基于塑料闪烁体光纤阵列的水中氚在线监测装置设计

范栋梁[1,2] 曾林林[1,2] 王晨旭[1,2] 曾友石[1] 邓 珂[1] 李婧琳[1,2] 朱励骁[1]
马玉华[1] 程文宇[3] 张 钦[1] 刘 卫[1]
1（中国科学院上海应用物理研究所 上海 201800）
2（中国科学院大学 北京 100049）
3（武汉第二船舶设计研究所 武汉 430064）

摘要 氚是一种氢的放射性同位素，自然环境中的氚主要来自核电站排放。核电站中的氚主要以氚化水的形式进入自然环境的水体中。由于氚具有一定的生物毒性，需要进行监测。不同国家和地区对核电站周围水体和饮用水中的氚活度限制不同，最低要求低至100 Bq·L^{-1}。为及时反映水体中的氚水平，亟需一套探测下限低、灵敏度高的在线监测系统。本文基于实验室自主研制的塑料闪烁体光纤水中氚在线监测装置，采用Geant4蒙特卡罗模拟并结合ROOT数据分析，系统研究了光纤长度、直径、数量、排布方式、包层结构、光纤弯曲以及杂质核素背景对最小可探测活度浓度的影响，并提出了一套有效降低最小可探测活度浓度的设计方案。结果表明：在现有的水中氚探测器设计的基础上，对于直径46 mm的空心腔室，应采用1 800根以上的直径1 mm、长度20 cm的无包层圆柱体光纤，才能使得最小可探测活度浓度降低至100 Bq·L^{-1}。

关键词 氚，Geant4，最小可探测活度浓度，实时监测，塑料闪烁体光纤
中图分类号 O657.4
DOI: 10.3724/j.0253-3219.2026.hjs.49.250410
CSTR: 32193.14.hjs.CN31-1342/TL.2026.49.250410

The design of a plastic scintillating fiber-based array for online tritium monitoring device in water

FAN Dongliang[1,2] ZENG Linlin[1,2] WANG Chenxu[1,2] ZENG Youshi[1] DENG Ke[1] LI Jinglin[1,2]
ZHU Lixiao[1] MA Yuhua[1] CHENG Wenyu[3] ZHANG Qin[1] LIU Wei[1]
1(*Shanghai Institute of Applied Physics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Shanghai 201800*, *China*)
2(*University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing 100049*, *China*)
3(*Wuhan Second Ship Design And Research Institute*, *Wuhan 430064*, *China*)

Abstract **[Background]** Tritium is a radioactive isotope of hydrogen that is primarily released from nuclear power plants in the form of tritiated water. Once discharged, it can enter natural water bodies and the human living

甘肃省科技重大专项“钍基熔盐堆关键装备与技术开发”(No.23ZDGH001)、中国科学院上海应用物理研究所育新计划(No.SINAP-YXJH-202304)资助
第一作者：范栋梁，男，2001年出生，2023年毕业于中国计量大学，现为博士研究生，研究领域为核技术应用
通信作者：张钦，E-mail：zhangqin91@sinap.ac.cn；刘卫，E-mail：liuwei@sinap.ac.cn
收稿日期：2025-11-04，修回日期：2026-03-10
Supported by the Key Science and Technology Development Project of Thorium-based Molten Salt Reactor of Gansu Province (No.23ZDGH001), the Young Potential Program of Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences (No.SINAP-YXJH-202304)
First author: FAN Dongliang, male, born in 2001, graduated from China Jiliang University in 2023, doctoral student, focusing on nuclear technology and applications
Corresponding author: ZHANG Qin, E-mail: zhangqin91@sinap.ac.cn; LIU Wei, E-mail: liuwei@sinap.ac.cn
Received date: 2025-11-04, revised date: 2026-03-10

environment. Due to its biological toxicity, continuous monitoring of tritium in water is required. Regulatory limits on tritium activity in drinking water vary by region, with the lowest threshold reaching 100 Bq·L^{-1}, which places stringent demands on the detection limit of monitoring systems. **[Purpose]** This study aims to meet the requirement for real-time monitoring of low-level tritium water by developing a detection system with a low minimum detectable activity concentration (MDAC). **[Methods]** Based on a laboratory-developed real-time tritium-in-water monitoring system using plastic scintillating optical fibers, Geant4 Monte Carlo simulations combined with ROOT-based data analysis were employed to investigate the key factors affecting MDAC of the monitoring system. Under fixed chamber geometry and electronic parameters, the effects of fiber length, diameter, number, spatial arrangement, cladding thickness, fiber curvature, and impurity radionuclide background were systematically investigated. **[Results]** The simulation results indicate that: (1) a fiber length of approximately 20 cm provides a practical balance between mechanical feasibility, cost and MDAC reduction; (2) for a fixed chamber geometry, MDAC decreases with the increase of fiber number or fiber diameter; (3) the influence of fiber arrangement on MDAC is significant only at low filling densities; (4) fiber cladding affects MDAC reduction only when the filling density is low and the cladding thickness is below 0.1 μm; (5) it is necessary to ensure that the fibers are straight and without obvious bends as much as possible during the industrial manufacturing and processing of scintillator fibers; and (6) impurity radionuclides can significantly degrade detection efficiency and increase MDAC, hence, should be minimized. **[Conclusion]** For practical detector design, achieving an MDAC of 100 Bq·L^{-1} requires a single 46 mm-diameter chamber filled with approximately 1 800 unclad plastic scintillating fibers of 1 mm diameter and 20 cm length. At high filling densities, a uniform fiber arrangement is recommended to reduce optical crosstalk. In addition, background suppression and the integration of radionuclide pre-treatment or purification units should be considered in practical applications.

Key words Tritium, Geant4, Minimum detectable activity concentration (MDAC), Real-time monitoring, Plastic scintillating fiber

氚是一种氢的同位素，其半衰期为12.33 a，通过β衰变放出的电子平均能量为5.7 keV，最大能量为18.7 keV。当今自然环境中氚的主要来源于核电站，核电站产生的氚极易通过水循环进入生物体内[1]。随着核电的发展，很多国家和地区已对核电站排放的水中氚活度和饮用水中的氚活度限值进行了规定[2]。根据国标GB 6249－2025规定[3]，对于内陆厂址，排放口下游1 km处受纳水体中的氚浓度不能超过100 Bq·L^{-1}，对于饮用水中的氚活度限值，欧盟定为100 Bq·L^{-1}，最为严格[2]。在动物上的实验，已证明了氚可能对人体有潜在危害[4－7]，所以水中氚的快速、在线监测问题日益受到关注。目前水中氚的在线监测的主要方式是使用塑料闪烁光纤对水中氚活度进行测量[8－10]，此方式的探测效率较低，最小可探测活度浓度（Minimum Detectable Activity Concentration，MDAC）较高，目前现有的腔室设计的MDAC约为3 600 Bq·L^{-1}[10]，不能满足需要。本文对影响MDAC的因素进行了探究，分析并得到了能将基于塑料闪烁光纤的水中氚在线监测系统的MDAC降至100 Bq·L^{-1}的最优参数，给出了原型探测器搭建的建议。

1 实验方法

1.1 模拟方法及物理模型

Geant4（Geometry and Tracking）是欧洲核子研究中心（Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire，CERN）在1994年开发的一款用于模拟粒子在物质中传输与相互作用的软件[11－13]。本文使用Geant4对氚发射的β粒子在水和光纤中的行为进行模拟。

按照目前的水中氚在线监测器的设计[14]，Geant4模拟了一个聚四氟乙烯空心圆柱体腔室和两个光电倍增管，腔室中排布着被水淹没的闪烁光纤，结构如图1所示。

采用的光纤材料为聚苯乙烯，为了最大限度提高光子在腔内的反射，腔室材料选择了聚四氟乙烯。在圆柱体腔体两侧各设有亚克力圆盘作为光学窗口并密封腔室。为了去除光阴极自发射、宇宙射线引起的假事件，腔室两端各放置一个光电倍增管用以符合计数。最后使用光学硅脂将光电倍增管耦合到亚克力光学窗口上。同时为了降低宇宙射线在腔室中产生的背景计数，在特氟龙腔体外包裹一层1 mm厚度的塑料闪烁体作为反符合层。

为了满足低能计算的要求，本研究使用了

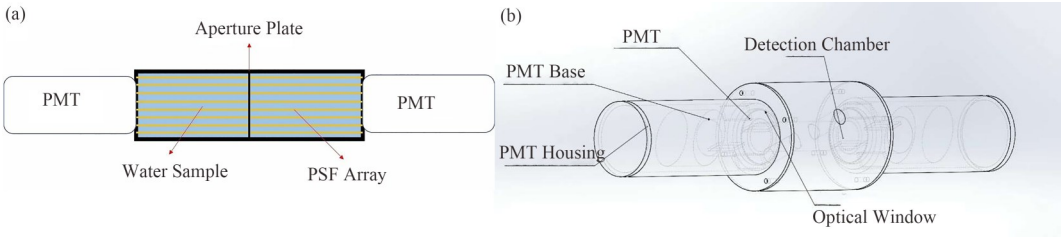


图1　(a) 由聚四氟乙烯腔室、塑料闪烁体光纤阵列和两侧的光电倍增管组成的水中氚探测器[8], (b) 实际探测器的前端探测结构示意图[14]（彩图见网络版）

Fig.1　(a) Schematic diagram of the water-based tritium detector composed of a polytetrafluoroethylene chamber, a plastic scintillator fiber array, and photomultiplier tubes on both sides[8], (b) Front-end detection structure of the actual detector[14] (color online)

Geant4针对低能粒子特化的LiverMore物理列表（G4EmLivermorePhysics），光纤、塑料闪烁体材料性质从Geant4 Nist数据库中的G4_POLYSTYRENE、G4_PLASTIC_SC_VINYLTOLUENE取得，折射率、发射光谱、衰减时间和光衰减常数来自厂家数据库[15]。水的光学性质取自Geant4自带的光学事例“OpNovice”[16]，聚四氟乙烯材料性质从Geant4 Nist数据库中的G4_TETRACHLOROETHYLENE取得，亚克力光学窗口、光学硅脂的数据取自文献[17]。光电倍增管的量子效率取自厂家数据表[18]。

1.2　最小可探测活度浓度(Minimum Detectable Activity Concentration)

MDAC表示在给定的探测效率、测量时间和背景条件下，探测系统可以可靠分辨出的最小放射性活度浓度，通常用于表示系统的灵敏度下限。本文采用Currie推导的MDAC公式，见式(1)[19]：

$$\mathrm{MDAC}=\frac{2.75+4.65\sqrt{N_{\mathrm{b}}}}{\varepsilon\cdot T\cdot V} \tag{1}$$

对于本模拟中的物理模型，推导可得式(2)：

$$\mathrm{MDAC}=\frac{2.75+4.65\sqrt{N_{\mathrm{b}}}}{\varepsilon\cdot T\cdot \pi\cdot\left(R^2-nr^2\right)\cdot h} \tag{2}$$

式中：V为氚水体积，N_{b}为背景计数；ε为探测效率；T为探测时间；R为腔室半径；n为光纤个数；r为光纤半径；h为腔室高度（光纤长度）。

在当前的腔体结构设计中，腔体尺寸越大，可容纳的光纤及被探测水样越多，最小可探测活度浓度越低。但受限于便携性、经济性等多方面因素，腔体尺寸存在一定上限，尤其是腔室半径。由于光纤阵列高填充密度导致孔喉尺度很小，毛细力会阻止氚水自发浸润纤维间隙，因此在注液前应对腔室抽真空或对进水口施加足够正压，确保液体能顺利润湿光纤表面并排出大部分残余气体[20]。

1.3　背景计数

背景计数是影响MDAC的一个重要量，其主要来源是电子学噪声和宇宙射线。以常见的Hamamatsu R2154-02型光电倍增管（Photomultiplier Tube，PMT）为例，其典型暗电流在测量条件下约为几个纳安培量级。该暗电流主要由热电子发射、二次发射等电子学噪声产生，通常对应的暗计数率在10^3 $\mathrm{s^{-1}}$量级，这对于采用PMT快速门控计数的系统来说是一个较大的基线值[18]。然而，在双端符合读出设计中，仅当两个PMT在极短的时间窗内同时触发时才判定为有效事件，因此单个PMT的随机暗噪声触发被极大抑制。根据标准随机符合理论，双端符合的噪声计数率如式(3)所示：

$$R_{\mathrm{acc}}=2R_{\mathrm{L}}R_{\mathrm{R}}\Delta t \tag{3}$$

式中：R_{L}、R_{R}为左右PMT的暗计数率，取2 000 $\mathrm{s^{-1}}$[21]；Δt为符合时间窗口，取200 ns。可得到PMT的暗电流带来的背景计数率R_{acc}为0.8 $\mathrm{s^{-1}}$，因此PMT带来的电子学噪声在整体背景计数中几乎可以忽略不计[22]。

宇宙射线中的绝大部分粒子，可使用铅、塑料、铝的屏蔽层进行吸收，但宇宙射线中的μ子穿透能力极强，能量为GeV量级，可轻易穿透多层被动屏蔽，产生大量背景计数[23]。经典地面实验测得的宇宙μ子的注量率约为1 $\mathrm{cm^{-2}\cdot min^{-1}}$[24]，本模拟中采用的腔室的有效横截面积为920 $\mathrm{cm^2}$，由此估得探测器的μ子通量为920 $\mathrm{min^{-1}}$。现代仪器中一般采用主动反符合层来排除μ子，通过选择较小的腔室并采取反符合技术，背景计数可从60 $\mathrm{s^{-1}}$降低至9 $\mathrm{s^{-1}}$[10,25]。

本研究根据实际经验和实验室条件，在模拟中固定腔室半径，根据分析，探测时间和背景计数都可视为常量，因此影响MDAC的参量有：探测效率、腔室高度（光纤长度）、光纤数量和光纤半径。其中，探测效率由光纤具体排布情况、有无包层及包层厚度、水中杂质粒子浓度等因素共同决定。

本模拟中重要的参量和常量，如表1所示。

表1　Geant4模拟中直接影响计数的参量、常量
Table 1　Parameters and constants directly affecting counts in Geant4 simulation

模拟中的参量 Parameters in simulation	默认取值 Default value	模拟中的常量 Constants in simulation	典型值 Typical value
光纤个数 Number of optical fibers	562	PMT吸收峰 PMT absorption peak / nm	420
光纤长度 Length of optical fibers / cm	20	PMT量子效率 PMT quantum efficiency	0.26
光纤直径 Diameter of optical fibers / mm	1	光阴极有效区域直径 Effective diameter of photocathode / mm	46
包层厚度 Cladding thickness / μm	0	光纤闪烁发射峰 Scintillation emission peak of optical fiber / nm	435
腔室直径 Diameter of chamber / mm	46	光纤光产额 Light yield of optical fiber / MeV^{-1}	8 000
腔室高度 Height of chamber / cm	20	光子猝灭系数 Photon quenching coefficient / mm MeV^{-1}	0.126
测量时间 Measurement time / h	1	氚电子能量 Tritium electron energy / keV	5.7
符合窗口 Coincidence window / ns	200	背景计数 Background count / s^{-1}	9

2　结果和讨论

2.1　光纤长度对MDAC的影响

Azevedo团队[11]已经阐述了总长度、成本不变的情况下，单个长光纤的探测器拆成多个短光纤、模块化的探测器对计数率的提升，但并未讨论光纤的长度对MDAC的影响。模拟中，使用了562根底面直径为1 mm、长度20 cm的无包层圆柱体光纤和直径为46 mm的空心腔室组成探测腔体内的塑料闪烁体光纤阵列，结合表1的数据，式(2)可写为式(4)：

$$\mathrm{MDAC}=\frac{111}{\varepsilon\cdot 3\,600\cdot\pi\cdot\left(0.23^2-nr^2\right)\cdot 2.0} \tag{4}$$

由此得到MDAC和光纤长度的关系如图2所示。

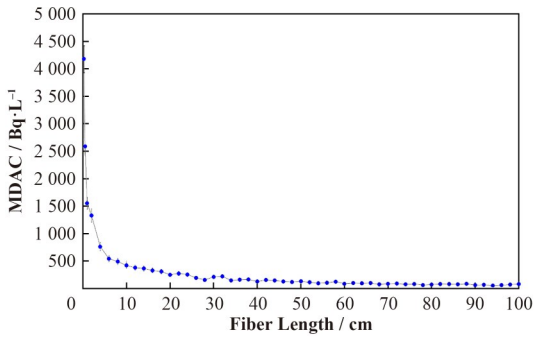


图2　光纤长度和MDAC的关系
Fig.2　The relationship between fiber length and MDAC

从图2中可以看出，MDAC随长度增长，减小的速度逐渐变慢，而当长度大于20 cm时，MDAC几乎不变。在实际制造中，兼顾组装方便、经济性和较低MDAC的光纤长度应为20 cm左右。

2.2　光纤数量及直径对MDAC的影响

基于上述结论，在模拟中设置了无包层光纤直径为1 mm、2 mm、3 mm，腔室直径46 mm，光纤长度和腔室高度为20 cm。在实际制造中，光纤的个数是决定成本的重要因素，因此每次模拟里都改变了圆柱体光纤的个数并重新排布，对于圆柱体光纤在圆柱体腔室中的排布问题，参考了Magdeberg大学的数据库[24]，该数据库讨论了在大圆中尽可能多地放置全等小圆问题的几何解，通过该数据库计算，在腔室直径固定为46 mm的条件下，光纤填充数量存在最大值，直径1 mm光纤最多排布1 852根，直径2 mm光纤最多排布452根，直径3 mm光纤最多排布196根。

Geant4模拟中，在水中构建了全方向同性β粒子源，氚的β粒子平均能量仅为5.7 keV，在水中射程不足5 μm[7]。这导致在进入光纤前，氚的β粒子大部分能量都在水中损失，产生少量闪烁光子。增加光纤数或增大光纤直径可以提高氚的β粒子进入光纤的概率，提高光子产额，进而提高探测效率、降低MDAC。模拟得到的不同直径的光纤组成的探测腔室的MDAC和光纤数的关系图见图3。

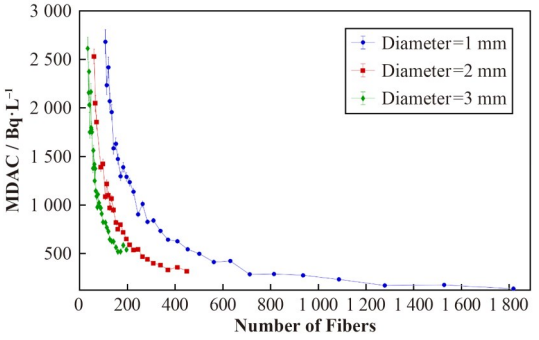


图3　不同直径的光纤组成的探测腔室的MDAC和光纤数的关系图(部分误差棒小于标志大小)(彩图见网络版)
Fig.3　Relationship between MDAC and the number of fibers in detection chambers with different fiber diameters (some error bars are smaller than the marker size) (color online)

从图3可得，保持腔室大小形状不变，使用相同数量的光纤，直径更大的，MDAC更小。当仅使用一个直径46 mm的空心圆柱体作为腔室时，只有使用直径1 mm的光纤并达到约1 800根以上才能将MDAC降至100 Bq·L^{-1}。

2.3 光纤排布情况对MDAC的影响

为定量化探究无包层光纤的排布情况，引入Clark和Evans提出的平均最近邻指数（Average Nearest Neighbor Index，ANN），其定义如式（5）所示[25]：

$$\mathrm{ANN}=\frac{r_{\mathrm{exp}}}{r_{\mathrm{obs}}} \tag{5}$$

式中：r_{exp}和r_{obs}分别为预期平均距离和观测平均距离，假定光纤的几何中心在外力作用下不会在高度方向发生改变，则三维距离可退化为二维距离，而对于点在二维区域中的泊松过程，预期平均距离（$\bar{\boldsymbol{r}}_{\mathrm{exp}}$）和观测平均距离（$\bar{\boldsymbol{r}}_{\mathrm{obs}}$）的定义如式（6）和式（7）所示：

$$\bar{\boldsymbol{r}}_{\mathrm{exp}}=\frac{1}{2\sqrt{\dfrac{N}{\boldsymbol{S}}}} \tag{6}$$

$$\bar{\boldsymbol{r}}_{\mathrm{obs}}=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\min\left\{\sqrt{(x_i-x_j)^2+(y_i-y_j)^2}\,\middle|\, j\in\mathbb{N},j\leqslant N,j\neq i\right\} \tag{7}$$

式中：N为要素数量；$\boldsymbol{S}$为研究区域的面积；i、j表示两个不同的要素。为调节光纤阵列的ANN，首先需在腔室内壁选定一点作为参考点，用以模拟外界力或结构扰动的作用位置。随后，对每根光纤中心位置施加沿径向的位移，其位移幅度为该光纤与参考点之间距离的单调递减函数，即靠近参考点的光纤发生较大位移，而远离参考点的光纤位移较小[26]。该扰动方式在保持腔室整体尺度不变的前提下，引入了受控的空间非均匀性，使光纤阵列的最近邻距离分布发生系统性变化，从而实现对ANN指数的调节。

由于光纤具有不可重叠的物理体积，位移大小存在上界，因此ANN的数值也存在最小限制。默认光纤未扰动时，从数据库中得到的坐标导出的ANN为最大值。模拟中采用直径1 mm、长度20 cm的圆柱体光纤，腔室直径为46 mm。由此得到ANN与MDAC的关系图，如图4所示。

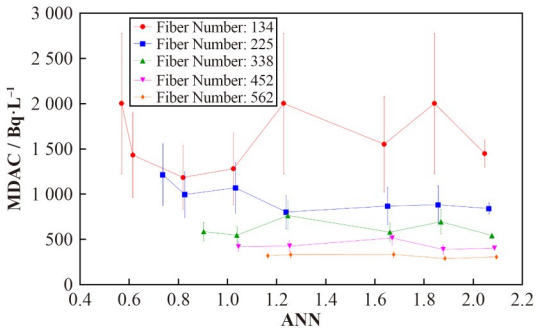


图4 不同数量的光纤组成的探测腔室里，ANN与MDAC关系图（ANN定义域有限）（彩图见网络版）

Fig.4 Relationship between ANN and MDAC in detection chambers with different numbers of fibers (ANN defined over a limited domain) (color online)

ANN小于1，表示此时光纤分布比随机分布更紧密、成团簇状，ANN越小，则说明排列越密集；ANN越接近1，表示光纤分布类似泊松随机分布，既不是强烈成团，也不是强烈均匀；ANN大于1，表示光纤分布比随机更均匀，ANN越大，则说明越倾向于像晶格那样均匀排列。

从图4中可以看出，随着光纤数量增加，ANN的最小值逐渐上升。当光纤填充密度较低时，MDAC随ANN的变化表现出一定波动；随着光纤填充密度的提高，ANN取值范围逐渐减小。当填充密度较高时，ANN仍能反映局部排布疏密；然而在极高填充密度条件下，几何约束使得光纤间距被强烈限制在接近$2r$的狭窄区间内，导致其对结构扰动的响应不再敏感。此时，即使局部排布发生微扰重构，ANN的变化很小，难以有效表征结构差异，因而逐渐失去作为判据的统计意义。

基于上述局限性，本文基于图论，将光纤中心r视为点集，完整定义如式（8）与（9）所示：

$$\boldsymbol{\mathcal{V}}=\left\{r_i=(x_i,y_i,0)\ i=1,\cdots,N\right\} \tag{8}$$

其中任意两点满足硬点约束：

$$\left\|r_i-r_j\right\|\geqslant 2r,\ i\neq j \tag{9}$$

以反映光纤之间不可重叠的几何条件。基于点集$\boldsymbol{\mathcal{V}}$，定义无向图$G=(\boldsymbol{\mathcal{V}},E)$，由观测距离$r_{\mathrm{obs}}$的中位数决定距离阈值$d_c$，进而决定边集$E$，见式（10）。

$$\begin{cases}E=\left\{(i,j)|i<j,\left\|r_i-r_j\right\|\leqslant d_c\right\}\\ d_c=k\cdot\mathrm{Median}\,(\boldsymbol{r}_{\mathrm{obs}})\end{cases} \tag{10}$$

式中：k为可变常量，$\mathrm{Median}\,(\boldsymbol{r}_{\mathrm{obs}})$为$r_{\mathrm{obs}}$的中位数。在该定义下，边的存在表示两根光纤在观测尺度d_c内形成有效邻接关系。当点集发生微扰$x_i\rightarrow x_{i'}$时，对应得到扰动后的图$G'=(\boldsymbol{\mathcal{V}},E')$。通过比较微扰前后边集的变化，引入结构重排参量（式（11）），用以表征邻接关系的断裂与新生程度。

$$\frac{\delta E}{|E|}=\frac{\left|E-E'\right|+\left|E'-E\right|}{|E|} \tag{11}$$

由于$\delta E/|E|$可直接刻画局部拓扑结构的变化，而非依赖单一距离统计量，因此在高填充密度、平均

最近邻距离高度受限的情况下，仍对结构微扰保持良好的敏感性。由此得到$\delta E/E$和MDAC的关系如图5所示。

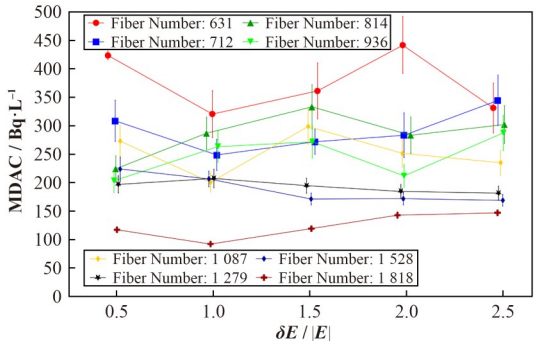


图5 不同数量的光纤组成的探测腔室里$\delta E/|E|$与MDAC的关系（彩图见网络版）

Fig.5 Relationship between $\delta E/|E|$ and MDAC in detection chambers with different numbers of fibers (color online)

使用ROOT进行相关性分析，光纤数小于1 279的曲线的皮尔逊相关系数（Pearson correlation coefficient）的绝对值均小于0.1，而光纤数≥1 279时，线性拟合的斜率为0，卡方检验值约等于1。综上，可以认为$\delta E/E$与MDAC没有明显的关系，特别是当光纤数目较大时，即使受到外力冲击，阵列发生重排，也近似认为探测器的MDAC不变。

2.4 光纤包层对MDAC的影响

无包层光纤虽然使得氚发射的低能电子更易进入光纤内部，但也使得光纤对光子的约束能力变差，光子极易出射到水中，使得探测效率下降、MDAC上升。为了降低MDAC，提高光纤的寿命，需要在光纤表面涂覆光学包层，包层的厚度一般为光纤直径的3%。直径1 mm的光纤包层厚度为30 μm，而氚发射的电子在包层中的透射深度最大约为10 μm[7]，因此包层应当更薄才能使得低能电子进入光纤中。常见的光学包层有：特氟龙（Polytetrafluoroethylene，PTFE）、聚酰胺酸（Polyamic Acid，PAA）和硅酮（Silicone）。在常见的光学包层中，聚酰胺酸的折射率为1.64~1.78，甚至高于塑料闪烁光纤纤芯本身的折射率1.60[27]。这种折射率反差无法形成有效的光波导结构，光子在纤芯与包层界面极易泄漏，导致探测效率严重下降。因此，本模拟不采用PAA涂层，而选择硅酮与PTFE等折射率低于1.60、寿命更长的材料。

使用Kanaya−Okayama公式（12）[28]，来估计电子在固体靶材中的射程：

$$\rho Re = 5.025 \times 10^{-12} \frac{AE_0^{5/3}}{\lambda_s Z^{8/9}} \tag{12}$$

式中：ρ是靶物质密度；Re是电子射程；A是原子量；E_0是入射电子能量；λ_s是经验常数（约为0.182）；Z是原子序数，得到氚发射的电子在硅酮和PTFE中的射程分别约为1.17 μm和0.65 μm。这为模拟中包层的初始厚度设置提供了依据。

为了对比两种包层在降低MDAC中的表现并确定合适的包层厚度，使用Geant4模拟了直径为1 mm、长20 cm的圆柱体光纤组成的阵列，腔室直径为46 mm。得到的不同包层厚度的情况下光纤数和MDAC的关系图，如图6所示。

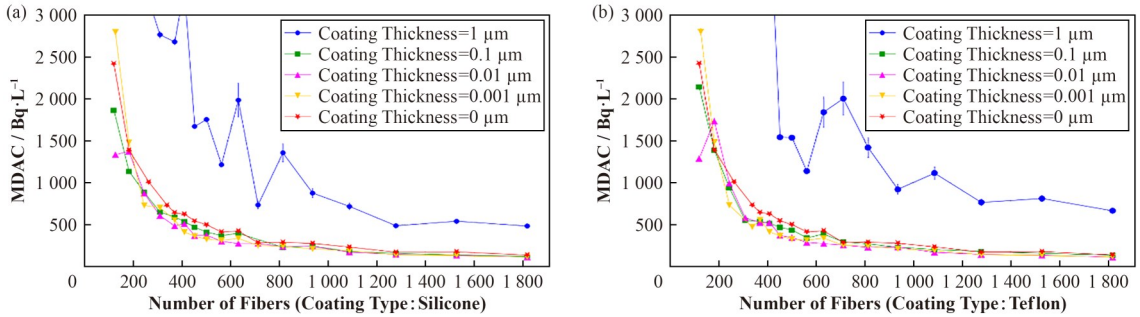


图6 具有不同厚度的两类包层光纤组成的探测腔室的MDAC和光纤数的关系图（彩图见网络版）
(a) 硅酮包层，(b) 特氟龙包层

Fig.6 Relationship between MDAC and the number of fibers in detection chambers composed of fibers with different cladding thicknesses (color online) (a) Silicone cladding, (b) Teflon cladding

从图6中可以看出，当包层厚度量级为1 μm时，包层阻碍了电子进入光纤，反而使得MDAC增大，而当包层量级为0.1 μm时，包层通过将光子束缚在光纤中，减少了光子出射的概率，增加了探测效率，降低了MDAC。进一步减小厚度，MDAC变化不大，甚至在光纤数很少的时候，MDAC反而增大。

只有在光纤填充密度不是特别大时，包层可以有效降低MDAC。而当光纤填充密度较大时，包层只能稍微降低MDAC。这是由于光纤填充密度很高时，光子即使出射到水中，也能大概率在被水吸收之前，重新进入光纤并被探测。

对于亚纳米到十几个纳米级别的包层，可采用

原子层沉积（Atomic Layer Deposition，ALD）对光纤表面进行薄膜制备。ALD通过交替引入前驱体气体、在光纤表面发生自限制性吸附反应，从而实现对材料厚度的精确控制与高均匀性覆盖。该方法在纤维、复杂曲面等高曲率基底上的应用已被报道[29]。而对于制备百纳米级别的包层，也可以考虑物理气相沉积（Physical Vapor Deposition，PVD）或者化学气相沉积（Chemical Vapor Deposition，CVD）方法[30-31]，以上两种沉积法均被广泛用于光纤包层及相关光学涂层的制备和应用研究中[32-33]。在实际生产中，对于包层厚度为纳米级别的光纤，由于光纤厂家无法独立生产纳米量级的光纤包层，可先生产无包层光纤，再委托专门的涂层厂家进行制造。

基于Kanaya－Okayama公式对氚的β粒子在包层材料中的射程估计，可以确定包层厚度处于纳米量级时并不会完全阻挡电子进入光纤芯层。在此基础上，需进一步论证：在“包层光纤+PMT+后端电子学”体系中，氚的β粒子能被成功探测到。Geant4模拟结果表明，在考虑无包层存在的情况下，能够到达光纤的氚β粒子能量典型值约为10 keV，其中在光纤内沉积的能量约为5 keV[11]。在有0.1 μm硅酮包层的情况下，对于低能电子（keV量级）在固体中的传输，可采用连续减速近似（Continuous Slowing Down Approximation，CSDA）假设，单位长度能量损失可近似视为均匀分布[34]，即式（13）：

$$\frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}x} \approx \frac{E_0}{Re} \tag{13}$$

因此，通过厚度为0.1 μm的包层后，电子的能量损失见式（14）：

$$\Delta E \approx E_0 \times \frac{d}{Re} \approx 0.9 \tag{14}$$

则进入光纤芯层的能量约为9.1 keV，对于所采用的塑料闪烁光纤，其光产额约为8 000 photons·MeV^{-1}，因此单个β粒子在光纤中可产生的光子数见式（15）：

$$N_\gamma \approx 9 \times 10^3 \times 5 \times 10^{-3} \approx 45 \tag{15}$$

闪烁光子的典型波长约为435 nm，与所选用光电倍增管的光谱响应良好匹配。假设光子被包层光纤成功引导到光学窗口，和光阴极作用。在该波长下，PMT的量子效率约为0.26，则单次事件中转化为光电子的期望数见式（16）：

$$N_{\mathrm{pe}} \approx 45 \times 0.26 \approx 12 \tag{16}$$

在PMT增益约为10^6的条件下，可在阳极端形成数量级为10^7个电子的电荷脉冲，对应电荷量约为1.6 pC，该量级明显高于典型的电荷灵敏放大器CR-111的等效输入噪声电荷（Equivalent Noise Charge，ENC）630，也就是0.1 fC[35]。后端电子学系统拟采用Cremat公司的电荷灵敏前置放大器CR-111，并配合CR-200-50 ns成形滤波电路，使用ADA4857运放进行电压放大。经上述多级放大与整形后，低能氚β粒子在PMT中产生的弱电荷脉冲信号，被转化为具有良好信噪比的电压脉冲信号。最终，信号通过高速比较器整形成数字脉冲，并利用基于施密特反相器的延展器将脉冲宽度稳定至200 ns，以适配后续逻辑处理。通过逻辑“与”电路实现光纤双端PMT的时间符合判选，有效抑制暗计数和单端噪声事件。

2.5 光纤曲率对MDAC的影响

塑料闪烁体光纤在出厂时，为方便运输，通常会缠绕在线轴上，这会造成光纤产生弯折，可能会影响光纤传输光子的效率，进而影响探测效率和MDAC。

为了探究光纤曲率对MDAC的影响，使用Geant4模拟了直径为1 mm、长20 cm的圆柱体无包层光纤组成的阵列。在Geant4建模中，弯折的圆柱体可以近似认为是一个“面包圈”形状的环面围成的体积的一部分。由此得到的不同光纤数目下，弯折圆柱体曲率和MDAC的关系图，如图7所示。

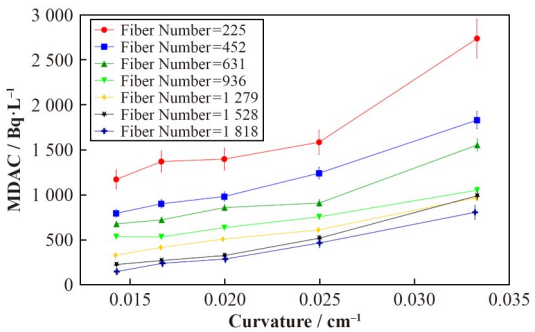


图7 不同数量的光纤组成的探测腔室的MDAC和光纤曲率的关系（彩图见网络版）

Fig.7 Relationship between the curvature of the optical fibers and the MDAC of detection chambers composed of different numbers of optical fibers (color online)

光纤曲率越大、弯折角度越大，光纤产生的光子在传输过程中就越容易进入水中，进而被水或者腔室材料吸收，导致了到达光学窗口的光子数目减少，探测效率下降、MDAC上升；光纤的弯折也会导致光纤两端和光学窗口耦合得不够紧密，光子在进入光学窗口前被散射掉的概率上升。

对于将要使用于氚电子探测的闪烁体光纤，在制造过程中要避免弯折；对已制造好的弯曲光纤，需采用先热处理再固定拉直的办法，保证其准直。

2.6 杂质核素对MDAC的影响

由于氚的β粒子的能量很低，导致氚探测器对

能量很敏感，其他核素发射的粒子会对计数带来巨大影响，考虑单个核素衰变产生粒子的符合计数，同时物理列表更换为适用于 keV 到 GeV 情况下的 Penelope（G4EmPenelopePhysics）。

本次模拟采用 562 根直径 1 mm、长度 20 cm 的圆柱形无包层光纤，腔室直径为 46 mm。对于核废水中不同常见核素在探测器中的响应结果，单粒子平均计数及其等效氚衰变浓度的置信区间基于正态分布近似计算，结果如表 2 所示。

表 2　核废水中不同核素的衰变粒子能量、单个核素在该探测器中产生的计数和等效氚衰变个数

Table 2　Energies of decay particles from various radionuclides in nuclear wastewater, the counts produced per nuclide in the detector, and the equivalent number of tritium decays

核素 Nuclide	典型衰变粒子能量 Typical decay particle energy / keV	单个核素平均计数（95% 置信区间） Single nuclide's counts (95% confidence interval)	单个核素等效氚衰变浓度（95% 置信区间） Equivalent tritium decay concentration per single particle / $Bq\cdot L^{-1}$ (95% confidence interval)
^{14}C	β:49	0.633 2±0.009 4	6 259±205
^{60}Co	β:98	8.834 6±0.058 2	87 292±2 582
^{90}Sr	β:196	101.171±0.197	$(9.99±0.29)\times10^{5}$
^{90}Y	β:933.6	3 508.51±1.16	$(3.466±0.011)\times10^{7}$
^{137}Cs	β:188	86.722 4±0.183	$(8.56±0.25)\times10^{5}$
^{131}I	β:192	92.278 6±0.188	$(9.11±0.26)\times10^{5}$

废水中的其他常见核素发射的β粒子的能量都比氚的β粒子的平均能量大一两个数量级，对于高灵敏度的氚探测器，会产生大量的偶然符合计数，使得实际废水中的探测效率远高于模拟中纯氚水中的探测效率，严重影响最小可探测活度浓度的准确性。在 Geant4 模拟中，水中发射的γ粒子由于穿透能力强，直接穿过了水层和光纤，并未在腔室中发生任何闪烁过程，因此也未能产生计数。为了获得真实的 MDAC 并减少杂质对探测响应的干扰，必须对待测水样进行放射性前处理，以去除氚以外的放射性核素。由于氚发射的β粒子能量极低，和其他低 MDAC 的闪烁体方法类似，在待测水样的预处理阶段需通过蒸馏、电解富集、同位素分离、反渗透膜过滤等工艺去除杂质核素，以确保将干扰核素的残留活度降至可忽略水平[36-40]。对于本设计的高灵敏度氚探测器，前处理工艺可以显著降低杂质的背景计数，使探测效率和 MDAC 更贴合实际情况。

3　结语

本文模拟并探究了塑料闪烁光纤的实时氚监测仪中影响 MDAC 的具体因素，包括光纤长度、光纤直径、光纤填充密度及排布、光纤包层、光纤曲率及氚水中的杂质核素。具体结论如下：

1）考虑到组装方便、经济性和较低 MDAC，构成探测腔的光纤长度应为 20 cm 左右。

2）保持腔室和光纤直径不变，光纤数越多，MDAC 越低；保持腔室和光纤数不变，光纤直径越大，MDAC 越低。

3）当光纤填充密度不是很大时，光纤排布的疏密程度会对 MDAC 造成影响；而当光纤填充密度较高时，MDAC 对光纤排布的具体情况不敏感。

4）为形成光波导结构，应采用折射率低于 1.60 的特氟龙和硅酮包层。包层厚度量级应在 0.1 μm 以下才能有效降低 MDAC。当光纤填充密度不太大时，包层才能较为明显地降低 MDAC。

5）为降低 MDAC，在工业制造和处理闪烁体光纤时，应尽量保证光纤准直无明显弯曲。

6）被探测的氚水应当尽量减少杂质粒子，以保证 MDAC 的可靠性。

在未来实际工程应用中，对于直径为 46 mm 的单个空心探测腔室，为实现 MDAC 约 100 $Bq\cdot L^{-1}$ 的设计目标，建议采用约 1 800 根直径 1 mm、长度 20 cm 的无包层圆柱体塑料闪烁光纤构成探测阵列。在该填充密度条件下，MDAC 对光纤具体排布形式及包层结构不再敏感，因此无需额外设置包层或对排布进行精细优化。但在工业制造与装配过程中，应尽量保证光纤保持良好准直状态，避免明显弯曲，以降低光传输损耗对探测效率的不利影响。

在结构设计方面，应采用法兰连接配合光学胶水或弹性密封元件形成可靠的密封体系，确保氚水在长期运行过程中无泄漏风险，并维持稳定的光学耦合条件。此外，可在探测腔室外围设置塑料闪烁体反符合层。当外层闪烁体与内部探测单元在时间上同时产生信号时，可判定为宇宙射线或环境γ射线在闪烁体中沉积能量所致的外源事例，并通过电子学反符合判据加以剔除，进而降低系统本底计数率，从而为实现低 MDAC 水平提供工程保障。

作者贡献声明　范栋梁负责课题具体工作，包括公

式推导、编程、模拟计算、数据呈现、文章撰写；曾林林、王晨旭和程文宇参与学术讨论，并就论文部分细节提供改进建议；曾友石和马玉华提供模拟计算的服务器资源并进行维护；邓珂和李婧琳负责调查研究论文背景并对结果进行验证；朱励骁提供项目资助；张钦提供项目指导，优化研究方案，并提出论文细节修改建议；刘卫负责研究方向的总体把控和决策支持。

参考文献

1 曾林林, 程文宇, 王晨旭, 等. 钍基熔盐堆核石墨中的氚含量定量估算[J]. 核技术, 2025, **48**(9): 090604. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2025.hjs.48.240209. CSTR: 32193.14.hjs.CN31-1342/TL.2025.48.240209.
ZENG Linlin, CHENG Wenyu, WANG Chenxu, *et al*. Quantitative estimation of tritium content in graphite for thorium molten salt reactor[J]. Nuclear Techniques, 2025, **48**(9): 090604. DOI: 10.11889/j. 0253-3219.2025. hjs. 48.240209. CSTR: 32193.14. hjs. CN31-1342/TL. 2025. 48.240209.

2 The Canadian Nuclear Safety Commission. Tritium in drinking water[EB/OL]. (2009-08-20)[2025-11-04]. https: //www. nuclearsafety. gc. ca/eng/resources/health/tritium/tritium-in-drinking-water/.

3 苏州热工研究院有限公司, 生态环境部核与辐射安全中心. 核动力厂环境辐射防护规定:GB 6249—2025[S/OL]. 北京: 中国标准出版社, 2025:5[2025-01-21]. https: //www. mee. gov. cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/hxxhj/fsxhjbz/202502/W020250220362180190245.pdf.
Suzhou Thermal Engineering Research Institute Co., Ltd., National Nuclear and Radiation Safety Center of the Ministry of Ecology and Environment. Regulations on Environmental Radiation Protection of Nuclear Power Plants: GB 6249—2025[S/OL]. Beijing: China Standard Publishing House, 2025:5[2025-01-21]. https://www.mee.gov. cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/hxxhj/fsxhjbz/202502/W020250220362180190245.pdf.

4 Wang B, Zhou X Y. Effects of prenatal exposure to low-dose. BETA. radiation from tritiated water on the neurobehavior of mice[J]. Journal of Radiation Research, 1995, **36**(2): 103–111. DOI: 10.1269/jrr.36.103.

5 Cahill D F, Yuile C L. Tritium: some effects of continuous exposure *in utero* on mammalian development[J]. Radiation Research, 1970, **44**(3): 727. DOI: 10.2307/3573152.

6 Lee J H, Kim C S, Choi S I, *et al*. Tissue distribution, excretion and effects on genotoxicity of tritium following oral administration to rats[J]. Nuclear Engineering and Technology, 2019, **51**(1): 303–309. DOI: 10.1016/j.net.2018.09.013.

7 Li S R, Zhang Y F, Xue H Y, *et al*. Integrative effects based on behavior, physiology and gene expression of tritiated water on zebrafish[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2021, **225**: 112770. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2021.112770.

8 程文宇. 基于闪烁光纤的水中氚在线监测[D]. 上海: 中国科学院上海应用物理研究所(中国科学院大学), 2024.
CHENG Wenyu. Online monitoring of tritium in water based on scintillation fiber[D]. Shanghai: Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences (University of Chinese Academy of Sciences), 2024.

9 Priester F, Klein M. TRitium activity measurements with a PhotomultipliEr in liquids – the TRAMPEL experiment [J]. Fusion Engineering and Design, 2016, **109–111**: 1356–1359. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2015.12.027.

10 Azevedo C D R, Baeza A, Chauveau E, *et al*. Development of a real-time tritium-in-water monitor[J]. Journal of Instrumentation, 2023, **18**(12): T12008. DOI: 10.1088/1748-0221/18/12/T12008.

11 Agostinelli S, Allison J, Amako K, *et al*. Geant4—a simulation toolkit[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2003, **506**(3): 250–303.

12 Azevedo C D R, Baeza A, Chauveau E, *et al*. Simulation results of a real-time in water tritium monitor[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2020, **982**: 164555. DOI: 10.1016/j. nima. 2020.164555.

13 Allison J, Amako K, Apostolakis J, *et al*. Geant4 developments and applications[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2006, **53**(1): 270–278. DOI: 10.1109/TNS.2006.869826.

14 Cheng W Y, Deng K, Zeng Y S, *et al*. Development of an enhanced online tritium monitoring system using plastic scintillation fiber array[J]. Nuclear Science and Techniques, 2024, **35**(10): 173. DOI: 10.1007/s41365-024-01518-x.

15 LUXIUM Solutions. Plastic scintillating and wavelength-shifting fibers[EB/OL]. (2023-10-23) [2025-1-04]. https://luxiumsolutions. com/sites/default/files/2026-03/

149228_Luxium_PSWS%20Fibers%20Brochure.pdf.

16 Geant4. OpNoviceDetectorConstruction. cc[EB/OL]. (2024-11-5) [2025-11-04]. https://gitlab. cern. ch/geant4/geant4/-/commits/master/examples/extended/optical/OpNovice/src/OpNoviceDetectorConstruction.cc.

17 Argyriades J, Arnold R, Augier C, *et al*. Spectral modeling of scintillator for the NEMO-3 and SuperNEMO detectors[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2011, **625**(1): 20 – 28.

18 HAMAMATSU. For scintillation counting and high energy physics 51 mm(2inch) diameter,fast time response, bialkali photocathode, 10-stage, head-on type[EB/OL]. (2010-11-10) [2025-11-04]. https://www. hamamatsu. com. cn/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/etd/R2154-02_TPMH1089E.pdf.

19 Currie L A. Limits for qualitative detection and quantitative determination. Application to radiochemistry [J]. Analytical Chemistry, 1968, **40**(3): 586 – 593. DOI: 10.1021/ac60259a007.

20 Duprat C, Protière S, Beebe A Y, *et al*. Wetting of flexible fibre arrays[J]. Nature, 2012, **482**(7386): 510 – 513. DOI: 10.1038/nature10779.

21 Indico Cern. Characterization of the Hamamatsu photomultipliers for phase 1 of the KM3NeT project[EB/OL]. (2018-11-20) [2025-11-04]. https://indico. cern. ch/event/622922/attachments/1426678/2189054/PMT-Paper.pdf.

22 Sharan M K, Singaraju R N, Sinha T, *et al*. Measurement of cosmic-ray muon flux in the underground laboratory at UCIL, India, using plastic scintillators and SiPM[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2021, **994**: 165083. DOI: 10.1016/j.nima.2021.165083.

23 Clarkson A, Hamilton D J, Hoek M, *et al*. GEANT4 simulation of a scintillating-fibre tracker for the cosmic-ray muon tomography of legacy nuclear waste containers [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2014, **746**: 64 – 73. DOI: 10.1016/j.nima.2014.02.019.

24 Lv C, Hu K, Li H, *et al*. Multiplexed SiPM readout of plastic scintillating fiber detector for muon tomography [EB/OL]. (2025-11-20)[2026-04-03]. https://arxiv.org/abs/2511.16185.

25 吕汶辉, 杨永新, 衣宏昌, 等. 闪烁光纤阵列探测器最小可探测活度浓度仿真计算[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2022, **43**(11): 1636 – 1641.
LYU Wenhui, YANG Yongxin, YI Hongchang, *et al*. Simulation analysis of minimum detectable activity concentration of scintillating optical fiber array detector [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2022, **43** (11): 1636 – 1641.

26 Specht E. The best known packings of equal circles in a circle (complete up to N = 2600) [EB/OL]. (2024-12-15) [2025-11-04]. http://hydra. nat. uni-magdeburg. de/packing/cci/cci.html#References.

27 Clark P J, Evans F C. Distance to nearest neighbor as a measure of spatial relationships in populations[J]. Ecology, 1954, **35**(4): 445 – 453. DOI: 10.2307/1931034.

28 Merson J, Picu R C. Random fiber network loaded by a point force[J]. Journal of Applied Mechanics, 2022, **89** (4): 044501. DOI: 10.1115/1.4053329.

29 Janani R, Majumder D, Scrimshire A, *et al*. From acrylates to silicones: a review of common optical fibre coatings used for normal to harsh environments[J]. Progress in Organic Coatings, 2023, **180**: 107557. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2023.107557.

30 Kanaya K, Okayama S. Penetration and energy-loss theory of electrons in solid targets[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1972, **5**(1): 43 – 58. DOI: 10.1088/0022-3727/5/1/308.

30 Qu W W, Chen Y X, Liu S Q, *et al*. Advances and prospects of nanomaterial coatings in optical fiber sensors [J]. Coatings, 2025, **15**(9): 1008. DOI: 10.3390/coatings15091008.

32 Panjan P, Drnovšek A, Gselman P, *et al*. Review of growth defects in thin films prepared by PVD techniques [J]. Coatings, 2020, **10**(5): 447. DOI: 10.3390/coatings10050447.

33 Yadav K K, Jain T A. Chemical vapor depostion (CVD): Fundamentals and applications – a review[J]. NeuroQuantology, 2022, **20**(7): 4750 – 4758.

34 Vendittozzi C, Di Micco E, Caponero M A, *et al*. Functional coatings for fiber Bragg gratings: a critical review of deposition techniques for embedded and harsh-environment applications[J]. Coatings, 2025, **15**(11): 1268. DOI: 10.3390/coatings15111268.

35 Divay L, Eustache E, Bouhadida M, *et al*. Thin layer deposition of TiO_2 and PMMA on optical micro or nano

fibers for nonlinear optics[J]. Journal of the European Optical Society-Rapid Publications, 2025, **21**(1): 15. DOI: 10.1051/jeos/2025009.

36 Bichsel H. Straggling in thin silicon detectors[J]. Reviews of Modern Physics, 1988, **60**(3): 663–699. DOI: 10.1103/revmodphys.60.663.

37 Cremat Inc. Maximum detectable pulse[EB/OL]. (2024-11-01) [2025-11-04]. https://www. cremat. com/applications/csp-selection-guide/.

38 Atkinson R, Eddy T, Kuhne W, *et al*. Measurement of the tritium concentration in the fractionated distillate from environmental water samples[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2014, **135**: 113–119. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2014.04.012.

39 Dymecka M, Szaciłowski G, Rzemek K, *et al*. Low-level tritium measurements in freshwater and seawater samples [J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2024, **333**(7): 3511–3522. DOI: 10.1007/s10967-023-09295-4.

40 施章宏, 赵庆凯, 陈长安. 水中氕、氘、氚同位素的分离技术研究现状[J]. 核化学与放射化学, 2024, **46**(2): 85–99.
SHI Zhanghong, ZHAO Qingkai, CHEN Chang'an. Review of water hydrogen isotope separation technology [J]. Journal of Nuclear and Radiochemistry, 2024, **46**(2): 85–99. DOI: 10.7538/hhx.2024.YX.2023042.

41 Li G, Liang M C, He S J, *et al*. RO film-based pretreatment method for tritium determination by LSC[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2020, **166**: 109343. DOI: 10.1016/j.apradiso.2020.109343.

42 王晨旭, 薛孝宠, 刘佳煜, 等. 基于氕氚关系的固体聚合物电解浓氚仪的标定[J]. 核技术, 2024, **47**(4): 040404. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.040404.
WANG Chenxu, XUE Xiaochong, LIU Jiayu, *et al*. Calibration of tritium enrichment factor in solid-polymer electrolyte device based oncorrelation between deuterium and tritium[J]. Nuclear Techniques, 2024, **47**(4): 040404. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.040404.