



2010年版

中国工程物理研究院 科技年报

Annual Report of China Academy of Engineering Physics



• 中国原子能出版传媒有限公司 •

7B13-54

20001

2010

2010 年版

中国工程物理研究院

科技年报

Annual Report of

China Academy of Engineering Physics

编辑部通讯地址

四川省绵阳市 919 信箱 805 分箱

邮编: 621900

电话: (0816) 2485754, 2485793

传真: (0816) 2485754

E-mail: HPLPB @caep.ac.cn

URL: www.caep.cetin.net.cn



中国原子能出版传媒有限公司

图书在版编目(CIP)数据

中国工程物理研究院科技年报. 2010 年版/《中国工程物理研究院科技年报》编辑部编. — 北京: 中国原子能出版传媒有限公司, 2011.3

ISBN 978-7-5022-5206-9

I. ①中… II. ①中… III. ①工程物理学—中国—2010—年报 IV. ①TB13-54

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 055654 号

内容简介

本书主要介绍 2009 年度中国工程物理研究院在物理、力学与数学、化学与材料科学和信息科学与电子工程等重点学科与研究领域的部分科研进展与科研成果, 这些内容采用专稿形式, 充分体现了科研特色, 展示了科研能力。另外, 本书还介绍了 2009 年度中国工程物理研究院科研人员申请的国家自然科学基金资助项目、科研人员在全国性学会中部分任职情况、中国工程物理研究院组织或参加的国内外学术交流活动以及当年度硕博学位论文题目。

本书旨在加强与国内外同行之间的交流与合作, 并可供从事科学研究与管理的有关部门和科技人员、高等院校师生参考。

中国工程物理研究院科技年报/2010 年版

出版发行 中国原子能出版传媒有限公司 (地址: 北京市海淀区阜成路 43 号 邮编: 100048)

责任编辑 付 真

特约编辑 李天惠

印 刷 四川绵阳科学城曙光印刷厂

经 销 全国新华书店

开 本 880 mm×1230 mm 1/16

字 数 318 千字

印 张 9.625

版 次 2011 年 3 月第 1 版 2011 年 3 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5022-5206-9

印 数 1—1 000 定 价 100.00 元

出版社网址: <http://www.aep.com.cn> E-mail: atomep123@126.com

版权所有 侵权必究

《中国工程物理研究院科技年报》

编审委员会

主 任 杜祥琬

副主任 彭先觉 汪小琳 李志民

委 员 (以姓氏笔画为序)

王保健	邓文荣	冯建农	帅茂兵	司宝萍	叶春福
刘柯钊	何建国	何世达	何朝晖	李 华	李方军
李正宏	苏 伟	吴志杰	张 健	张 凯	张保汉
张明君	张文平	范泽辉	孟凡宝	赵 峰	赵成杰
顾 援	莫 军	黄 健	梅 军	傅思祖	舒远杰
隋 展	谢 平	魏智勇			

编辑部 李天惠 刘 剑

首届全国脉冲功率会议成功召开

首届全国脉冲功率会议于 2009 年 9 月 21 日到 25 日在安徽芜湖成功举行。此次会议是中国核学会脉冲功率技术及其应用分会成立后举办的首次全国性学术交流会议，会议由芜湖国睿兆伏电子股份有限公司承办，中物院流体物理研究所、中物院科协、四川省电子学会高能电子学专业委员会等单位协办。

会议共收录论文 210 篇，涉及脉冲功率技术及其应用、强流脉冲加速技术、高功率微波技术、相关数值模拟研究等多个领域。来自中国工程物理研究院、西北核技术研究所、中科院电工所等研究院所，清华大学、中国科技大学、国防科技大学等高校的相关科研单位，以及国睿兆伏电子、力源电子、天润中电等相关企业的 190 位代表参加了会议。彭先觉院士、中物院流体物理研究所邓建军研究员、西北核技术研究所曾正中研究员和国防科大刘金亮教授为大会作了特邀报告。会议报告论文 110 余篇，张贴论文 60 余篇。经专家评审，评选出了 5 篇优秀论文。另外，会议还评选了优秀青年科技工作者。



目录 2010

院长致辞.....	赵宪庚	1
-----------	-----	---

物理学科

“神龙一号”装置产生的光中子特性模拟研究.....	向艳军	5
过渡金属钼与镍钛合金的晶格动力学研究.....	曾召益	7
用于脉冲中子测量的“裂变 γ 射线探测器”的设计技术.....	张建华	9
“强光一号”Z箍缩实验 Al 等离子体能谱诊断.....	秦 义	12
高浓铀主动中子多重性测量研究.....	熊忠华	13
辐射不透明度实验研究进展.....	张继彦	15
全范围状态方程的大规模快速计算.....	孟续军	18
微喷射物理机制研究进展.....	王 裴	22
喷射混合理论研究进展.....	王 裴	25
武器物理欧拉数值方法应用研究.....	何长江	28

力学与数学学科

爆炸容器应变增长现象机理的研究进展.....	董 奇	33
炸药件内部不同位置的局部密度反演.....	戴 斌	35
高斯过程响应面法及其应用研究.....	刘信恩	37
三维离散位错动力学模拟研究.....	余 勇	39
基于设计结构矩阵的多学科协同设计方法研究.....	李火生	41
人在回路的沉浸式虚拟装配技术研究.....	何良莉	43
基于微能脉冲的微纳米尺度沉积与去除可逆加工技术研究.....	何建国	46
空气静压支承关键技术研究.....	陶继忠	48
电子束焊接工艺知识库与专家系统研究.....	沈显峰	50
光滑粒子动力学方法中基于界面重构的表面张力模型.....	章明宇	52
界面不稳定性与湍流混合现象的数值模拟研究.....	王丽丽	54
CHAP 程序研制进展.....	熊 俊	57
可扩展的通信调度创建算法.....	刘 旭	60
高应变率多介质、大变形欧拉数值模拟方法研究.....	冯其京	62
AMR 自适应结构网格上辐射流体力学显隐耦合时间积分算法.....	徐小文	65

目录 2010

化学与材料学科

含氦钛膜 He 演化行为研究.....	周晓松	69
污染治理技术进展.....	蒋树斌	72
爆轰实验示踪气体样品在线远程安全采集技术研究.....	姜 涛	75
等离子体对多壁碳纳米管的表面修饰.....	徐 涛	77
炸药晶体缺陷的 μ CT 表征研究.....	宗和厚	79
聚苯胺/乙烯基聚合物抗静电薄膜的制备和应用研究.....	钟发春	81
新型灌封材料的制备与表征.....	赵秀丽	83
水基磁流变抛光液的设计、制备和性能.....	魏齐龙	85
钯及钯合金的氙老化效应研究.....	朱宏志	87
PuO_2 和 $\alpha\text{-Pu}_2\text{O}_3$ 光学性质的经验势模拟研究.....	褚明福	90
新型 Ti-Zr-Ni-Pd 准晶吸氙特性研究.....	黄火根	92
ICF 制靶关键技术研究.....	张 林	94

信息科学与电子工程学科

皮秒时间分辨率变像管相机研制及进展.....	张登洪	99
高能闪光照相图像处理技术研究进展.....	管永红	102
微惯性传感器的新进展.....	高 杨	105
圆波导 TE_{21} 模跟踪网络的研究.....	赫英毅	108
微波波段光子带隙结构在天线中的应用技术.....	陈 琦	110
高动态航天飞行器惯性/卫星复合定位技术.....	魏可惠	112
高动态卫星定位接收机技术研究.....	解 楠	115
ISAR 图像欺骗干扰技术研究.....	江 舸	118
熔石英表面功能化处理技术研究进展.....	蒋晓东	120
ICF 激光驱动器波前校正技术研究.....	代万俊	123
高功率微波 NEPTUNE 程序中的并行计算及几何建模.....	陈 军	126
高重频二极管泵浦双程 MOPA 系统中的锥度光纤相位共轭研究.....	高清松	128
微波混沌腔体中的散射特性研究.....	闫二艳	130
重复频率直线变压器在长脉冲高功率源中的应用.....	向 飞	132
辐射成像技术最新研究的进展.....	陈 浩	134

附录

附件 A 2009 年度国家自然科学基金资助项目.....	139
附件 B 2009 年度中国工程物理研究院在全国性学会中部分任职情况.....	140
附件 C 2009 年硕士、博士研究生毕业论文题录.....	144



院长致辞

“十一五”是大事频仍、成绩斐然的五年。科研能力再上新台阶，部分项目取得历史性突破，科研实力有效提升，学科建设及科技成果丰硕。

2010年度科技年报50多篇研究报告，虽仅仅是我院在物理学、力学与数学、化学与材料科学以及信息科学与电子工程科学等领域的部分基础研究和应用研究成果，但重要的是，它展示了我院科研人员加大基础研究投入、保障我院未来可持续发展的基础。

站在新起点，中国工程物理研究院着眼国家安全形势以及国防科技和武器装备发展趋势，着力提升自主创新能力，以军民融合、三元发展为主抓手，以全力解决科研实力不足以支撑使命要求的主要矛盾为突破口，全力以赴推进我院事业科学发展。新技术孕育新突破，我们要进一步加大基础研究和应用基础研究的广度和深度，解决制约核武器和高新技术装备发展的关键技术和“瓶颈”问题，并在战略科技探索方面取得特色创新成果，引领后续发展，为有效履行“一个确保、四个统筹”神圣使命提供技术保证和支撑，为我国迈向世界强国做出新的更大贡献！

中国工程物理研究院院长

钱震夔

中物院精神

铸国防基石
做民族脊梁



物理学科

等离子体物理与计算物理
核物理与军控物理



向艳军

助理实习员

0816-2493325

xiangyj@caep.ac.cn

“神龙一号”装置产生的光中子特性模拟研究

“神龙一号”装置可产生光中子，采用蒙特卡罗程序模拟计算了其产生的光中子强度、时间和能量特性及其被慢化剂慢化后的时间能谱特性。

1 获得“神龙一号”装置产生的高强度脉冲白光中子特性

流体物理研究所的“神龙一号”直线感应电子加速器加速电子的能量达 20 MeV，其产生的高能韧致辐射光子有部分高于钽靶的光核阈能，会产生光中子。利用蒙特卡罗软件 MCNP5 模拟电子-光子-中子耦合输运，计算了“神龙一号”装置采用每层 0.5 mm 厚、共 24 层的叠层钽靶产生的光中子特性，其中子强度达 1.34×10^{11} 个每脉冲，呈白光特性，从热能区直到十几兆电子伏，如图 1 所示；近似各向同性发射，中子脉冲宽度约在 90 ns，时间特性如图 2 所示。

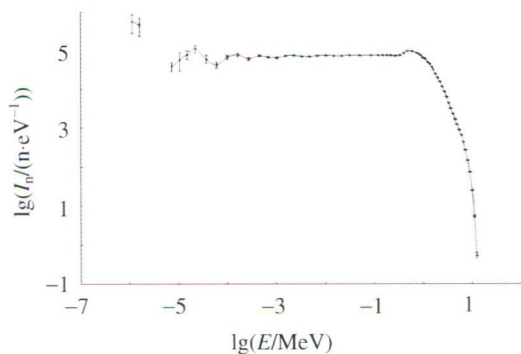


图 1 光中子能谱

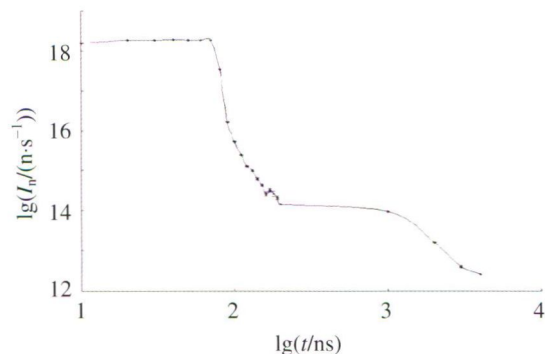


图 2 光中子时间特性

目前“神龙一号”装置采用的叠层钽靶主要用来产生高能韧致辐射光子，不能产生最高强度的中子，换用韧致辐射截面和光核截面大的材料，可以得到更高强度的中子。采用蒙特卡罗软件 MCNP5，选择计算了天然存在的、光核阈能较小、光核截面较大的多种重金属，钽、钨、金、铅、钍、铀的中子产额随厚度的变化，如图 3 所示，其中铀的中子产额最高。接着算得铀靶的厚度为 7~8 cm 时，中子产额可达

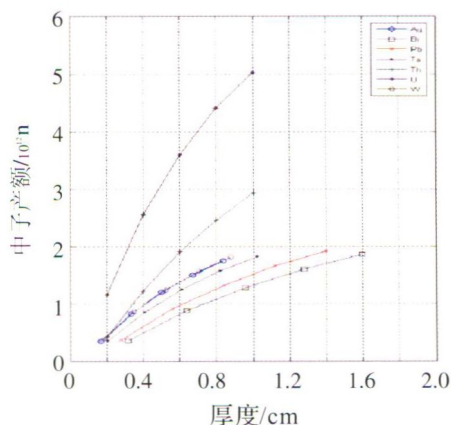


图 3 不同材料的光中子产额

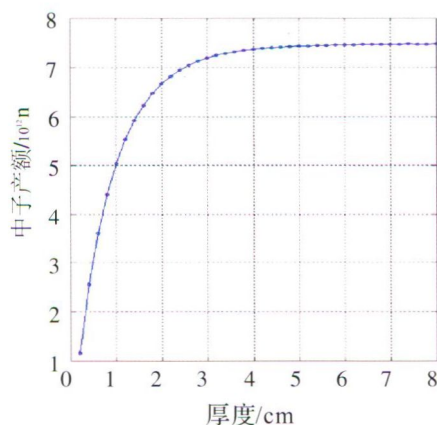


图 4 铀靶光中子产额随厚度的变化

约 7.5×10^{12} 个每电子脉冲(见图 4),即“神龙一号”装置采用铀靶,可得到更高强度的中子,比目前的中子强度提高约 50 倍。

2 获得白光中子的慢化特性

“神龙一号”装置产生的光中子能量跨度从热能到十几兆电子伏,实际使用时可能只需某一特定能区的中子,如中子共振测温只有共振能区的中子有用,这需要将光核中子慢化,以使该能区的中子强度最大,但需要考虑慢化过程导致脉冲中子的时间特性变差。分别计算了 3 种常用的慢化剂(重水、石蜡和铍)对中子的慢化,得到共振能区中子最多时的中子时间、能量二维分布,计算结果如表 1 所示。石蜡厚度为 2.5 cm 时,其表面的共振能区中子注量(铀靶)为 $2.65\times10^6\sim1.25\times10^8\text{ n/(eV}\cdot\text{cm}^2)$,慢化导致的时间展宽在 0.6~1.5 μs ,比散裂源(LANSCE)的中子慢化后时间展宽小 1~2 个数量级。

表 1 光中子慢化至共振能区的特性

辐射靶	慢化剂	最优慢化剂厚度/cm	慢化剂表面出射中子微分通量/($\text{n}\cdot\text{eV}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$)		慢化导致的时间展宽/ μs^*	
			1 eV	100 eV	10 eV	100 eV
叠层钽靶	重水	12~14	7.85×10^6	1.49×10^5	7	2
	石蜡	2.0~2.5	4.09×10^6	7.44×10^4	1	0.2
	铍	12~14	9.36×10^6	1.49×10^5	4	1
铀	重水	12~14	6.04×10^7	1.28×10^6	9	3
	石蜡	2.0~2.5	1.25×10^8	2.65×10^6	1.5	0.6
	铍	16~18	5.28×10^7	6.74×10^5	11	4

*为 1/10 高度对应的时间宽度。

科学意义

本课题对“神龙一号”装置产生的光核中子特性进行了模拟研究,获得了光中子的能谱、时间特性以及慢化的结果,表明“神龙一号”装置可以作为一个高强度的脉冲白光中子源。

展望

本文的所有结果均是理论模拟计算所得,理论计算和实验测量还存在一些差别,需要在实验上测量“神龙一号”装置的光中子特性。在核技术应用领域,中子的应用相当广泛,若“神龙一号”装置具有较高的中子强度和较好的脉冲特性,若将其作为一个脉冲中子源,研制出相应的中子诊断系统,将有广泛的应用前途。

参考文献

[1] 向艳军,马景芳,“神龙一号”装置产生的共振能区中子特性模拟研究[J].核电子学与探测技术,2010,30(3):394-400.



曾召益

博士研究生

0816-2491281

skxiang@caep.ac.cn

过渡金属钼与镍钛合金的晶格动力学研究

高温高压下物态方程的研究,是凝聚态物理研究领域的一个基础问题。确定材料所发生的相变进而精密划定相区边界是构制物态方程的一个关键的科学问题。作为一种重要的超高压物态方程的标准材料,钼(Mo)是否会发生固-固相变是其自身和其他材料物态方程研究的一项重要内容。镍钛合金(NiTi)在较高的温度下呈现出超弹性性能,在加载和卸载时可伴随百分之几至18%的非线性可恢复应变。这种转变称之为马氏体相变。为了更清楚地了解这种相变行为,尽可能精确地认识母相和马氏体相的晶格结构是必要的。

1 精确计算声子色散曲线

运用线性响应和小位移两种方法分别精确计算了 Mo 和 NiTi 的声子色散曲线,从而可以准确获得其他热力学性质。其中 Mo 的结果^[1]如图 1 所示。我们不仅精确得到了 Mo 在零压下的声子色散关系,而且成功预测了其高压下的结果。由于 Mo 有可能在高压下从基态的体心立方(bcc)结构转变为面心立方(fcc)结构,于是计算了两种结构的声子谱随压力的变化关系。在高压下, bcc 结构的 Mo 出现虚频,表明其结构的不稳定性;反之, fcc 结构的 Mo, 其声子频率在高压下虚频消失。由小位移方法得到了不同结构的 NiTi 合金的声子色散曲线^[2]。其高温奥氏体相(B2 结构)在零温下显然是不稳定的,因此有虚频的出现。而低温下单斜 B19'结构或底心正交 BCO 结构为稳定结构,如图 2 所示。

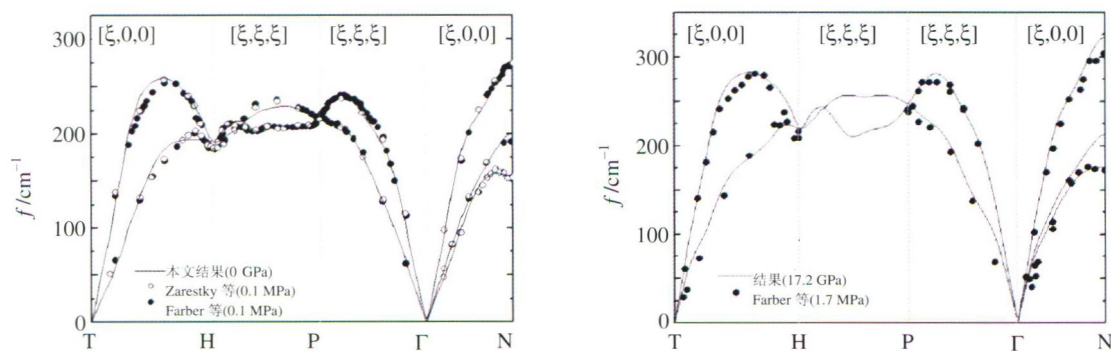


图 1 Mo 在不同压力下(左图: 0 GPa; 右图: 17.2 GPa)的声子色散曲线

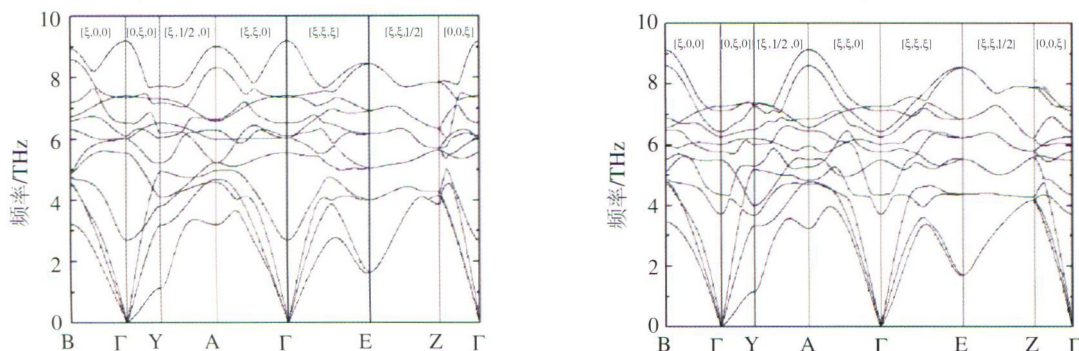


图 2 NiTi 合金的声子色散曲线(左图: B19'结构; 右图: BCO 结构)

2 准简谐近似下相图的计算

通过计算高温高压下 bcc 和 fcc 结构 Mo 的自由能, 我们得到了其结构相图^[1], 如图 3 所示。我们发现钼在高温高压下有可能从 bcc 结构转变到 fcc 结构。在较低温度下, bcc 结构钼一直保持其稳定性到 700 万大气压以上。然而在高温下(4 000 K 以上), bcc 到 fcc 的相变压力相对而言低很多。相变的起始点位于 232 GPa, 4 000 K, 非常接近冲击波实验中观察到的第一个声速间断点(210 GPa, 4 100 K)。这也许意味着冲击波试验中, 钼的熔化是从 fcc 结构开始的。我们的结果与 Belonoshko 等人的较为一致。如果外推我们的结果到目前静高压测得熔化数据的最高压力(119 GPa), 我们的温度是 3 557 K, 与静高压的熔化温度(3 302±140) K 比较接近。因此, 我们认为, 静高压的熔化线可能不是简单的固液边界, 而静高压中所谓熔化状态可能是一种更为复杂的有结构的液体状态。

通过计算 BCO 和 B19' 结构 NiTi 的自由能, 澄清了其马氏体结构 B19' 与 BCO 结构的关系^[2], 如图 4 所示。通过计算, 得到了 BCO 结构与 B19' 结构的相边界, 预测了 BCO 结构所存在的范围, 对于进一步认识 NiTi 合金的马氏体相变有着重要意义。基于准简谐近似, 成功获得了 Mo 和 NiTi 合金的热状态方程以及其他热力学参数。

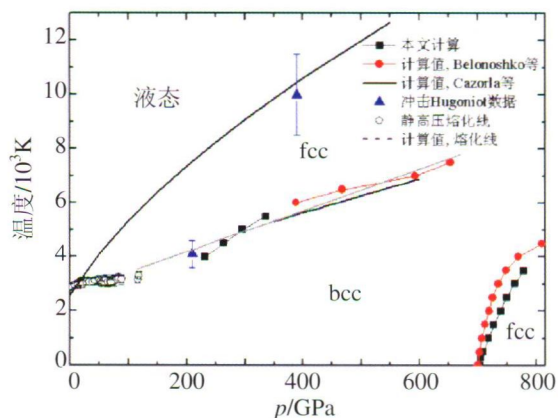


图 3 钼的相图与其他理论及实验比较

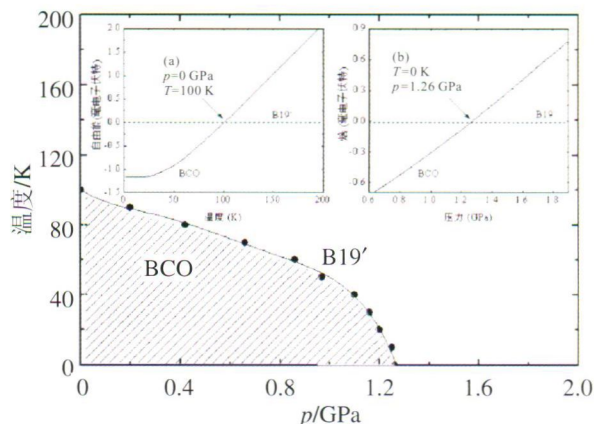


图 4 NiTi合金BCO相与B19'相边界

科学意义

对过渡金属 Mo 的晶格动力学计算研究, 提供了可靠的相变数据。对于澄清 Mo 在冲击熔化之前是否发生了固-固相变有着重要的意义, 并且有助于加深对其他金属材料在极端条件下的物理性质的理解。对形状记忆合金的研究, 根据计算, 预测了 BCO 结构的存在范围, 有助于进一步认识 NiTi 合金的马氏体相变机制。

展望

基于 Mo 的相变研究, 进一步认识其熔化问题, 争取对其动-静高压熔化数据中存在的巨大差异提出合理的解释。对于 NiTi 合金, 对其力学性质进行研究, 并进一步认识马氏体相变机制。

参考文献

- [1] Zeng Zhaoyi, Hu Cui-e, Chen Xiangrong, et al. Lattice dynamics and thermodynamics of molybdenum from first-principles calculations [J]. *J. Phys. Chem. B*, 2010, **114**: 298 (Published online: December 17, 2009).
- [2] Zeng Zhaoyi, Hu Cui-e, Chen Xiangrong, et al. Lattice dynamics and phase transition of NiTi alloy [J]. *Solid State Commun.*, 2009, **149**: 2164.



张建华

助理研究员

0816-2484205

daihuahaozi@sina.com.cn

用于脉冲中子测量的 “裂变 γ 射线探测器”的设计技术

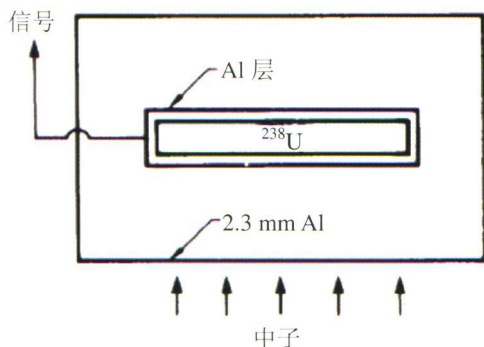
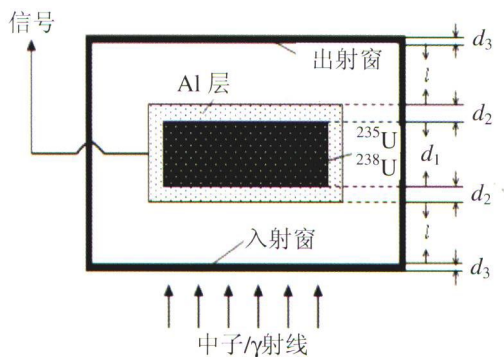
强脉冲辐射场测量是获取辐射场重要的物理特征参数,研究核装置性能的必要手段,其中脉冲中子辐射场测量是其中最为重要和最为活跃的研究内容,而对脉冲中子测量技术的研究又以适用于特定测量场景的脉冲中子探测器设计和研制为其技术核心^[1-2]。为获得高精度的脉冲裂变中子时间谱和总数,发展灵敏度适当、中子和 γ 甄别能力强、中子能量响应平坦、时间响应快的探测器的设计技术及相应测试技术具有十分重要的现实意义及应用前景。

1 “裂变 γ 射线探测器”的物理结构设计

“裂变 γ 射线探测器”(fission gamma-ray detector)^[3]结构如图1所示。此探测器由 ^{235}U 或 ^{238}U 及其金属包层、入射窗和出射窗、接地壳体等组成。探测器的工作原理是:脉冲中子经准直后从入射窗方向射入探测器后,诱发U材料裂变,其中一部分瞬发裂变 γ 射线从铀材料透射出来并与其金属包层物质发生作用而产生次级电子,一部分电子将逃逸出探测器阴极表面,向探测器入射窗、出射窗和壳体运动,从而引起探测器有正极性的脉冲电流信号输出。如果探测器的阴极通过示波器负载接地,那么入射脉冲中子对应探测器输出的脉冲电流波形就会被记录下来。

通过合理选择U材料及其金属包层的厚度、选择入射窗、出射窗的材料和厚度,选择探测器阴极与入(出)射窗之间的距离,可以使得由入射 γ 射线产生的从入射窗到探测器阴极的电流与从阴极到出射窗的电流相互抵消,从而尽可能地降低探测器的 γ 射线灵敏度,不妨把这种“抵消”机制称为“细致平衡”。设想该探测器可以利用 ^{235}U 的裂变截面在裂变中子能谱主要区间变化较小的特性,通过对探测器结构的优化设计,使之成为一种中子能量响应较为平坦的电流型探测器,同时利用其“细致平衡”机制实现高的中子、 γ 甄别测量能力。

结合图1所示的“裂变 γ 射线探测器”的物理结构,进一步分析和提取探测器的各个物理结构参数,如图2所示。

图1 “裂变 γ 射线探测器”结构示意图图2 “裂变 γ 射线探测器”物理结构参数示意图

(1)通过定性分析,选取探测器的窗及阴极铝包层材料。

(2)利用蒙特卡罗(M.C)程序进行建模计算,得出如下几条规律关系曲线:

- 固定 d_2 、 d_3 、 l ，改变 d_1 ，以分析 U 材料厚度对探测器中子、 γ 灵敏度及两者比值的影响；
- 固定 d_1 、 d_3 、 l ，改变 d_2 ，以分析阴极铝包层厚度对探测器中子、 γ 灵敏度及两者比值的影响；
- 固定 d_1 、 d_2 、 d_3 ，改变 l ，以分析阴极与窗之间的距离对探测器中子、 γ 灵敏度及两者比值的影响；
- 分析并确定几种典型的探测器结构参数 d_1 、 d_2 、 d_3 和 l 的组合，考察不同情况下探测器的中子能量响应曲线。

经过分析和 M.C 模拟计算得到的规律关系表明：

(1)通过优化设计的探测器对同样能谱分布的 γ 射线的灵敏度可以通过“细致平衡”控制在中子灵敏度 1~2 量级以下；

(2)裂变 γ 探测器的中子灵敏度基本上仅与铀的质量有关。在铀的面积、密度、同位素丰度不变的条件下，中子灵敏度随铀的厚度增加而增加；当铀的厚度足够大时，探测器的中子灵敏度趋于饱和，接近一个定值；

(3)优化探测器的 d_1 、 d_2 、 d_3 和 l 结构组合参数，在探测器的中子、 γ 探测信噪比满足要求的前提下，可以在中子能量 0.1~14 MeV 区间使探测器的中子灵敏度变化控制在倍数之内，能量响应很平坦；

(4)在 l 固定的条件下，随着 d_1 的减小，需要增大 d_2 才能满足信噪比要求； d_2 较大导致探测器中子能量响应变化加大，这是不希望的。适当增加 d_1 ，控制 d_2 ，方可使探测器的中子能量响应变化较小；

(5)探测器 γ 射线灵敏度的“细致平衡”需要考虑实际的 γ 射线能谱，对探测器特性参数进行模拟计算时需要进行完整的 M.C 建模。

2 探测器的机械结构设计

分析结果表明，“裂变 γ 射线探测器”正常工作需要抽真空。为了使探测器满足真空要求(封离 50 d 后，探测器真空度小于 5 Pa)，探测器结构如下：用陶瓷管支撑探测器的阴极，满足了探测器阴极与接地外壳之间的绝缘、探测器结构件的精确装配、减小放气量等多方面的要求；探测器的出射窗的后面接续增设了真空附室结构，如图 3 所示。

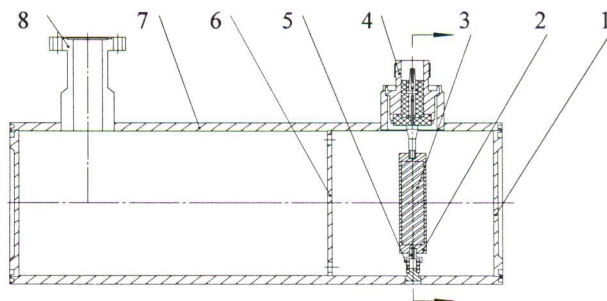


图 3 “裂变 γ 射线探测器” 结构剖面示意图

- 1—探测器入射窗；2—金属 Al 包层；3— ^{235}U 裂变材料；4—信号引出头(真空陶瓷柯阀和电缆转接座)；
5—阴极部件的绝缘支撑；6—探测器出射窗；7—探测器外壳；8—探测器静真空获取和监测接口

3 探测器的主要物理特性研究

用 DT 中子源和 ^{60}Co γ 射线源对探测器的灵敏度进行了标定，标定结果验证了探测器设计技术可靠性，同时也验证了探测器需要抽真空判断的正确性，以及探测器静态真空设计指标的合理性；结合 M.C 模拟计算和实测探测器电容电感进而研究获得了探测器的时间响应特性参数；上升时间和半高宽均小于 1 ns，探测器的时间响应很快。