

微焦点X光光源

王 占 山

摘要: 我们研制了操作在5kV至50kV的微焦点X光光源,它可以满足高分辨率投影成像的需要。通过采用单极靴磁透镜来进行电子束聚焦,得到了 $5\mu\text{m}$ 至 $10\mu\text{m}$ 的光点尺寸。此光源操作方便,可应用在工业、生物、医学等领域。

一、引 言

随着人们对X射线越来越深入地研究,对X射线的应用也越来越广泛。如X射线显微术^[1]、X射线光刻技术^[2]、X射线天文学等。在X射线的应用中,光源是一个重要环节。同步辐射、激光等离子体X射线源的出现给X射线的应用和研究带来了新的活力。但由于这些光源制造复杂,价格昂贵,在应用中受到较大限制,在大多数应用中仍需采用常规的X射线光源,与上述光源相比,常规X光光源的根本弱点在于强度较低,但现在已发展了各种高灵敏度的X光接收器件,在采用常规X光源时,仍能获得足够的灵敏度,而使用常规X光光源可使整个的X光实验系统与应用系统结构简单,操作灵活,便于推广应用。

X射线的特征是色散极小,任何物质的X光折射率 n 与1的偏差大约为 $10^{-4}\sim 10^{-6}$,所以难以实现对X光的聚焦。故X光的成像要采用特殊的方法。一种是利用点光源进行投影放大^[3],另一种是对X射线采用特殊的聚焦方法,如掠入射成像、波带片成像、多层反射膜成像、第三种是X射线接触式成像,本文研制的微焦点X光光源,就是利用它的光源尺寸小的特征进行投影放大成像。

用点光源投影成像的办法进行放大成像的思想,在伦琴发现X光后不久就被提出了,若样品距光源距离为 S ,成像在离样品为 S' 的平面上,则放大率 M 为 $(S+S')/S$,这样方法得到像的分辨率由两部分决定,其一是光源的尺寸,其二是衍射效应。由衍射效应决定的分辨率近似为 $(S\lambda)^{1/2}$, λ 为所用辐射的波长,当要求分辨率为 $1\mu\text{m}$ 时,若 $\lambda=1\sim 10\text{\AA}$,则 S 为 $1\text{mm}\sim 10\text{mm}$,对于透射靶这样的距离极易达到,故对中等分辨率的放大成像,分辨率主要受光源尺寸限制,故应设法缩小X射线管的光点尺寸。用点光源投影成像的办法获得中等分辨率的X射线显微图是相当方便的,而在许多实际应用中,并不需要看到 $1\mu\text{m}$ 以下的分辨率。这时用别的办法就比较复杂和繁琐,而采用点光源投影成像就比较简单。本文描述的光源采用单极靴透镜聚焦电子束,以实现微焦点X光光源,它和以前的微焦点X光光源^[4,5]相比,具有体积小,重量轻便于操作等特点,用它与我室研制的X射线像增强器一起使用,可实现中等乃至高分辨率的X射线实时观察,可望获得广泛的应用。

注:本文作者的导师为余永正。

二、光源的尺寸、性能指标

为了得到 $1\mu\text{m}$ 左右的X光光点,就要求电子束被聚焦到 $1\mu\text{m}$ 左右,我们采用三极电子枪,包括阴极,阳极和聚焦板,它的交叉点直径为 $30\mu\text{m}$ 左右,电流可达几个 μA ,可以满足我们实验的要求。在理想情况下,以电子枪交叉点圆斑为物,经磁透镜成像,形成所需达到的电子束直径。由于透镜象差的影响,理想情况下电子束直径必须比预先给定的直径还要小,没最后得到的直径为 $1\mu\text{m}$,则总的电子光学系统缩小倍数 M 在30倍左右。由于发射采用氧化物阴极它的亮度比钨丝高,因此可以得到满意的上靶电流,在电子枪的聚焦极前又加了一个同轴电极,使其和磁透镜都处于零电位,主要是得到轴对称的静电场,也起到一定的聚焦作用。

长期以来,一直使用着上、下极靴构成并带有磁轭回路的磁透镜,它的结构尺寸比较大,加工精度和装配工艺要求严格,对进一步提高性能带来一定的困难,鉴于这种情况,人们开始研究新型的磁透镜,单极靴磁透镜就是其中的一种。它只有半片磁靴,在磁靴上开一个小孔,构成极孔,开此孔对于磁场的会聚有更大的好处^[7],单极靴磁透镜的聚焦场比双极靴透镜集中,分布宽度窄,极面上的磁场强度最大,离开极面,场强迅速下降,所以透镜的聚焦作用基本位于极面外,此磁场的轴上磁场分布可以用公式 $B(Z) = B_0 \exp[-\ln 2(\frac{Z}{d})]$ 来描述,其场是指数形式, B_0 为最大场强, d 是磁场半宽度,这些值与单极靴内径及极靴的形状有关,单极靴的优点是场分布的半宽度比较小,球差导数 C_s 与色差导数 C_c 都小,而且工艺性好。其线包可以用加油冷却,可得到 $8\text{A}/\text{mm}^2$ 的电流密度,并缩小了透镜的尺寸。它的磁通密度与磁路和线圈的不完整性关系不大,此加工精度和线圈缠绕方式都可以放宽。

根据磁路的设计原则^[8, 9],我们设计了单极靴磁透镜的磁路,其中考虑了油冷的问题,

其尺寸见图。用此单极靴磁透镜和前面的电子枪相加就制成了微焦点X光光源。

做成的X射线光源工作在 5kV 至 50kV 范围内,工作电流是 $1-5\mu\text{A}$,所得到的光点尺寸近似为 $5\mu\text{m}$ 至 $10\mu\text{m}$,电流的测量方法和通常的X光管电流测量方法一样。对光点测量比较复杂,虽然测量的方法比较多^[10, 11],但基本上都得借助其它的仪器设备,根据我们实验室现有的条件,我们用 $10\mu\text{m}$ 相距为 $30\mu\text{m}$ 的铜网做为物,用X光像增强器进行接收观察,可以看到比较清晰的像,故可知我们所做的光源其光点尺寸在 $10\mu\text{m}$ 以下。

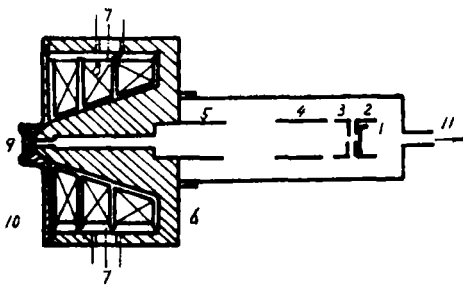


图: 整个光源的结构图

- | | |
|------------|-------------------|
| 1. 阴极 | 2. 调制极 (使用时电位同阴极) |
| 3. 阳极 | 4. 聚焦极 |
| 5. 聚焦电极圆筒 | |
| 6. 单极靴透镜磁路 | 7. 冷却油 |
| 8. 线包 | |
| 9. 靶面 | 10. 盖板 |
| 11. 接真空室 | |

三、应 用

用我们制成的微焦点X光光源同X光像增强器一起使用,可以在工业、生物、医学等领域得到广泛的应用,如用这样的系统来实现集成电路的在线实时检查,可以对电缆、针状插

座进行检验,还可以用来制成小型的X射线诊断仪、特别适用于工厂、矿山、农村等医疗条件差的地方进行诊断检查,当然还可以用来检查生物样品的切片。随着光源性能的提高,可望对生物活细胞进行实时观察,那将产生更高的科学价值和应用价值。

参 考 文 献

- [1] Janos Kirz and Harvey Rarback, Rev. Sci. Instrum., 56 No1 p1
- [2] SPIE Conference Proceedings. 448
- [3] Cosslett. V. E and Nixon. W. C, "X-ray Microscopy", Cambridge University press, Cambridge(1960)
- [4] Ely. R. V, "Microfocal Radiography", Academic, London. 1981
- [5] V. E. Cosslett, Contemporary physics 22 No1, No2 (1981)
- [6] Franks, A at el, Ann. N. Y. Acad. Sci., 342 p167 (1980)
- [7] T. Mulvey, Unconventional lens Design in "Magnetic Electron Lenses" edited by P. W. Hawkes, Springer—Verlag Berlin(1982)
- [8] 西门纪业、葛肇生, 电子显微镜的原理和设计
- [9] A. Septier, "Focusing of Charged Particals"(1967) Academic Press. New. York.
- [10] D. E. Grider and P. K. Ausburn, Br. J. , NDT 29 No1 p15—17

An X-ray Microfocal Source

Wang Zhanshan

Abstract

An X-ray microfocal source has been disigned and studied to meet the need of intermediate or high resolution projection microradiography. Its working voltage range is 5-50kV. Electron beam is focused by a single-pole magnetic lens and the spot size is of 5-10 μ m. The operation of this source is easy and lt's applied in the field of industry, medicine and biology.