

用于中子单色器镶嵌分布测量的 γ 衍射源设计

姚振强, 徐家云, 杨尊勇, 姚茂莹, 王明秋

(四川大学 物理科学与技术学院, 四川 成都 610064)

摘要:用 γ 衍射法测量中子单色器镶嵌角分布,要求 γ 入射束具有强度大、单能性好、发散度小等特点。为了满足上述要求,须对 γ 射线源(金材料)的形状和尺寸进行设计。本工作通过分析束流强度、束流发散度与束斑形状的关系,给出了金材料的矩形设计方案;通过蒙特卡罗计算,分析 γ 自吸收和 γ 康普顿散射在不同厚度下分别对束流密度和单能性的影响,给出矩形金材料在 x, y, z 3个方向的尺寸分别为0.6、6和10 mm。用所设计的金材料制成 γ 源,成功实现了用 γ 衍射法对Ge单晶中子单色器镶嵌分布的测量。

关键词:中子单色器; ^{198}Au γ 衍射源;放射源金材料设计

中图分类号:O571.56

文献标志码:A

文章编号:1000-6931(2010)08-0902-04

Design of γ Diffraction Source Used for Measurement of Mosaic Structure of Neutron Monochromator

YAO Zhen-qiang, XU Jia-yun, YANG Zun-yong, YAO Mao-ying, WANG Ming-qiu
(College of Physics Science and Technology, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

Abstract: Measurement of the mosaic structure for neutron monochromator using γ diffraction requires that the incident γ -ray beam has the features of big intensity, good energy uniformity and small angular divergence, so it is an essential procedure to design the shape and size of gold material of γ source. The cuboid shape of gold was chosen by analysis of the relationships between the intensity, divergence of the γ beam and the beam profile shape. The cuboid gold sizes in three directions were optimized as 0.6, 6 and 10 mm, respectively by analyzing the effect of γ -ray attenuation in gold on the beam intensity, and the effect of γ scattering in gold on the energy uniformity. Using the γ source of the cuboid gold material designed, the Ge crystal mosaic of neutron monochromator was measured successfully by the method of γ diffraction.

Key words: neutron monochromator; ^{198}Au γ diffraction source; design of radioactive gold

中子衍射谱仪是分析材料微观结构的重要工具,而中子单色器是中子衍射谱仪的关键部件,它能将反应堆白光中子源转化成衍射所需

的单色中子源,其转换性能与单色器镶嵌分布密切相关。大块晶体单色器的镶嵌分布可通过中子衍射方法测量^[1],但需用核反应堆中子源,

测量费用高、实验装置复杂,且也只有在中子衍射谱仪建成后才能进行这种分析^[2]。针对这一情况,文献[3-4]提出用 γ 衍射法测量。 γ 源是 γ 衍射实验装置中的核心单元。 γ 射线的波长要比通常用于衍射分析的X射线或中子的波长小两个量级,满足布拉格衍射公式的入射角极小(不足 1°)。因此, γ 衍射实验除了要求入射 γ 束具有单能性外,还要求 γ 束入射方向单一性特别好^[5],这可通过准直器将 γ 束准直成窄束实现。但准直器又会减弱入射 γ 束强度,这就要求 γ 源能提供足够高的强度。实验室通常有的 γ 源均不能满足这一要求。用反应堆高注量率的热中子辐照 ^{197}Au ,可生成满足 γ 衍射实验要求的 ^{198}Au γ 源。文献[3]报道,用一定形状和尺寸的金材料通过中子活化制成了 γ 衍射源,并用于衍射实验,成功分析了 HgI_2 ^[6]等晶体的镶嵌结构。但该文献未给出金材料所取形状尺寸的设计方法。显然,要成功实现 γ 衍射实验,并在衍射实验过程中便于对强 γ 源进行操作和防护,以及针对不同单色器晶体的几何尺寸和镶嵌分布宽度、不同核反应堆热中子注量率等因素,辐照前对 γ 衍射源金材料的形状和尺寸进行设计是必不可少的。本工作拟在建立设计方法的基础上,给出用于锗单晶中子单色器镶嵌结构测量的 γ 衍射源金材料的形状和尺寸设计。

1 几何形状设计

γ 衍射源金材料几何形状的设计取决于对 γ 入射束束斑形状的要求,后者的选择应从有利于提高 γ 入射束强度进行考虑。 γ 入射束强弱直接关系到 γ 衍射实验的成败,因入射到晶体上的 γ 射线只有极少部分发生衍射,并因存在散射和其它本底对测量的干扰,因此,要求单位时间内产生的衍射 γ 射线必须足够多,这就要求入射到晶体上的 γ 入射束强度必须足够大。 γ 入射束强度由束斑面积和束流密度的乘积决定,束斑面积即为入射 γ 束穿出金材料的几何截面面积,因此,可通过适当增大金材料的这一几何面积来增大入射束强度。但较大的束斑面积会使入射束入射方向的单一性变差,降低单色器镶嵌分布测量的分辨率。因此,应从选择金材料的几何形状出发,在保证有足够大的几

何截面面积的条件下,又有足够好的入射束的方向单一性,以满足对测量分辨率的要求。

入射 γ 束斑的形状可选择为圆形或矩形,即金材料的几何截面可设计成圆形或矩形。圆形束 γ 射线的发散性与方向无关,在水平或竖直两个方向上的发散性相同,对于一定的 γ 束发散度,圆形截面的面积受到限制,这显然不利于增大 γ 入射束强度。如果设计为矩形 γ 束,可将矩形金材料的宽度方向(水平方向)的尺寸设计得较小,而长度方向(竖直方向)的尺寸设计得较大。这样,矩形 γ 入射束的发散度在水平方向可很小,保证在水平方向有足够高的晶体镶嵌分布测量分辨率。由于矩形的竖直方向尺寸可根据被测晶体在竖直方向的大小做得较大,因此, γ 束斑的面积可做得较大,增大 γ 束强度。设计的矩形金材料的形状如图1所示。矩形水平和竖直方向分别用 x 和 z 表示,与 xz 面垂直的方向用 y 表示。衍射实验时, γ 束沿 y 的负方向射向被测晶体。 y 方向的尺寸设计为各处相等,这样,可保证 γ 束斑内的强度均匀。

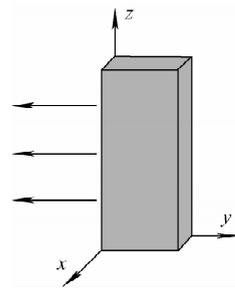


图1 衍射 γ 源金材料的几何形状

Fig. 1 Scheme of gold of γ source

2 尺寸设计

选定金材料的形状后,需进一步对各方向尺寸进行设计,以获得图1所示的矩形金材料在 x 、 y 、 z 3个方向的最佳尺寸。

2.1 y 方向尺寸设计

y 方向的尺寸设计应从提高 γ 入射束束流密度出发,同时也应考虑对 γ 束单能性的要求。

金材料被中子活化后的 γ 束流密度与核反应堆热中子注量率和辐照时间有关,也与金材料 y 方向的厚度有关。当辐照条件一定时,其束流密度随 y 方向厚度增加而增大,但这种随厚度增大的速率会逐渐变小,这是由于 ^{198}Au 发

出的 412 keV γ 射线在穿出金属材料的过程中存在自吸收效应,当厚度足够大时,这种自吸收效应变得很严重,这时的 γ 束流密度随厚度增加变得非常缓慢,以致趋于饱和。将对应于饱和束流密度的金属材料厚度称为饱和厚度。显然,当金属材料实际厚度大于饱和厚度时, γ 束流密度不会再增加,而整个金属材料 γ 源的活度却增加,且几乎是随厚度线性增加。由于衍射用 γ 源的活度要求较大,可达 3.7×10^{12} Bq 以上,若厚度增加 1 倍, γ 源的活度也要增加 1 倍,明显会增加衍射实验过程中对强 γ 源屏蔽和防护的难度。

根据上述分析, y 方向尺寸应选择在饱和厚度以下。这一饱和厚度可通过束流密度随厚度变化的关系曲线得到。为得到这一关系曲线,首先用蒙特卡罗方法计算出金属材料中不同厚度 y 处的 412 keV γ 射线沿负 y 方向穿出 xz 面的透射率。得到的透射率随厚度变化的关系曲线如图 2 所示。其计算方法为:将金属材料按 y 方向分成若干等厚度薄片,分别计算每个薄片内发出的 γ 射线垂直穿出 xz 面的透射率。由于薄片数目分得足够多,薄片极薄,每个薄片内 γ 射线的透射率可认为与厚度无关。

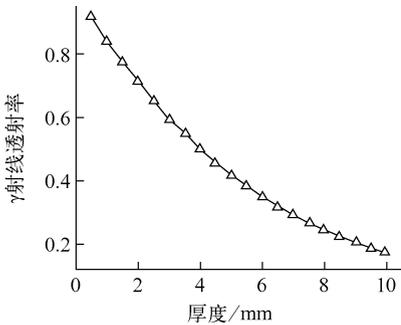


图 2 γ 射线透射率与厚度的关系

Fig. 2 Transmissivity of γ -ray vs thickness of gold

由图 2 可见,在金属材料不同厚度处发出的 412 keV γ 射线垂直穿出 xz 面的透射率随厚度增加迅速减小,当厚度为 4 mm 时,透射率减小到约 50%,而当厚度为 8 mm 时,其透射率不足 30%,即厚度每增加 4 mm,透射率约减小一半。

对图 2 所示的透射率曲线取不同厚度进行积分并归一,可得到束流密度随厚度的变化关系,如图 3 所示。

由图 3 可看出,饱和厚度约为 16 mm。因

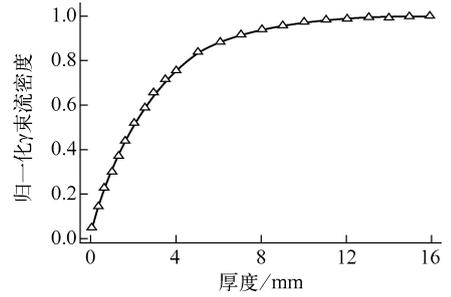


图 3 xz 面出射束流密度与厚度关系曲线

Fig. 3 Flux density exiting from xz plane vs thickness of gold

此, γ 衍射源金属材料在 y 方向的厚度应选择为 16 mm 以下。究竟取多大值,还应考虑 γ 束单能性受厚度的影响这一因素。

考虑到康普顿效应对出射束单能性的影响,通过蒙特卡罗方法计算 γ 束单能性与厚度的关系,其方法是,计算一定厚度下穿出图 1 所示 xz 面的 γ 射线强度随能量的分布,由能量小于 412 keV γ 射线所占比例表征 γ 束的单能性。得到的单能性随厚度的分布如图 4 所示。

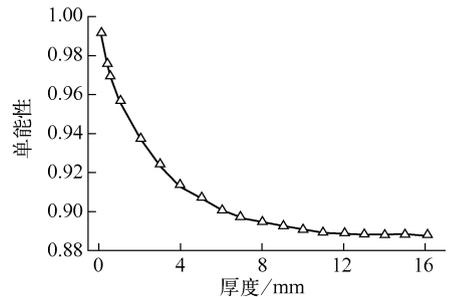


图 4 不同厚度下 xz 面出射 γ 射线单能性

Fig. 4 Energy uniformity of γ -ray beam exiting from xz plane vs thickness of gold

由图 4 可见, γ 束单能性随厚度增加而变差,当厚度足够大时,单能性不再变化。根据图 3、4 所示束流密度和单能性随厚度的变化规律,在 3~10 mm 之间选择金属材料 y 方向的厚度,相应的束流密度变化范围为 65%~98%,单能性为 93%~89%。这里给出的束流密度是相对束流密度。实际束流密度与金属材料被活化的程度有关,即与活化后的 ^{198}Au 在金属材料中所占比例有关。活化程度与热中子注量率和活化时间相关,如果所用反应堆热中子注量率大,且金属材料被充分活化,则可选择较小的厚度,如

4 mm,甚至3 mm;如果情况相反,则应选择得厚一些。由于用于活化的反应堆热中子注量率仅为 $10^{13} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 量级,且受反应堆运行对辐照时间的限制,故选择的厚度为6 mm。如果把厚度选择为10 mm,束流密度只能再提高百分之几,而源强却会提高60%多,这无疑会增加辐射防护的难度,或在实验过程中接受更多的辐射剂量。

2.2 金材料 x, z 方向的尺寸设计

γ 衍射源金材料 x, z 方向尺寸决定了 γ 入射束束斑大小。较大的入射束束斑对提高入射束强度有利,这有利于 γ 衍射实验的实现;但束斑增大,入射束在水平方向的发散度也增大,这又不利于提高单色器晶体镶嵌分布的测量分辨率。因此, x 方向的尺寸应兼顾上述两方面因素进行设计。设 x 方向尺寸为 d ,它与 γ 束发散角 ϕ 和与源到准直器的距离 D 的关系如图5所示。

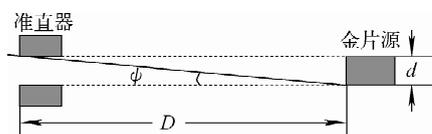


图5 γ 入射束水平发散度示意图

Fig. 5 Scheme of horizontal divergence of γ -ray beam

由图5可见, d 与 ϕ 和 D 的关系为:

$$d = D \tan \phi \quad (1)$$

根据式(1),当对镶嵌分布测量分辨率的要求允许发散角较大时, d 可较大;当实验室空间允许 D 较大时, d 也可较大。由于要测的晶体单色器镶嵌角分布的半宽度为 $0.1^\circ \sim 0.5^\circ$,允许的发散角范围为 $0.2' \sim 1'$, D 考虑的变化范围为 $2 \sim 5 \text{ m}$,根据式(1), d 的变化范围为 $0.12 \sim 1.45 \text{ mm}$ 。实际选择 d 时,应考虑 D 的限制,并保证足够小的发散角。取发散角为 $0.5'$,结合 D 为 4 m ,取 d 为 0.6 mm 。若 d 较大,而当需 d 较小时,只需将准直器的缝宽减小即可实现。虽通过调节准直器缝宽可改变 x 方向的有效尺寸,但这并不意味着可将 d 取得很大,因这只会将源强大幅提高,增加辐射防护的难度,而对改善 γ 入射束的性能并无帮助。

z 方向的尺寸影响到 γ 入射束束斑大小和 γ 入射束竖直方向的分散度。当只关心镶嵌分布的水平测量分辨率时,只限制 γ 入射束的水

平发散度,而竖直方向的分散度可设计得较大,为增大束斑面积,可将 z 方向尺寸取得较大,但应小于被测晶体单色器 z 方向的尺寸。本工作要测的晶体单色器在 z 方向的尺寸大于 10 mm ,因此,将 z 方向的尺寸设计为 10 mm 。

此时,取反应堆热中子注量率为 $8 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,对金材料辐照 24 h ,在辐照结束后,估算金材料的活度可达 $3.7 \times 10^{12} \text{ Bq}$,能够满足测量对源强度的要求。

3 结论

用 γ 衍射测量中子单色器镶嵌角分布, γ 入射束需具有强度大、单能性好、发散度小等特点。为实现上述要求, γ 源金材料形状和尺寸设计是一关键步骤。本工作设计出的矩形金材料在 x, y, z 3个方向的尺寸分别为 0.6 mm 、 6 mm 、 10 mm 。金材料经核反应堆中子辐照后,制备出了 γ 衍射所需的 γ 源。用此 γ 源成功实现了用 γ 衍射方法对Ge单晶中子单色器镶嵌分布的测量。

参考文献:

- [1] KULDA J, WAGNER V, MIKULA P, et al. Comparative tests of neutron monochromators using elastically bent silicon and mosaic crystals [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 1994, 338: 60-64.
- [2] AXE J D, CHEUNG S, COX D E, et al. Composite germanium monochromators for high resolution neutron powder diffraction applications[J]. Journal of Neutron Research, 1994, 2(3): 85-94.
- [3] SCHNEIDER J R. A γ ray diffractometer: A tool for investigating mosaic structure[J]. Journal of Applied Crystallography, 1974, 7(6): 541-546.
- [4] FREUND A, SCHNEIDER J. Two new experimental diffraction methods for a precise measurement of crystal perfection[J]. Journal of Crystal Growth, 1972, 13(14): 247-251.
- [5] HEWAT A W. Design for conventional high-resolution neutron powder diffractometer[J]. Nucl Instrum Methods, 1975, 127: 361-370.
- [6] YELON W B, ALKIRE R W, SCHIEBER M M, et al. Crystal perfection of HgI_2 studied by neutron and gamma-ray diffraction[J]. J Appl Phys, 1981, 52(7): 4 604-4 609.