

辐射场中NaI (TI) 闪烁体探测器响应全过程模拟

俞赛云 仇怀利 李佳 朱涛 宋逢泉

Whole-process simulation of NaI (TI) scintillator detector response in radiation field

YU Saiyun, QIU Huaili, LI Jia, ZHU Tao, SONG Fengquan

引用本文:

俞赛云, 仇怀利, 李佳, 等. 辐射场中NaI (TI) 闪烁体探测器响应全过程模拟[J]. 应用光学, 2023, 44(5): 967–974. DOI: 10.5768/JAO202344.0501004

YU Saiyun, QIU Huaili, LI Jia, et al. Whole-process simulation of NaI (TI) scintillator detector response in radiation field[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(5): 967–974. DOI: 10.5768/JAO202344.0501004

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0501004>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于FPGA的PPM调制可见光图像传输系统

FPGA-based PPM modulated visible light image transmission system

应用光学. 2019, 40(1): 162–166 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0108002>

单光子探测三维点云与可见光图像融合处理算法研究

Fusion processing algorithm of single-photon detection for three-dimensional point cloud and visible light image

应用光学. 2021, 42(6): 1034–1039 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0602004>

基于蒙特卡罗法的水下激光光幕探测性能研究

Detection performance of underwater laser light screen based on Monte Carlo method

应用光学. 2019, 40(3): 454–460 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0302008>

真空条件下低温红外辐射测量技术研究

Research on low-temperature infrared radiation measurement technology under vacuum condition

应用光学. 2020, 41(4): 730–736 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0406002>

穿透毛玻璃的可见光成像系统

Visible light imaging system through frosted glass

应用光学. 2019, 40(3): 416–421 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0302002>

自适应功率分配可见光MIMO信道容量研究

Research on MIMO channel capacity for adaptive power allocation visible light

应用光学. 2020, 41(3): 626–630 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0308002>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2023) 05-0967-08

辐射场中 NaI(Tl) 闪烁体探测器响应全过程模拟

俞赛云¹, 仇怀利¹, 李 佳², 朱 涛³, 宋逢泉¹

(1. 合肥工业大学 物理学院, 安徽 合肥 230601; 2. 中国科学技术大学 核科学技术学院, 安徽 合肥 230031;
3. 福建省辐射环境监督站, 福建 福州 350013)

摘 要: NaI(Tl) 探测器是典型的闪烁体辐射探测器, 其探测过程涉及辐射能量沉积、可见光信号产生与输运、光电转换与信号处理等物理过程。首先利用蒙特卡罗方法、Birks 公式及射线追迹程序, 开展了射线粒子在晶体中转为可见光输出过程的计算分析, 并结合光电倍增管和信号处理电路的指标参数进行模拟仿真, 得出探测器最终输出的脉冲电压信号参数; 然后, 在 ^{137}Cs 源辐射场中采用 $\Phi 50\text{ mm}\times 50\text{ mm}$ NaI(Tl) 晶体耦合光电倍增管开展实验验证, 实验测得探测器输出脉冲信号的上升/下降时间比为 0.39, 与模拟计算数值 0.36 相比, 相差约 7.69%, 表明模拟计算模型的输出结果与实测数据基本符合, 初步证明了论文的模拟计算模型及计算分析过程的正确性。论文提出的方法, 对于深入理解辐射粒子激发的荧光可见光在晶体闪烁体中的传输规律和闪烁体辐射探测器系统的优化设计, 具有一定参考意义。

关键词: 辐射探测; NaI(Tl) 晶体; 蒙特卡罗; 可见光传输

中图分类号: TN812.1

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202344.0501004

Whole-process simulation of NaI (Tl) scintillator detector response in radiation field

YU Saiyun¹, QIU Huaili¹, LI Jia², ZHU Tao³, SONG Fengquan¹

(1. School of Physics, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China; 2. School of Nuclear Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230031, China; 3. Radiation Environment Supervision Station of Fujian Province, Fuzhou 350013, China)

Abstract: NaI (Tl) detector is a typical scintillator radiation detector, and its detection process involves radiation energy deposition, generation and transport of visible light signal, photoelectric conversion, signal processing and other physical processes. Firstly, the process of ray particles converting into visible light signal output in crystals was simulated and analyzed by Monte Carlo method, Birks formula and ray tracing program. Combined with the index parameters of photomultiplier tube and signal processing circuit, the pulse voltage signal parameters for the final output of the detector were obtained. Then, the experiment was verified by using $\Phi 50\text{ mm}\times 50\text{ mm}$ NaI (Tl) crystal-coupled photomultiplier in ^{137}Cs source radiation field. The experimental results show that the rise/fall time ratio of the output pulse signal of detector is 0.39, which is about 7.69% different than the simulated value of 0.36, indicating that the output results of the simulation calculation model are basically consistent with the measured data, which preliminarily proves the correctness of the simulation

收稿日期: 2023-02-20; 修回日期: 2023-04-25

基金项目: 国家自然科学基金 (12005224)

作者简介: 俞赛云 (1997—), 女, 硕士研究生, 主要从事核辐射探测和辐射粒子输运及光学模拟计算研究。

E-mail: 2020111197@mail.hfut.edu.cn

通信作者: 宋逢泉 (1975—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事核辐射探测和辐射粒子输运及光学模拟计算研究。

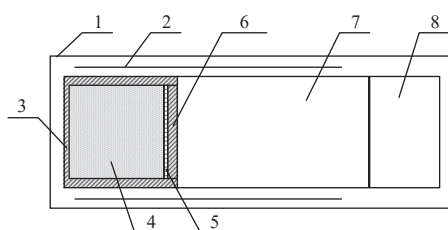
E-mail: fengquan.song@hfut.edu.cn

calculation model and calculation analysis process. The proposed method is of certain reference significance for deeply understanding transmission law of fluorescent visible light excited by radiation particles in crystal scintillator and optimization design of scintillator radiation detector system.

Key words: radiation detection; NaI (TI) crystal; Monte Carlo; transport of visible light

引言

闪烁体探测器具有探测效率高、响应时间快等特点^[1],是目前应用较为广泛的核辐射探测器^[2-4]。典型的闪烁体探测器系统主要由闪烁晶体探头、光电转换器及信号处理电路等组成,如图 1 所示。



1.铝外壳;2.磁屏蔽套;3.反射层;4.闪烁晶体;5.硅胶;6.光学玻璃(光导);7.光电倍增管;8.信号处理电路

图 1 NaI(Tl) 晶体闪烁体探测器结构简图

Fig. 1 Brief diagram of NaI (TI) crystal scintillator detector structure

闪烁体探测器的基本工作原理为:射线粒子进入闪烁体时把部分或全部能量转移给电子,这些次级电子使闪烁材料分子电离或激发,接着被激发的分子退激,此过程以光辐射方式向外发出荧光光子,荧光光子在出射闪烁晶体后被光电倍增管光阴极收集,通过光电效应转化为光电子;光电子在电场中逐级倍增,在阳极聚集产生电脉冲信号,最后通过信号处理电路对输出电脉冲信号进行处理分析。

对上述过程的模拟是一项重要的技术手段,不仅有助于深入理解闪烁体辐射探测器的性能特征,对于发展新的辐射探测方法也都具有重要的指导意义。针对射线粒子在闪烁体中的输运,目前模拟大多是通过蒙特卡罗程序,如 FLUKA、MCNP (Monte Carlo N particle transport code)、GEANT4 等。例如 DEMIR N^[5]、MOUHTI I^[6] 分别采用 FLUKA、MCNPX 模拟光子在闪烁体中的沉积能量即脉冲高度光谱,与 NaI(Tl) 探测器测量结果取得良好的一致性;HIRANO Y 采用 Geant4 蒙特卡罗程序,模拟了射线与材料的相互作用和光子在闪烁体中传播的光学过程,并将仿真获得的空间和能量分辨

率与探测器探测的实验值进行了比较^[7]。对于粒子在闪烁体中沉积能量与光产额之间的关系,BIRKS JB 于 1965 年提出著名的 Birks 公式^[8-9]。除了基础的模拟研究外,PAYNE S E、BIZARRI G、GAO F 等人还进行了进一步研究,针对不同类型的闪烁体开展了荧光产额的非线性研究^[10-12];WIRTH S 等人在对闪烁体阵列进行模拟时得到荧光逃逸效应对闪烁像素探测器的噪声性能起主要作用的结论,并发现光的传输过程可能会对信噪比产生影响^[13]。关于可见光在介质中传播的模拟人们也常常用到蒙特卡罗方法,MENG F 等人在研究浑浊介质中极化光的传播时,使用蒙特卡罗方法进行数值计算,得到散射光的空间强度分布和 Stocks 矢量模式,并结合实验测量结果得出散射光的空间因子,可用于标定散射系数、吸收系数等组织光学参数^[14];王建岗等人也利用蒙特卡罗程序模拟了光子在高散射介质中的迁移过程,包括光子每一步与介质的相互作用,即光子被散射和吸收,以及根据菲涅尔定律和斯涅尔定律分析光子在折射率不匹配边界上的反射和折射^[15-16];郑兴荣等人运用 Matlab 软件对光传播特性进行了数据计算和仿真模拟,得到了光在介质面上传播的各种特性曲线,以此研究电矢量在介质表面的光传播特性^[17]。

上述模拟大多数是针对单个物理过程,且依赖自研程序,通用性难以保证。因此,需要建立闪烁体探测器辐射场响应的通用方法模型,针对辐射场中晶体产生的输出信号进行模拟,为相关核探测技术提供基础理论模型。本文在此方面开展了初步的工作,以常用的 NaI(Tl) 晶体为例,模拟分析了辐射场下闪烁体探测器输出信号,首先采用 MCNP 程序^[18-20],获得粒子在 NaI(Tl) 中沉积能量分布,然后结合 Birks 公式和晶体光学参数,通过射线追迹程序,将晶体中沉积能量转换为晶体可见光信号输出,结合光电倍增管参数以及电路分析,将可见光信号转换为电信号,完成 NaI(Tl) 探测器输出信号的模拟。本文通过实验验证了模拟方法的结果,分析了实验结果和模拟结果差异的原因,

为下一步模型改进积累相关经验。

1 分析与模型

针对辐射场中 NaI(Tl) 探测器的全过程响应进行模拟, 分析流程如图 2 所示。主要分为 3 个过程进行模拟: 射线粒子在闪烁体中输运过程、沉积能量转换为晶体输出光信号过程、晶体输出光信号转换为探测器输出电信号过程。

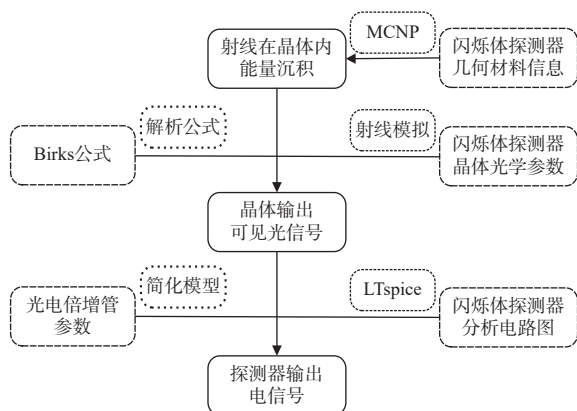


图 2 全过程模拟方法的描述

Fig. 2 Description of whole-process simulation method

各个过程的模拟方法情况如下。

1) 射线粒子在闪烁体中输运过程模拟, 目的在于获得入射粒子在晶体中能量沉积的空间和时间分布。根据闪烁体探测器的几何与材料信息, 尤其是晶体探头的参数, 采用由美国洛斯阿拉莫斯国家实验室开发的 MCNP 程序完成模拟^[18]。MCNP 程序是通过模拟单粒子在指定系统内的径迹、核反应等行为, 以获得相关变量的期望值, 具有几何包容性强, 减方差技巧丰富以及材料数据截面齐全等优点, 是一种常用的解决中子、光子、电子及其联合输运问题的蒙特卡罗程序^[19]。

2) 沉积能量转换为晶体输出光信号过程模拟, 既涉及可见光的产生, 又涉及可见光的输运。闪烁体的荧光产额与沉积能量间存在非线性关系, 沉积能量只有一小部分转化为可见光能量, 剩余能量主要通过内部淬灭效应, 激发能向邻近分子辐射和非辐射迁移以及自吸收进行消散。因此, BIRKS J B 提出以下关系^[8-9]:

$$\frac{dL}{dx} = S \left(\frac{dE}{dx} \right) \left[1 + KB \left(\frac{dE}{dx} \right) \right]^{-1} \quad (1)$$

式中: dL/dx 为单位路径的荧光产额; dE/dx 为单位路径上带电粒子的能量损失; S 为荧光发光效率,

仅与闪烁体材料有关。根据 BIRKS J B 的理论, 沿着粒子电离路径的闪烁体分子分为损坏和未损坏两部分, B 表征损伤分子和未受损分子的比例, K 表征受损伤分子的淬灭概率, 但在具体实验中 KB 只能作为一个参数进行测量^[8]。

γ 射线在闪烁体中发生康普顿效应等, 在产生荧光光子的同时, 闪烁体中产生的次级电子伴随着致韧辐射、散射和正电子湮灭等作用沉积在闪烁体中, 生成的荧光光谱范围一般包括可见光到紫外光。这里仅对荧光光子进行可见光传输模拟, 采用射线追迹程序完成。使用射线追迹程序模拟 γ 辐射粒子所激发的荧光可见光在晶体中输运过程时, 计算中将荧光可见光作为光射线处理, 通过求解一组光射线传输位置和波矢微分方程, 追踪射线在模拟区域内的运行轨迹, 获取晶体输出的荧光可见光功率参数。可见光传播模型如图 3(a) 所示。

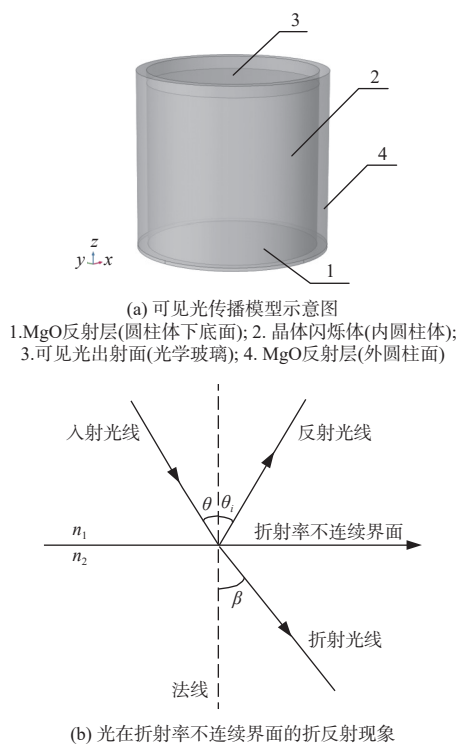


图 3 可见光传播示意图

Fig. 3 Schematic diagram of visible light propagation model

当光线入射到界面时与界面法线方向夹角不同时, 光线在不同介质接触面上会存在折射、反射及全反射现象, 如图 3(b) 所示。由于该模型中求解了射线功率, 则“材料不连续性”特征将计算反射和折射光线这些变量的更新值。重新初始化使用的菲涅耳方程^[21]为

$$\left\{ \begin{array}{l} r_p = \frac{n_2 \cdot \cos \theta - n_1 \cdot \cos \beta}{n_2 \cdot \cos \theta + n_1 \cdot \cos \beta} \\ r_s = \frac{n_1 \cdot \cos \theta - n_2 \cdot \cos \beta}{n_1 \cdot \cos \theta + n_2 \cdot \cos \beta} \\ t_p = \frac{2 \cdot n_1 \cdot \cos \theta}{n_2 \cdot \cos \theta + n_1 \cdot \cos \beta} \\ t_s = \frac{2 \cdot n_1 \cdot \cos \theta}{n_1 \cdot \cos \theta + n_2 \cdot \cos \beta} \end{array} \right. \quad (2)$$

式中: r_p 和 r_s 是 p 光和 s 光的反射系数; t_p 和 t_s 是 p 光和 s 光的透射系数; n_1 和 n_2 分别是入射介质和折射介质的折射率; θ 是入射角; θ' 是反射角, $\theta = \theta'$; β 是折射角。

射线追迹程序得出的数据仅是离散时间点的光输出, 而可见光的发光是服从指数衰减的湮灭过程, 所以要通过离散时间得到连续衰减, 需要对已知数据进行展宽处理, 将展宽后的数据整合在一起, 得到光响应数据。

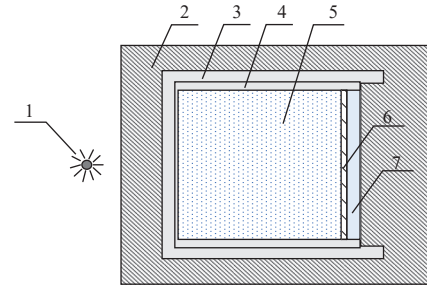
3) 晶体输出光信号转换为探测器输出电信号过程模拟, 涉及光电转换、电路仿真。光电转换过程可根据光电倍增管参数, 如量子效率、电子渡越时间和时间分散、增益等, 对光电转换后电脉冲信号进行评估, 然后根据探测器电路原理图, 对电信号处理过程进行仿真。由于本文使用的探测器的运放等器件来自 ADI 公司, 因此采用该公司开发的电路仿真软件 LTspice 完成电路模拟仿真^[22]。

2 模型测试与验证

2.1 模拟

以最为常见的 NaI(Tl) 闪烁体探测器作为模拟对象, 探头核心为 $\Phi 50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ NaI(Tl) 晶体, 其侧面和前端分别覆盖 2.8 mm 和 1 mm 厚的 MgO 反射层, 探头后端为 1.8 mm 厚硅胶, 再后边为 4 mm 厚的光学玻璃, 最外侧为承担保护和降低噪声作用的铝壳, 其结构为外径增加内径固定的空心圆柱, 探测器的外部环境设置为空气, 如图 4 所示。放射源的类型为指向铝壳前端轴心发射的 ^{137}Cs 点源, 距离铝壳前端轴心距离为 10 cm, 与探头对称轴所成的角度为 0° , 这就是 MCNP 模拟中模型设置。MCNP 模拟出的是射线照射到闪烁体能量沉积数据, 通过 Birks 公式可将沉积能量转化为荧光产额。

本文利用 MCNP 中 Fmesh 计数功能计算了不同入射角度下光子在 NaI(Tl) 晶体内的能量沉积情况, 并通过公式 (1) 将光子产生的能量沉积转化为光产额。实验常用的 ^{137}Cs 源, 能量为 0.662 MeV,



1.放射源 2.空气 3.铝外壳 4.MgO 反射层 5.NaI(Tl) 晶体
6.硅胶 7.光学玻璃。

图 4 NaI(Tl) 晶体探头的 MCNP 计算模型

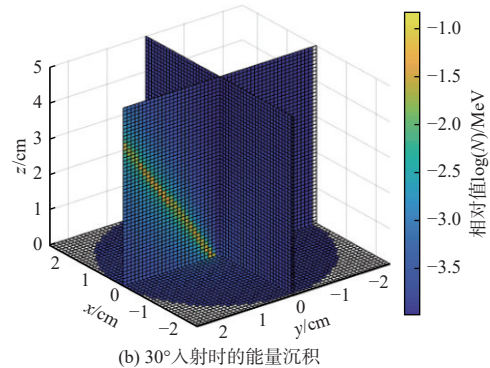
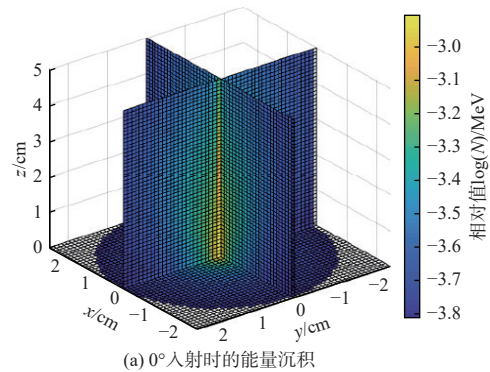
Fig. 4 MCNP calculation model of NaI (Tl) crystal probe

与 NaI(Tl) 晶体主要发生康普顿散射和光电效应, 产生的次级电子沿自身径迹损失能量, 在此过程中 NaI(Tl) 分子吸收能量并发出荧光。因此, 射线主要沿其入射方向沉积能量, 生成荧光光子, 并且沿着入射方向不同位置的发光时间有先后。光子产生后, 发光是一个指数衰减的湮灭过程^[23], 满足以下公式:

$$f(t) = [0.0048 \cdot \exp(-0.004545t - 0.033) - 0.0232 \cdot \exp(-0.2186t - 1.5876)] \times N \quad (3)$$

式中: N 为该单元的荧光产额; $f(t)$ 与 N 对应, t 单位为 ns 且 $t > 0$, 约 1 500 ns 后可近似认为衰减完毕。

为了直观分析荧光产生分布与源入射角度的关系, 对 MCNP 的能量沉积输出结果进行可视化, 图 5 给出了射线 0° 、 30° 、 60° 入射时荧光产生分布的三维切片图。



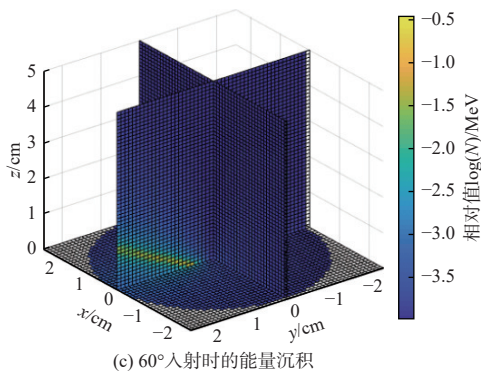


图 5 不同角度入射能量沉积分布
Fig. 5 Distribution of incident energy deposition at different angles

当源入射角度为 0° 时, 光子沿探头的对称轴入射, 切片图采用直角坐标系, 是为了便于观察荧光产额进行对数转换, 颜色越鲜亮, 表示荧光产额越高。从图 5 中可以看出, 荧光产额自中心向外迅速衰减, 并且随着入射深度增加, 荧光产额也逐渐衰减。同理, 当源入射角度为 30° 和 60° 时, 光子也沿着入射方向的法向迅速衰减, 并随着入射深度缓慢衰减。结合模拟数据与理论分析可知, 射线入射到晶体后有一定的穿透深度, 所以能量沉积的最大值并非晶体表面, 而是与表面有一段距离。

接下来利用射线追迹程序模拟可见光在闪烁体中的传播。如图 3(a) 所示, 直径为 50 mm、高为 50 mm 的圆柱形 NaI(Tl) 晶体 (图 3(a) 中 2), 可见光出射处连接着光学玻璃 (3-K9), 射线入射端面的反射层厚度为 1.8 mm (1-MgO), 晶体和玻璃表面是厚度为 3 mm 的反射层 (4-MgO)。可见光在闪烁体和反射层的界面遵循菲涅尔定律, MgO 与空气接触面反射率设为 0.9。可见光从光学玻璃的另一端出射, 可将光学玻璃出射面设置为冻结, 同时在此节点下添加一个沉积射线功率节点, 以计算可见光的输出。图 6 为某一时刻可见光在闪烁体中传播轨迹 (图示仅选取部分射线)。

前文中提到荧光可见光产生时间与位置有关, 且发光时间服从指数衰减, 而射线追迹程序得出的数据仅是离散时间点的光输出, 所以根据发光服从的指数衰减公式, 将每个角度的荧光产额数据划分为离散时间的数据, 导入射线追迹程序中, 为方便之后 Matlab 对数据插值展宽处理, 这里取离散时间间隔为 10 ns。对同一角度多次模拟得到的离散时间的光输出数据, 利用 Matlab 的插值函数 spline 对这些数据进行一维数据插值再展宽拟

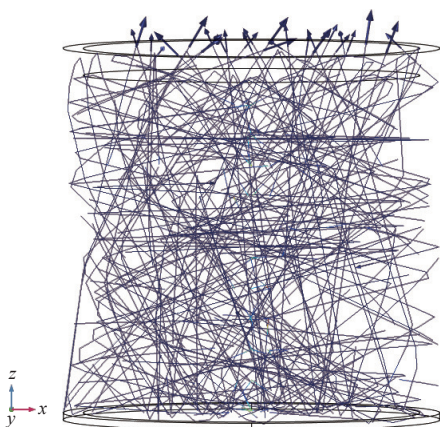


图 6 部分可见光在闪烁体中的传播轨迹
Fig. 6 Propagation trajectories of partial visible light in scintillator

合后, 可得到连续的光输出, 图 7 为拟合的不同角度的曲线。

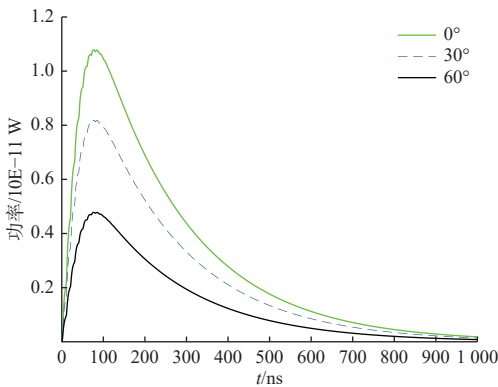


图 7 不同角度入射时晶体输出可见光功率参数
Fig. 7 Visible light power parameters for crystal output at different incidence angles

根据光电倍增管的量子效率和增益可获得光电转换后的电信号。根据光电倍增管的渡越时间离散, 对获得的电流脉冲信号, 基于图 8 电路原理图, 采用 LTspice 软件得到 NaI(Tl) 探测器的电信号输出。图 8 电路中, 输入点为 I1, 即为光电倍增管输出的脉冲电流信号; 输出点为 R10 与 R9 之间的电势差, 输出端负载如图 8 所示。

2.2 实验

基于 ¹³⁷Cs 标准源进行验证实验, 采用 Φ50 mm×50 mm NaI(Tl) 晶体耦合光电倍增管 (海南展创 XP3240), 结合数字化分析电路进行实验。使用的光电倍增管的量子效率为 75 μA/lm, 电子渡越时间和渡越分散时间分别为 48 ns 和 12 ns, 光电倍增管的增益为 7×10⁵。以射线 0° 角入射为例, 根据光电倍增管的渡越时间离散 12 ns, 通过 Matlab 对 0° 数

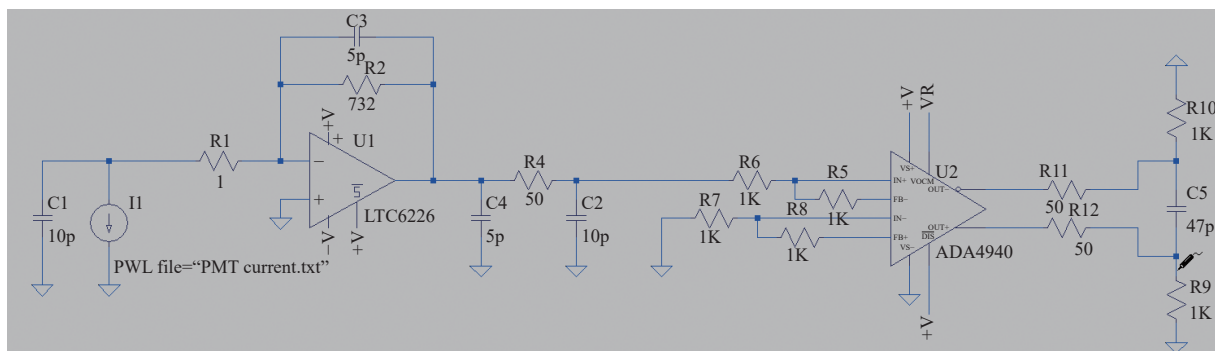


图 8 NaI(Tl) 探测器中电路原理图

Fig. 8 Circuit schematic diagram of NaI (Tl) detector

据做高斯展宽, 高斯半高宽为 12 ns, 获得的脉冲信号如图 9 所示。

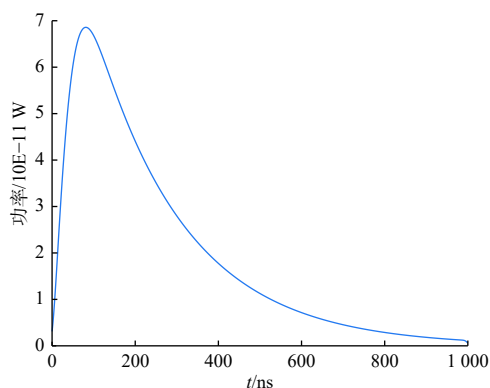


图 9 脉冲信号曲线

Fig. 9 Pulse signal curve

图 10 为 NaI(Tl) 探测器单个输出脉冲信号的实验结果和模拟结果比较。用单个脉冲的上升/下降时间的比值反映脉冲形状, 实验结果和模拟结果分别为 0.39 和 0.36, 相差 7.69%, 总体上脉冲信号的实验结果与模拟结果符合良好, 为进一步模型开发提供了分析基础。

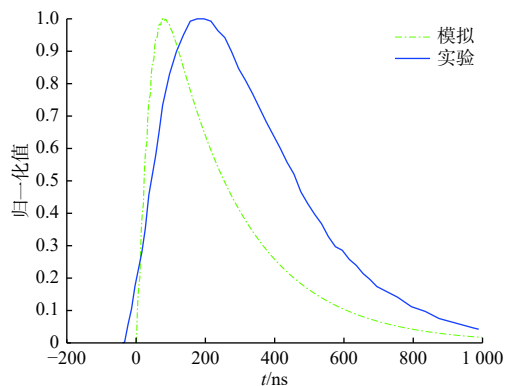


图 10 归一化光输出拟合曲线

Fig. 10 Fitting curve of normalized optical output

另外, 从模拟曲线与实验曲线分布形态的细节上看, 两者并不是完全吻合, 存有一定差异, 对于单个脉冲的上升时间, 实验结果和模拟结果分别为 215.2 ns 和 85 ns; 对于单个脉冲的下降时间, 实验结果和模拟结果分别为 550.1 ns 和 236.3 ns。分析其原因, 主要有以下 3 点: 1) 在射线光学模拟计算中, 采用了比较简化的模型, 没有充分考虑光射线在晶体闪烁体中的散射过程和吸收过程; 2) 射线光学程序本身不能直接设定可见光输出功率随时间连续变化的函数, 需通过对离散输出数据进行展宽和插值, 数值拟合的时间连续的光输出函数曲线, 在拟合过程产生了一定的误差; 3) 在晶体输出荧光可见光信号转换为探测器输出脉冲电压信号的模拟中, 对电子在光电倍增管电路中渡越过程的计算, 没有构建详细的计算模型。

3 结果与分析

本文对 γ 辐射场中 NaI(Tl) 晶体闪烁体探测器响应信号输出的全过程开展了模拟计算分析, 使用 MCNP 程序、Birks 公式和射线追踪程序等模拟分析工具, 模拟计算出 γ 辐射场中典型 NaI(Tl) 晶体闪烁体探测器的光响应曲线, 并通过 ^{137}Cs 放射源开展验证实验, 所得测试数据与模拟计算结果大体一致, 表明本文所采用的模拟分析方法基本正确。将模拟结果对比实验测量的 NaI(Tl) 闪烁体探测器的光响应曲线, 可以看到整体趋势一致, 但依然存在一定的误差, 这是因为: 首先在各阶段模拟过程中, 为了模拟方便将模型简化, 并且光传播模拟时没有考虑光在闪烁晶体中的散射、吸收; 其次, 射线追踪自身局限性也导致了模拟结果与实验测量结果存在差异; 最后, 晶体输出光信号转换为探测器输出电信号过程中没有建立光电倍增管

的详细模型, 对电子渡越过程的模拟不够详细。

本文的研究工作, 对于深入理解 NaI(Tl) 晶体闪烁体中可见光射线的传输规律, 开展闪烁体辐射探测器系统的优化设计具有一定参考意义。考虑以后将 MCNP 与射线追踪结合使用, 可以利用 Geant4 模拟验证闪烁体光输出信号, 同时对提高闪烁体探测器光提取效率做进一步的研究。

参考文献:

- [1] 任国浩. 无机闪烁晶体在我国的发展史[J]. *人工晶体学报*, 2019, 48(8): 1373-1385.
REN Guohao. Development history of inorganic scintillation crystals in China[J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2019, 48(8): 1373-1385.
- [2] KOROLEVA T S, SHULGIN B V, PEDRINI Ch, et al. New scintillation materials and scintiblocs for neutron and γ -rays registration[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2005, 537(1/2): 415-423.
- [3] 安少康. NPTool模拟NaI(Tl)和LaBr₃(Ce)闪烁体探测器试验研究[J]. *铀矿冶*, 2019, 38(3): 198-203.
AN Shaokang. Experimental study on NPTools Simulation of NaI(Tl) and LaBr₃(Ce) scintillator detectors[J]. *Uranium Mining and Metallurgy*, 2019, 38(3): 198-203.
- [4] 袁航. NaI(Tl)和CsI(Na)闪烁体探测器的探测性能研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
YUAN Hang. Detection performance of NaI(Tl) and CsI(Na) scintillator detectors[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019.
- [5] DEMIR N, KULUÖZTÜRK Z N. Determination of energy resolution for a NaI(Tl) detector modeled with FLUKA code[J]. *Nuclear Engineering and Technology*, 2021, 53(11): 3759-3763.
- [6] MOUHTI I, ELANIQUE A, MESSOUS M Y, et al. Validation of a NaI(Tl) and LaBr₃(Ce) detector's models via measurements and Monte Carlo simulations[J]. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 2018, 11(4): 335-339.
- [7] HIRANO Y, ZENIYA T, IIDA H. Monte Carlo simulation of scintillation photons for the design of a high-resolution SPECT detector dedicated to human brain[J]. *Annals of Nuclear Medicine*, 2012, 26(3): 214-221.
- [8] MOUATASSIM S, COSTA G J, GUILLAUME G, et al. The light yield response of NE213 organic scintillators to charged particles resulting from neutron interactions[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 1995, 359(3): 530-536.
- [9] BIRKS J B, FIRK F W K. The theory and practice of scintillation counting[J]. *Physics Today*, 1965, 18(8): 60.
- [10] BIZARRI G, MOSES W W, SINGH J, et al. An analytical model of nonproportional scintillator light yield in terms of recombination rates[J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, 105(4): 044507.
- [11] PAYNE S A, CHEREPY N J, HULL G, et al. Nonproportionality of scintillator detectors: theory and experiment[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2009, 56(4): 2506-2512.
- [12] GAO F, XIE Y, KERISIT S, et al. Yield, variance and spatial distribution of electron-hole pairs in CsI[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2011, 652(1): 564-567.
- [13] WIRTH S, METZGER W, PHAM-GIA K, et al. Impact of photon transport properties on the detection efficiency of scintillator arrays[C]//2006 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record. New York: IEEE, 2006: 2602-2603.
- [14] MENG F, MA X, ZHAO H, et al. A study of polarized light propagation in turbid medium by monte carlo simulations and experiments[C]//2006 International Symposium on Biophotonics, Nanophotonics and Metamaterials. New York: IEEE, 2006: 132-135.
- [15] WANG J G, WANG G Y, XU Z Z. Monte Carlo simulation of photon migration path in turbid media[J]. *Chinese Optics Letters*, 2008, 6(7): 530-532.
- [16] 王建岗, 王桂英, 徐至展. 光在分层散射介质中传输行为的蒙特卡罗模拟研究[J]. *光学学报*, 2000, 20(3): 346-350.
WANG Jiangang, WANG Guiying, XU Zhizhan. Monte Carlo simulations for light propagation in striated scattering medium[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, 20(3): 346-350.
- [17] 郑兴荣, 宋小永, 郑燕飞, 等. 基于MATLAB的光传播特性的数值计算[J]. *陇东学院学报*, 2017, 28(5): 36-40.
ZHENG Xingrong, SONG Xiaoyong, ZHENG Yanfei, et al. Numerical calculation on the propagation characteristics of light based on Matlab[J]. *Journal of Longdong*

- University, 2017, 28(5): 36-40.
- [18] BRIESMEISTER J F. MCNPTM-A general Monte Carlo N-particle transport code, Version 4C[R]. USA: LA-13709-M, Los Alamos National Laboratory, 2000.
- [19] 彭礼韬. MCNP和Geant4在伽马测井领域的应用对比研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2021.
- PENG Litao. Comparative study on the application of MCNP and Geant4 in well logging[D]. Beijing: School of Nuclear Science and Engineering, 2021.
- [20] 马继明, 朱宏权, 王奎禄, 等. 硅酸镨 γ 图像转换屏荧光弥散特性研究[J]. *应用光学*, 2010, 31(5): 752-756.
- MA Jiming, ZHU Hongquan, WANG Kuilu, et al. Fluorescence dispersion of Lu_2SiO_5 crystal as a γ -image converter[J]. *Journal of Applied Optics*, 2010, 31(5): 752-756.
- [21] 田秀劳. 光波在左手材料中的菲涅尔公式和布儒斯特定律[J]. *光子学报*, 2006, 35(7): 1103-1106.
- TIAN Xiulao. Fresnel formulate and Brewster law of optical waves in the left-handed materials[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, 35(7): 1103-1106.
- [22] BELL I. Introduction to circuit simulation with LTspice-Part 4[J]. *Everday Partical Electronics*, 2019, 48(1): 48-51.
- [23] KONSTANTINOOU G, LECOQ P, BENLLOCH J M, et al. Metascintillators for ultrafast gamma detectors: a review of current state and future perspectives[J]. *IEEE Transactions on Radiation and Plasma Medical Sciences*, 2022, 6(1): 5-15.