

组织等效空腔电离室设计与饱和特性研究

程 松 刘伯学 唐开勇 刘虹宇 王艳春

(北京防化研究院 北京 102205)

摘要 MOS 场效应管与空腔电离室两种技术结合,形成一种用于个人核辐射剂量监测的新型探测器——直接电荷存贮(Direct Ion Storage, 简称 DIS)探测器。本文在介绍该探测器原理基础上,从壁材料、气体成分、腔体形状和尺寸、壁厚度以及绝缘材料等角度,设计与研制组织等效空腔电离室。利用 ^{60}Co γ 辐射源和中能 X 射线,测试了电离室饱和特性,很好的满足 DIS 探测器对电离室饱和特性的要求。

关键词 直接电荷存贮探测器, 组织等效空腔电离室, MOS 场效应管, 饱和特性曲线

中图分类号 TL7, TL8

在个人核辐射剂量监测方面,缺乏具有能量响应范围宽、灵敏度高、处理时间短、速度快、可现场监测与报警、可重复使用等特点的探测器,故需研制新型探测器。上世纪末,Kahlainen^[1-2]借鉴 MOS 场效应管浮栅充电原理,结合 Bragg-Gray 空腔电离室技术,研制了直接电荷存贮探测器(DIS, Direct Ion Storage Detector)及其剂量计。

本文从探测器原理出发,设计与研制 DIS 探测器中组织等效空腔电离室,重点从壁材料、气体成分、腔体形状和尺寸、壁厚度以及绝缘材料等角度,测试电离室辐射性能,以为研制新型 DIS 探测器奠定基础。

1 DIS 探测器原理

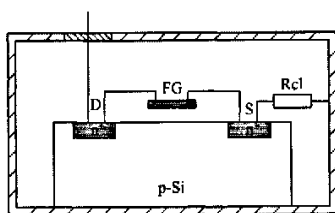


图1 直接电荷存贮探测器结构

Fig.1 Structure of direct ion storage detector

Kahlainen 改变了 MOS 管结构,去除表面绝缘层,将栅极暴露的 MOS 管放置于空腔电离室,构成 DIS 探测器(图1)。浮(置)栅(极)FG 既是 MOS 管栅极,又是电离室收集电极。

在漏极 D 和源极 S 间施加较高电压。通过

Fowler-Norheim 效应,对浮栅 FG 充电。如探测器未受电离辐射照射,浮栅电荷可保持相当长时间。电离辐射照射时,与室壁相互作用产生次级电子,在室内气体中产生电子离子对,使部分浮栅电荷被中和,影响 MOS 管浮栅 FG 表面电荷与电势^[3, 4]。根据 Bragg-Gray 空腔理论,电离室室壁的吸收剂量与电离室内空气电离电荷量成比例,从而与漏源电流变化量存在着关系,反演室壁吸收剂量。

2 空腔电离室设计与研制^[5-6]

电离室是工作在饱和区的气体探测器,理论上不存在复合效应,电子离子对可被全部收集,也不存在气体放大效应。

按照工作方式,电离室可分为两类:记录单个核辐射粒子的脉冲电离室和记录大量粒子平均电离效应的电流电离室,后者包括测量单位时间内(相对较短时间)电离辐射所产生平均电离电流的电流电离室和测量相对较长时间内累积电离室。

本文研制的电离室为累积电离室,测量 γ 射线与室壁作用后产生次级电子的电离效应。累积到收集电极的电荷,部分中和浮栅上原先注入的电荷。这一特点有别通常意义上电容电荷积累过程,而系浮栅(收集电极)空穴电荷不断被中和的过程。

2.1 壁材料和气体成份

壁材料选择主要取决测量物理量。利用 DIS 探测器测量人体组织的吸收剂量,是电离辐射授予单位质量人体组织的平均能量。应选择与人体组织匹配的壁材料和气体成分,即吸收辐射导致次级带电

粒子具有相同通量密度和能量分布。因此，所选材料对初始辐射的吸收系数应基本相同，对次级带电粒子的原子阻止本领也基本相同。

根据 γ 辐射与材料相互作用方式与元素原子序数关系，对不同成分的两组混合物，通过调整成分比例以获得相同有效原子序数的物质，对于一定能量 γ 射线的能量吸收几乎完全相同。但是，次级电子通量密度和能量分布通常并不相同。在实际应用中，还应考虑壁材料具有足够刚度、耐久性、电导率，其与腔内气体也无反应。我们选择 A-150 组织等效材料，主要成份是聚氯乙烯，掺入一定量石墨，以改善其导电性能。

腔内气体应在辐射条件下性能稳定，并便于组装电离室模块和 MOS 管模块。经权衡利弊，我们选择干燥空气。

2.2 腔体形式和尺寸

探测器测量辐射类型是 X 射线或 γ 辐射。根据空腔电离理论，电离室腔体应满足：1) 其尺寸远小于光子在介质中产生的次级电子射程，不影响介质中初级光子和次级电子的能谱分布；2) 腔体内气体电离几乎完全起源于介质中次级电子，初始光子在腔体内释放的次级电子则可忽略；3) 腔体周围的介质厚度大于次级电子最大射程，满足电子平衡要求。由此，空腔所在位置介质的吸收剂量与空腔气体中次级电子产生的电离之间建立了联系。

测量吸收剂量，电离室中心应与待测点重合。为使空腔电离室放入不影响电离室所在部位及其周围介质中的辐射场，电离室尺寸应足够小，室壁应有足够厚度。

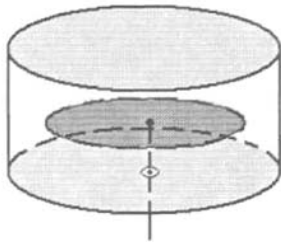


图 2 圆柱形空腔电离室结构

Fig.2 Structure of cylinder cavity ionization chamber

基于上述考虑，我们采用圆柱体结构电离室(图 2)，上下底面间距 d 为 3mm，腔体内径为 $\phi 10\text{mm}$ 与 $\phi 15\text{mm}$ 。收集电极为圆板形，与上下底面平行

且间距相等，厚度 0.77mm，收集电极与室壁间距为 0.77mm。电极间距尽可能保持均匀，以确保收集电荷电场分布均匀。

2.3 壁厚度

如壁厚等于辐射产生的次级电子在壁材料中最大射程，则它们不能到达腔体内部。除充当次级电子源外，室壁还吸收和散射原始辐射。因此，室壁不能过厚。对组织等效材料 A-150 而言，壁厚度 0.52g/cm^2 足以实现 ^{60}Co γ 辐射电子平衡条件。

2.4 绝缘材料

高纯铝连线与电离室壁间的电绝缘材料为聚四氟乙烯，阻值 $>10^{16}\Omega$ ，可免使电离室收集电极和室壁间存在泄漏电流路径，导致浮栅电荷泄漏。

3 测试装置

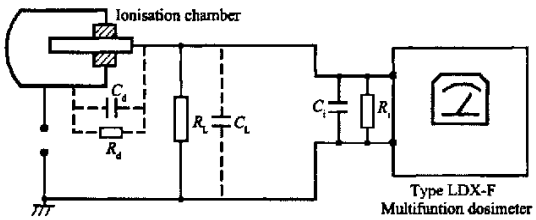


图 3 电离室饱和特性测试装置

Fig.3 Schematic diagram of saturation characteristic test of cavity ionization chamber

辐照实验的测试系统(图 3)由电离室与 LDX-F 型多功能剂量仪组成。图中 R_d 、 C_d 为电离室绝缘电阻和电容， R_L 是负载电阻， C_L 是电缆线分布电容， R_i 、 C_i 分别是剂量计输入电阻和输入电容。该多功能仪器主要用于放射外科的 γ 辐射源的小野 ($<18\times 18\text{mm}$) 照射剂量^[7]。使用 $\phi 10\text{mm}$ 与 $\phi 15\text{mm}$ 电离室，测量单位时间内累积的剂量当量，剂量率对应于流过电离室的平均电离电流。

4 结果与讨论

4.1 电离室饱和特性曲线

4.1.1 ^{60}Co γ 辐射源

饱和特性曲线是 60s 内剂量累积(电离室电离电流时间积分)与偏压的关系。用 ^{60}Co γ 源照射电离室，其所在位置的剂量率为 10cGy/min ，偏压从

-6.2V 变化至 -310V。对 -310V 时电离室响应值归一求得电离室收集效率。

测试结果(图 4)表明,对于 $\phi 10\text{mm}$ 电离室,偏压为 -20V 和 -30V 时,收集效率分别为 86%和 95%;对于 $\phi 15\text{mm}$ 电离室,偏压为 -20V 和 -30V 时,收集效率分别为 80%和 90%。收集效率随偏压值升高而略增,两电离室饱和特性曲线接近平坦,电离室基本处于饱和区,室壁产生的电子-空穴对基本被收集。由于工作气体(空气)中含有一定量负电性气体(O_2),增强电场可减少负离子与空穴的复合,故收集效率随偏压升高而略增。

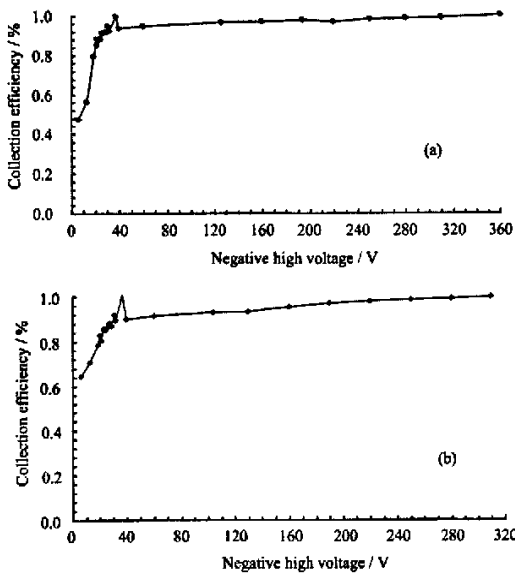


图 4 $\phi 10\text{mm}$ (a)与 $\phi 15\text{mm}$ (b)电离室饱和特性曲线(^{60}Co)
Fig.4 Saturation characteristic curve of $\phi 10\text{mm}$ (a) and $\phi 15\text{mm}$ (b) cavity ionization chamber (For ^{60}Co)

4.1.2 中能 X 射线

所用 X 射线能量为 70~180keV, 剂量率范围为 0.84~5cGy/min, 外加电压为 -6.2V 至 -36V。利用 X 射线照射 $\phi 10\text{mm}$ 电离室, 测试不同外加电压下收集效率。采用最大响应值归一化, 结果(图 5)表明,对于 4 种能量 X 射线,探测器的偏压为 -20V 至 -30V 时,电离室收集效率均大于 90%,说明偏压达 -20V 以上,电离室基本进入饱和状态,满足直接电荷存贮探测器对电离室饱和特性要求。

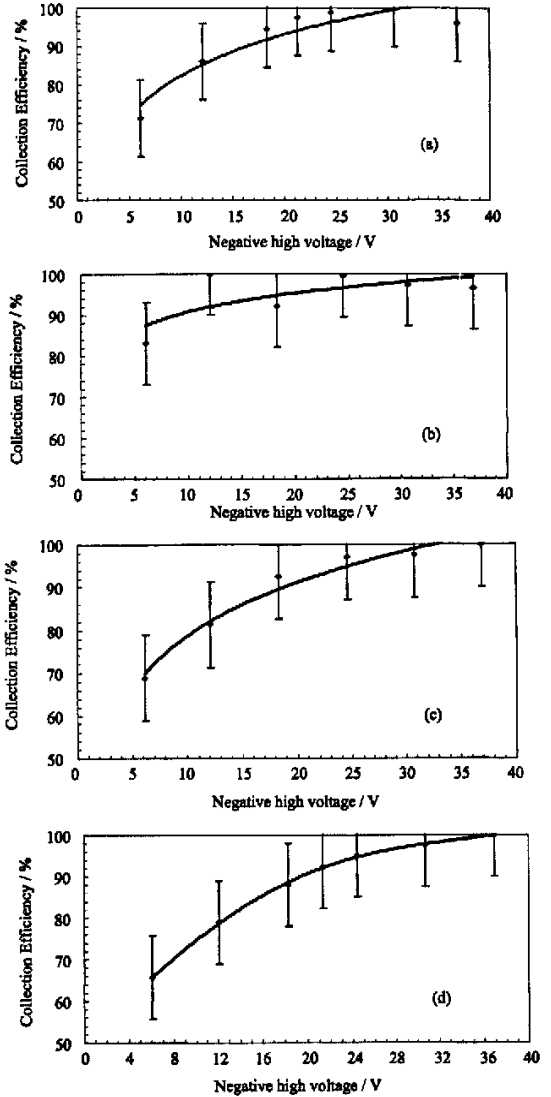


图 5 $\phi 10\text{mm}$ 电离室饱和特性曲线(X 射线)

Fig.5 Saturation characteristic curve of cavity ionization chamber of $\phi 10\text{mm}$. For X-rays of
a) 70 keV, b) 100 keV, c) 140 keV and d) 180 keV

4.2 电离室累积计数与剂量率的关系

改变 $\phi 15\text{mm}$ 电离室与 ^{60}Co γ 源之间距离以改变剂量率。偏压为 -30V, 测定 1min 的累积计数与剂量率的关系, 结果(图 6)表明, 电离室累积计数与剂量率呈线性关系。

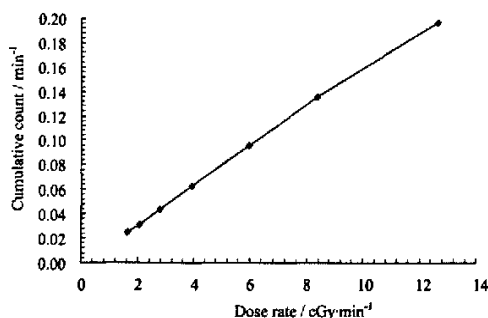


图 6 $\Phi 15\text{mm}$ 电离室剂量率响应特性

Fig.6 Dose rate response of $\Phi 15\text{ mm}$ cavity ionization chamber

5 结论

本空腔电离室的设计与饱和特性有如下特点:

1) 采用内径 $\Phi 10\text{ mm}$ 与 $\Phi 15\text{ mm}$ 圆柱体外形结构, 壁材料为具有良好组织等效特征的 A-150 材料, 腔体内工作气体选择干燥空气。

2) 利用 ^{60}Co γ 源和 70~180 keV X 射线分别测量 $\Phi 10\text{ mm}$ 和 $\Phi 15\text{ mm}$ 电离室饱和特性, 偏压高于 -20V 的饱和特性曲线接近平坦, 电离室均基本处于饱和区, 能够满足直接电荷存贮探测器对电离室饱和特性要求。

3) 电离室累积计数与剂量率呈线性关系。

本工作是研制 DIS 探测器的部分工作, 为研制新型探测器奠定了基础。下一步有待与 MOS 管结合形成探测器样管。

参考文献

- 1 Kahilainen J. Radiation Detector. U. S. Patent Document. 5739541, 4/1998, 250/370.07. 1-12
- 2 Kahilainen J. Radiat Prot Dosim, 1996, 66(1-4): 459-462
- 3 Wernli C, Fiechtner A, Kahilainen J. Radiat Prot Dosim, 1999, 84(1-4): 331-334
- 4 Wernli C, Kahilainen J. Radiat Prot Dosim, 2001, 96(1-3): 255-259
- 5 安继刚. 电离辐射探测器. 第 1 版. 北京: 原子能出版社, 1995. 65-163
AN Jigang. Ionisation Radiation Detector. 1st ed. Beijing: Atom Energy Press. 1995. 65-163
- 6 Boag J W. Radiation Dosimetry. Vol. II. London: Academic Press, 1966. 1-72
- 7 中国测试技术研究院, LDX-F 型多功能剂量仪使用说明书, 2002. 1-7
National Institute of Measurement and Testing Technology, Type LDX-F multifunction dosimeter manual, 2002. 1-7

Design and saturation characteristics of tissue-equivalent cavity ionization chamber

CHENG Song LIU Boxue TANG Kaiyong LIU Hongyu WANG Yanchun

(Institute of Chemical Defense, Beijing, 102205, China)

Abstract A direct ion storage (DIS) detector integrates MOS field effect transistor with cavity ionization chamber and is used for monitoring personnel dose. As part of our efforts to develop DIS detector, we report in this paper a tissue-equivalent cavity ionization chamber, including the wall material, gas composition, shape and size of cavity, wall thickness and insulated material. Using ^{60}Co γ -rays and 70~180 keV X-rays, the test results show that saturation characteristics of the cavity ionization chamber meet the requirement of DIS detector.

Key words Direct Ion Storage detector, tissue-equivalent cavity ionization chamber, MOS field effect transistor, saturation characteristic curve

CLC TL7, TL8