

用于反应堆中子/ γ 射线混合场测量的 涂硼电离室性能*

陈国云¹⁾²⁾ 辛勇¹⁾ 黄福成¹⁾ 魏志勇^{2)†} 雷升杰²⁾ 黄三玻²⁾
朱立²⁾ 赵经武³⁾ 马加一³⁾

1)(南昌大学物理系, 南昌 330031)

2)(南京航空航天大学空间环境中心, 南京 210016)

3)(南京大学物理系, 南京 210093)

(2011年7月5日收到; 2011年12月26日收到修改稿)

近年来, 涂硼电离室已逐渐成为核反应堆周围高通量中子/ γ 射线混合场监测的辐射探测器之一. 研制了一种高灵敏度涂硼电离室, 并给出了其内部结构. 用 fA 级弱电流放大器测得: 当涂硼电离室的工作电压在 700 V 以下时, 漏电流小于 1.0 pA; 用 Am-Be 中子源辐照时测得涂硼电离室的电流曲线坪长为 500 V, 坪斜为 $3.72 \times 10^{-4} \text{ V}^{-1}$; 当涂硼电离室的工作电压为 400 V 时, 对应漏电流为 0.4 pA. 测试表明涂硼电离室中子信号电流与辐照源的相对位置有关, 将 Am-Be 中子源置于距石蜡慢化体底部 8 cm 时, 测得中子信号电流最大值为 2.0 pA. 用 ^{137}Cs 和 ^{90}Sr 辐照时测得涂硼电离室 γ 射线信号电流为 1.0—2.0 pA, 但在 γ 射线场中坪特性不如中子场中坪特性明显. 电离室中子探测灵敏度达 $1.0 \times 10^{-15} \text{ Acm}^2\text{s}$ 量级, γ 射线探测灵敏度达 $9.0 \times 10^{-22} \text{ Acm}^2\text{s}\cdot\text{eV}^{-1}$ 量级. 这种涂硼电离室漏电流小、灵敏度高、坪特性好, 可用于反应堆周围的中子/ γ 射线混合场测量.

关键词: 涂硼电离室, 漏电流, 坪特性, 灵敏度

PACS: 29.40.Cs, 87.53.Bn, 07.85.Fv

1 引言

核反应堆周围的中子通量常跨越十几个数量级且不可避免地伴随有 γ 射线, 用于这种中子/ γ 射线混合场测量的探测器通常针对以下三个量程: 源量程、中间量程和功率量程^[1-3]. 源量程下的中子通量较小 ($\phi < 10^5 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$), 一般采用正比计数管工作在脉冲模式下测量; 而中间量程、功率量程下的中子通量常跨越 8 个数量级 (10^3 — $10^{11} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$), 故在这两个量程下的测量一般采用累积电离室工作在电流模式下实现^[4].

用电离室进行混合场监测始于 20 世纪 60 年代, 文献 [5, 6] 先后提出了用充电介质液体电离室测量中子/ γ 射线混合场, 随后 Ladu 和 Pelliccioni 据

此优化了电离室电极间距等参数^[7], 刻度了 ^{60}Co 和 Po-Be 中子源^[8], 得出了混合场品质因数测量方法^[9]. 1982 年, Oda 等^[10] 发现了混合场测量中电离室的正负离子平均复合系数与平均品质因数之间的关系, 并由此提出了确定单爆辐射场剂量当量的方法. 接着, Malyshev 等^[11] 在反应堆上测量了电离室的热稳定性. 几年后, Chuklyaev^[12] 又利用充气或者电离辐射调制真空电离室内信号来监测核反应堆. 近年来, 继 Becker 等^[13] 将涂硼镁电离室系统运用到了强度调制放射治疗领域后, Nohtomi 等^[14] 用带 γ 射线衰减器的组织等效电离室对拓宽了中子/ γ 射线混合场中的中子能量测量范围. 此外, Liu 等^[15] 还测量了 Mg (Ar) 和 Al (Ar) 金属基电离室信号电流, 得出混合

* 国家自然科学基金 (批准号: 41064002) 资助的课题.

† E-mail: cgy8008@nuaa.edu.cn

场中活化污染分别包含 2% 和 50% 测量电流. 国外对电离室灵敏度的研究大都局限于定性层面, 如 Distenfeld 等^[16] 得出脉冲放电电离室 γ 射线灵敏度在 $5.16 \times 10^{-8} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1}$ — $1.29 \times 10^{-3} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1}$ 内与填充气体、内衬物以及内部电容有关; Gunter 等^[17,18] 实验测得平行板聚乙烯壁驻极电介质电离室的中子和 γ 射线灵敏度, 并得出中子能量与电极间距的关系; Chuklyaev 等^[19] 报道了一种基于标准中子源来有效确定充气电离室中子探测灵敏度的方法; Nohtomi 等^[20] 测得充 C-CO₂ 电离室对 3—7 MeV 中子和 ⁶⁰Co 的 γ 射线的相对灵敏度; Ziebell 等^[21] 报道了固态二极管电离室对相同吸收剂量的中子探测灵敏度是对质子探测灵敏度的 10—100 倍. 国内的北京核仪器厂和中国原子能科学研究院报道了一些产品的灵敏度值^[22-24].

近年来, 涂硼电离室因具有寿命长、稳定性好、造价低廉等优点而备受人们青睐, 但目前国内用于反应堆周围混合场监测的涂硼电离室报道很少. 本文研制了一种用于反应堆中子/ γ 射线混合场测量的高灵敏度涂硼电离室, 并给出了其整体结构及详细内部结构. 在 Am-Be 中子源、¹³⁷Cs 和 ⁹⁰Sr 源辐照下, 用 fA 级弱电流放大器分别测量了涂硼电离室的漏电流及 I - V 曲线. 最后由实验得出的工作电压、坪特性参数及信号电流值导出了电离室对中子和 γ 射线探测灵敏度, 并将其与国内已有工作进行了对比. 此外, 本文也对电离室 I - V 曲线随外界辐射场的变化及原因做了定性分析, 可为该领域的后续研究工作提供参考.

2 涂硼电离室的结构

2.1 整体结构

涂硼电离室的整体结构如图 1 所示.

图 1 中的涂硼电离室由厚度为 5 mm 的不锈钢板材立方箱体 (145 mm×145 mm×135 mm) 和盖板 (190 mm×187 mm) 组成. 涂硼电离室箱体内充以 $4.0 \times 10^4 \text{ Pa}$ 的 P10 气体 (90%Ar+10%CH₄), 箱体与盖板之间用橡皮窝圈密封, 外面再用螺丝固定. 涂硼电离室左右两表面均焊接有支架, 分别用于固定高压刺刀式螺母连接器 (BNC) 和信号 BNC; 从箱内引出的高压线与信号线分别通过对应的 BNC 与外界相连. 电离室前后分别开有流气孔, 它与箱体间用环氧树脂密封. 电离室内部电极独立于箱体,

其整体结构示于图 2.



图 1 涂硼电离室的整体外观

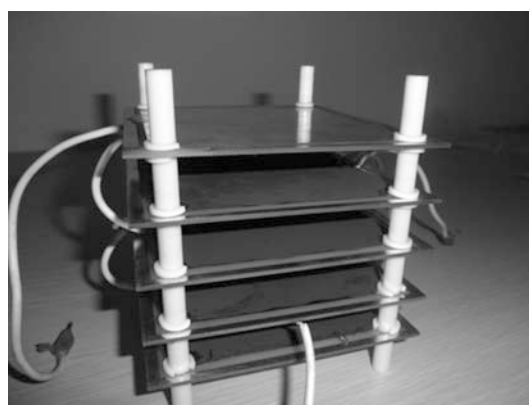


图 2 涂硼电离室内部电极的整体结构

图 2 中涂硼电离室的内部电极由五块规格为 117 mm×125 mm 的印刷电路板 (PCB) 用四根直径为 8 mm 的聚四氟乙烯棒支撑而成, 各电极之间的间距均为 20 mm, 两面再用 2 mm 厚的聚四氟乙烯固定垫圈固定. 为测量中子, 在每块 PCB 的上下表面 (图 3 中 A 板的上表面和 B 板的下表面除外) 均涂有 0.6 mg/cm^2 的富集 ¹⁰B 粉. 用若干根电线连接各 PCB 表面以传输电信号, 最后将其汇聚成 4 根电线, 其中两根地线 (图 2 中有一根被遮挡) 用于将电极板外围接地.

2.2 结构细节

涂硼电离室及其内部电极的结构细节如图 3 所示. 各 PCB 表面电信号由导线引出, 其中 A 板、C 板和 E 板表面的电线汇聚后与外界负高压 BNC 相连, 从左端引出; 而 B 板和 D 板表面的电线汇聚后与外界信号 BNC 相连, 从右端引出. 涂

硼电离室的内部电极所用 PCB 上均刻有不导电的矩形槽 (图 3 中 PCB 的缺口处), 将 PCB 导电面分为中央导电面和周围导电环面. 图 3 中 B 板、D 板上的圆圈分别表示用导线将它们的两个导电环面连接; 而 A 板、C 板和 E 板上的半圆圈分别表示用导线将它们的中央导电面和周围导电环面相连. 涂硼电离室的右边连接箱体内壁与电极板的电线用于将 B 板和 D 板的周围导电环面接地. 高压和信号的引出处用厚度为 8 mm 的聚四氟乙烯绝缘圆片分开, 圆片与箱体之间用环氧树脂密封. 图 3 是涂硼电离室内部结构细节的主视图, 为了直观起见将两个流气孔与两个 BNC 均画在了左右两侧, 实际上流气孔与 BNC 分布在涂硼电离室四个侧面. 图 3 中灰色小圆点代表衬于 PCB 表面的 ^{10}B 粉, 大黑点代表电线与 PCB 的焊接点.

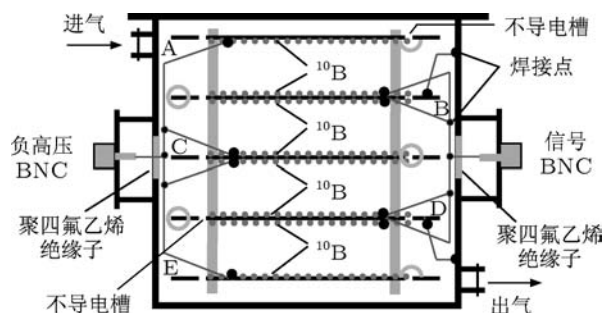


图 3 涂硼电离室内部结构示意图

3 涂硼电离室的辐照与测量

3.1 漏电流测量

涂硼电离室漏电流测量中所用设备包括北京核仪器厂生产的 FH1910 型便携式 3 kV 高压电源、南京鸿宾微弱信号检测有限公司生产的 HB-872 型 fA 级微弱电流放大器以及给其供电的 HB-101 型直流稳压电源、杭州三汇公司生产的 DST3042B 型 40 Mbit 数字存储示波器. 电离室漏电流测量装置示于图 4.

由 HB-872 型电流放大器将累积电离室输出的电流信号放大, 其放大倍数 M 由用户设定, 通常 $M = 10^{10} - 10^{13}$, 然后将其转换成电压信号输入示波器. 用户通过预设放大倍数 M 与示波器电压幅值读数即可算出电离室的输出电流. 由此测得的

电流随高压变化曲线称为电离室 $I-V$ 曲线.

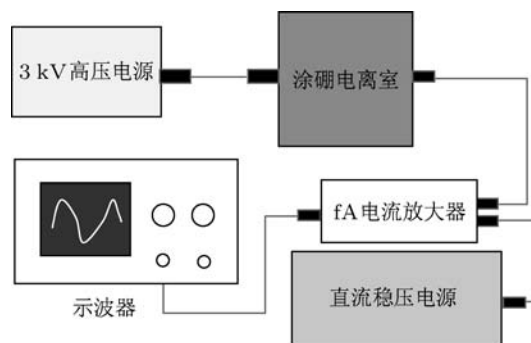


图 4 涂硼电离室的漏电流测量装置示意图

3.2 涂硼电离室的辐照

用 Am-Be 中子源辐照涂硼电离室如图 5 所示. 圆柱形石蜡慢化体中央开有直径为 6 mm, 高为 15 cm 的圆孔, 活度为 3.7×10^9 Bq 的 Am-Be 中子源置于石蜡慢化体内孔的底端. Am-Be 中子源放出的中子 (平均能量为 4.2—5 MeV) 一部分经孔直接进入电离室, 另一部分则经石蜡慢化体慢化后再进入电离室.

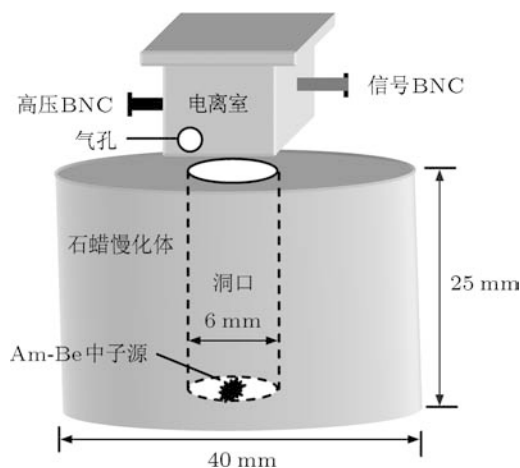


图 5 用 Am-Be 中子源辐照涂硼电离室

实验所用 γ 射线源包括 ^{137}Cs 和 ^{90}Sr , 活度均为 3.7×10^8 Bq. γ 射线源不用时储存在铅罐中, 测量时将铅罐的射线出口打开并紧挨着电离室放置, 放出的 γ 射线就会进入涂硼电离室.

3.3 输出信号测量

测量涂硼电离室的输出信号时, 所用高压由北京核仪器厂 FH1016 型 3 kV 插件高压电源提供, 所

用弱电流放大器和示波器与以上所述相同. 改变涂硼电离室所加高压后, 即可得出涂硼电离室高压和输出信号电流的关系, 即 $I-V$ 曲线.

4 结果及讨论

4.1 涂硼电离室漏电流

漏电流是累积电流电离室的一个重要特性参数, 它关系到电离室的灵敏度指标以及外部放大电路放大倍数的选择. 根据厂家提供的技术参数, 当弱电流放大倍数置于 $M = 10^{11}$ 时, 示波器读数 1 mV 所对应的电离室输出电流就为 $1.0 \times 10^{-3} \times 10^{-11} \text{ A} = 1.0 \times 10^{-14} \text{ A} = 0.01 \text{ pA}$. 当周围没有放射源时, 按照图 4 连接测量设备. 通过改变电离室所加高压值, 可读出示波器各电压幅度值, 将其换算成电流后再作出涂硼电离室输出信号电流随高压的变化关系 ($I-V$ 曲线), 结果如图 6 所示. 实验中电离室所加高压、示波器电压实际读数均为负值, 为方便起见作图时均改为正值. 图 6 中的三个实验条件的区别如下: 条件 1 是在南京大学测得的数据, 条件 2 是在南京航空航天大学于时间 t_1 测得的数据, 条件 3 是在南京航空航天大学于时间 t_2 (距 t_1 三天后) 测得的数据, 其余相同.

从图 6 可以看出: 涂硼电离室漏电流随外加电压的升高而增加, 当涂硼电离室工作在 700 V 以下

时, 其漏电流小于 1.0 pA . 此外, 改变实验环境 (条件 1 和条件 2) 和改变实验时间 (条件 2 和条件 3) 对漏电流曲线的影响很小, 表明测量重复性较好.

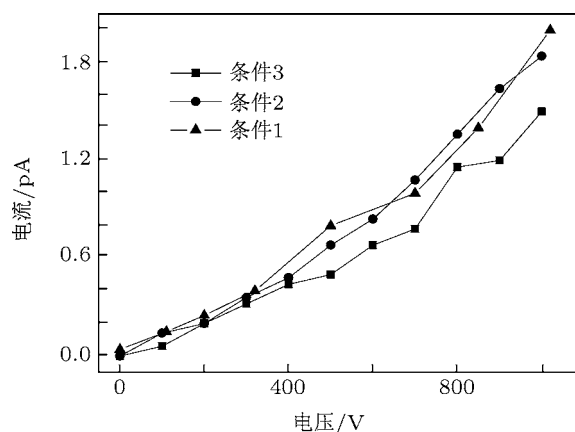


图 6 无辐照时涂硼电离室的 $I-V$ 曲线

4.2 用 Am-Be 中子源测量

连接好实验设备后, Am-Be 中子源与石蜡慢化体有以下三种相对位置 (图 7): (1) Am-Be 中子源置于石蜡慢化体底部, 即 $h = 0 \text{ cm}$; (2) Am-Be 中子源置于距离石蜡体底部 8 cm 处, 即 $h = 8 \text{ cm}$; (3) Am-Be 中子源置于距离石蜡体底部 11 cm 处, 即 $h = 11 \text{ cm}$.

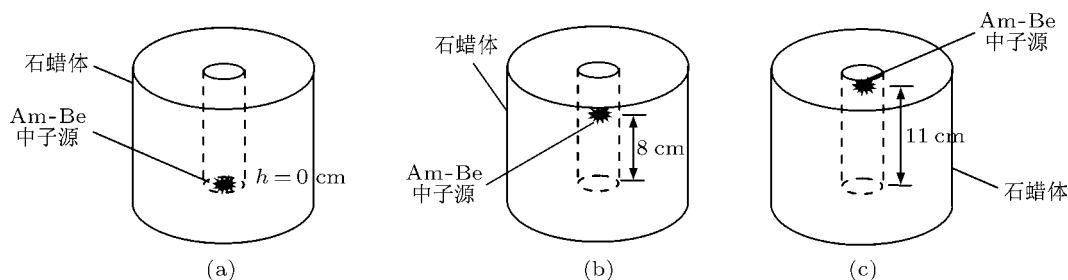


图 7 Am-Be 中子源与石蜡体的三种相对位置 (a) $h = 0 \text{ cm}$; (b) $h = 8 \text{ cm}$; (c) $h = 11 \text{ cm}$

保持弱电流放大倍数 $M = 10^{11}$ 不变, 将所测得的示波器电压幅值的读数换算成电流并扣除漏电流本底后得到涂硼电离室的 $I-V$ 曲线, 结果如图 8 所示.

从图 8 可以看出: 涂硼电离室的 $I-V$ 曲线均在 $200-700 \text{ V}$ 呈现了良好的电流坪, 坪长为 500 V , 坪斜为 $3.72 \times 10^{-4} \text{ V}^{-1}$; 涂硼电离室工作在坪始

点 200 V 时漏电流为 0.2 pA . 由图 5 和 Am-Be 中子源的活度可估算出入射到电离室的中子注量率为 $2.0 \times 10^2 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, 因而涂硼电离室的中子探测灵敏度值为 $1.0 \times 10^{-15} \text{ Acm}^2 \text{ s}$; 电离室中子信号电流大小与 Am-Be 中子源的相对位置有关, 当 Am-Be 中子源距离石蜡慢化体底部 8 cm 时测得最大中子信号电流值为 2.0 pA .

当 Am-Be 中子源离电离室较远 ($h = 0$ cm) 时, 石蜡慢化体本身要吸收部分中子; 另外, 从洞中直接出射的中子因能量高 (MeV 量级) 而与 ^{10}B 发生反应的概率小, 故测得的累积电流很小 (0.3 pA). 当 Am-Be 中子源离电离室太近时, 进入电离室的中子数虽多但大多是未经慢化的快中子, 电离室对此的探测效率很低, 因而累积电流也很小. 因此, 在这两者之间必然有一个最佳的距离, 这里取 Am-Be 中子源距离涂硼电离室底部 8 cm. 综合漏电流和坪特性性质, 将涂硼电离室的工作电压选择在 400 V 是合适的.

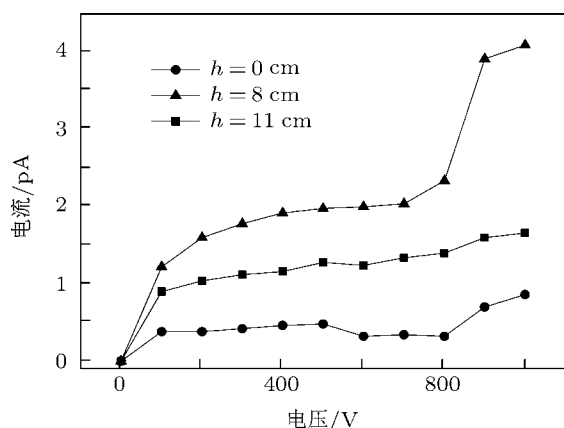


图 8 用 Am-Be 中子源辐照时涂硼电离室的 I - V 曲线

4.3 用 γ 射线辐照源 ^{137}Cs 和 ^{90}Sr 测量

4.3.1 涂硼电离室输出的 γ 射线信号电流

连接好实验设备后, 先用 γ 射线辐照源 ^{137}Cs 、再加上辐照源 ^{90}Sr 辐照涂硼电离室, 保持弱电流放大倍数 $M = 10^{11}$, 将示波器电压读数换算成电流后并扣除漏电流本底, 测得涂硼电离室 I - V 曲线如图 9 所示.

从图 9 可以看出: 单用 ^{137}Cs 辐照时, 外加高压 200—800 V 范围内对应的 γ 射线信号电流为 0.42—2.04 pA, 可取平均值 1.23 pA; 而相同条件下用 $^{137}\text{Cs} + ^{90}\text{Sr}$ 共同辐照时 γ 射线信号电流

为 0.82—2.44 pA, 可取平均值 1.63 pA. 此外, 用 γ 射线辐照源测量时所得的 I - V 曲线中的电流坪不如用 Am-Be 中子源辐照测量时所得到的电流坪明显, 单用 ^{137}Cs 时甚至看不到电流坪. 尽管 γ 射线辐照源的活度 (3.7×10^8 Bq) 相比中子源 (3.7×10^9 Bq) 要小, 但前者没有任何屏蔽而在涂硼电离室周围形成了较强的 γ 射线辐射场. 考虑到金属和大多数绝缘材料的电阻率均随外界 γ 射线辐射场的增强而减小 [25—27], 可能这就是电离室测得的 γ 射线信号电流随外加高压上升而逐渐失去坪特性的原因. 对于 Am-Be 中子源, 中子经石蜡慢化体慢化后在涂硼电离室周围形成的辐射场已经很弱, 还不足以对电离室内绝缘子的电阻率产生明显的影响, 因而在图 8 中出现了明显的电流坪. 因此, 若混合场中的 γ 射线辐射场较强, 用涂硼电离室测量中子/ γ 射线混合场时所用高压电源应具有较好的电压稳定性.

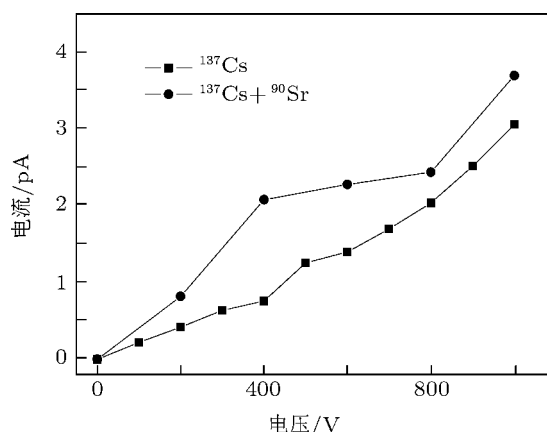


图 9 用 γ 射线辐照源 ^{137}Cs 和 ^{90}Sr 辐照时涂硼电离室的 I - V 曲线

4.3.2 涂硼电离室 γ 射线探测灵敏度的估算

用同一 γ 射线剂量仪测得 ^{137}Cs 和 ^{90}Sr 所在位置的 γ 射线当量剂量率分别为 $2.5 \times 10^{-5} \text{ Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ 和 $1.0 \times 10^{-5} \text{ Sv}\cdot\text{h}^{-1}$, 据此求得的涂硼电离室 γ 射线探测灵敏度及 γ 射线辐照源相关参数列于表 1, 其中 ^{137}Cs 和 ^{90}Sr 的比释动能因子分别取自文献 [28, 29].

表 1 涂硼电离室的 γ 射线探测灵敏度及 γ 射线辐照源相关参数

辐照源	当量剂量率 $/10^{-5}\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$	比释动能因子 $/10^{-16}\text{Gym}^2$	γ 能注量率 $/10^9\text{eV}\cdot\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	信号电流平均值 $/10^{-12}\text{A}$	电离室 γ 灵敏度 $/10^{-22}\text{Ac}m^2\text{s}\cdot\text{eV}^{-1}$
^{137}Cs	2.5	3.38	1.360	1.23	9.04
^{90}Sr	1.0	6.14	0.453	未测	未测
$^{137}\text{Cs}+^{90}\text{Sr}$	未测	未测	1.813	1.63	9.00

由表 1 可知: 涂硼电离室的 γ 射线探测灵敏度达 $9.0 \times 10^{-22} \text{ Acm}^2 \text{ s} \cdot \text{eV}^{-1}$, 且两种方法测得电离室的 γ 射线探测灵敏度值一致. 因 γ 射线辐照源 ^{137}Cs 和 ^{90}Sr 放出的 γ 射线能量分别为 0.661 和 1.76 MeV, 与探测器之间的距离为 10 cm, 查阅文献 [28] 可知对应的 γ 射线照射量分别为 $5.81 \times 10^{-18} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ Bq}^{-1}$ 和 $1.65 \times 10^{-17} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ Bq}^{-1}$. 为便于比较, 我

们把自制电离室 γ 射线探测灵敏度换算为常用单位的形式 $2.0 \times 10^{-5} \text{ Askg} \cdot \text{C}^{-1}$. 目前国内研制涂硼电离室的单位主要有中核 (北京) 核仪器厂和中国原子能科学研究院, 前者生产的 DL123, BZD-4, RC-6EB, CC52 型 [22,24] 涂硼电离室和后者生产的堆用 THDD-90 型涂硼电离室 [23] 在国内该领域均名列前茅. 这些电离室与本工作研制的涂硼电离室的灵敏度值列于表 2.

表 2 自制涂硼电离室与已有涂硼电离室的探测灵敏度比较

电离室名称	中子探测灵敏度/ $10^{-14} \text{ Acm}^2 \text{ s}$	γ 射线探测灵敏度/ $10^{-5} \text{ Askg} \cdot \text{C}^{-1}$	资料来源
涂硼电离室	0.1	2.00	本文
DL123 型六节中子涂硼电离室	2.4	17.40	文献 [22]
BZD-4 型圆柱形补偿膜电离室	7.5	0.88	文献 [22]
RC-6EB 型涂硼电离室	5.3	0.28	文献 [24]
CC52 型涂硼电离室	1.9	8.40	文献 [24]
堆用 THDD-90 型中子电离室	2.5	13.20	文献 [23]

涂硼电离室的探测灵敏度值标志着其所能测量的最小辐照场, 一般而言, 探测灵敏度值越小对应的电离室的性能越好. 从表 2 可知, 本工作所研制的涂硼电离室的探测灵敏度指标达到了目前国内的研究水平. 这种涂硼电离室漏电流小、灵敏度高并具有良好的坪特性, 可用于反应堆周围的中子/ γ 射线混合场的监测.

5 结论

涂硼电离室用于核反应堆周围大通量中子/ γ 射线混合场监测因具有寿命长、稳定性好、成本低廉等优点而备受人们青睐, 但国内相关报道很少. 本文研制了一种高灵敏度涂硼电离室, 并给出了其详细的内部结构. 首先在无辐照源时测量了电离室漏电流, 然后在 Am-Be 中子源和 γ 射线辐照源 ^{137}Cs , ^{90}Sr 的辐照下, 测得了涂硼电离室的 I - V 曲线. 通过分析实验结果, 分别估算了涂硼电离室

的中子探测灵敏度和 γ 射线探测灵敏度, 并确定了其工作电压和电流坪特性等参数. 涂硼电离室工作电压在 700 V 以下时漏电流小于 1.0 pA, 在 200—700 V 范围内出现良好的电流坪, 坪长为 500 V, 坪斜为 $3.72 \times 10^{-4} \text{ V}^{-1}$. 涂硼电离室的工作电压为 400 V, 对应的漏电流为 0.4 pA. 涂硼电离室输出的中子信号电流与 Am-Be 中子源的相对位置有关, 当 Am-Be 中子源距离石蜡慢化体底部 8 cm 时中子信号电流最大值为 2.0 pA. 涂硼电离室输出的 γ 射线信号电流为 1.0—2.0 pA, 但在 γ 射线辐射场中坪特性不如中子场中的坪特性明显. 所研制的涂硼电离室中子探测灵敏度达 $1.0 \times 10^{-15} \text{ Acm}^2 \text{ s}$ 量级, γ 射线探测灵敏度达 $9.0 \times 10^{-22} \text{ Acm}^2 \text{ s} \cdot \text{eV}^{-1}$ 或者 $2.0 \times 10^{-5} \text{ Askg} \cdot \text{C}^{-1}$ 量级.

感谢江苏省疾病预防控制中心的周献峰医师为本文的测量工作提供 γ 射线源.

- [1] Liu J, Zhang F, Zhang R, Zhang Y 2003 *Nucl. Power Eng.* **24** 231 (in Chinese) [刘炯, 张帆, 张瑞, 张英 2003 核动力工程 **24** 231]
- [2] Zhang J M, Olmstead R A 1999 *Nucl. Power Eng.* **20** 507 (in Chinese) [张建民, Olmstead R A 1999 核动力工程 **20** 507]
- [3] Wang Z G, Yue S 2002 *Nucl. Power Eng.* **23** 24 (in Chinese) [王治国, 岳升 2002 核动力工程 **23** 24]
- [4] Grosshoeg G 1979 *Nucl. Instrum. Meth.* **162** 125

- [5] Ladu M, Pelliccioni M, Roccella M 1965 *Nucl. Instrum. Meth.* **34** 178
- [6] Charalambus S 1967 *Nucl. Instrum. Meth.* **48** 181
- [7] Ladu M, Pelliccioni M 1967 *Nucl. Instrum. Meth.* **53** 35
- [8] Ladu M, Pelliccioni M 1966 *Nucl. Instrum. Meth.* **39** 339
- [9] Ladu M, Pelliccioni M, Roccella M 1967 *Nucl. Instrum. Meth.* **53** 71

- [10] Oda K, Yamamoto T, Kawanishi M 1982 *Nucl. Instrum. Meth.* **202** 481
- [11] Malyshev E K, Prokhorov V V, Tolchenov Y M 1986 *Sov. At. Energy* **61** 216
- [12] Chuklyaev S V 1992 *At. Energy* **73** 917
- [13] Becker J, Brunckhorst E, Schmidt R 2008 *Radiother. Oncol.* **86** 182
- [14] Nohtomi A, Sugiura N, Itoh T, Sakae T, Terunuma T, Fujibuchi T 2010 *Nucl. Instrum. Meth. A* **614** 159
- [15] Liu Y H, Lin Y C, Nievaart S, Roca A, Tsai P E, Liu H M, Moss R, Jiang S H 2010 *Radiat. Meas.* **45** 1427
- [16] Distenfeld C, Bishop W, Lamplough J 1967 *Nucl. Instrum. Meth.* **49** 309
- [17] Gunter P, Uwe K 1984 *Nucl. Instrum. Meth.* **223** 155
- [18] Gunter P 1985 *Nucl. Instrum. Meth. A* **234** 183
- [19] Chuklyaev S V, Vorontsov O M, Dikarev V S, Pol'nikov E F 2009 *At. Energy* **106** 437
- [20] Nohtomi A, Sugiura N, Itoh T, Sakae T, Terunuma T, Fujibuchi T 2010 *Nucl. Instrum. Meth. A* **614** 159
- [21] Ziebell A L, Clasie B, Wroe A, Schulte R W, Reinhard M I, Dowdell S J, Lerch M L, Petasecca M, Perevertaylo V L, Zinets O S, Anokhin I E, Rosenfeld A B 2011 *Radiat. Meas.* **46** 1638
- [22] Yang D G, Lu S T, Xuan Z X 2008 *Nucl. Electron. Detect. Techn.* **28** 456 (in Chinese) [杨道广, 陆双桐, 宣肇祥 2008 核电子学与探测技术 **28** 456]
- [23] Guo W Q, Yin C Y, Huang K, Liu N R, Zhao M N, Li Y M, Shi Y, Zhu H N 1994 *At. Energy Sci. Techn.* **28** 129 (in Chinese) [郭文琪, 因长有, 黄克, 刘乃荣, 赵玛瑙, 李玉梅, 石跃, 朱焕南 1994 原子能科学技术 **28** 129]
- [24] Lu S T 1983 *Nucl. Electron. Detect. Techn.* **3** 10 (in Chinese) [陆双桐 1983 核电子学与探测技术 **3** 10]
- [25] Bishay A G, El-Gamal S 2011 *Nucl. Instrum. Meth. B* **269** 1108
- [26] Nouh S A 2004 *Radiat. Meas.* **38** 167
- [27] Noda K, Nakazawa T, Oyama Y, Yamaki D, Ikeda Y 1996 *J. Nucl. Mater.* **233—237** 1289
- [28] Tian Z H 2004 *Radiation Dosimetry* (Beijing: Atomic Energy Press) p50 (in Chinese) [田志恒 2004 辐射剂量学 (北京: 原子能出版社) 第 50 页]
- [29] Wei Z Y 2010 *Radiation Dosimetry* (Harbin: Harbin Engineering University Press) pp68,86 (in Chinese) [魏志勇 2010 辐射剂量学 (哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社) 第 68,86 页]

Performances of a boron-lined ionization chamber used in neutron/ γ -ray mixed field of reactors*

Chen Guo-Yun¹⁾²⁾ Xin Yong¹⁾ Huang Fu-Cheng¹⁾ Wei Zhi-Yong^{2)†} Lei Sheng-Jie²⁾
Huang San-Bo²⁾ Zhu Li²⁾ Zhao Jing-Wu³⁾ Ma Jia-Yi³⁾

1) (*Department of Physics, Nanchang University, Nanchang 330031, China*)

2) (*Space Environment Center, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China*)

3) (*Department of Physics, Nanjing University, Nanjing 210093, China*)

(Received 5 July 2011; revised manuscript received 26 December 2011)

Abstract

Boron-lined ionization chambers (BLICs) have gradually become one of radiation detectors which are used to monitor the neutron/ γ -ray mixed field with large flux around reactors in recent years. In this paper a BLIC with high sensitivity is fabricated and the internal structure is detailed. By using a weak current amplifier with an accuracy of fA, the leakage current of the BLIC is less than 1.0 pA when the high voltage is below 700 V; under the irradiation by the Am-Be neutron source, on the I - V curve of the BLIC there appears a current plateau with a length of 500 V and a slope of $3.72 \times 10^{-4} \text{ V}^{-1}$; when the operating voltage is 400 V, the leakage current of the BLIC is 0.4 pA. Experiments show that neutron signal current measured by the BLIC depends on the relative position of the BLIC with respect to the radiation source; a maximum of 2.0 pA is obtained when the source is 8 cm away from the bottom of the hole in the paraffin moderator. Under the exposure by ^{137}Cs and ^{90}Sr , γ -ray signal current measured by the BLIC is 1.0—2.0 pA, but the current plateau is not obvious in γ -ray field. The neutron sensitivity of the BLIC reaches a level of $1.0 \times 10^{-15} \text{ Ac m}^2 \text{ s}$ and the γ -ray sensitivity reaches a level of $9.0 \times 10^{-22} \text{ Ac m}^2 \text{ s} \cdot \text{eV}^{-1}$. The BLIC shows small leakage current, high sensitivity, and good plateau characteristics, which can be used to monitor the neutron/ γ -ray mixed field around reactors.

Keywords: boron-lined ionization chambers, leakage current, plateau feature, sensitivity

PACS: 29.40.Cs, 87.53.Bn, 07.85.Fv

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41064002).

† E-mail: cgy8008@nuaa.edu.cn