

闪烁体耦合 SiPM 测量 γ 能谱的模拟研究

许 浒¹ 程 翀¹ 刘翎箭^{1,2} 郭智荣¹ 陈祥磊¹ 屈国普²

1 (武汉第二船舶研究设计所 武汉 430064)

2 (南华大学 核科学与技术学院 衡阳 421001)

摘要 硅光电倍增管(Silicon photomultiplier, SiPM)是一种新型的光电探测器件,由工作在盖革模式下的雪崩二极管阵列组成。利用 GEANT4 蒙特卡罗软件包对 LaBr₃:10%Ce³⁺、NaI(Tl)闪烁晶体耦合 SiPM 测量 γ 射线能谱进行了细致的模拟,通过单色光 LED 光源照射 SiPM,得到 SiPM 自身暗电流噪声经电子学放大后,与集成的盖革雪崩二极管之间的间隙引起吸收光子涨落对能谱的展宽。对模拟得到的 662 keV γ 射线能量分辨率进行修正,最后与实验结果对比能够很好地符合,还得到了一组对应闪烁晶体本征能量分辨率的程序参数 $P_{r,s}$ 。结果验证了模拟程序设置的闪烁晶体与封装材料光学参数的合理性与可靠性,为闪烁体探测器设计提供了一套开发工具。

关键词 闪烁晶体,硅光电倍增管,GEANT4 软件包,能量分辨

中图分类号 TL812⁺.1

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2017.hjs.40.010401

Simulation study of scintillation crystal photocoupling with SiPM for gamma spectrometry

XU Hu¹ CHENG Chong¹ LIU Lingjian^{1,2} GUO Zhirong¹ CHEN Xianglei¹ QU Guopu²

1(Wuhan Secondary Institute of Ships, Wuhan 430064, China)

2(School of Nuclear Science and Technology, University of South China, Hengyang 421001, China)

Abstract Background: The silicon photomultiplier (SiPM) is a new type of photo detector consisting of avalanche photodiode arrays operated in Geiger mode. Its photocoupling performance with scintillation crystal is helpful for gamma spectrometry. **Purpose:** This study aims to provide a reliable tool for the design of scintillation detector photocoupling with SiPM to achieve effective gamma spectrometry with the GEANT4 code. **Methods:** GEANT4 toolkit is used to simulate NaI(Tl) and LaBr₃:10%Ce³⁺ scintillation crystal detect 662-keV γ -ray photocoupling with SiPM by building a complete Monte Carlo model of a scintillator includes ionizing particle and optical photon transport. Energy resolution of 662-keV gamma spectrum is modified with the contribution of dark current noise amplified by the electronic system and statistical fluctuation of optical photon absorbed by avalanche photodiode of SiPM which was previously illuminated with monochromatic LED light. **Results:** Simulation results show that energy resolution of 662-keV gamma spectrum is in accordance with the result of experimental measurement. A group of parameters ($P_{r,s}$) which corresponded to scintillation crystal intrinsic energy resolution is obtained simultaneously. **Conclusion:** The GEANT4 simulation of NaI(Tl) and LaBr₃:10%Ce³⁺ scintillation crystals photocoupling with SiPM for 662-keV γ -ray spectrometry results consistently with experimental energy spectrum, and confirms the reliability and rationality of material properties and parameters which set in GEANT4 toolkit.

Key words Scintillation crystal, SiPM, GEANT4 toolkit, Energy resolution

第一作者: 许浒, 男, 1977 年出生, 2004 年于西安交通大学获硕士学位, 高级工程师, 从事核辐射探测研究

通信作者: 刘翎箭, E-mail: liulingjian719@163.com

收稿日期: 2016-09-19, 修回日期: 2016-11-07

First author: XU Hu, male, born in 1977, graduated from Xi'an Jiaotong University with a master's degree in 2004, senior engineer, focusing on the work of nuclear radiation measurement and detection

Corresponding author: LIU Lingjian, E-mail: liulingjian719@163.com

Received date: 2016-09-19, accepted date: 2016-11-07

光电探测器是把光辐射信号转换成电压或者电流等电信号的器件。盖革雪崩光电二极管阵列(Geiger-Mode Avalanche Photodiode, GM-APD), 也称为硅光电倍增管(Silicon Photomultiplier, SiPM), 是一种新型的光电探测器件, 与其他光子计数探测器相比, SiPM 体积小、工作电压低、内部增益高(高达 10^6 量级)、时间响应快、且对电场和磁场不灵敏、可以灵活地做成二维阵列, 所以广泛应用于微光探测、光子计数、高能物理及核医学等领域^[1-3]。近年来, 随着 SiPM 中雪崩二极管(Avalanche Photodiode, APD)集成技术的进步, 在某些领域 SiPM 替代光电倍增管(Photomultiplier Tube, PMT)作为闪烁晶体的光学读出端正在成为一种新的研究方向。

蒙特卡罗程序(Monte Carlo N Particle Transport Code, MCNP、GEometry ANd Tracking 4, GEANT4、Electron-Gamma Shower, EGS、FLUKtuierende KAskade, FLUKA)常作为一种节省时间、材料的开发工具, 为闪烁体探测器提供优化设计方案。在闪烁体探测器以 SiPM 为光学读出端测量能谱能量分辨的模拟中, 为了获得精确的结果, 需对闪烁体中能量的沉积、闪烁光子的产生和传输、SiPM 的闪烁光吸收等进行完整详细的模拟。同 PMT 一样, SiPM 的能量分辨率 $\Delta E/E$ 可以写成^[4-5]:

$$(\Delta E/E)^2 = (\delta_{sc})^2 + (\delta_p)^2 + (\delta_{st})^2 + (\delta_n)^2 \quad (1)$$

式中: δ_{sc} 是闪烁晶体的本征能量分辨率; δ_p 是闪烁光子从闪烁晶体到雪崩二极管由于输运引起的偏差对能量分辨的贡献^[4-5]; δ_{st} 是 SiPM 中集成的雪崩二极管之间的缝隙对雪崩二极管吸收光子的统计涨落对能量分辨的展宽; δ_n 是 SiPM 自身暗电流噪声经过放大电路后对能量分辨的贡献。其中: δ_{st} 可以描述成:

$$\delta_{st} = 2.355 \times (F_{e,n}/P_{h,e})^{1/2} \quad (2)$$

式中: $F_{e,n}$ 是雪崩二极管的过剩噪声因子, 即由于雪崩效应的随机性引起噪声增加的倍数。PMT 对应的

的 $F_{e,n}$ 值一般在 1.1–1.2 之间^[6], 而 APD 对应的 $F_{e,n}$ 值至少在 2 以上^[7]; $P_{h,e}$ 为 APD 吸收光子产生的电子空穴对数或 PMT 光阴极吸收光子产生的光电子数。

目前, 闪烁体探测器的蒙特卡罗模拟主要是以模拟沉积能量, 再通过能谱展宽算法^[8]对其展宽。而能谱展宽算法要求知道探测器在任意能量处的能量分辨率, 而这在实际测量中是不可能的, 只能根据已知的几个能量点拟合得到其它能量处的分辨, 这样势必对能谱展宽引入误差。并且这种模拟方法缺乏对晶体闪烁过程真实模拟, 电子学电路所造成的能谱展宽也并未考虑。本文利用 GEANT4 这种构建于 C++ 多态特性之上的完全开源的蒙特卡罗程序包对晶体闪烁过程进行细致模拟, 结合单个单色光 LED 灯测得的 SiPM 自身暗电流, 经电子学放大后对能谱的展宽和对模拟结果的修正。

1 实验设计

实验选择爱尔兰公司 Sensl 制造加工的 MicroFC-60035-SMT 型号的 SiPM 代替 PMT 作为闪烁体的光学读出端, 分别测试了两种不同样品的晶体: 1#晶体为 $\phi 6 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 的 NaI(Tl); 2#晶体为 $\phi 6 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 的 $\text{LaBr}_3:10\%\text{Ce}^{3+}$ 。以上样品晶体均由北京玻璃研究院生产加工。晶体主要参数在表 1 中列出。晶体出射面与 SiPM 光学灵敏面采用光学硅脂(Bicron BC-630)耦合, 晶体用白色 Teflon 材料包裹充当反射层, 出射窗口光学封装玻璃为石英玻璃(折射率为 1.458)。入射源为 662 keV 的 ^{137}Cs 。实验还通过精密脉冲信号发生器调节单色光 LED 光源(发光波长为 460 nm)的发光强度照射 SiPM 和 PMT 输入同一电子学放大系统, 使其输出能谱的峰位与闪烁晶体测得的 662 keV γ 射线能谱峰位一致, 获得 SiPM 自身暗电流经电子学系统放大后对能谱的影响。PMT 型号为北京滨松生产的 CR110, 其与 SiPM 的主要参数一同在表 1 中列出。

表 1 SiPM 与 PMT 的主要参数
Table 1 General parameters of SiPM and PMT.

型号 Type	灵敏面积 Active area / mm^2	典型电压 Recommended voltage / V	峰值波长 Peak wavelength / nm	光谱响应范围 Spectral range / nm	增益 Gain
MicroFC-60035-SMT	6×6	27.5	420	300–800	3×10^6
CR110	25×25	1 000	420	300–650	2.11×10^6

电子学部分采用 ORTEC 插件式能谱仪，为探测器提供线性高压电源(27.5 V)、主放大器、多道分析仪。晶体经放射源照射或 SiPM 经单色光 LED 灯照射的输出信号经前放放大进入主放大器成形，输入多道分析仪(4096 道)后进入计算机进行解谱。所有实验测试均在恒温箱内完成，实验系统框架图如图 1 所示。

图 2 给出了 SiPM 耦合样品晶体测量 662 keV γ 射线得到的能谱，由于样品晶体尺寸很小， γ 射线能量越高越容易穿透闪烁晶体和难以在其内部沉积能量，所以测得的能谱峰康比较小。NaI(Tl)所测 662 keV γ 射线的全能峰峰位在 658 道，LaBr₃:10%Ce³⁺在 726 道。这是因为 LaBr₃:10%Ce³⁺晶体密度比 NaI(Tl)大，对 662 keV γ 射线的阻止本领要高，且光产额也比 NaI(Tl)大，因此全能峰峰位在 NaI(Tl)右侧。图 3 给出了单色光 LED 灯照射

SiPM 与 PMT 归一化后输出的多光子谱，通过精密脉冲信号发生器调节 LED 灯发光强度使 SiPM 所测能谱峰位分别与图 2 中 NaI(Tl)、LaBr₃:10%Ce³⁺测得的 662 keV γ 射线能谱全能峰峰位对应。而 PMT 与 SiPM 的量子效率不同，相同发光强度照射的条件下，输出脉冲幅度不同，峰位道址不同，为方便对比，对 PMT 输出多光子谱进行归一化处理使其与 SiPM 所测能谱峰位相对应。通过高斯拟合得到 NaI(Tl)、LaBr₃:10%Ce³⁺及与晶体道址对应的 LED 灯照射 SiPM 的能量分辨率分别为(8.4±0.263)%、(4.27±0.143)%、(5.32±0.16)%、(3.46±0.121)%。SiPM 测得的单色光 LED 灯的能谱展宽明显比 PMT 要大，这是因为 SiPM 对光子极为灵敏，SiPM 中集成的 APD 之间存在间隙，光子打到 APD 上被转换成电子空穴对的统计涨落较大，且 SiPM 自身暗电流噪声比 PMT 要大，都会对所测能谱造成一定的展宽。

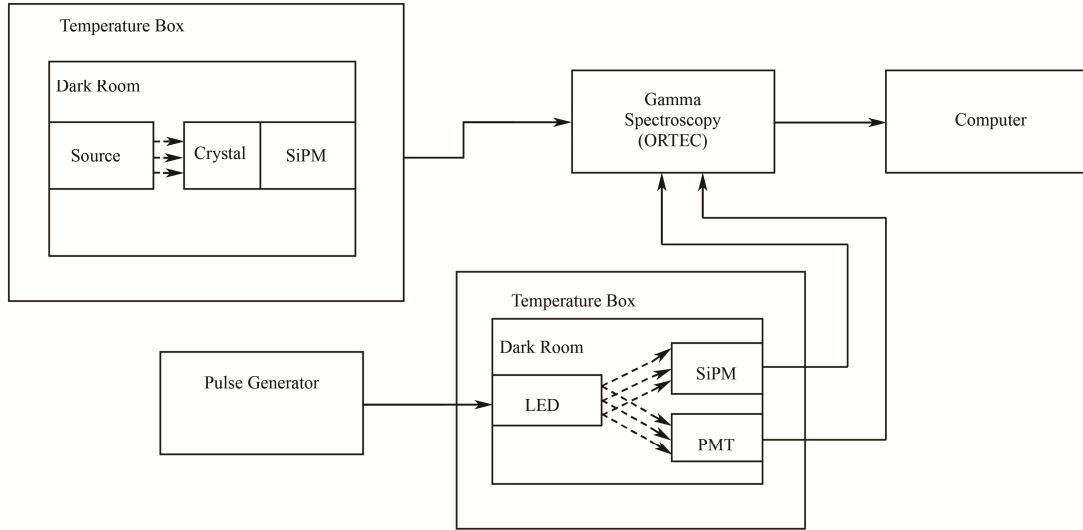


图 1 实验系统结构框架
Fig.1 Structure diagram of experimental system.

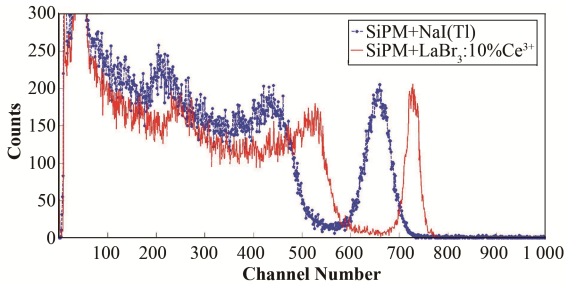


图 2 SiPM 耦合样品晶体测量 662 keV γ 射线能谱
Fig.2 Energy spectrum of sample scintillation crystal detected 662-keV γ -ray with SiPM photocoupled.

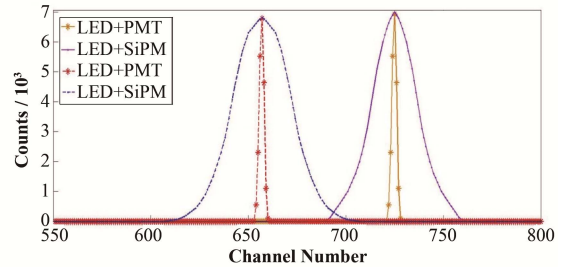


图 3 单色光 LED 灯照射 SiPM 与 PMT 归一化后的多光子谱
Fig.3 Normalized energy spectrum of monochromatic LED light illuminate SiPM and PMT.

2 模拟设计

GEANT4是由CERN基于C++面向对象技术开发的蒙特卡罗方法应用软件包,用于模拟粒子在物质中的输运过程^[9]。GEANT4 计算程序的编写分为探测器构造、源项指定、物理过程声明、运行与事件控制和输出计算结果等几个过程。下面详细描述了程序主要组成部分。

2.1 探测模块构建

通过 GEANT4 中提供的 Detector 类来建立探测模块包括其几何形状、物质材料、光学特性。探测模块几何结构用程序语言描述为尺寸 $\phi 6\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 的闪烁晶体,外包一层厚度为 1 mm 的 Teflon 反射层,最外层用 2 mm 铝壳进行封装,晶体出射面用 2 mm 光学玻璃封装。SiPM 几何尺寸为 $7\text{ mm} \times 7\text{ mm} \times 0.65\text{ mm}$ 的方形薄片^[10],有效光敏面积为 $6\text{ mm} \times 6\text{ mm}$ 。

表 2 给出了晶体样品的一些物理特性参数,而闪烁晶体与封装材料的光学特性参数如晶体自身光吸收长度、反射层材料的反射率、光学封装玻璃的吸收长度与折射率等,均与闪烁晶体发射光谱的波长相关。在 GEANT4 中这些与晶体发射光谱波长相关的光学特性参数^[11-14]均以数组的形式进行设置。模拟程序里的闪烁晶体发光光谱波长每隔 2 nm 取一个点,将波长的值转换成光子能量在 $E_{p,\text{num}}$ 中描述。num 是波长范围内抽取点的总个数,每个光子能量对应的发射概率通过计算在 P_{num} 中设置。同理,晶体内光吸收长度 $L_{a,\text{num}}$ 、Teflon 材料反射率 $R_{T,\text{num}}$ 、光学封装玻璃的折射率 $F_{g,\text{num}}$ 等的每个参数值均与发射光谱数组内的光子能量一一对应设置。在 GEANT4 模拟晶体闪烁过程的众多外部参数中,分辨率尺度 $P_{r,s}$ ^[15]起着重要的作用,其值直接决定晶体的本征能量分辨率。晶体实际发射光子数围绕平均值涨落的宽度可表示为 $P_{r,s} \times (N_{\text{mean},p})^{1/2}$,在堆栈行为 StackingAction 类中限定一次完整事件内闪烁晶体内部产生的粒子类型,只对一次事件的入射粒子

反应完全后产生的 optical photon 进行记录,可以获得闪烁晶体的本征分辨率。为了与实际晶体样品的本征能量分辨率相匹配,模拟程序在限制其他参数同一的条件下,仅改变 $P_{r,s}$ 的值进行多次运算,获得不同的本征分辨,拟合后反推相应的 $P_{r,s}$ 。图 4 给出了 GEANT4 中 10^5 次 662 keV 能量 γ 射线入射闪烁晶体内部产生的光子谱图,图 4 中 $\text{LaBr}_3:10\%\text{Ce}^{3+}$ 与 $\text{NaI}(\text{TI})$ 的光子谱峰位比值与模拟程序中设置的晶体光产额有关, $\text{LaBr}_3:10\%\text{Ce}^{3+}$ 与 $\text{NaI}(\text{TI})$ 光产额的比值为 1.658。而图 2 实验测得的能谱峰位比例关系与图 4 有较大差别,这是因为测量 $\text{LaBr}_3:10\%\text{Ce}^{3+}$ 与 $\text{NaI}(\text{TI})$ 闪烁晶体耦合 SiPM 时,主放的放大倍数不同。图 5 给出了 662 keV 能量 γ 射线入射闪烁晶体时设置不同的 $P_{r,s}$ 值,得到一组对应的闪烁晶体本征分辨率。对于入射能量 662 keV 的 γ 射线, $\text{NaI}(\text{TI})$ 与 $\text{LaBr}_3:10\%\text{Ce}^{3+}$ 的本征能量分辨率分别为 5.9%^[16]和 1.8%^[17]。对应的 GEANT4 外部参数 $P_{r,s}$ 分别为 2.43 和 1.59。

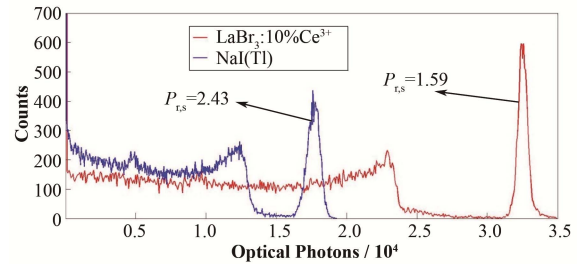


图 4 GEANT4 模拟 10^5 次的闪烁晶体内部产生的光子谱
Fig.4 GEANT4 toolkit simulate optical photons spectrum inside scintillation crystal in 10^5 events.

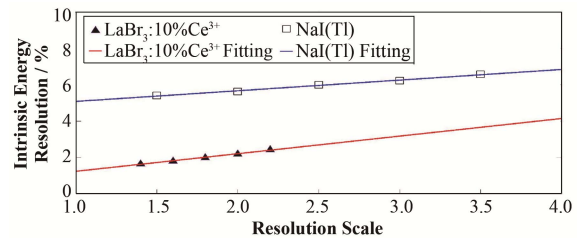


图 5 γ 射线为 662 keV 时 GEANT4 中不同的 $P_{r,s}$ 值对应的晶体本征能量分辨率
Fig.5 $P_{r,s}$ in GEANT4 vs. intrinsic energy resolution of scintillation crystal when energy of γ -ray is 662 keV.

表 2 闪烁晶体样品的物理特性参数
Table 2 Physical properties of sample scintillators.

闪烁体 Scintillator	密度 Density / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	折射率 Refractive index	发射谱峰值波长 Peak wavelength of emission spectrum / nm	吸收谱峰值波长 Peak wavelength of absorption spectrum / nm	光产额 Light yield / photons $\cdot \text{keV}^{-1}$
NaI(Tl)	3.67	1.85	415	234, 293	38
$\text{LaBr}_3:10\%\text{Ce}^{3+}$	5.08	1.90	358, 386	—	63

闪烁晶体与封装材料之间的表面光学性质通过 GEANT4 中 G4OpBoundaryProcess 类提供的 UNIFIED 模型^[7]来进行描述。反射层与晶体之间的边界类型为 dielectric_dielectric，抛光类型为 groundbackpainted，描述晶体表面粗糙程度的参数 sigma alpha 设置为 0.1。

2.2 物理过程声明

涉及到的物理与光学过程在 PhysicsList 类里进行定义，物理过程主要是电磁相互作用包括电离、韧致辐射、多重散射、电子对效应、康普顿散射、光电效应。光学过程包括闪烁光子产生、切伦科夫辐射、伯克吸收、瑞利散射和一些边界过程（反射、折射、吸收）。

2.3 SiPM 响应

SiPM 的光子探测效率 $E_{p,d}$ ^[9]（峰值波长 420 nm 处为 30%）以数组形式在程序中描述。光子探测效率 $E_{p,d}$ 定义为：

$$E_{p,d} = E_q \times F_f \times P_g \quad (3)$$

式中： F_f 是几何填充因子，是 SiPM 中集成的 APD 占整个区域的面积比； E_q 是量子效率，是 APD 吸收一个光子产生电子空穴对的概率； P_g 是电子空穴对发生盖革雪崩的概率。追踪粒子数据的详细程度即冗余信息追踪(tracking verbose)设置为 1，对入射到 SiPM 中 APD 上的粒子种类、能量大小、动量方向、位置时间信息进行记录。然后在步数据冗余(SteppingVerbose)类中，通过限定输出条件，仅对所有到达 APD 上的光子数（闪烁荧光、切伦科夫光）与光子探测效率 $E_{p,d}$ 进行运算，得到 SiPM 输出的电子空穴对数。实验标定所用的 LED 灯为 460 nm 的单色光（蓝光）LED 灯，对应 $E_{p,d}$ 的值为 26%^[9]。

3 模拟结果与分析

GEANT4 蒙特卡罗软件模拟的 NaI(Tl)晶体耦合 SiPM 探测能量 662 keV 的 γ 射线的能谱与实验测得的能谱归一化后的结果如图 7 所示。拟合得到的全能峰的能量分辨率为 $(6.57 \pm 0.147)\%$ 。能谱上能清楚地看到光电全能峰与康普顿平台，由于模拟程序对闪烁晶体产生的每个光子都要进行追踪，探测器几何构建越复杂，程序运算速度越慢，因此现阶段的模拟程序中并未考虑实验室内环境，所以模拟得到能谱中峰康比要高于实验测得能谱，且 γ 反散射峰并不明显。模拟的能量分辨率与实验所测相差较大是因为程序无法对雪崩二极管吸收光子的统计

涨落与电子学电路造成的能量展宽进行模拟。实验通过单色光 LED 灯照射 SiPM 对模拟结果进行修正，获得的能量分辨 $\Delta E_1/E_1$ 为：

$$(\Delta E_1/E_1)^2 = (\delta_{st1})^2 + (\delta_{n1})^2 \quad (4)$$

式(4)中并没有晶体本征分辨与光子输运引起的偏差对能谱能量分辨的贡献。同式(2)中的 δ_{st} 一样， δ_{st1} 是与电子空穴对数有关的值，电子空穴对数又正比于 SiPM 的输出脉冲幅度。实验通过精密脉冲信号发生器控制 LED 灯的发光强度使 SiPM 的输出脉冲幅度与 662 keV γ 射线入射样品晶体耦合 SiPM 的输出脉冲幅度相同，使其值尽可能接近样品晶体测量射线能谱时的值。最后将模拟能谱的分辨率与 $\Delta E_1/E_1$ 代入式(1)计算得到修正后的能量分辨。如表 3 所示，修正后的能量分辨略大于实验结果，这是因为式(2)中的 $F_{e,n}$ 与雪崩二极管的结构材料和入射到雪崩二极管上光的波长有关。同一结构材料的雪崩二极管，其 $F_{e,n}$ 的值随入射光波长而增大^[7]。实验用来修正模拟结果的单色光 LED 灯发光波长为 460 nm，比表 2 中 NaI(Tl)、LaBr₃:10%Ce³⁺ 的吸收光谱峰位波长要大。LED 灯与样品晶体输出能谱道址相同即 SiPM 上产生的电子空穴对数 $P_{h,e}$ 相同时， δ_{st1} 的值比实际样品晶体耦合 SiPM 的 δ_{st} 值大，导致修正结果偏大。因此，仅用一个单色光 LED 灯来对模拟结果进行修正不能完全反映 SiPM 的误差。可以用光谱仪对样品晶体发射光谱进行刻度获得每个波长对应的发光强度，再结合激光器照射 SiPM 对模拟结果进行修正，这是后续需要改进的地方。

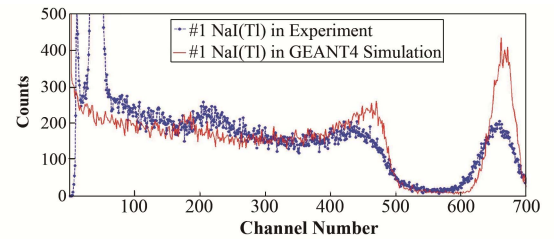


图 6 归一化后的模拟与实验能谱
Fig.6 Normalized energy spectrum of simulation and experiment.

表 3 #1、#2 样品晶体耦合 SiPM 测量 662 keV γ 能谱能量分辨率模拟与实验结果比较(%)

Table 3 Simulated and experimental energy resolution of sample #1 and #2 scintillation crystal detect 662-keV γ -ray with SiPM light out (%).

晶体标号及种类 Sample and type	模拟结果 Simulated energy resolution	实验结果 Experimental energy resolution	修正结果 Revised energy resolution
#1 NaI(Tl)	6.570±0.147	8.400±0.263	8.454±0.217
#2 LaBr ₃ :10%Ce ³⁺	2.581±0.104	4.270±0.143	4.317±0.160

4 结语

本文对影响闪烁体探测器能量分辨的因素进行了详细讨论, 利用 GEANT4 这一功能强大的探测器模拟工具, 对 $\text{LaBr}_3:10\%\text{Ce}^{3+}$ 、 NaI(Tl) 闪烁晶体耦合 SiPM 测量 γ 射线能谱进行了细致的模拟, 修正后的模拟结果与实验结果对比能够很好地符合。验证了程序模拟晶体闪烁过程的精确性和可靠性, 同时还得到了一组对应闪烁晶体 662 keV 的本征能量分辨率的程序参数 $P_{r,s}$ 。为闪烁体的设计提供了一套更细致、精确的开发工具, 对应用在不同领域种类繁多的闪烁体模拟提供了参考。

参考文献

- Buzhan P, Dolgoshein B. Silicon photomultiplier and its possible application[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2003, **504**: 48–52. DOI: 10.1016/S0168-9002(03)00749-6.
- Golovina V, Saveliev V. Novel type of avalanche photo detector with Geiger mode operation[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2004, **518**: 560–564. DOI: 10.1016/j.nima.2003.11.085.
- Judenhofer M S, Wehl H F, Newport D F, *et al.* Simultaneous PET-MRI: a new approach for functional and morphological imaging[J]. Nature Medicine, 2008, **14**(4): 459–465. DOI: 10.1038/nm1700.
- Moszyński M. Inorganic scintillation detectors in γ -ray spectrometry[J]. Nuclear Instruments and Methods A, 2003, **505**: 101–110. DOI: 10.1016/S0168-9002(03)01030-1.
- Kapusta M, Balcerzyk M, Moszyński M, *et al.* A high-energy resolution observed from a YAP:Ce scintillator[J]. Nuclear Instruments and Methods A, 1999, **421**: 610–613. DOI: 10.1016/S0168-9002(98)01232-7.
- Moszyński M, Szczęśniak T, Kapusta M, *et al.* Characterization of scintillators by modern photomultipliers - a new source of errors[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2010, **57**: 2886–2896. DOI: 10.1109/TNS.2010.2054111.
- Moszyński M, Kapusta M, Balcerzyk M, *et al.* Comparative study of avalanche photodiodes with different structures in scintillation detection[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2001, **48**: 1205–1210. DOI: 10.1109/23.958751.
- 苏耿华. 海水就地 γ 能谱测量溴化镧探测器的技术研究[D]. 北京: 清华大学, 2010.
SU Dihua. Research on *in-situ* LaBr γ -ray spectrometer for seawater radiation monitoring[D]. Beijing: Tsinghua University, 2010.
- 曾志, 李君利, 程建平, 等. GEANT4 在核技术领域的应用[J]. 同位素, 2005, **18**(1): 55–58. DOI: 10.3969/j.issn.1000-75.2005.01.013.
ZENG Zhi, LI Junli, CHENG Jianping, *et al.* GEANT4 applications in nuclear technology[J]. Journal of Isotopes, 2005, **18**(1): 55–58. DOI: 10.3969/j.issn.1000-75.2005.01.013.
- Sens L. C-series microFC-60035-SMT[EB/OL]. 2014-12-11[2016-8-21]. <http://www.sensl.com/downloads/ds/DS-MicroCseries.pdf>.
- 邹本飞, 桂强, 张明荣, 等. 掺铈溴化镧闪烁晶体封装技术的研究[J]. 人工晶体学报, 2016, **45**(1): 64–69. DOI: 10.16553/j.cnki.issn1000-985x.2016.01.011.
ZOU Benfei, GUI Qiang, ZHANG Mingrong, *et al.* Study on the packaging technology of $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ scintillation crystal[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2016, **45**(1): 64–69. DOI: 10.16553/j.cnki.issn1000-985x.2016.01.011.
- van Dam H T, Seifert S, Drozdowski W, *et al.* Optical absorption length, scattering length, and refractive index of $\text{LaBr}_3:\text{Ce}^{3+}$ [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2012, **59**(3): 656–664. DOI: 10.1109/TNS.2012.2193597.
- Gobain S. NaI(Tl) and Polyscin NaI(Tl) sodium iodide scintillation material[EB/OL]. 2005-10-12[2016-8-21]. <http://www.crystals.saint-gobain.com/sites/imdf.crystals.com/files/documents/sodium-iodide-material-data-sheet.pdf>.
- Pichler B J, Lorenz E, Mirzoyan R, *et al.* Production of a diffuse very high reflectivity material for light collection in nuclear detectors[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2000, **442**: 333–336. DOI: 10.1016/S0168-9002(99)01245-0.
- Nilsson J, Cuplov J, Isaksson M. Identifying key surface parameters for optical photon transport in GEANT4/GATE simulations[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2015, **103**: 15–24. DOI: 10.1016/j.apradiso.2015.04.017.
- Moszyński M, Zalipska J, Balcerzyk M, *et al.* Intrinsic energy resolution of NaI(Tl)[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 2002, **484**: 259–269. DOI: 10.1016/S0168-9002(01)01964-7.
- van Loefa E V D, Dorenbose P, van Eijka C W E, *et al.* Scintillation properties of $\text{LaBr}_3:\text{Ce}^{3+}$ crystals: fast, efficient and high-energy-resolution scintillators[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2002, **486**: 254–258. DOI: 10.1016/S0168-9002(02)00712-X.