

文章编号: 1007-4627(2015)03-0330-05

用于二维位敏闪烁体中子探测器的波移光纤性能研究

吴冲¹, 罗韦¹, 唐彬², 孙志嘉², 杨振², 康丽³

(1. 中国石油大学(北京)理学院, 北京 102249;

2. 中国科学院高能物理研究所实验物理中心, 北京 100049;

3. 东莞理工学院电子工程学院, 广东 东莞 523808)

摘要: 波移光纤是闪烁体中子探测器的重要组成部分, 其性能参数——光衰减长度、光损失率和光吸收重发射效率等将直接影响探测器的性能。本研究利用一套光纤性能测试试验装置, 系统地研究了 BCF91A 型波移光纤的光传输性能。结果表明: BCF-91A 型波移光纤光衰减长度为 (148 ± 5) cm, 吸收重发射效率约为 5.6%; 当光纤转弯半径为 20 mm, 长度为 1.1 m 时, 其性能可以满足闪烁体中子探测器要求; BCF-91A 型波移光纤是很好的光纤候选材料。

关键词: 波移光纤; 光衰减长度; 光损失率; 光吸收重发射效率; 闪烁体中子探测器

中图分类号: O571.53 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.32.03.330

1 引言

作为研究物质结构和动力学性质的理想探针, 中子散射技术已在凝聚态物理、化学、生命科学、材料科学等领域^[1-2]的研究中被广泛采用。位置灵敏型中子探测器是中子散射试验中的关键设备, 通过入射中子与探测器内核素的相互作用来实现中子探测。由于³He 气体具有探测效率高、 n/γ 抑制比好等优点, 截至 2007 年, 国际上 70% 以上的中子探测器都是以³He 气体作为中子转换材料^[3]。但近几年³He 气体价格飞涨, 基于³He 的探测器也变得十分昂贵, 研发新型中子探测器以满足各种

科学研究需要已经迫在眉睫。

基于新型闪烁体材料和光电技术的闪烁体型中子探测器, 具有对热中子探测效率高、位置分辨本领强等特点, 因而日益受到重视。其中基于⁶LiF/ZnS(Ag) 闪烁体和波移光纤结构的大面积位置灵敏型闪烁体中子探测器更是近些年的研究热点^[4-5]。该探测器结构如图 1 所示, 在 ZnS(Ag) 闪烁体中掺杂⁶LiF, 利用⁶Li(n, α)T 核反应实现对热中子的转换; 利用沿 X、Y 方向排布的波移光纤收集闪烁屏中产生闪烁光, 并传输到后端的光电倍增管进行光电转换; 后续电子学对光电倍增管输出信号进行处理, 最终实现对入射中子位置的探测。

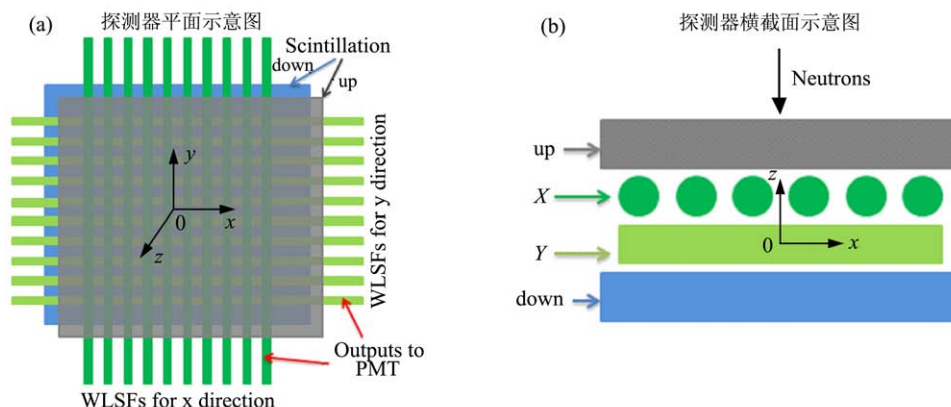


图 1 (在线彩图) SSND 模型图

收稿日期: 2014-08-10; 修改日期: 2014-10-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11175257); 广东省自然科学基金资助项目(S2012010010306)

作者简介: 吴冲(1969-), 男, 安徽合肥人, 副教授, 博士, 从事原子核与粒子物理研究, E-mail: wuc@ihep.ac.cn。

波移光纤是闪烁体中子探测器的重要组成部分，其结构如图 2^[6] 所示，由芯层和包层两部分构成。其工作原理为芯层中的波移物质吸收入射光子后被激发，被激发的原子向 4π 空间立体角均匀发射波长较长的光子；当光子的出射角度（出射方向与界面法线的夹角）大于临界角时，将发生全反射；全反射光子传输到光纤两端被光电倍增管接收。因此，波移光纤与普通的光纤不同，信号读出不依赖于光子的入射角度，可采用光纤侧面与闪烁体的耦合方式，从而减少光纤数目，节约成本。波移光纤的性能参数——光衰减长度、光损失率和光吸收重发射效率等，将直接影响探测器的性能。其中，BCF-91A 型波移光纤的吸收光谱在 350 ~ 465 nm 之间，在 420 和 450 nm 处分别是其吸收光谱峰值，而 $^6\text{LiF}/\text{ZnS}(\text{Ag})$ 闪烁体发射光谱峰值为 450 nm，两者符合较好。本文利用一套光纤性能测试试验装置，系统地研究了 BCF-91A 型波移光纤的光传输性能。

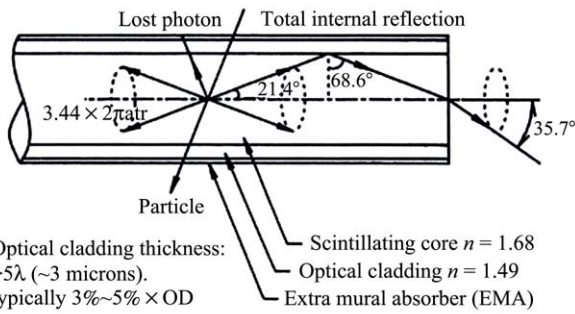


图 2 波移光纤的结构及其工作原理

2 试验装置

$^6\text{LiF}/\text{ZnS}$ 闪烁体中子探测器采用 BCF-91A 波移光纤，其直径为 1 mm，可实现蓝光到绿光（峰值波长 510 nm）的转换^[6]。

为了获得光纤光衰减长度、光损失率和光吸收重发射效率等性能参数，设计了一套基于 LED 光源的试验装置（以 LED 灯模拟闪烁屏出射的闪烁光），如图 3 所示。该试验装置主要包括蓝光 LED、带导轨的铝型材支架及监测用光电倍增管等，所有器件均放置于暗箱中，以满足整体避光需求。试验中蓝光 LED 放置在带狭缝的灯座内，光纤固定于带导轨的铝型材支架上，带狭缝的 LED 灯座也固定于支架上并可沿滑轨方向滑动。光纤在铝型材支架两端经过一定的转弯弧度后与光电倍增管的入射窗耦合。为排除 LED 发光不稳定以及光纤与 PMT 耦合等对传输到光电倍增管光子数的影响，采用两个光电倍增管双端测试的试验方案，即一端光电倍增管监测 LED 光源稳定性，其信号作为归一系数，另

一端光电倍增管测试不同条件下光纤传输的光子数。试验选用的光电倍增管为 XP2020^[7]，具有较大的放大倍数，其输出信号能够较精确地反映光子数的变化。将光电倍增管的信号从暗箱壁上的穿墙件引出并接到标准数据获取系统中。数据获取系统主要由电荷灵敏型 ADC 2249W 和获取 PC 机构成，ADC 2249W 的触发信号由触发 LED 光源的脉冲发生器提供。

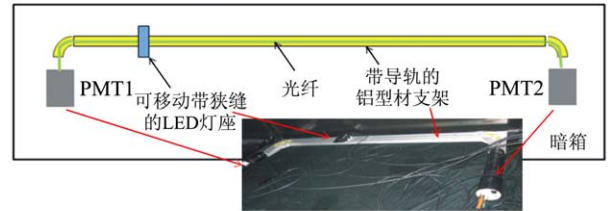


图 3（在线彩图）光纤性能测试原理图和试验装置示意图

3 测试结果及分析

3.1 光衰减长度

对于双包层光纤，其传输到光电倍增管的平均光子数 N_{mean} 与光子的传输距离的关系是两种成分指数衰减的叠加^[8-9]：

$$N_{\text{mean}} = A_1 \cdot \exp\left(\frac{-l}{\lambda_1}\right) + A_2 \cdot \exp\left(\frac{-l}{\lambda_2}\right) + N_0, \quad (1)$$

其中： l 为光源到光电倍增管光阴极的距离； λ_1, λ_2 分别是光纤包层和芯层的光衰减长度； A_1, A_2 分别为这两种结构传输的光的信号幅度； N_0 为噪音本底。用上述指数衰减关系式拟合 $N_{\text{mean}} - l$ 的试验数据即可得到衰减长度 λ_1, λ_2 。实际应用中，由于包层对闪烁光的吸收率很高，光纤主要通过芯层传输光子，因此测试中 λ_2 的贡献比 λ_1 要大得多，可以把公式(1)简化为

$$N_{\text{mean}} = A \cdot \exp\left(\frac{-l}{\lambda}\right), \quad (2)$$

其中 λ 为光纤整体的光衰减长度，通过改变 LED 光源的位置 l ，可以得到光子数随光源位置的变化曲线，用上述指数衰减关系式拟合试验数据，即可得到 λ 的值。

通常采用刻度光电倍增管单光电子峰的方法确定 N_{mean} 的值，通过测试得到的光电倍增管信号大小除以单光电子峰位可以得到 N_{mean} 。采用两个光电倍增管双端测试的试验方案，归一后的光电倍增管信号满足：

$$A' = \frac{A_{\text{PMT1}} \cdot \exp\left(\frac{-l}{\lambda}\right)}{A_{\text{PMT2}} \cdot \exp\left[\frac{-(L-l)}{\lambda}\right]} = A \cdot \exp\left(\frac{L-2l}{\lambda}\right), \quad (3)$$

其中: l 为LED到光电倍增管PMT1光阴极的距离; L 为光纤总长度; A_{PMT1} , A_{PMT2} 分别为LED发出的光被光纤吸收重发射后向左右两边传输的光子相对强度; A 为 A_{PMT1} 和 A_{PMT2} 的比值。试验结果如图4所示。通过指数拟合, 得到BCF-91A的光衰减长度 λ 为 (148 ± 5) cm。因此在闪烁探测器设计中, 光纤的长度控制在1.5 m以内, 以保证到达光电倍增管的光子数能够满足后端电子学的触发要求, 同时该参数有助于准确估算由闪烁屏出射后最终到达光电倍增管的光子数。

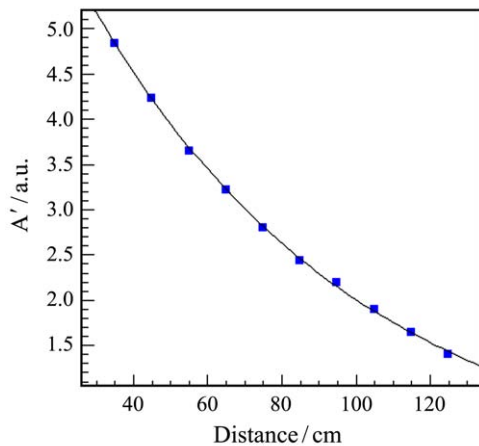


图 4 (在线彩图) 光纤光衰减长度测试结果

3.2 光纤弯转条件下的光损失率

探测器研制中, 为实现大立体角覆盖, 需要多个探测器工作单元拼接^[10-11]。为了减小各个探测器单元拼接时的死区, 需要将波移光纤阵列在与闪烁屏平行的平面弯折到垂直面, 再与后端的光电倍增管耦合。光纤的弯转过程中存在弯曲损耗, 主要包括微弯损耗和宏弯损耗。其中微弯损耗是由于光纤受到不均匀应力作用, 如侧压力或温度变化, 导致光纤轴发生微小不规则的弯曲所带来的光损耗^[12]。由于微弯损耗所带来的影响较小而且很难避免, 试验中主要考虑光纤由于宏弯所引起的损耗。

光纤的宏弯损耗主要是由于弯转导致光子在其内部传输的光路发生变化, 试验中通过测试光纤弯曲前后其传输的光子数变化来衡量。具体反映为由光电倍增管测试得到的信号幅度大小变化。弯曲损耗系数 $\alpha(\lambda)$ 定义为

$$\alpha(\lambda) = \frac{10}{L} \cdot \lg \left[\frac{P_{in}(\lambda)}{P_{out}(\lambda)} \right], \quad (\text{dB/mm}) \quad (4)$$

其中: $P_{in}(\lambda)$ 为输入光功率; $P_{out}(\lambda)$ 为光纤输出光功率; L 为光纤的弯曲部分的长度。试验中 $P_{in}(\lambda)$, $P_{out}(\lambda)$ 分别对应光电倍增管测试得到的光纤弯转前

后的电信号幅度。

试验测试了BCF-91A波移光纤在7种不同弯转半径条件下的弯曲损耗系数。试验装置中一端光电倍增管测试结果作为归一系数, 另一端光电倍增管分辨测试弯转半径在50, 40, 30, 20, 15, 10和5 mm条件下光纤传输到这一端的光子数信号。

从图5和表1中可以看出弯曲损耗系数随光纤的弯转半径增大呈明显的指数下降。这是因为弯转半径越大从光纤中逃逸的光子数越少, 其光损耗越小。对于BCF-91A波移光纤来说, 其弯转的临界半径约为15 mm, 即当光纤弯转半径小于15 mm时, 其传输的光子数急剧减少。

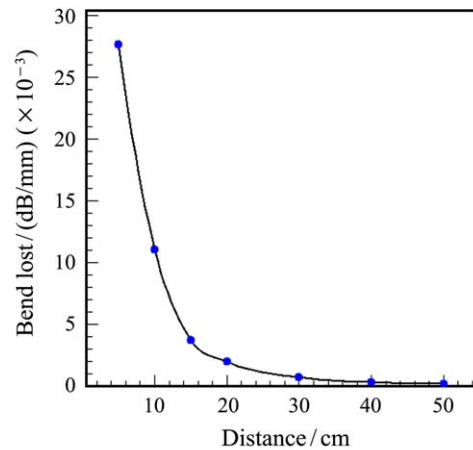


图 5 (在线彩图) 不同弯转半径下弯曲损耗系数

表 1 光损失率测试结果

光纤弯转半径/mm	光损失率/%
5	21.7 ± 0.2
10	17.4 ± 0.2
15	8.9 ± 0.1
20	6.3 ± 0.1
30	3.5 ± 0.1
40	2.2 ± 0.1
50	1.7 ± 0.1

光纤阵列结构除了考虑光损失率, 还要考虑由光纤弯转所带来的探测死区。当光纤阵列的弯转半径取20 mm时, 探测器对应的探测死区为24%。

3.3 吸收重发射效率

波移光纤的吸收重发射效率是指光纤吸收蓝光后发射绿光并在光纤中传输的几率, 主要由光纤的蓝光吸收效率、吸收蓝光后发射绿光的效率以及绿光在光纤中传输的几率决定。这三个参数是光纤的固有参数, 厂家仅提供了光纤吸收蓝光后发射绿光效率为80%, 以及重发

射的绿光向光纤一端的传输几率为 3.4%^[6]。试验测试很难单独给出光纤的蓝光吸收效率这个参数的准确值，通过定义波移光纤的吸收重发射效率 ζ 来评估光纤这一性能：

$$\xi = \frac{N_{\text{green}}}{N_{\text{blue}}}, \quad (5)$$

其中： N_{blue} 为入射到光纤上的蓝光光子数； N_{green} 为传输到光电倍增管上的绿光光子数。试验中，两个参数均通过刻度过的光电倍增管信号获得。

试验中选用的光电倍增管 XP2020 为高增益光电倍增管，2 000 V 工作电压下，其增益可达 3×10^7 。光电倍增管的刻度主要采用单光子入射方法得到其单光电子峰，试验中利用信号发生器驱动 LED (蓝光) 作为光源，LED 在入射光电倍增管之前经过一个光衰减器，将 LED 光源衰减为单光子，直接测量该单光子信号就得到单光电子峰^[13]。图 6(a) 为测试得到的单光电子能谱，将单光电子能谱进行高斯拟合，可以得到单光电子能谱峰道数为 (61.35 ± 0.19) channel，其中电子学噪声为 20 channel。通过改变光电倍增管的工作高压，可以得到光电倍增管的增益线性曲线。图 6(b) 为光电倍增管增益线性测试结果。从图 6(b) 可以看出此光电倍增管具有较好的增益线性，但是相同高压下增益测试值比厂商所提供的值略低，这是由于光电倍增管的使用年限较久，器件有一定程度的老化等方面原因所致。

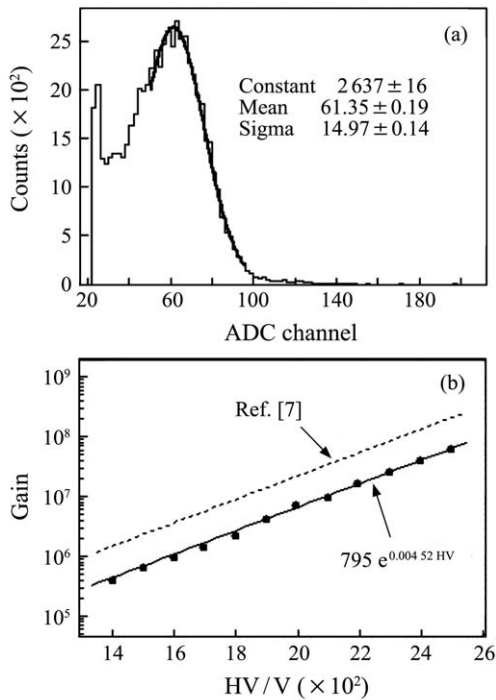


图 6 光电倍增管单光电子能谱(a)及增益线性(b)

通过光电倍增管的刻度，可以通过计算得到光电倍增管信号对应的光子数。波移光纤的吸收重发射效率测试中，LED 发射的蓝光通过小狭缝入射到光纤上，狭缝宽度为 0.5 mm，小于光纤直径。 N_{blue} 是 LED 通过狭缝直接照射光电倍增管光阴极窗而产生的输出脉冲信号对应的光子数。 N_{green} 是相同条件下，LED 直接照射光纤，经过波移光纤吸收重发射后传输到光电倍增管光阴极而产生的输出脉冲信号对应的光子数。实际计算中，还要排除光纤长度对传输绿光光子数的影响。光电倍增管信号在转换为光子数时，要考虑不同波长光子对应的光电倍增量子效率，本试验中 LED 灯发射的蓝光光谱峰值波长为 450 nm，BCF-91A 光纤发射的绿光光谱峰值波长为 510 nm，XP2020 光电倍增管对应的量子效率 Q_p ：波长 450 nm 的蓝光为 19.8%，波长 510 nm 的绿光为 12.2%^[7]。

图 7 为波移光纤的吸收重发射效率测试结果，其中图 7(a) 为通过准直孔得到的蓝光信号谱图，利用高斯分布拟合得到的峰位值 S_1 ，以及光电倍增管对应的单光电子峰位值 $S_{S.p.e}$ ，可以得到入射光纤的总蓝光光子数 $N_1 = S_1/S_{S.p.e}/Q_p = 3.17 \times 10^3$ 。图 7(b) 为准直孔照射光纤条件下，光电倍增管得到的绿光信号谱图，此时对应光子数为 $N_2 = 1.28 \times 10^2$ 。排除光纤长度 (50 cm) 对传输绿光光子数的影响，光纤的吸收重发射效率 ζ 约为

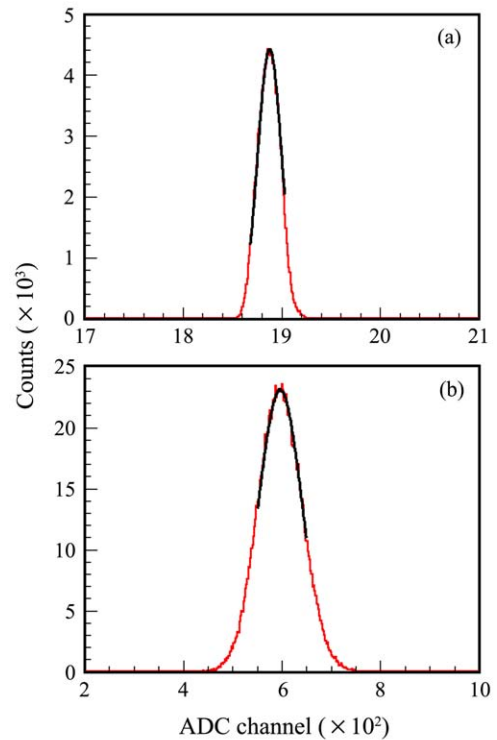


图 7 (在线彩图)波移光纤的吸收重发射效率测试结果 (a)通过准直孔得到的蓝光信号谱; (b)通过光纤后得到的绿光信号谱。

5.6%。该参数对于估算最终光电倍增管收集到的光子数至关重要, 是保证探测器结构设计满足电子学需求的关键参数。

4 结论

通过以上测试, 得到波移光纤的光衰减长度为 (148 ± 5) cm, 光吸收重发射效率 ζ 约为 5.6%。当中子探测器的波移光纤长度为 1.1 m, 其转弯半径为 20 mm, 采用两端耦合光电倍增管时, 由于 ${}^6\text{LiF}/\text{ZnS}(\text{Ag})$ 闪烁体的表面出射光产额为 8.01×10^3 ^[14], 我们可以大致估算出光纤出射端面的光子数 N 约为 580 个, 高于探测器设计所需的 100 个光子数的要求。

参考文献:

- [1] WEI Zhiyong, ZANG Lihui, FAN Wo, *et al.* Nuclear Techniques, 2006, **29**(9): 713. (in Chinese)
(魏志勇, 臧黎慧, 范我, 等. 核技术, 2006, **29**(9): 713.)
- [2] CHEN Dongfeng, GOU Cheng, YE Chuntang, *et al.* Nuclear Techniques, 2005, **28**(2): 127. (in Chinese)
(陈东风, 勾成, 叶春堂, 等. 核技术, 2005, **28**(2): 127.)
- [3] Oed A. Nucl Instr Meth A, 2004, **525**(1-2): 62.
- [4] RHODES N J, WARDLE A G, BORAM A J, *et al.* Nucl Instr Meth A, 1997, **392**(1-3): 315.
- [5] Crow M L, Hodges J P, Cooper R G. Nucl Instr Meth A, 2004, **529**(1-3): 287.
- [6] Available on the web <http://www.detectors.saint-gobain.com/default.aspx>
- [7] Philips Data Handbook for Electron Tubes T9. 1987
- [8] CHI Shaopeng, XIA Xiaomi, ZHOU Li, *et al.* High Energy Physics and Nuclear Physics. 2003, **27**(3): 257. (in Chinese)
(迟少鹏, 夏小米, 周莉, 等. 高能物理与核物理, 2003, **27**(3): 257.)
- [9] WANG Xiaolian, XU Zizong, HOU Yunzhen, *et al.* High Energy Physics and Nuclear Physics. 1997, **21**(9): 787. (in Chinese)
(汪晓莲, 许咨宗, 侯云珍, 等. 高能物理与核物理, 1997, **21**(9): 787.)
- [10] SACKETT D, IEKI K, GALONSKY A, *et al.* Physical Review C, 1993, **48**(1): 118.
- [11] ZECHER P D, GALONSKY A, KRUSE J J, *et al.* Nucl Instr Meth A, 1997, **401**(2-3): 329.
- [12] XUE Mengchi. Telecommunication Science. 2009, **7**: 57. (in Chinese)
(薛梦驰. 电信科学, 2009, **7**: 57.)
- [13] TANG Junjie, WANG Tuo, ZHANG Qiang, *et al.* Chin J Lumi, 2013, **34**(1): 78. (in Chinese)
(唐军杰, 王拓, 张强, 等. 发光学报, 2013, **34**(1): 78.)
- [14] WU Chong, TANG Bin, SUN Zhijia, *et al.* Radiation Measurements, 2013, **58**(11): 128.

Study of Wave-length Shifting Fiber for 2-dimensional Position Sensitive Scintillation Neutron Detector

WU Chong^{1,1)}, LUO Wei¹, TANG Bin², SUN Zhijia², YANG Zhen², KANG Li³

(1. College of Science, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. Center of Experimental Physics, Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. College of Electronic Engineering, Dongguan University of Technology, Dongguan 523808, Guangdong, China)

Abstract: The position-sensitive scintillator neutron detector (SSND) with high efficiency, high resolution and high n/γ discriminate ability *etc.*, is developed to replace the traditional ${}^3\text{He}$ neutron detector. The wave-length shifting fibers (WLSF) are used in SSND. The performances of BCF-91A type WLSF, such as attenuation length, bend loss and lights transportation ability *etc.*, are studied in this paper. The attenuation length is (148 ± 5) cm. The lights transportation ability is about 5.6%. When the length of WLSF is 1.1 m, the bend radius is 20 mm, the photon number N transferred by the fiber meet the demand of SSND. According to the result, BCF-91A type WLSF is a good candidate for SSND.

Key words: wavelength shifting fiber; attenuation length; bend loss; lights transportation ability; scintillation neutron detector

Received date: 10 Aug. 2014; Revised date: 19 Oct. 2014

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(11175257); Natural Science Foundation of Guangdong Province, China(S2012010010306)

1) E-mail: wuc@ihep.ac.cn.

<http://www.npr.ac.cn>