

氚基同位素电池设计优化及其电学性能的提升

应红^{1,2} 施海宁^{1,2} 梁冬冬³ 许志恒³ 龚频³ 汤晓斌³

¹(苏州热工研究院有限公司 苏州 215004)

²(国家核电厂安全及可靠性工程技术研究中心 苏州 215004)

³(南京航空航天大学核科学与技术系 南京 211106)

摘要 采用蒙特卡罗方法开展了氚基同位素电池在辐致伏特效应和辐致光伏效应两种不同能量转换模式下的性能研究。探讨了换能材料的几何物理参数对电池电学输出性能的影响,设计制备了单层和叠层两类氚基同位素电池,测试分析了增大氚源强度、采用叠层构型两种方式对电池电学输出的提升效果。模拟结果表明:Si、SiC、GaAs 光伏组件均可用于辐致伏特效应氚基同位素电池换能,且存在各自最佳厚度参数,使得电池电学输出性能达到最优,分别为 3.8 μm 、2.2 μm 、1.7 μm ;对于辐致光伏效应氚基同位素电池,可通过调整 ZnS:Cu 荧光层的厚度,使出射的荧光辐照度达到最大,进而优化电池电学输出性能。结果提示,增大氚源强度、采用叠层构型均可实现氚基同位素电池最大输出功率等电学参数的有效提升,其中并联叠层的最大输出功率可达到 106.138 nW,相比于单层构型增幅超过 64%。

关键词 同位素电池,氚,蒙特卡罗方法,辐致伏特效应,辐致光伏效应

中图分类号 TL99

DOI: 10.11889/j.1000-3436.2023-0047

引用该文:

应红,施海宁,梁冬冬,等.氚基同位素电池设计优化及其电学性能的提升[J].辐射研究与辐射工艺学报,2023,41(6):060701. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2023-0047.

YING Hong, SHI Haining, LIANG Dongdong, *et al.* Design optimization and electrical performance improvement of tritium-based nuclear batteries[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2023, 41(6): 060701. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2023-0047.



Design optimization and electrical performance improvement of tritium-based nuclear batteries

YING Hong^{1,2} SHI Haining^{1,2} LIANG Dongdong³ XU Zhiheng³ GONG Pin³ TANG Xiaobin³

¹(Suzhou Nuclear Power Research Institute Co., Ltd, Suzhou 215004, China)

²(National Engineering Research Center for Nuclear Power Plant Safety & Reliability, Suzhou 215004, China)

³(Department of Nuclear Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

基金资助: 国家自然科学基金(12005101)、中央高校基本科研业务费专项资金资助(NT2023013)和江苏省卓越博士后计划(2022ZB235)资助

第一作者: 应红,男,1987年8月出生,2011年硕士毕业于中国科学技术大学,高级工程师

通信作者: 应红, E-mail: 258542762@qq.com; 汤晓斌, 教授, E-mail: tangxiaobin@nuaa.edu.cn

收稿日期: 初稿 2023-05-17; 修回 2023-07-27

Supported by National Natural Science Foundation of China (12005101), the Fundamental Research Funds for the Central Universities (NT2023013), and the Excellent Postdoctoral Program of Jiangsu Province (2022ZB235)

First author: YING Hong (male) was born in August 1987, and obtained his master's degree from University of Science and Technology of China in 2011, senior engineer

Corresponding author: YING Hong, E-mail: 258542762@qq.com; TANG Xiaobin, professor, E-mail: tangxiaobin@nuaa.edu.cn

Received 17 May 2023; accepted 27 July 2023

ABSTRACT The performance of tritium-based nuclear batteries based on two different energy conversion modes, the irradiated voltaic effect and irradiated photovoltaic effect, was studied by using the Monte Carlo method. The influence of the geometrical-physical parameters of energy conversion materials on the electrical output performance of batteries was investigated. Single-layer and stacked-layer tritium-based nuclear batteries were designed and prepared. The effects of increasing the tritium source intensity and adopting the stacked-layer configuration on the enhancement of the electrical output of the batteries were analyzed. The simulation results showed that Si, SiC, and GaAs photovoltaic modules could be used for irradiated voltaic effect tritium-based nuclear batteries and that their respective optimal thickness parameters allow the electrical output performance to be optimized; the optimal thicknesses were 3.8 μm , 2.2 μm , and 1.7 μm , respectively. For irradiated photovoltaic effect tritium-based nuclear batteries, the thickness of the ZnS:Cu fluorescent layer could be adjusted to maximize the emitted fluorescence irradiance and optimized the electrical output performance. The experimental results showed that increasing the radiation intensity of the tritium source and adopting the stacked-layer configuration could effectively enhance electrical parameters such as the maximum output power of tritium-based nuclear batteries. The maximum output power of the stacked-layer nuclear battery could reach 106.138 nW, which was an increase of more than 64% compared with that of the single-layer configuration.

KEYWORDS Nuclear battery, Tritium, Monte Carlo method, Irradiated voltaic effect, Irradiated photovoltaic effect

CLC TL99

随着社会的发展和科技的进步,空间探测任务等特殊场景下的微型电源需求日益迫切^[1-2]。作为微型电源的一种候选方案,氚基同位素电池因其具有能量密度高、寿命长、可微型化等优点,受到了广泛的关注^[3]。截至目前,针对氚基同位素电池的研究主要是通过改变氚源形态^[4-5]、调整氚源与换能单元的加载方式^[6]等方法来探究优化氚基同位素电池的输出性能,在对比探究不同换能模式对电池输出性能的影响方面尚不够深入。因此,开展不同换能模式氚基同位素电池的设计优化及其电学性能提升研究具有较强的现实意义,有助于进一步推动电池走向实际应用阶段。本文基于辐致伏特效应对和辐致光伏效应两种不同能量转换模式,利用半导体光伏组件、荧光层等换能材料将氚源的辐射能转换为电能,围绕氚基同位素电池开展了蒙特卡罗模拟设计、实验组装测试

及输出性能优化等研究工作。

1 材料与方法

1.1 氚源与换能材料

本文使用蒙特卡罗粒子输运程序MCNP5-1.4版本开展氚基同位素电池的模拟计算,选择固态 Ti^3H_2 作为氚源,其属于纯 β 发射体,最大能量为18.6 keV,平均能量为5.7 keV,半衰期为12.3 a^[7],物质的量为54 g/mol,密度为3.91 g/cm³,质量比活度为1 076 Ci/g,体积比活度为4 207 Ci/cm³。在模拟过程中,构建氚基同位素电池所选用的换能材料有Si、SiC、GaAs半导体光伏组件以及ZnS:Cu荧光层,其特征参数如表1所示。在实验测试过程中,选用氚灯作为激发源项进行相关电学性能测试研究。

表1 换能材料的各项属性参数^[8-9]
Table 1 Various properties of energy conversion materials^[8-9]

换能材料 Energy conversion materials	禁带宽度 E_g / eV Energy gap	密度 ρ / (g·cm ⁻³) Density	物质的量 M / (g·mol ⁻¹) Molar mass
Si	1.12	2.329	14
SiC	2.90	3.210	20
GaAs	1.42	5.317	64
ZnS	3.80	4.102	46

1.2 氚基同位素电池模拟设计优化方法

本研究氚基同位素电池的模拟设计优化思路为：首先，对氚源进行蒙特卡罗模拟，以确定合适的氚源厚度；然后，通过建立辐致伏特、辐致光伏两种氚基同位素电池模型，探讨半导体光伏组件厚度对氚基同位素电池电学输出的影响以及荧光层中荧光的输运过程，模拟计算辐致伏特效

应、辐致光伏效应氚基同位素电池的电学性能参数。因此，开展氚基同位素电池的模拟设计优化需要先模拟计算确定氚基同位素电池中氚源的厚度。本研究模拟构建的 Ti^3H_2 同位素源模型以及 3H 的 β 粒子微分能谱如图 1 所示。其中源外部设置为真空，源的大小设置为 $1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ ，能谱数据来源于 ICRP 138 [10]。

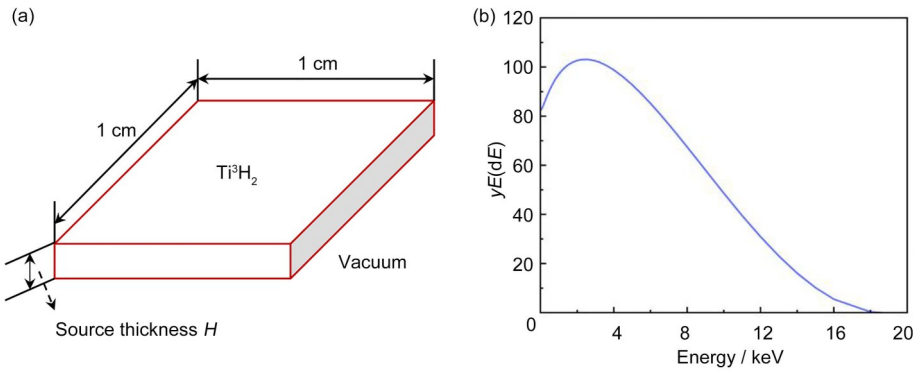


图 1 (a) Ti^3H_2 同位素源模型；(b) 3H 的微分能谱

基于 MCNP5 蒙特卡罗粒子输运程序，使用 F1 卡和 *F1 卡记录得到不同厚度 Ti^3H_2 同位素源的表面出射粒子数、表面出射能量，模拟结果如图 2 所示。当 Ti^3H_2 源的厚度为 $1.4\ \mu\text{m}$ 时，源的表面出射活度密度、表面出射功率密度分别为 $39.982\ \text{mCi}/\text{cm}^2$ 、 $1.630\ \mu\text{W}/\text{cm}^2$ ，此后随着源厚度的增加， Ti^3H_2 源的表面出射活度密度、表面出射功率密度趋于稳定。此外，随着源厚度的增加， Ti^3H_2 源的自吸收率不断增大，总活度出射率、总功率出射率不断减小。基于表面出射活度密度、表面出射功率密度、总活度出射率、总功率出射率最大化、自吸收率最小化原则，本文选择 $1.4\ \mu\text{m}$ 作为模拟构建的氚基同位素电池 Ti^3H_2 源的厚度。

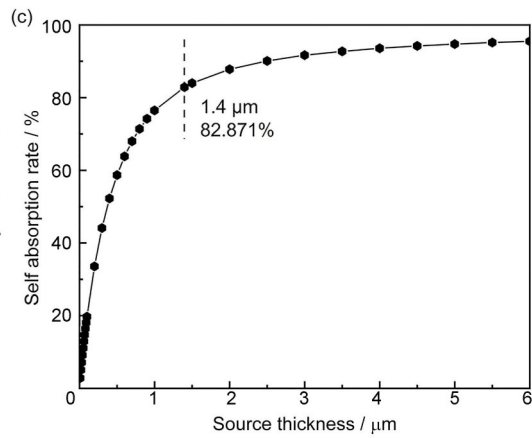
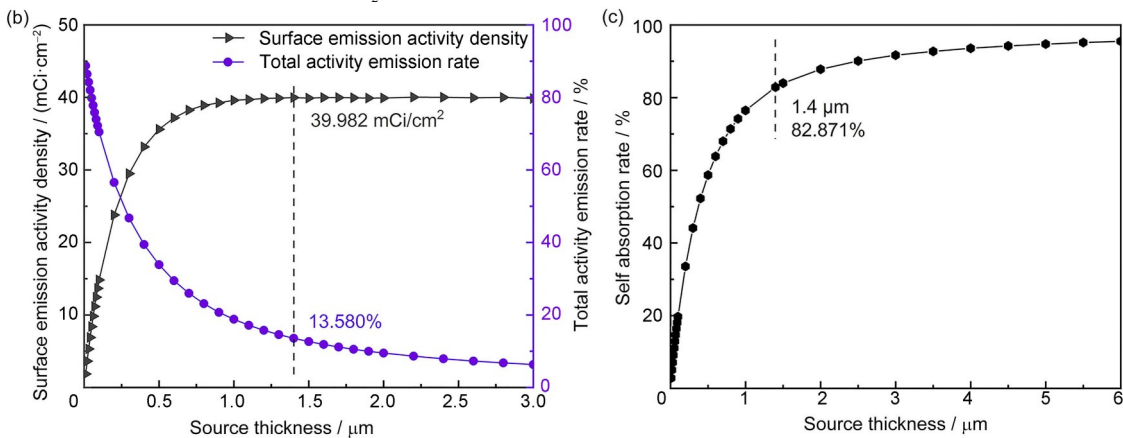
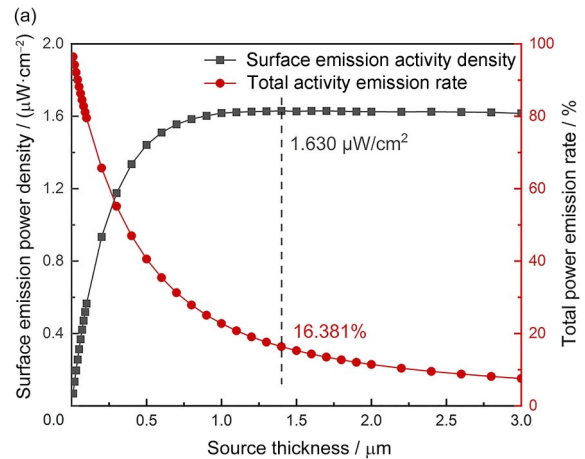


图 2 Ti^3H_2 源的表面出射功率密度、总功率出射率(a)；表面出射活度密度、总活度出射率(b)；自吸收率随源厚度的变化趋势(c)

Fig. 2 Trend of surface emission power density and total power emission rate (a), surface emission activity density and total activity emission rate (b), and self-absorption rate of Ti^3H_2 source with source thickness (c)

1.3 电学参数计算方法

本文模拟计算时,假定Si、SiC、GaAs为理想PN结半导体换能材料,故氚基同位素电池的短路电流 I_{sc} 可表示为式(1)。

$$I_{sc} = \frac{E_{dep} \cdot A}{E_{dep}} \times 5.9274 \times 10^{-3} \quad (1)$$

式中: I_{sc} 单位为A; E_{dep} 为通过*F8卡记录得到的单个 β 粒子在半导体材料中的能量沉积,MeV; A 为1.4 μm 厚 Ti^3H_2 源的表面出射活度,mCi; E_{dep} 为半导体材料产生一对电子-空穴对所需要的平均能量,eV,其可利用半导体材料的禁带宽度 E_g 通过公式(2)计算得到^[11]。

$$E_{dep} = 2.8E_g + 0.5 \quad (2)$$

根据肖克莱方程,基于理想PN结半导体材料的氚基同位素电池的开路电压 V_{oc} 可以表示为式(3)^[11-12]。

$$V_{oc} = \frac{nk_B T}{q} \ln \left(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1 \right) \quad (3)$$

式中: V_{oc} 单位为V; n 为氚基同位素电池的几何因子,本文假定为理想状态,故 n 取1; k_B 为玻尔兹曼常数,J/K; T 为绝对温度,K,本文计算时 T 设定为300 K,即 $k_B T$ 为0.025 9 eV; q 为电子电量; I_0 为反向饱和电流,A,其可通过公式(4)计算得到^[11]。

$$I_0 = 1.5 \times 10^5 e^{-\frac{E_g}{k_B T}} \quad (4)$$

氚基同位素电池的最大输出功率和最大输出功率密度可以分别表示为式(5)、(6)。

$$P_{max} = FF \times V_{oc} \times I_{sc} \quad (5)$$

$$\bar{P}_{max} = \frac{P_{max}}{V_{tran}} \quad (6)$$

式中: V_{tran} 为半导体换能材料的体积, cm^3 ; FF 为填充因子,是衡量氚基同位素电池输出性能的一个重要参数,可由公式(7)计算得到^[12]。

$$FF = \frac{\frac{q}{nk_B T} V_{oc} - \ln \frac{q}{nk_B T} V_{oc} + 0.72}{\frac{q}{nk_B T} V_{oc} + 1} \quad (7)$$

氚基同位素电池的能量转换效率有两种表达方式:装置能量转换效率 η 和总的能量转换效率 η_{total} ^[13]。装置能量转换效率 η 为氚基同位素电池的最大输出功率 P_{max} 与 Ti^3H_2 源的表面出射功率 P 的比值。总能量转换效率 η_{total} 为氚基同位素电池的最大输出功率 P_{max} 与 Ti^3H_2 源总功率 P_{total} 的比值。相应的计算见式(8)、(9)。

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{total}} = \frac{FF \times V_{oc} \times I_{sc}}{P} \quad (8)$$

$$\eta_{total} = \frac{P_{max}}{P_{total}} = \frac{FF \times V_{oc} \times I_{sc}}{A_{total} \times E_{ave}} \quad (9)$$

式中: A_{total} 为 Ti^3H_2 源的总活度; E_{ave} 为 Ti^3H_2 源释放的 β 粒子平均能量,本文取5.7 keV。

1.4 性能测试方法

1.4.1 光学性能测试

采用荧光分光光度计(Agilent technologies)对氚灯、ZnS:Cu荧光层进行发光光谱测量。采用紫外-可见-红外分光光度计(Shimadzu UV3600)测量ZnS:Cu荧光层的反射率。在QE-R光谱响应测试系统上测定所用光伏组件的光谱响应区间,其波长扫描范围为300~2 000 nm。

1.4.2 电学性能测试

电学性能测试是同位素电池性能测试评价必不可少的关键部分。本研究对所组装的氚基同位素电池进行电学性能测试的设备主要由三部分组成:(1)双通道数字源表(Keithley 2636A),测试同位素电池的伏安特性曲线($I-V$);(2)屏蔽暗箱,用于放置同位素电池,避免受外界环境光和电磁等因素干扰;(3)电脑控制端及测试软件LabTracer,用于提取测试数据。

2 结果与讨论

2.1 辐致伏特效应氚基同位素电池模拟

辐致伏特效应氚基同位素电池的电学性能参数计算模型如图3所示。模型外部设置为真空, Ti^3H_2 源的尺寸设置为1 cm×1 cm×1.4 μm ,半导体材料的尺寸为1 cm×1 cm× L 。其中,厚度 L 为通过计算 Ti^3H_2 源释放的 β 粒子在半导体换能材料中的射程所选择得到的精细化计算厚度区间,具体取值如表2所示。

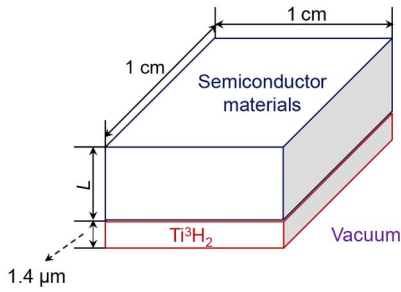


图3 辐致伏特效应氚基同位素电池电学性能参数计算模型
Fig. 3 Simulation model of irradiated voltaic effect nuclear battery based on Ti^3H_2

表2 辐致伏特效应氚基同位素电池半导体厚度 L 的取值

Table 2 Values of semiconductor thickness L in irradiated voltaic effect nuclear battery based on Ti^3H_2

半导体材料类型	厚度区间 $L / \mu m$
Types of semiconductor materials	Thickness range
Si	2~4
SiC	1.5~2.5
GaAs	1~2

基于MCNP5，使用*F8卡记录不同厚度下半导体材料中所沉积的 β 粒子能量，所得结果如图4所示。进一步通过公式计算即可得到基于Si、SiC、GaAs的辐致伏特效应氚基同位素电池的短路电流、开路电压、最大输出功率等电学参数。模拟计算结果表明：氚基同位素电池的短路电流、开路电压、填充因子、最大输出功率等参数随半导体厚度的变化规律一致，在所选半导体厚度 L 区间内，均呈先增大后稳定变化趋势。

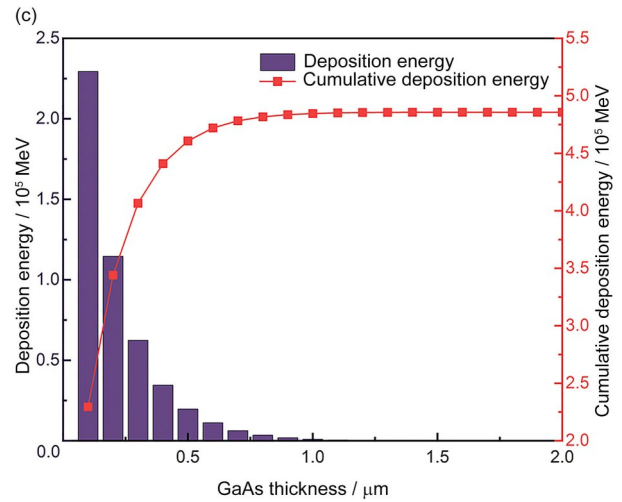
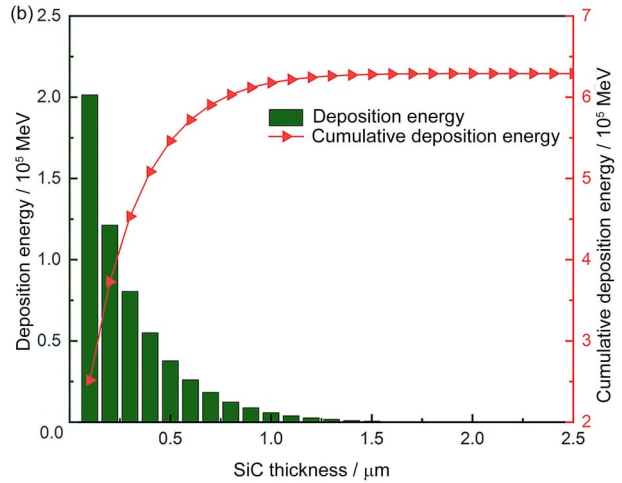
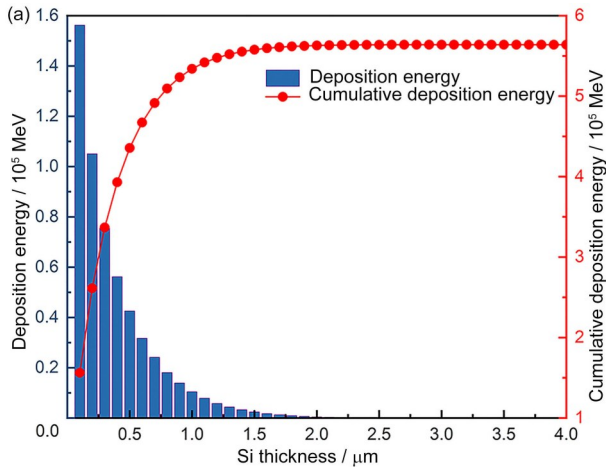


图4 Si (a)、SiC (b)、GaAs (c)中的沉积能量分布和累计沉积能量随材料厚度的变化趋势
Fig. 4 Distribution of deposition energy and cumulative deposition energy in Si (a), SiC (b), and GaAs (c)

图5为基于Si、SiC、GaAs的辐致伏特效应氚基同位素电池的最大输出功率、最大输出功率密度随半导体厚度的变化趋势。由分析结果可知，当Si、SiC、GaAs厚度分别为 $3.8 \mu m$ 、 $2.2 \mu m$ 、 $1.7 \mu m$ 时，基于上述半导体的辐致伏特效应氚基同位素电池的最大输出功率达到最大，分别为 $6.741 nW$ 、 $21.430 nW$ 、 $9.533 nW$ 。当继续增大半导体厚度，电池的最大输出功率保持不变。基于尺寸最小化、功率最大化原则，可认为此厚度为该模拟条件下半导体材料的最佳厚度。在此最佳厚度下辐致伏特效应氚基同位素电池的其他电学参数如表3所示。

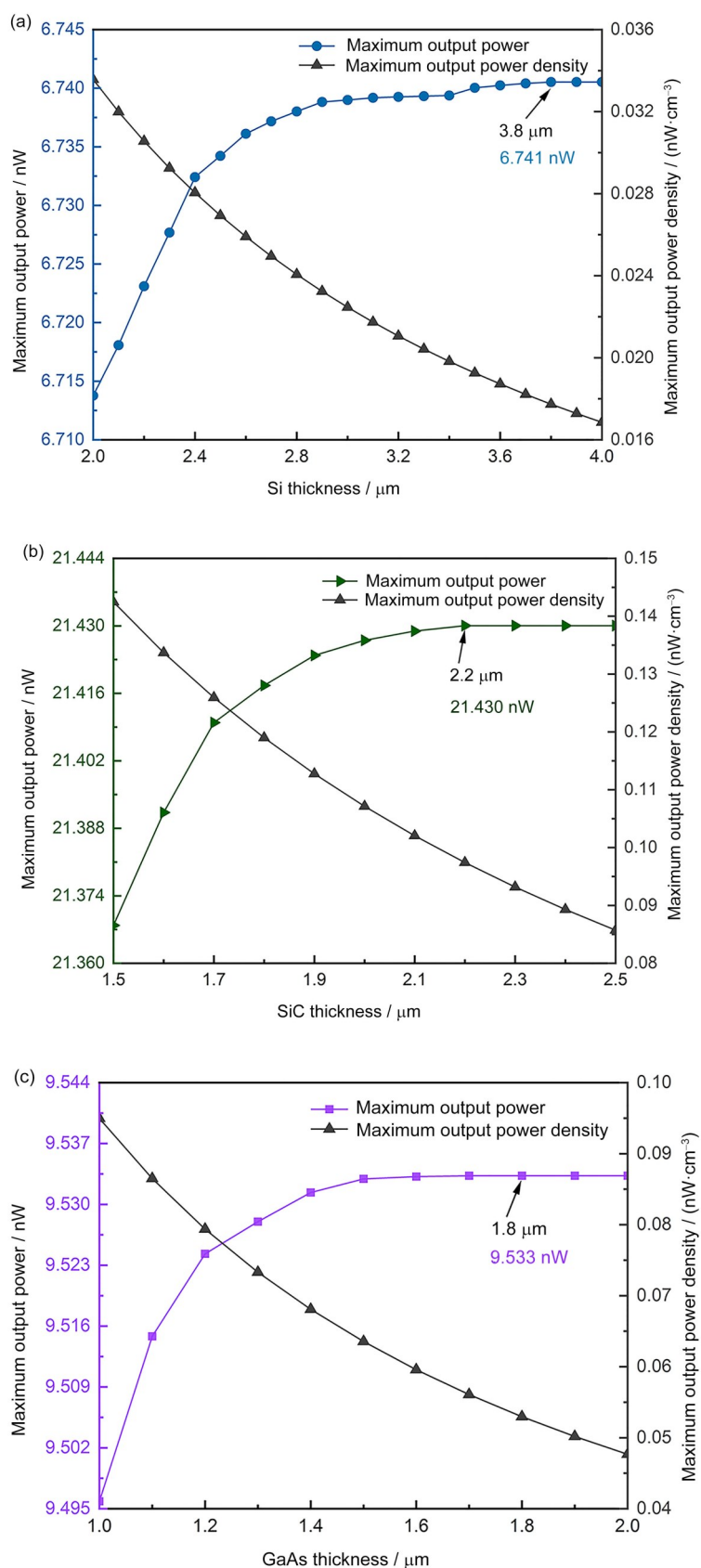


图5 基于Si (a)、SiC (b)、GaAs (c)的氚基同位素电池的最大输出功率、最大输出功率密度随材料厚度的变化趋势
 Fig. 5 Variation trend of maximum output power and maximum output power density of nuclear battery based on Ti^3H_2 with Si (a), SiC (b), and GaAs (c) thickness

表3 最佳半导体厚度下辐致伏特效应氚基同位素电池的电学参数
Table 3 Electrical parameters of irradiated voltaic effect nuclear battery based on Ti^3H_2 at optimal semiconductor thickness

半导体光伏组件厚度 / μm	短路电流 I_{sc} / nA	开路电压 V_{oc} / V	填充因子 FF / %	装置能量转换效率 η / %	总能量转换效率 η_{total} / %
Semiconductor photovoltaic modules (thickness)	Short circuit current	Open circuit voltage	Fill factor	Device energy conversion efficiency	Total energy conversion efficiency
Si (3.8)	24.928	0.359	0.753	0.414	0.034
SiC (2.2)	10.827	2.118	0.935	1.315	0.108
GaAs (1.8)	17.514	0.650	0.837	0.585	0.048

2.2 辐致光伏效应氚基同位素电池模拟研究

辐致光伏效应氚基同位素电池的模拟相比辐致伏特效应氚基同位素电池，需考虑 Ti^3H_2 源衰变释放的 β 粒子作用于荧光材料所产生的荧光粒子的

运输过程。本文选择 ZnS : Cu 荧光层作为模拟过程中的荧光材料，基于计算模型得到 Ti^3H_2 释放的 β 粒子在 ZnS : Cu 荧光层的沉积能量和累计沉积能量，如图 6(a) 所示。

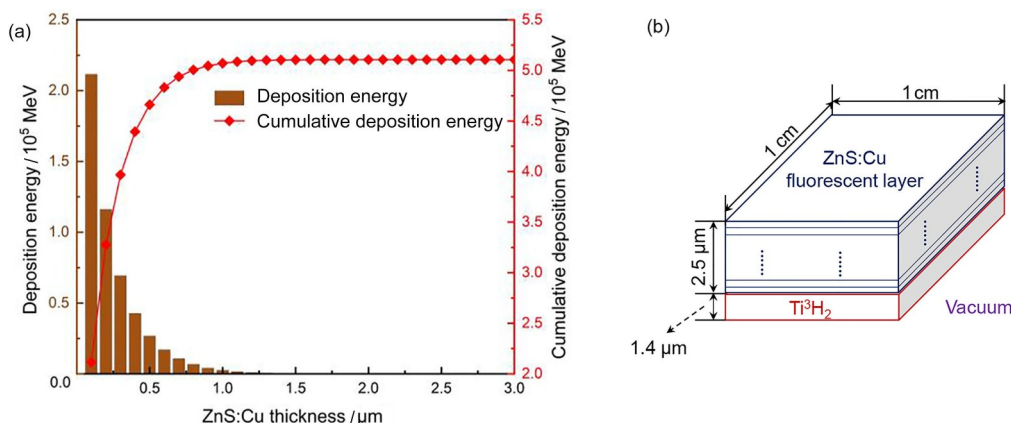


图 6 ZnS : Cu 荧光层中沉积能量分布和累计沉积能量随材料厚度的变化趋势 (a) 与 ZnS : Cu 荧光层辐致发光计算模型 (b)
Fig. 6 Distribution of deposition energy and cumulative deposition energy (a), and radioluminescence calculation model in ZnS : Cu fluorescent layer (b)

在图 6(a) 的基础上，进一步选择厚度为 $2.5 \mu m$ 的 ZnS : Cu 荧光层细化研究辐致发光过程。ZnS : Cu 荧光层辐致发光计算模型，如图 6(b) 所示。其中，荧光层分 50 层，每层厚度为 $0.05 \mu m$ 。通过使用 *F8 卡记录得到 Ti^3H_2 源释放的 β 粒子在 ZnS : Cu 荧光层各薄层中的能量沉积，每一薄层的能量沉积记为 $E(n)$ ， n 从 1 到 50，假定 ZnS : Cu 荧光层各薄层中沉积的能量全部用于产生荧光。

ZnS : Cu 荧光层各薄层产生的荧光在荧光层中的运输过程如图 7 所示。各薄层产生的荧光在荧光层中的运输过程中会被荧光层本身吸收、反射，最终从外表面出射的荧光辐照度(光强)只占初始荧光的一部分^[8]。考虑到 ZnS : Cu 荧光层各薄层产生的荧光在运输过程中的吸收、反射损失，计算得到了不同厚度 ZnS : Cu 荧光层外表面出射荧

光辐照度，如图 8 所示。

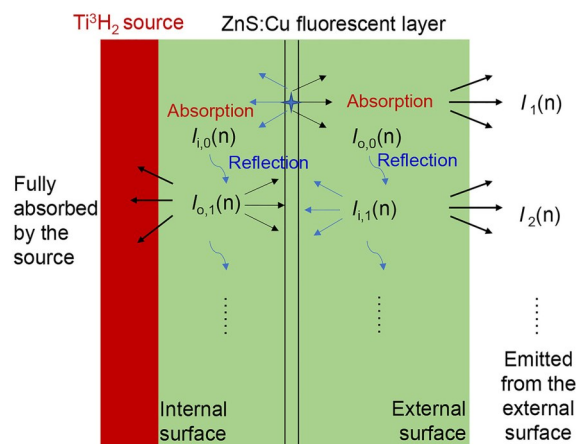


图 7 ZnS : Cu 荧光层中荧光的运输过程
Fig. 7 Fluorescence transport process in ZnS : Cu fluorescent layer

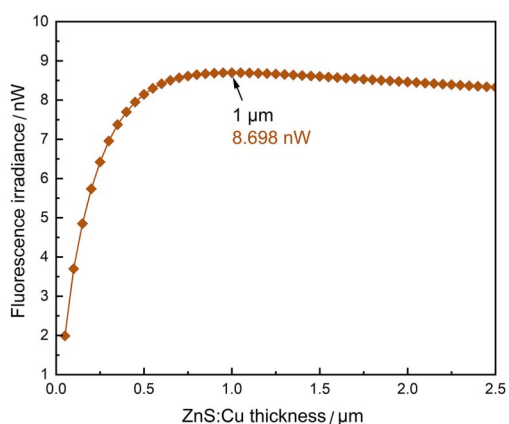


图8 ZnS:Cu 荧光层外表面出射荧光辐照度随材料厚度的变化趋势

Fig. 8 Variation trend of fluorescence irradiance emitted from the outer surface of ZnS:Cu fluorescent layer with thickness

ZnS : Cu 荧光层外表面出射荧光辐照度随荧光层厚度的增加先增大后减小, 即存在某一荧光层厚度, 使得荧光层外表面出射荧光辐照度最大。模拟计算得知, 最大值在荧光层厚度为 1 μm 时取得, 此时的荧光层外表面出射荧光辐照度为 8.698 nW。

假定荧光层外表面出射的荧光完全被半导体光伏组件吸收用以转换电能, 模拟计算了基于不同厚度荧光层的氚基同位素电池电学参数。在构建辐致光伏效应氚基同位素电池模型时, 设定半导体光伏组件足够大, 以至于其能完全吸收荧光层外表面出射的荧光。此外, 在计算电学参数时不考虑氚源释放的 β 粒子沉积在半导体光伏组件的能量所产生的电能。模拟结果表明, 辐致光伏效应氚基同位素电池电路电流、开路电压、填充因子、最大输出功率等电学参数随 ZnS : Cu 荧光层

厚度的变化趋势与 ZnS : Cu 荧光层外表面出射荧光辐照度的变化趋势一致, 即在 ZnS : Cu 荧光层厚度为 1 μm 左右时达到最大值。其中, 使用 Si 半导体光伏组件的辐致光伏效应氚基同位素电池的短路电流、开路电压、填充因子、最大输出功率和总能量转换效率分别为 0.549 nA、0.168 V、0.603、0.056 nW 和 0.003%。使用 Si 半导体光伏组件的辐致光伏效应氚基同位素电池的最大输出功率随荧光层厚度的变化趋势如图 9 所示。

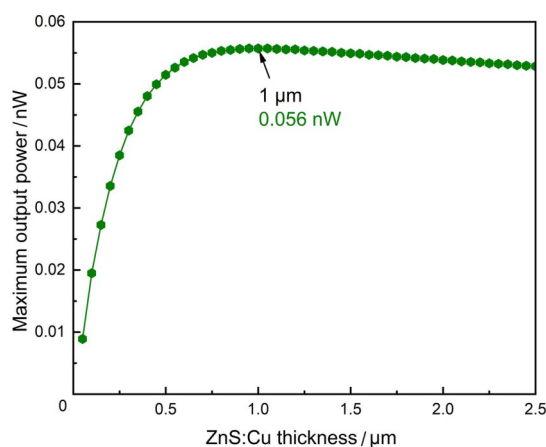


图9 基于 Si 半导体光伏组件和 Ti^3H_2 源的辐致光伏效应氚基同位素电池的最大输出功率随荧光层厚度的变化趋势

Fig. 9 Variation trend of the maximum output power of irradiated photovoltaic effect nuclear battery based on Si and Ti^3H_2 with ZnS:Cu fluorescence layer thickness

2.3 单层氚基同位素电池的组装测试

本研究选择氚灯作为氚激发源项, 同时选择外量子效率与氚灯发光光谱可以实现高响应匹配的 GaAs 半导体光伏组件作为换能材料, 材料样品实物与相应性能如图 10 所示。

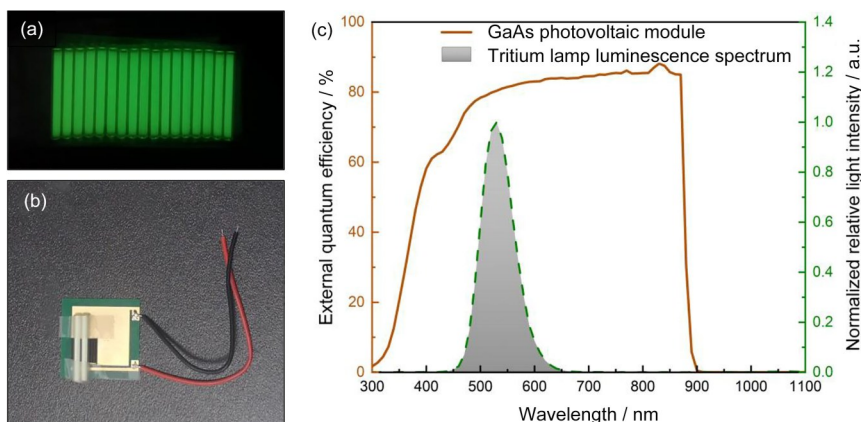


图10 氚灯实物图(a), GaAs 光伏组件实物图(b)和 GaAs 外量子效率曲线(c)

Fig. 10 Physical diagrams of tritium lamp (a) and GaAs (b), and GaAs external quantum efficiency curve (c)

进一步开展了单层氚基同位素电池的组装测试，重点探究增大氚源强度(氚灯数量)对氚基同位素电池电学输出性能的提升效果。

图 11 为实验测试得到的单层氚基同位素电池的 $I-V$ 和 $P-V$ 曲线，表 4 为单层氚基同位素电池的具体电学参数。实验结果表明：随着氚灯数的增多，单层氚基同位素电池的短路电流、开路电压、最大输出功率随之不断增大。这是因为在一定氚灯数量范围内（氚灯尚未完全覆盖半导体光伏组件的换能单元时），随着氚灯数量的增多，会增加半导体光伏组件与氚灯接触的有效面积，从而使半导体光伏组件所吸收到的荧光辐照度变强，即射入半导体光伏组件的荧光光子数目也变多，进而使得单层氚基同位素电池的短路电流、开路电压和最大输出功率均变大。该结果表明增大氚源

强度可以有效提升氚基同位素电池的电学输出。

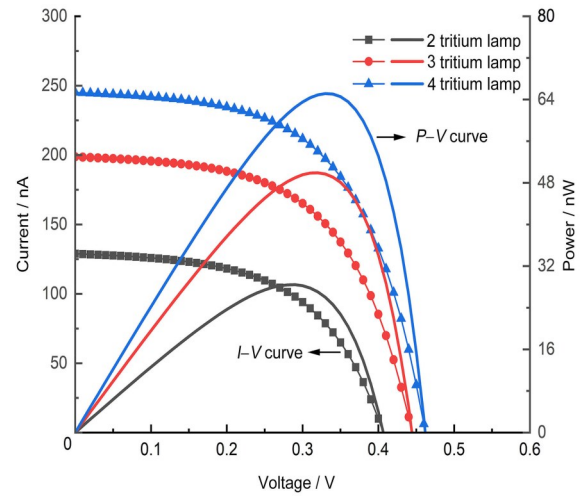


图 11 单层氚基同位素电池的 $I-V$ 和 $P-V$ 曲线
Fig.11 $I-V$ and $P-V$ curves of single-layer tritium-based nuclear battery

表 4 单层氚基同位素电池的电学性能参数

Table 4 Electrical performance parameters of single-layer tritium-based nuclear battery

半导体光伏组件 Semiconductor photo-voltaic modules	氚灯数 Number of tritium lamps	短路电流 I_{sc} / nA Short circuit current	开路电压 V_{oc} / V Open circuit voltage	填充因子 FF Fill factor	最大输出功率 P_{max} / nW Maximum output power
GaAs	2	129.044	0.405	0.544	28.428
	3	198.831	0.445	0.564	49.928
	4	245.228	0.465	0.571	65.149

2.4 叠层氚基同位素电池的组装测试

为进一步探讨氚基同位素电池电学输出性能的提升方法，本研究使用含减反膜的 AlGaInP 半导体光伏组件，开展了叠层构型氚基同位素电池的组装测试。叠层氚基同位素电池的结构模型及实

物如图 12 所示。由于叠层结构氚灯上下各有一半导体光伏组件，故在对叠层氚基同位素电池进行电学性能测试时需考虑上下两个半导体光伏组件的连接方式，即串联方式或是并联方式。本研究重点探讨了采用串、并联叠层构型对氚基同位素电池电学输出性能的提升效果。

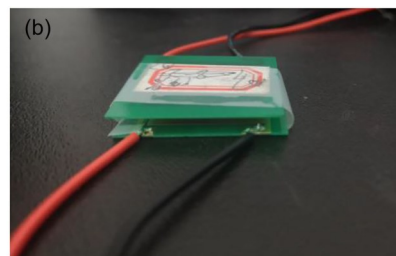
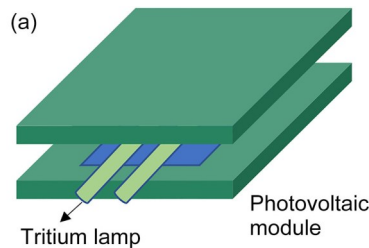


图 12 叠层氚基同位素电池的结构模型(a)及实物图(b)
Fig.12 Structural model (a) and physical diagram (b) of stacked tritium-based nuclear battery

图 13 为实验测试得到的串、并联叠层与上、下单层氚基同位素电池的 $I-V$ 、 $P-V$ 曲线。表 5 为串、并联叠层与上、下单层氚基同位素电池的具体电学参数。实验测试结果表明：上、下单层氚基同位素电池串联后，电池的开路电压、最大输

出功率得到了提升；并联后，电池的短路电流、最大输出功率得到了提升。但与电学串、并联规律不一致的是串联叠层氚基同位素电池的开路电压并非上、下单层开路电压之和以及并联叠层氚基同位素电池的短路电流并非上、下单层短路电

流之和，这是因为上、下单层半导体光伏组件的换能单元本身具有一定的差异性^[14]。通过对比单层、叠层氚基同位素电池的电学输出可知，采用

串、并联叠层结构对于提高氚基同位素电池的输出性能是可行的。

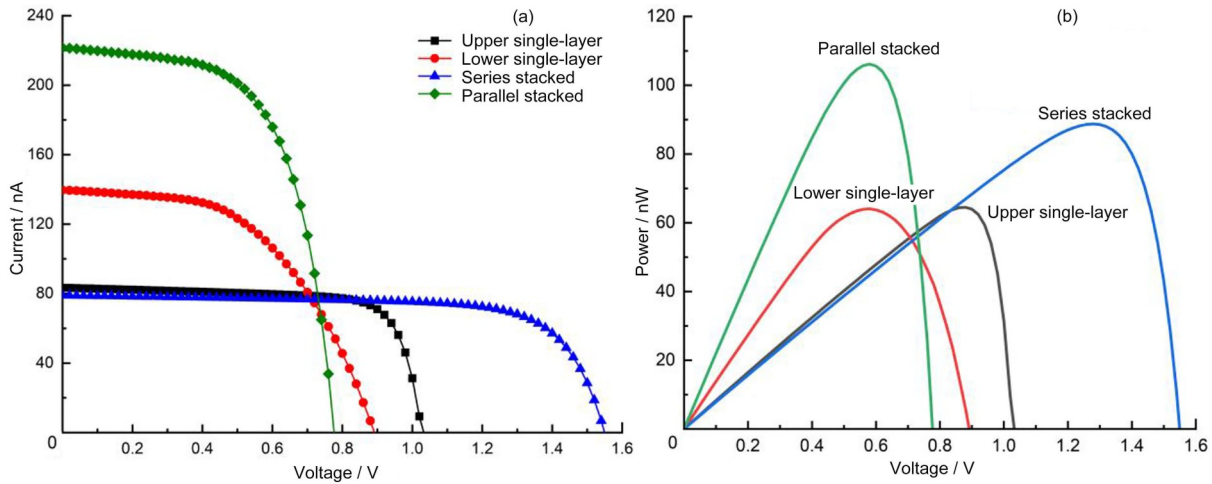


图 13 串、并联叠层与上、下单层氚基同位素电池的 $I-V$ (a) 和 $P-V$ (b) 曲线

Fig. 13 $I-V$ (a) and $P-V$ (b) curves of series, parallel stacked and upper, lower single-layer tritium-based nuclear battery

表 5 串、并联叠层与上、下单层氚基同位素电池的电学性能参数

Table 5 Electrical performance parameters of series, parallel stacked and upper, lower single-layer tritium-based nuclear battery

电池结构方案 Battery Structure Solutions	短路电流 I_{sc} / nA Short circuit current	开路电压 V_{oc} / V Open circuit voltage	填充因子 FF Fill factor	最大输出功率 P_{max} / nW Maximum output power
上层 Upper single layer	83.404	1.025	0.793	64.491
下层 Lower single layer	139.796	0.895	0.512	64.048
串联叠层 Tandem Stacking	79.020	1.550	0.724	88.735
并联叠层 Parallel Stacking	221.787	0.775	0.617	106.138

3 结论

选取 Si、SiC、GaAs 三种半导体作为换能单元，构建辐致伏特效应氚基同位素电池模型，开展了氚基同位素电池的电学性能参数计算，得到了基于不同半导体的辐致伏特效应氚基同位素电池的最佳电学输出性能。研究表明：当 Si、SiC、GaAs 厚度为 3.8 μm 、2.2 μm 、1.7 μm 时，基于此种半导体的辐致伏特效应氚基同位素电池的短路电流、开路电压、填充因子、最大输出功率、装置能量转换效率、总能量转换效率达到最大，分别为 24.928 nA、10.827 nA、17.514 nA、0.359 V、2.118 V、0.650 V、0.753、0.935、0.837、6.741 nW、21.430 nW、9.533 nW、0.414%、1.315%、0.585%、0.034%、0.108%、0.048%。开展了辐致光伏效应氚基同位素电池的蒙特卡罗模拟研究，着重探讨了 ZnS : Cu 荧光层中的荧光输运过程，并得到了辐

致光伏效应氚基同位素电池电学性能参数的输出规律。结果表明，当 ZnS : Cu 荧光层厚度为 1 μm 时，ZnS : Cu 荧光层外表面出射的荧光辐照度最大，可达 8.698 nW；且在此厚度下，ZnS : Cu 荧光层外表面出射荧光作用于半导体光伏组件所产生的短路电流、开路电压、填充因子、最大输出功率和总能量转换效率最大，其中基于 Si 光伏组件的氚基同位素电池计算得到的结果分别为 0.549 nA、0.168 V、0.603、0.056 nW 和 0.003%。同时，开展了单层、叠层氚基同位素电池的组装测试，探讨了氚基同位素电池电学性能提升方法，研究发现采用增加氚源强度（氚灯数量）以及串、并联叠层构型的方式，可以实现氚基同位素电池的最大输出功率等电学输出性能参数有效提升，其中并联叠层的最大输出功率可达到 106.138 nW，相比于单层构型增幅超过 64%。

作者贡献声明 应红、施海宁负责本文工作中的文献查阅、分析，为文章提供了相关素材来源；梁冬冬负责模拟计算、实验测试与总结；许志恒完成工作梳理、分析以及论文初稿写作；龚频、汤晓斌对文章进行了统筹修改和指导，并对文章的撰写与修改提供了积极的建议。全体作者均已阅读并同意最终的文本。

参考文献

- 邹宇, 黄宁康. 伏特效应放射性同位素电池的原理和进展[J]. 核技术, 2006, **29**(6): 432-437. DOI: 10.3321/j.issn: 0253-3219.2006.06.007.
ZOU Yu, HUANG Ningkang. Basic principles and developments of the radioisotope powered voltaic batteries[J]. Nuclear Techniques, 2006, **29**(6): 432-437. DOI: 10.3321/j.issn: 0253-3219.2006.06.007.
- 周毅, 张世旭, 李公平. 放射性同位素电池的研究进展[J]. 科学通报, 2017, **62**(17): 1831-1845. DOI: 10.1360/N972016-00793.
ZHOU Yi, ZHANG Shixu, LI Gongping. A review of radioisotope batteries[J]. Chinese Science Bulletin, 2017, **62**(17): 1831-1845. DOI: 10.1360/N972016-00793.
- Li H, Liu Y B, Hu R, *et al.* Simulations about self-absorption of tritium in titanium tritide and the energy deposition in a silicon Schottky barrier diode[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2012, **70**(11): 2559-2563. DOI: 10.1016/j.apradiso.2012.07.012.
- Russo J, Litz M, Ray W, *et al.* Development of tritiated nitroxide for nuclear battery[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2017, **125**: 66-73. DOI: 10.1016/j.apradiso.2017.04.013.
- Russo J, Litz M, Ray W, *et al.* Demonstration of a tritiated nitroxide nuclear battery[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2019, **144**: 93-103. DOI: 10.1016/j.apradiso.2018.10.012.
- Russo J, Litz M S, William Ray I I, *et al.* Planar and textured surface optimization for a tritium-based betavoltaic nuclear battery[J]. International Journal of Energy Research, 2019, **43**(9): 4370-4389. DOI: 10.1002/er.4563.
- 吴健, 雷家荣, 刘文科. 氚光源及其研究进展[J]. 同位素, 2012, **25**(1): 1-7.
WU Jian, LEI Jiarong, LIU Wenke. Overview of light sources powered by tritium[J]. Journal of Isotopes, 2012, **25**(1): 1-7.
- 洪亮. β 辐射光伏效应同位素电池的设计、制备和温度影响研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.
HONG Liang. Design, preparation and temperature effect of β -radiation photovoltaic isotope battery[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015.
- Wrbanek J D, Wrbanek S Y, Fralick G C. Micro-fabricated solid-state radiation detectors for active personal dosimetry[Z]. NASA/TM-2007-214674, 2007: 1-17.
- ICRP. Radionuclide transformations - energy and intensity of emissions[M]. London: PERGAMON PRESS LTD, 1983.
- Klein C A. Bandgap dependence and related features of radiation ionization energies in semiconductors[J]. Journal of Applied Physics, 1968, **39**(4): 2029-2038. DOI: 10.1063/1.1656484.
- Green M A. Solar cells: operating principles, technology, and system applications[M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1982.
- 刘玉敏. β 辐射伏特效应微型核电池的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2018.
LIU Yumin. Study on β radiation volt effect micro-nuclear battery[D]. Changchun: Jilin University, 2018.
- 刘云鹏. β 辐射伏特效应同位素电池的设计、制备及环境因素影响研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
LIU Yunpeng. Design, fabrication and environmental factors of beta radiation volt effect isotope battery[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014.