焦点距出射端 10~100mm, 每个空心玻璃毛细管都能有效地将 X 射线折到毛细管光学透镜的中心轴线上; 后者焦点相对较小(50nm~20 $\mu$ m), 但工作距离较短。

X 射线毛细管光学透镜又称为库马霍夫透镜, 它是由成千上万根空心玻璃纤维管在横截面上呈六方紧密排列而成的一束毛细管阵列。依其作用又可将毛细管光学透镜细分为聚焦透镜、准直透镜和半聚焦透镜, 图 2 为原理示意图。聚焦透镜可将一个弧度立体角内点射线源发出的 X 射线会聚, 形成高能 X 射线源; 准直透镜则将发散的 X 射线束变为面积较大、强度均匀的平行 X 射线束; 半聚焦透镜常用作中继耦合器件。元件外形如图 3 所示, 内部结构见图 4。

## 2 毛细管光学元件在医疗中的应用

应用 X 射线毛细管光学元件的最大优点在于能获得用其他方法很难得到的高强度微米、亚微米会聚和准直的 X 射线束。此类器件在医疗、材料研究、X 射线平板印刷术、制作高存储密度计算机存储芯片的 X 射线光刻技术等方面有重要的应用。下面着重介绍 X 射线毛细管光学元件在乳房 X 射线照相术、聚焦射线束治疗、蛋白质晶体学等技术中的应用<sup>[4~9]</sup>。

2.1 乳房 X 射线照相术(Mammography) 毛细管光学元件在医疗 CT 成像中有重要应用, 在软组织成像, 特别是乳房照相术和血管造影术方面获得广泛应用。乳腺癌是最致命的癌症之一, 也是妇女中最常见的恶性肿瘤, 高发于 35~50 岁之间的女性, 其发病率居女性恶性肿瘤之首, 全球每年约有 120 万人患此病。在美国每年有 186 000 名妇女被诊断患有乳腺癌, 其中 46 000 因此而丧生。在我国, 乳腺癌的发病率有逐年增加的趋势。因此对于乳腺癌的诊断尤为重要。通常采用的乳房照相术是通过正常组织和稍稠密癌变损伤组织之间图像对比度的观察或小型微钙化团块的观察来探测乳腺癌。诊断医学图像的精度与图像的对比度和分辨率有关, 在传统的治疗手段中, 受限有限尺寸的光源, 小焦点可以改善诊断效果, 但是不能

作者单位: 1. 中北大学仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西太原 030051; 2. 山东大学齐鲁儿童医院

作者简介: 孟宪文(1982~), 男, 山东济宁人, 硕士研究生, 研究方向: 光电器件与光电检测。

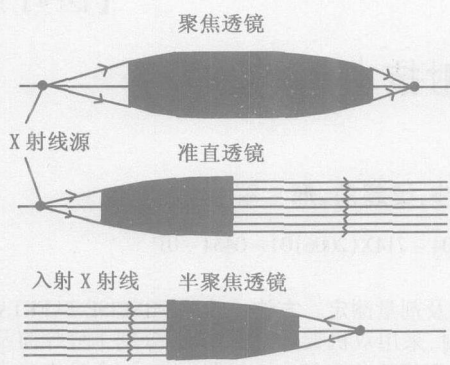


图 2 三类透镜工作方式示意图

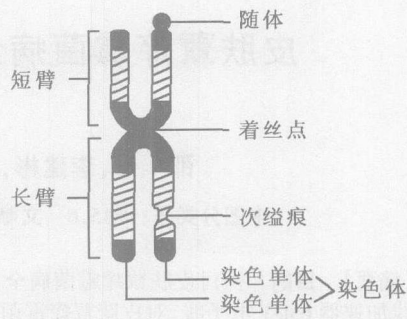


图 3 毛细管光学透镜外形结构

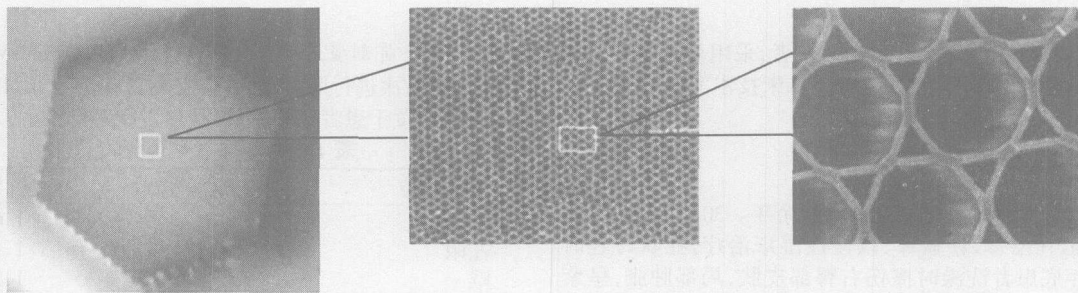


图 4 毛细管光学透镜内部结构图

能实现全场成像。小焦点带来的小入射角使得视场较小,同时限制了输出功率,使得患者接受 X 照射的时间变长。采用毛细管光学器件将改善拍摄图像的质量,抑制散射,能在不影响焦点的情况下有效地提高几何放大率,使图像分辨率提高到  $50\mu\text{m}$  或更好水平,可以更早地探测出乳房癌。而且可以大大减小所需 X 射线剂量,降低对患者身体的损伤。

2.2 聚焦射线束治疗技术<sup>[9]</sup> 传统的 X 射线治疗技术一般采用高能 X 射线,平行的 X 射线束经过狭缝瞄准照射到肿瘤上。一般采用伽马射线减小表面皮肤吸收剂量,但是中电压药征通常采用射线能量在 150 keV 左右,仍然会对患者健康部分造成比较大的伤害。而采用聚焦毛细管透镜可以使射线能量降低到 100keV 左右,在提高照射肿瘤剂量的同时,降低了肿瘤周围健康部分和表面皮肤的吸收剂量,从而达到较好的治疗效果。

2.3 蛋白质晶体学 此类器件在蛋白质结构鉴别和分析中也有很重要的应用。蛋白质晶体学所研究的对象即蛋白质晶体尺寸非常小,晶体衍射很弱,而且稳定性差,在同步辐射照射下,典型蛋白质晶体寿命为 2~3min。常规 X 射线衍射技术要求晶体的最小尺度为  $100\mu\text{m}$ ,显然不能满足大多数应用;利用 X 射线毛细管透镜可以增强 X 射线光源强度,并使射线束的尺寸减小至  $10\sim 15\mu\text{m}$ ,因此,研究的蛋白质晶体尺寸可以减小到  $20\mu\text{m}$ 。此技术可以用于药品制造、样本分析中。例如可以分析流感、肺炎等病毒的结构。毛细管光学透镜还可以应用于其它医学领域,在这里不再一一列举。随着毛细管光学技术的发展和制造技术的改进,应用范围会进一步拓宽。

3 展望

X 射线毛细管光学是发展最快的 X 射线光学技术之一,此外近十年来毛细管光学在中子领域研究也取得了很大进展,国外在此方面也有很多报道,在此不再详细介绍。在毛细管光学

研究中,制作工艺的研究是一个难点。

随着毛细管光学透镜制作技术的发展,新结构的毛细管光学元件会不断研制出来,传输的射线能量范围会进一步扩大,精度也将大大提高,在医疗领域中会有更广阔的应用。国内有些从事硬光纤器件生产的企业如果引进或者改造现有设备并掌握相关生产工艺,完全可以实现毛细管光学器件的国产化,促进我国毛细管光学的蓬勃发展,促进其在医疗相关领域中的应用。

参考文献:

[ 1 ] Albert Tebo. Kumakhov Optics Provide New Way to Deal with X-rays[ R] . OE Reports. 1994.  
[ 2 ] Borisova G. I. , Kumakhova M. A. Poly- capillary lens for neutrons [ J] . Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2004(529): 129.  
[ 3 ] Borisov G. I. , Kumakhov M. A. Tailoring of neutron beams spectrum and spatial distribution by means of capillary optics[ J] . Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2004(529): 102-105.  
[ 4 ] Lafferty, William, Michael, et al. Capillary Array- based Sample Screening[ P] . United States Patent, 20030044968 March 6, 2003.  
[ 5 ] Gibson, High Intensity. Small Diameter X- ray Beam Capillary Optic System [ P] . United States Patent, 5570408, October 29, 1996.  
[ 6 ] Macdonald C. A. Applications and Measurements of Poly capillary X- Ray Optics[ J] . Journal Of X- ray Science and Technology, 2003(6): 32- 47.

(收稿日期:2006- 06- 30)