

文章编号: 1007-4627(2014)04-0494-05

## BC501A 液体闪烁体对 $\gamma$ 射线的光输出响应

靳增雪<sup>1, 2</sup>, 陈志强<sup>1</sup>, 张苏雅拉吐<sup>1, 2</sup>, 刘建立<sup>1</sup>, 韩瑞<sup>1, 3</sup>, 刘星泉<sup>1, 2</sup>,  
林炜平<sup>1, 2</sup>, 任培培<sup>1, 2</sup>, 贾宝路<sup>1, 2</sup>, 石福栋<sup>1</sup>

(1. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 兰州大学, 兰州 730000; )

**摘要:** 研究了对 BC501A 液体闪烁体对  $\gamma$  射线的光输出响应特性。实验上利用  $\gamma$  放射源 ( $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ) 测量了不同光电倍增管高压下, 尺寸为  $\Phi 5.08\text{ cm} \times 5.08\text{ cm}$  的 BC501A 液体闪烁体探测器的脉冲幅度谱。利用 Geant4 软件进行模拟, 计算结果与实验数据很好地符合, 得到了能量分辨函数及能量刻度曲线。利用 Geant4 研究了 BC501A 的脉冲幅度谱的康普顿边缘  $E_c$ 、康普顿峰  $E_{\text{max}}$  及康普顿半高点  $E_{1/2}$  与能量分辨率的关系。同时模拟结果显示, 随  $\gamma$  射线能量 (0.2~3 MeV) 的增加, 康普顿边缘位置  $N_c/N_{\text{max}}$  从 0.8 至 0.7 线性减少。

**关键词:** BC501A; 光输出响应; Geant4; 能量分辨函数; 康普顿边缘

**中图分类号:** TL812.2      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.31.04.494

### 1 引言

加速器驱动的次临界系统 (Accelerator Driven sub-critical System, ADS) 被认为是一种“洁净”的核能系统, 成为国际研究热点。其主要由中高能强流质子加速器、重金属散裂靶及次临界反应堆构成<sup>[1-2]</sup>。为了开展散裂靶中子学特性研究, 我们研制了一套用于中子能谱测量的中子飞行时间谱仪, 其主要由覆盖  $5^\circ \sim 160^\circ$  角的 BC501A 液体闪烁体探测器构成。BC501A (或者 NE213, EJ301) 液体闪烁体具有良好的 n- $\gamma$  甄别性能及快的时间响应, 被广泛地用于中子能谱测量<sup>[3-5]</sup>。

对于中子能谱的测量, 在有效中子探测阈值下的中子探测效率是实验中重要的物理量。由于液体闪烁体探测器对于质子的光输出响应是非线性的, 而对于电子的光输出响应是线性的, 通常采用  $\gamma$  放射源对探测器进行能量刻度, 得到光输出响应函数, 以确定阈

值的等效电子能量, 再根据液体闪烁体探测器的质子和电子的相对光输出响应曲线转换得到阈值的等效中子能量。通常实验测量环境是中子与  $\gamma$  射线的混合场, 利用液体闪烁体探测器的脉冲形状分析法, 能够进行中子与  $\gamma$  射线的区分。但是对于  $\gamma$  射线的能谱测量, 需要利用探测器的  $\gamma$  射线光输出响应矩阵对  $\gamma$  射线的反冲电子谱进行解谱。因此有必要对液体闪烁体的  $\gamma$  射线光输出响应特性进行详细研究。

利用  $\gamma$  放射源对液体闪烁体探测器的能量刻度, 需要精确测定液体闪烁体探测器的光输出脉冲幅度谱康普顿边缘的位置, 其对应于康普顿电子的最大能量  $E_c = 2E_\gamma^2 / (0.511 + 2E_\gamma)$ , 其中  $E_\gamma$  为  $\gamma$  射线能量。由于探测器的能量分辨影响导致了康普顿边缘的展宽, 无法直接确定  $E_c$ 。利用蒙特卡罗模拟液体闪烁体探测器的脉冲幅度谱是一个重要的方法, 早期国际上比较常用的软件是德国 PTB 实验室开发的 GRESP<sup>[6]</sup> (适用于低于 2 MeV 光子能

收稿日期: 2013-12-21;      修改日期: 2014-03-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11075189); 中国科学院“百人计划”资助项目(0910020BR0, Y0101110BR0); 中国科学院战略性先导科技专项“未来先进核裂变能—ADS 嬗变系统”(XDA03030200)

作者简介: 靳增雪(1987-), 男, 河北邯郸人, 硕士, 从事粒子物理与原子核物理研究; E-mail: zengxuej@impcas.ac.cn

通信作者: 陈志强, E-mail: zqchen@impcas.ac.cn.

量)及后来发展的 PHRESP<sup>[7]</sup>。近年来国际上开始使用 MCNPX<sup>[8]</sup>、Geant4<sup>[9]</sup>及 Fluka<sup>[10]</sup>对有机闪烁体的  $\gamma$  射线光输出响应进行模拟, 得到很好的效果。在我们的前期工作中, 利用 Geant4 与 Fluka 模拟 EJ301 液体闪烁体探测器对  $\gamma$  射线的脉冲幅度谱, 表明 Geant4 比 Fluka 更好地符合实验数据<sup>[11]</sup>。本文将进一步利用 Geant4 软件研究 BC501A 液体闪烁体探测器对  $\gamma$  射线的光输出响应特性。

## 2 实验测量及结果

实验测量选用美国圣戈班公司 (Saint-Gobain crystals) 生产的 BC501A 液体闪烁体探测器, 液体闪烁体的尺寸为  $\Phi 5.08 \text{ cm} \times 5.08 \text{ cm}$ , 光电倍增管为日本滨松公司 (Hamamatsu) 的 R329-02。偏压供电选用德国 Wiener 公司的 MPOD 机箱, 偏压插件为德国 ISEG 公司的 EHS-F040n 型高精度模块 (纹波  $< 10 \text{ mV}$ )。数据获取系统采用 Wiener 公司的 VME 机箱、VM-USB 控制器, QDC 为意大利 CAEN 公司的 V965。实验测量过程偏压从 1700 V 至 2000 V 每隔 100 V 进行变化。从光电倍增管阳极输出的信号分成两路, 一路信号经过 40 m 延迟线延迟 200 ns 后送入 QDC, 另一路信号经过恒分甄别器 CF8000 进行甄别, 阈值设置为 10 mV, 送入门产生器 GG8020 展宽成 400 ns 后作为 QDC 的门信号及控制器的触发信号。

图 1 给出了 BC501A 液体闪烁体探测器对  $^{137}\text{Cs}$  标准  $\gamma$  放射源的典型实验测量脉冲幅度谱及利用 Geant4 软件模拟的脉冲幅度谱, 其中空心圆点为实验测量数据点, 脉冲幅度谱的康普顿峰位标记为  $E_{\text{max}}$ , 康普顿峰的半高处标记为  $E_{1/2}$ 。利用 Geant4 软件模拟时, 不考虑能量分辨率, 可以计算出  $^{137}\text{Cs}$   $\gamma$  射线的康普顿散射电子能谱, 可以得到康普顿边缘所在的位置  $E_c$ , 如图 1 中细线所示, 由  $^{137}\text{Cs}$  标准  $\gamma$  放射源的能量  $E_\gamma$  为 662 keV 可以计算得出其康普顿边缘位置能量  $E_c$  为 477 keV。为了验证 Geant4 模拟结果与实验测量结果相符, 模拟时需要考虑探测器的能量分辨的影响, 文献<sup>[6]</sup>给出了相应脉冲幅度处能量分辨函数公式:

$$\frac{\Delta E}{E} = \sqrt{a^2 + \frac{b^2}{E} + \frac{c^2}{E^2}} \quad (1)$$

其中:  $E$  为探测器的光输出脉冲幅度;  $\Delta E$  为相应脉冲幅度处的半高宽 (FWHM); 参数  $a$  表示从闪烁体内不同位置发光到光电倍增管的光阴极的光子输运不同导致的能量分辨; 参数  $b$  表示闪烁体内光子的产生、衰减, 光阴极上光电转换及光电倍增管的倍增过程中的统计涨落引起的能量分辨; 参数  $c$  表示光电倍增管的暗电流及电子学噪声等造成的影响, 通常这个量很小, 可以忽略。

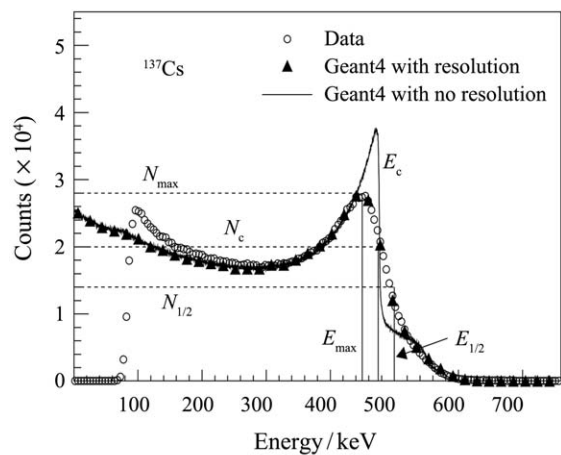


图 1 实验测量和 Geant4 模拟的 BC501A 对  $^{137}\text{Cs}$  放射源的脉冲幅度谱

对 Geant4 软件模拟得出的康普顿散射电子能谱进行高斯展宽, 其中高斯分布宽度为

$$\sigma_L = \frac{\Delta E}{2.355} \quad (2)$$

选择合适的  $a$ ,  $b$  及  $c$  参数, 可以计算出展宽后的脉冲幅度谱, 如图 1 中黑色实心三角所示。可以看出 Geant4 的计算结果与实验数据符合得很好。

实验中, 分别测量了 1700, 1800, 1900 和 2000 V 4 组偏压情况下 BC501A 液体闪烁体探测器对  $^{137}\text{Cs}$  和  $^{60}\text{Co}$  两种标准  $\gamma$  放射源的脉冲幅度谱, 如图 2 中黑色实心三角所示。Geant4 模拟软件采用 Geant4.9.6.p02 版本, 对比实验脉冲幅度谱, 在 1700 和 1800 V 偏压下, 得到  $a = 0.035$ ,  $b = 0.07$ ,  $c = 0.002$ ; 在 1900 和 2000 V 偏压下, 得到  $a = 0.035$ ,  $b = 0.075$ ,  $c = 0.002$ , 得到的模拟脉冲幅度谱 (图 2 中细线) 与实验数据相符。由式 (1) 可以看出随着偏压的增加, 探测器的能量分辨轻微变差。

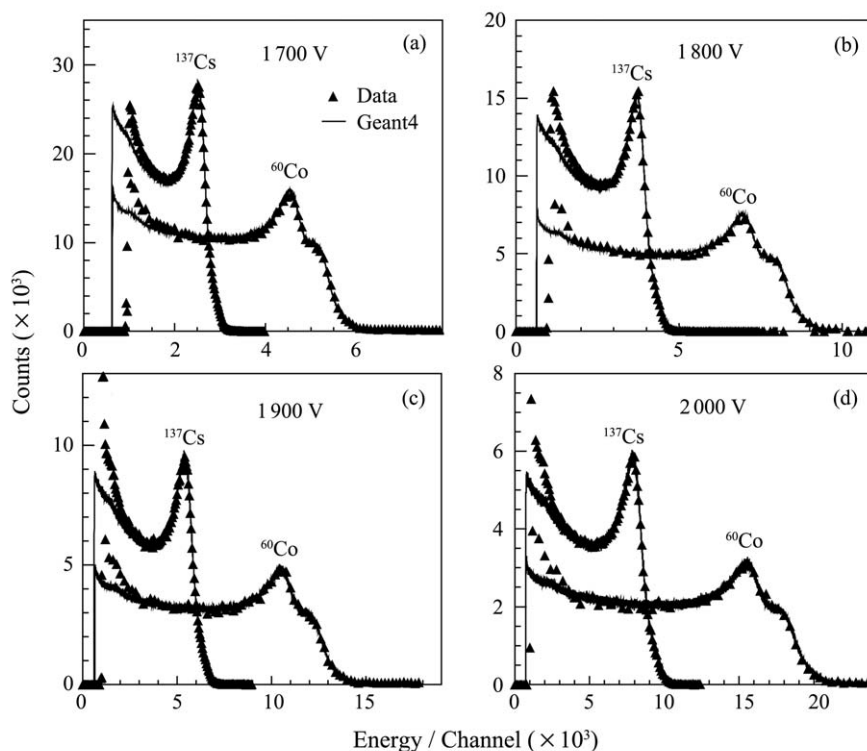


图 2 不同偏压下实验测量和 Geant4 模拟的 BC501A 对<sup>137</sup>Cs 与<sup>60</sup>Co γ射线的脉冲幅度谱

对比 Geant4 模拟结果与实际实验测量的<sup>137</sup>Cs (0.662 MeV), <sup>60</sup>Co(1.17 MeV, 1.33 MeV)γ射线脉冲幅度谱, 可以得到  $E_{max}$  的位置, 从而确定出能量与道数之间的关系, 即探测器对γ射线的能量响应曲线, 如图 3 所示。

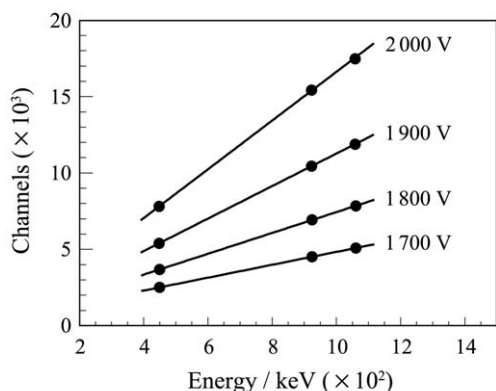


图 3 不同偏压下 BC501A 对<sup>137</sup>Cs 与<sup>60</sup>Co γ射线的能量响应曲线

### 3 Geant4 模拟计算

为了进一步研究 BC501A 液体闪烁体探测器对γ射线的光输出响应特性, 找出  $E_{max}$ ,  $E_{1/2}$ ,  $E_c$  与能量分辨率  $\Delta E_c/E_c$  的关系, 我们计算了不同能量分辨

率下的 BC501A 液体闪烁体探测器脉冲幅度谱。图 4 给出了能量分辨函数曲线, 改变式 (1) 能量分辨函数中  $b$  值从 0.05 至 0.11 变化, 入射γ射线能量从 0.2 至 3 MeV 每隔 0.2 MeV 变化。

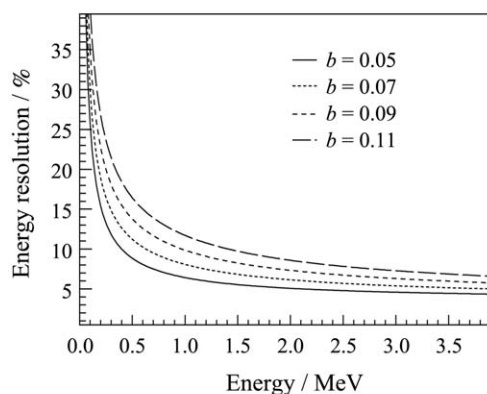


图 4 不同能量分辨率下的能量分辨函数曲线

根据每个入射γ射线能量 (0.2 ~ 3 MeV) 可以计算出  $E_c$ , 在确定的能量分辨函数下, 可以得到能量分辨率  $\Delta E_c/E_c$ 。对计算得到的脉冲幅度谱的峰位进行拟合, 可以得到  $E_{max}$  与  $E_{1/2}$ , 从而可以找出  $(E_{max} - E_c)/E_c$ ,  $(E_{1/2} - E_c)/E_c$  及  $(E_{1/2} - E_{max})/E_{max}$  与能量分辨率  $\Delta E_c/E_c$  之间的关系,

如图 5 中所示。可以看出不同能量分辨函数下, 它们之间的关系均呈线性关系, 能量分辨率越小,  $E_{\max}$  及  $E_{1/2}$  就越接近于  $E_c$ 。通过线性拟合图 5(c) 中不同能量分辨函数下  $(E_{1/2} - E_{\max})/E_{1/2}$  与  $\Delta E_c/E_c$  之间的关系, 得到拟合直线的斜率分别为  $1.17 \pm 0.03$ ,  $1.21 \pm 0.02$ ,  $1.23 \pm 0.01$ ,  $1.28 \pm 0.01$ 。

随着能量分辨函数中  $b$  值变大, 斜率稍稍变大, 国际上普遍采用文献[6]给出的值, 约为 1.5。文献[6]采用的是 GRESP 模型进行计算液体闪烁体对伽玛射线的光输出, Geant4 考虑了  $\gamma$  射线在液体闪烁体中的真实物理过程, 计算结果比 GRESP 更好地符合实验数据。

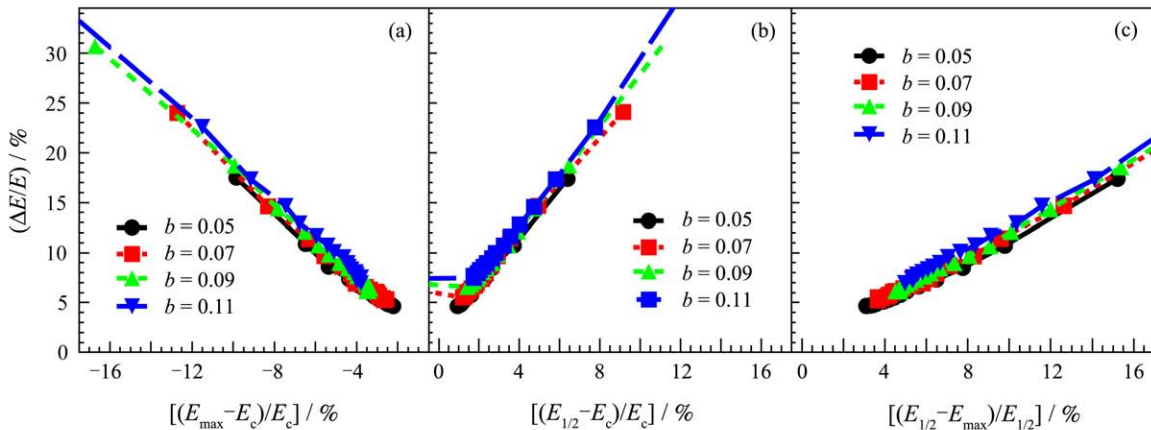


图 5 (在线彩图) 不同能量分辨率下的  $(E_{\max} - E_c)/E_c$ ,  $(E_{1/2} - E_c)/E_c$  及  $(E_{1/2} - E_{\max})/E_{1/2}$  与能量分辨率  $\Delta E_c/E_c$  之间的关系

图 6 中计算了每个入射  $\gamma$  射线能量 (0.2 ~ 3 MeV) 下康普顿边缘位置  $N_c/N_{\max}$  的比值, 可以看出, 随着

入射  $\gamma$  射线能量的增加,  $N_c/N_{\max}$  的比值从 0.8 至 0.7 线性减少。

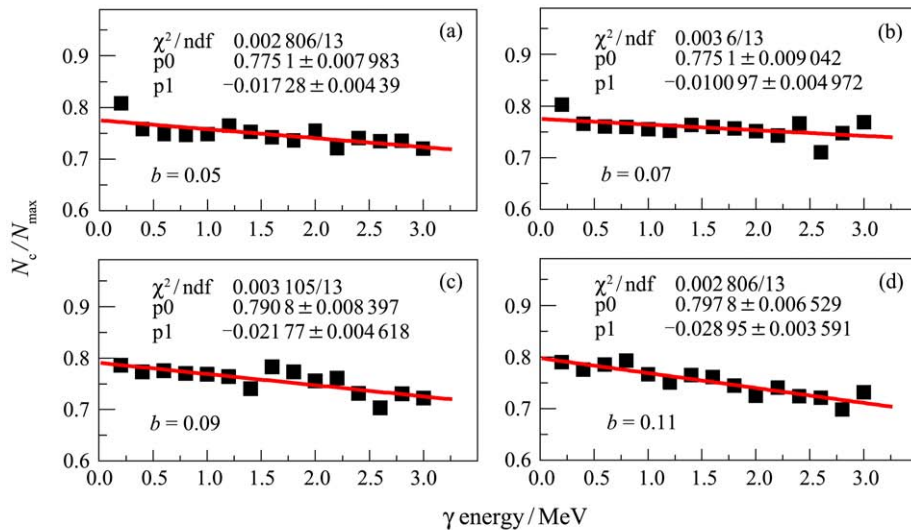


图 6 (在线彩图) 康普顿边缘位置  $N_c/N_{\max}$  随入射  $\gamma$  能量变化

### 4 总结

利用  $^{137}\text{Cs}$  与  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  放射源对不同偏压 (1700 ~ 2000 V) 下 BC501A 液体闪烁体的光输出脉冲幅度谱进行测量, 并利用 Geant4 软件进行模拟。结果显

示, 理论计算结果与实验数据很好地符合, 随着偏压的增加, 探测器能量分辨轻微变差。通过拟合实验与理论计算的脉冲幅度谱的康普顿峰, 得到了  $\gamma$  射线的线性光输出响应函数。进一步利用 Geant4 模拟, 计算了不同能量分辨率下  $(E_{\max} - E_c)/E_c$ ,

$(E_{1/2} - E_c)/E_c$  及  $(E_{1/2} - E_{\max})/E_{\max}$  与能量分辨率  $\Delta E_c/E_c$  之间的关系, 结果显示它们之间呈线性关系, 而且  $(E_{1/2} - E_{\max})/E_{\max}$  与  $\Delta E_c/E_c$  的直线拟合斜率约为 1.2, 小于文献[6]给出的值(约为 1.5)。康普顿边缘的位置  $N_c/N_{\max}$  的比值随着入射  $\gamma$  射线能量 (0.2 ~ 3 MeV) 的增加, 从 0.8 至 0.7 线性减少。Geant4 软件能够精确模拟 BC501A 液体闪烁体探测器的光输出脉冲幅度谱, 帮助实验进行探测器的能量刻度及给出光输出响应矩阵。

#### 参考文献:

- [1] BOWMAN C D, ARTHUR E D, LISOWSKI P W, *et al.* Nucl Instr and Meth A, 1992, **320**: 336.
- [2] RUBBIA C, RUBIO J A, BUONO S, *et al.* Conceptual Design of a Fast Neutron Operated High Power Energy Amplifier. CERN/AT/95-44(ET), 1995.
- [3] STAMER S, SCOBEL W, AMIAN W B, *et al.* Physics Review C, 1993, **47**: 1647.
- [4] YUREVICH V I, YAKOVLEV R M, VASSILKOV R G, *et al.* Nucl Instr and Meth A, 2006, **562**: 747.
- [5] SAITO S, TSUJIMOTO K, KIKUCHI K, *et al.* Nucl Instr and Meth A, 2006, **562**: 646.
- [6] DIETZE, KLEIN. Gamma-Calibration of NE213 Scintillation Counters. Nucl Instr Meth, 1982, **193**: 549.
- [7] NOVOTNY T, Photon Spectrometry in Mixed Neutron-Photon Fields Using NE213 Liquid Scintillation Detectors. PTB-Report PTB-N-28, Braunschweig, 1997.
- [8] TAJIK, GHAL-EH N, ETAATI G R, *et al.* Nucl Instr and Meth A, 2013, **704**: 104.
- [9] JAWORSKI G, PALACZ M, NYBERG J, *et al.* Nucl Instr and Meth A, 2012, **673**: 64.
- [10] KOHAN M Ranjbar, ETAATI G R, GHAL-EH N, *et al.* Applied Radiation and Isotopes, 2012, **70**: 864.
- [11] ZHANG Suyalatu, CHEN Zhiqiang, HAN Rui, *et al.* Chinese Physics C, 2013, **37**: 126003

## Light Output Response of BC501A Liquid Scintillator to $\gamma$ -rays

JIN Zengxue<sup>1, 2</sup>, CHEN Zhiqiang<sup>1</sup>, ZHANG Suyalatu<sup>1, 2</sup>, LIU Jianli<sup>1</sup>, HAN Rui<sup>1, 3</sup>, LIU Xingquan<sup>1, 2</sup>,  
LIN Weiping<sup>1, 2</sup>, REN Peipei<sup>1, 2</sup>, JIA Baolu<sup>1,2</sup>, SHI Fudong<sup>1</sup>

(1. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** The light output response of BC501A liquid scintillator to  $\gamma$ -rays has been studied. The pulse-height spectra of BC501A ( $\Phi 5.08$  cm  $\times$  5.08 cm) for different PMT high voltages have been measured using  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ -ray sources. The Geant4 simulated pulse-height spectra showed a good agreement with experimental data. The energy resolution functions and energy calibration curves have been obtained by comparing measured light output distribution with simulated one. The position of the Compton edge relative to the position of the maximum and the half height of the spectra has also been studied using Geant4 in detail. The value of  $N_c/N_{\max}$  at the position of Compton edge decreases from 0.8 to 0.7 with the increase of incident  $\gamma$ -rays energy (0.2~3 MeV).

**Key words:** BC501A; light output response; Geant4; energy resolution function; compton edge

**Received date:** 21 Dec. 2013; **Revised date:** 7 Mar. 2014

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China(11075189); Hundred Talents Program of Chinese Academy of Sciences(0910020BR0, Y0101110BR0); Strategic Pilot Scientific Technological Project of Chinese Academy of Sciences "Future Advanced Nuclear Fission Energy—ADS Transmutation System Fundamental" (XDA03030200)

**Corresponding author:** CHENG Zhiqiang, E-mail: zqchen@impcas.ac.cn.

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