

# 高效率 Be 过滤探测器 中子非弹性散射谱仪

阮景辉 牛世文 曾祥欣 王 军 成之绪  
程玉芬 勾 成 郭立平 林 军 俞安孙

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

沈志功 柯永丰 张泮林 严启伟

(中国科学院物理研究所 北京 100080)

1995-04-24 收稿

## 摘 要

在中国原子能科学研究院重水堆水平孔道旁,建立了高效率的 Be 过滤探测器中子非弹性散射谱仪,首次研制了具有宽的接受角( $\sim 30^\circ$ )和聚焦安排的新型 Be 过滤器,使探测效率提高3倍以上,同时也克服了一般 Be 过滤谱仪在低能段相干散射的影响.本谱仪还通过具有特殊取向的 Ge 单色器的不同晶面的自动转向,拓宽了测量的能量范围(10—400meV),并有较好的能量分辨率(4%—9%).在此谱仪上对  $ZrH_{1.6}$  和  $PdH_{0.58}$  的光学振动模以及高  $T_c$  超导材料  $YBa_2Cu_3O_{6+x}$  的全频谱进行了测试,观察出奇异的结构峰、高频模和反常的散射强度,表明本谱仪不仅效率高而且还具有优良的物理性能,可以在中等通量水平的反应堆上开展广泛的热中子非弹性散射研究.

**关键词** 非弹性散射, 中子谱仪, 探测器, 过滤器, 能量分辨率.

## 1 引 言

热中子散射方法已在物理、化学和生物等领域中得到广泛的应用,至今仍处在开拓的热潮之中.目前还在继续寻求新的强中子源,例如高强度的散裂中子源,创立新型的多用途的高效率中子散射谱仪,以便更充分地展示它的威力,拓宽其研究领域.

在中国仅有一个实验性的重水堆,水平孔道引出来的热中子通量大约为  $10^{18}n/s \cdot cm^2$ ,在已有的开展热中子散射的实验堆中处于中等偏下的水平.加之所有的水平孔道全是径向取向,快中子和  $\gamma$  射线本底较强,这给热中子非弹性散射研究带来很大困难,一般通用的中子谱仪,由于本底太高而难以实现应有的测量功能.显然,只有选择具有高效率的探测系统并能较好的屏蔽快中子的谱仪,才能进行比中子衍射实验困难得多的中子非弹性散射的研究,而具有宽的接受角和聚焦排列式的 Be 过滤探测器谱仪具备这一特点.

另外, 此种谱仪可开展的课题广泛多样, 除了可测定一般的声子能谱以外, 还对高频激发模、非谐振动模和以氢作为探针的定域模的研究具有独特的优越性。

## 2 新型 Be 过滤探测器中子非弹性散射谱仪的结构及其物理性能

谱仪的结构示意于图 1 中, 重水反应堆径向出射的热中子, 经过水平孔道内的准直器 C1 (发射角  $\sim 29'$ ), 投射到单色器 M 上 (Ge(111), Ge(113), Ge(224) 或 Cu(111)), 产生的单色中子束经小鼓内的准直器 C2 ( $\sim 40'$ ) 后打在样品 S 上, 在散射角为  $75^\circ - 105^\circ$  的非弹性散射中子经 Be 过滤器过滤后, 仅仅透射出能量  $\leq 5.2\text{meV}$  的中子, 并被 Be 后的中子探测器记录。

Be 过滤器由 21 块矩形 Be 块组成, 每块大小为  $10 \times 15 \times 1\text{cm}^3$ , 紧密地排列成扇形, 构成一个高 10cm、内外环弧宽分别为 23 和 31cm、厚为 15cm 的扇形环。每块 Be 的入射窗和出射窗的中心连线聚焦于样品的中心 S 上。除了入射和出射窗口外, Be 块其余面有镉片 (厚为 0.2 mm) 紧贴, 每块 Be 的出射窗口对样品中心的水平张角为  $0.97^\circ$ 。镉片的作用除了消除在 Be 块内散射的中子的影响外, 还对样品的非弹性散射中子有准直的作用, 这将提高谱仪的能量分辨率。由于 Be 块为矩形几何, 组成扇形后, Be 块间留有空穴, 为了获得良好的冷冻性能 (用液氮), 在空穴处填塞了三角形铝块。

探测器采用了浓缩  $^{10}\text{B}$  的  $\text{BF}_3$  中子计数管, 共 29 支分成三组。如果使用中间的一组, 则接受角限制在  $87.5^\circ - 92.5^\circ$  之间。

谱仪的主要物理性能如下:

(1) 单色中子束的能量范围: 选择经过特定方向截割并经热压处理的 Ge 单晶作为单色器, 通过旋转单色器主轴可以任意选取  $h, k, l$  的任何晶面, 最有效的几组晶面为 (111)、(113) 和 (224), 从而可获得 13 至 499meV 的单色中子束。单色台上也备有 Cu(111) 和 PG(002) 单色器。表 1 列出了各单色器的单色中子能量范围。

(2) 谱仪的能量分辨: 在第一准直器 C1 发散角为  $29'$ 、小鼓准直器 C2 发散角为  $40'$  和 Ge (或 Cu) 单色器镶嵌度为  $10'$  时, 谱仪的能量分辨率示于图 2 中。在感兴趣的能量范围内, 能量分辨率在 4%—9% 之间。由于计算中未考虑 Be 块的准直作用 (发散角为  $0.97^\circ$ ), 因而实际的能量分辨率要好于图 2 中的结果。此类谱仪还可使用组合过

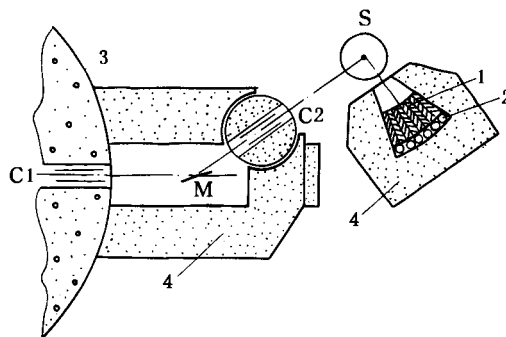


图 1 宽角、聚焦式 Be 过滤探测器中子非弹性散射谱仪

C1 为水平孔道内的准直器 ( $29'$ ),

C2 为旋转准直器 ( $40'$ ),

1 为液氮冷冻下的 Be 过滤器,

2 为  $\text{BF}_3$  热中子探测器,

3 为重水堆的生物屏蔽体,

4 为谱仪的屏蔽体,

M 为单色器 (Ge(111), Ge(113), Ge(224), Cu(111)),

S 为样品台。

表1 单色器及其单色中子能量范围

单色器	单色中子的能量范围 (meV)
Ge(111)	13 — 62
Ge(113)	46 — 212
Ge(224)	100 — 499
Cu(111)	35 — 150
PG(002)	12 — 60

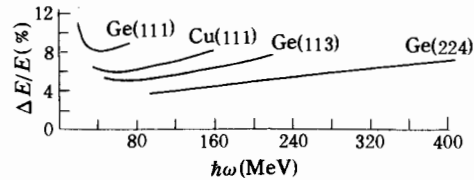
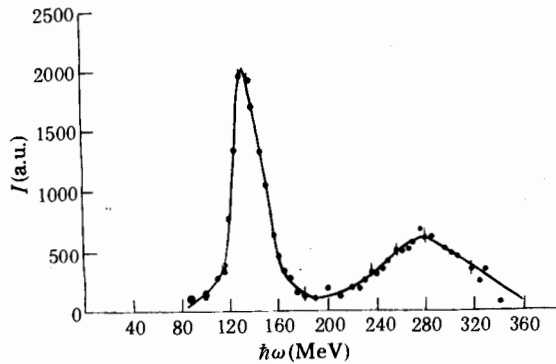


图2 谱仪的能量分辨率

滤器, 例如用 Be 和石墨取代单一的 Be 过滤器, 可使能量分辨率进一步提高, 特别是低能部分将获得较大的改善.

(3) 谱仪的探测效率: 由于 Be 过滤器接受样品非弹性散射中子的张角 ( $30^\circ$ ) 为通常的 3 倍, 再加上采用了 Be 块的聚焦排列, 因而本谱仪的探测效率提高了 3 倍以上.

### 3 几种样品的非弹性散射中子谱的测量

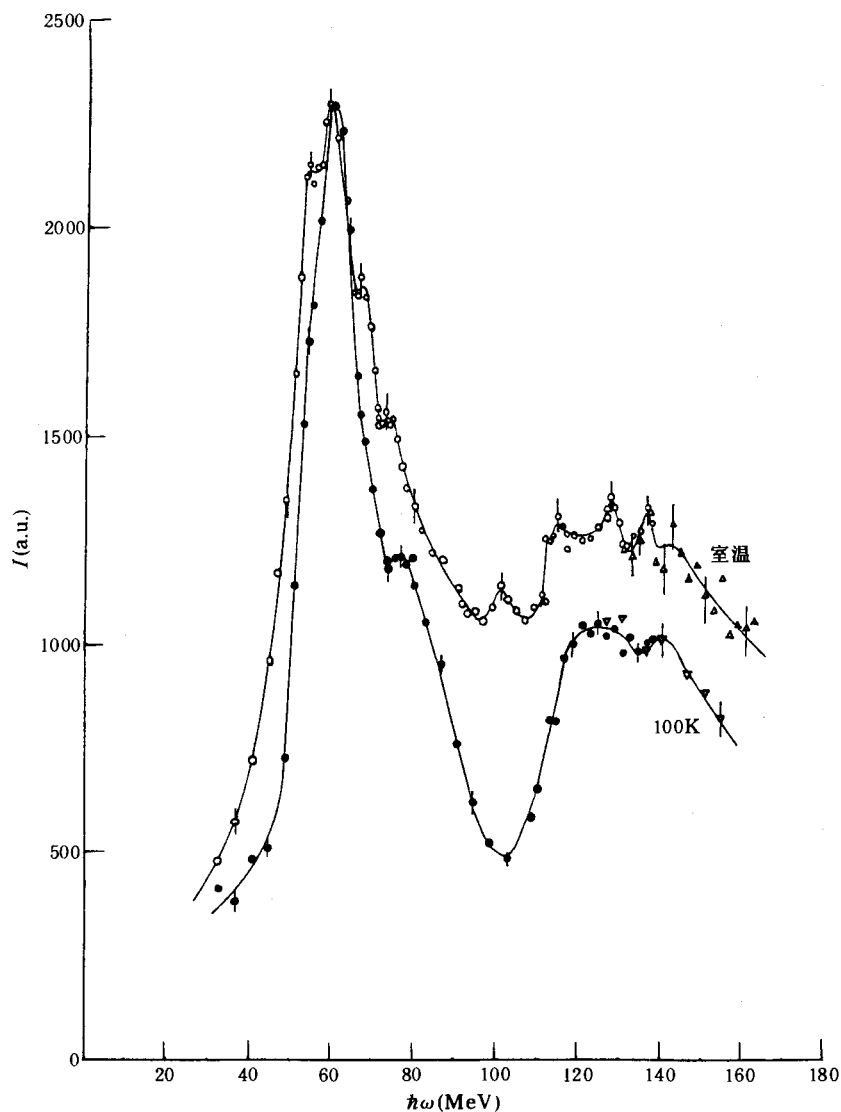
图3  $ZrH_{1.6}$  的光学振动谱

为了检验谱仪的物理特性, 首先测定了两种有代表性的金属氢化物  $ZrH_{1.6}$  和  $PdH_{0.8}$  的光学振动模, 其后在较宽的能量范围内测定了两种氧含量的高  $T_c$  超导材料  $YBa_2Cu_3O_{6+x}$  的散射谱, 观察高频模 (在  $60-150\text{meV}$  范围内) 随氧含量  $x$  的变化. 主要结果如下:

(1)  $ZrH_{1.6}$  的光学振动模:  $ZrH_{1.6}$  样品厚  $1.5\text{mm}$ , Ge(224) 作为单色器, 室温下的测量结果见图 3. 从图中可见, 基频和倍频分别在  $137$  和

$277\text{meV}$ , 与已有的结果<sup>[1]</sup> 符合较好, 并且也满足爱因斯坦模型的  $2:1$  关系. 基频峰分布尖锐, 其半宽度为  $28\text{meV}$ , 这说明本谱仪的能量分辨较好.

(2)  $PdH_{0.8}$  的光学振动模: 钯氢的振动模随氢含量而变化, 并具有强的非谐性. 振动模呈现精细结构, 然而用一般的中子非弹性散射谱仪是难以分辨的. 钯氢样品用电解法制备, 其含氢量由热中子透射法定出. 测量中分别用 Cu(111) 和 Ge(224) 作为单色器, 在室温和低温 ( $\sim 100\text{K}$ ) 两种条件下分别测定了光学振动模, 其结果示于图 4 中. 围绕基频主峰 ( $59\text{meV}$ ) 和倍频峰 ( $\sim 120\text{meV}$ ), 首次观察出一系列精细结构峰. 特别是在室温时, 结构峰清晰, 其峰位分别在  $53, 59, 68, 73, 101, 113, 127, 136$  和  $143\text{meV}$ . 已有的结果<sup>[2-4]</sup> 观察的基频主峰分布较宽, 在  $100\text{meV}$  以上的高频区, 峰重迭、结构模糊. 从图中低温 ( $\sim 100\text{K}$ ) 曲线可见  $53$  和  $67\text{meV}$  的结构峰几乎消失, 仅保留一个微弱的拐点. 而  $73\text{meV}$  的峰似乎向高频方向移动了  $3\text{meV}$  (即峰位在  $76\text{meV}$ ). 另外在  $100\text{meV}$  左

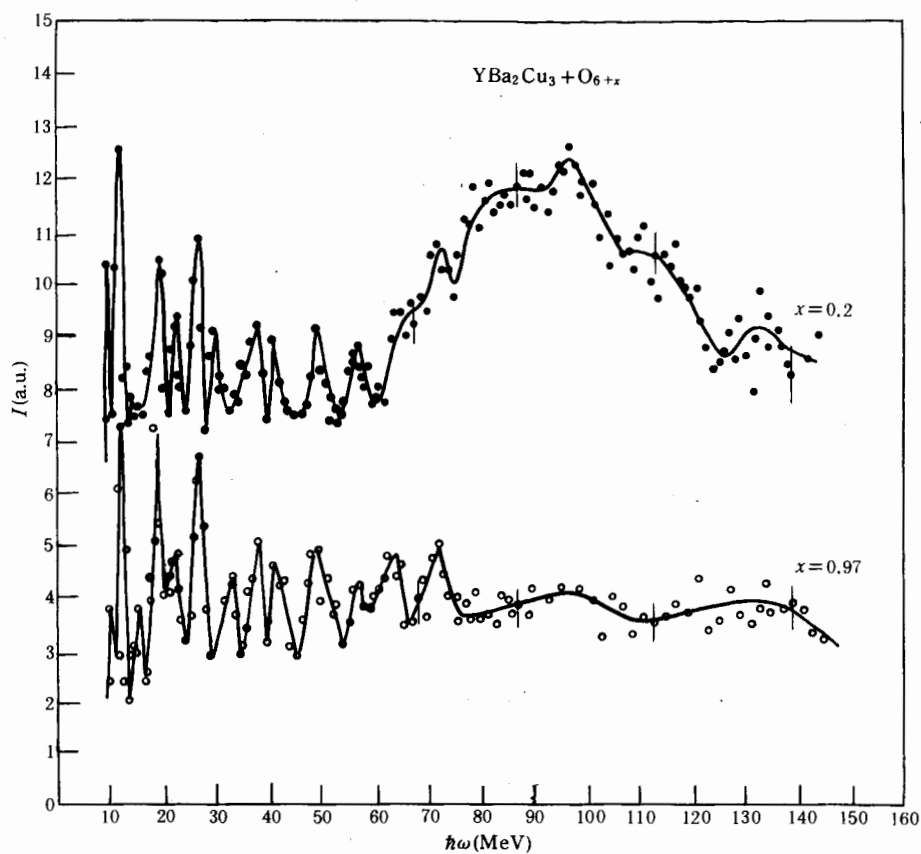
图4  $\text{PdH}_{0.58}$  的光学振动谱

右出现了一个深谷, 101meV 峰消失. 在 100meV 以上的高频区, 峰结构已不明显, 仅在大约 124meV 和 141meV 处有微弱的驼峰结构.

钯氢振动谱呈现的精细结构以及它随温度的异常变化的微观机理有待进一步分析, 从振动谱中获取非谐性参数的工作准备另文详述.

(3) 高  $T_c$  超导材料  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$  的激发模: 对于  $x=0, 0.2, 0.35, 0.78$  和  $0.97$  五种氧含量的  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$  样品, 在 10—150meV 能量范围内测定了激发模, 图 5 给出了有代表性的两种氧含量  $x=0.2$  和  $0.97$  的激发谱, 表 2 比较了用中子非弹性散射方法获得的谱峰位置. 主要结果概述如下:

(a) 在  $x \leq 0.2$  时(四角相, 半导体状态), 在 60—150meV 能量范围内, 发现有强

图5  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$  的中子非弹性散射谱表2  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$  的中子非弹性散射峰位置\*

序号	散射峰的位置 (meV)			序号	散射峰的位置 (meV)		
	本文	Gompf <sup>[5]</sup>	Parshin <sup>[6]</sup>		本文	Gompf <sup>[5]</sup>	Parshin <sup>[6]</sup>
1	10	10	10	8	33		
2	12	13—14	13—14	9	41	41	
3	15—16			10	48		
4	19	19	19	11	56	51—55	51—55
5	22	24		12	63(x=0.97)		
6	27			13	72(x=0.97)		
7	30(x≤0.2)		30	14	60—150(x≤0.2)	80(x→0)	

\* 在峰位后未标明  $x$  值的, 表示该峰位与  $x$  无关.

的高频模存在, 在  $x=0.78$  和  $0.98$  时(正交相, 超导态), 高频模消失, 仅残留一个无特征的平坦本底.

(b)  $x=0.2$  时, 在测量的能量范围内(10—150meV), 中子非弹性散射强度异常强于  $x=0.78$  和  $0.97$  的强度, 前者为后者的 1—2 倍.

(c) 在 60meV 以下能量区域内, 散射峰分辨清晰, 大多数谱峰与文献[5, 6] 基本一致, 而我们的结果更为精细.

我们从微观深层次上首先发现, 高频模和反常散射强度以及它们随氧含量的变化有如此巨大的差异, 它将有助于揭示高  $T_c$  超导机理的迷宫. 此部分工作的细节可参考文献[7].

## 4 结 论

根据以上谱仪的物理性能和几种典型样品的测试结果, 表明宽接受角和聚焦排列的 Be 过滤器谱仪能够运行在较好的能量分辨条件下, 且具有较高的探测效率, 可以在较低的反应堆功率( $\sim 5000\text{kW}$ )条件下广泛地开展热中子非弹性研究课题.

本谱仪的 Be 过滤器的物理结构为首创, 它不仅使探测效率提高 3 倍以上, 而且克服了一般 Be 过滤器谱仪固有的弱点——相干散射在低能区域的影响.

在此谱仪上获得了  $\text{PdH}_{0.58}$  和  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$  激发谱的优异结果, 首次观察出奇异的结构峰、高频模和反常的散射强度.

## 参 考 文 献

- [1] 阮景辉等, 高能物理与核物理, 5 (1978)441.
- [2] D. K. Ross *et al.*, *Zeitschrift fur Physikalische Chemie Neue Folge*, **Bd. 114** (1979) 221.
- [3] 陈桂英等, 物理学报, (1980) 257.
- [4] 阮景辉等, 物理学报, 3 (1986) 389.
- [5] F. Gompf *et al.*, *Proceedings of the Third International Conference on Phonon Physics and the Sixth International Conference on Phonon Scattering in Condensed Matter.*, **Vol.1** (1990) 307.
- [6] P. P. Parshin *et al.*, *Proceedings of the Third International Conference on Phonon Physics and the Sixth International Conference on Phonon Scattering in Condensed Matter.*, **Vol.1** (1990) 310.
- [7] 阮景辉等, 物理学报, 7 (1993) 1121; Ruan Jinghui *et al.*, *Physics Letters*, **A187** (1994) 107.

## A Beryllium Filter Spectrometer With High Efficiency for Neutron Inelastic Scattering

Ruan Jinghui   Niu Shiwen   Zeng Xiangxin   Wang Jun  
Cheng Zhixu   Cheng Yufen   Gou Cheng  
Guo Liping   Lin Jun   Yu Ansun  
(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413)

Shen Zhigong   Ke Yongfeng   Zhang Panlin   Yan Qiwei  
(Institute of Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Received 24 April 1995

### Abstract

A beryllium filter detector spectrometer with high efficiency for neutron inelastic scattering has been built beside the horizontal channel of heavy water reactor in China Institute of Atomic Energy. It is the first time to develop a new type of beryllium filter with a wide receiving angle ( $\sim 30^\circ$ ) and focus arrangement of beryllium blocks. The detecting efficiency of the spectrometer is raised at least by a factor of three. Furthermore, the influence of coherent scattering upon experiments has also been eliminated in the range of low energy. By automatic rotating of different crystal planes of Ge monochromator which possesses particular orientation the measurable energy range of the spectrometer has been widened (from 10 to 400meV) and the energy resolution improved (4%—9%). On this spectrometer, we have measured the optical vibrational modes for  $ZrH_{1.6}$  and  $PdH_{0.8}$  and the total spectrum of the high-temperature superconducting material  $YBa_2Cu_3O_{6+x}$  and observed its unusual structural peaks, high frequency modes and anomalous scattering intensities. It has been shown that the spectrometer not only is efficient but also possesses an excellent physical capability. So it is possible to carry out extensive research on inelastic thermal neutron scattering on a medium-flux reactor.

**Key words** inelastic scattering, neutron spectrometer, detector, filter, energy resolution.