

研究堆慢正电子源构建中的关键机理问题

王冠博 李润东 杨鑫 曹超 张之华

Key physics mechanism of the research reactor based slow positron source

Wang Guan-Bo Li Run-Dong Yang Xin Cao Chao Zhang Zhi-Hua

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 66, 082802 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.082802

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.082802>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I8>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

超快电子衍射技术及其应用

Ultrafast electron diffraction technique and its applications

物理学报.2015, 64(3): 034101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.034101>

多模式离子推力器栅极系统三维粒子模拟仿真

Three-dimensional particle in cell simulation of multi-mode ion thruster optics system

物理学报.2014, 63(18): 182901 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.182901>

单路脉冲功率真空装置的三维数值模拟研究

Three-dimensional numerical simulation of the single-channel pulsed-power vacuum device

物理学报.2013, 62(19): 192901 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.192901>

带螺旋支撑杆的同轴磁绝缘传输线三维数值模拟的实现

The implementation of the three-dimensional numerical simulation of the coaxial magnetically insulated transmission line with helical inductor

物理学报.2012, 61(16): 162901 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.162901>

磁绝缘传输线中心汇流区电子能量沉积及温度变化的数值模拟研究

The numerical simulation of the electronic energy deposition and temperature variation in post-hole convolute of magnetically insulated transmission lines

物理学报.2012, 61(16): 162902 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.162902>

研究堆慢正电子源构建中的关键机理问题*

王冠博 李润东† 杨鑫 曹超 张之华

(中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 绵阳 621900)

(2016年11月1日收到; 2017年1月22日收到修改稿)

研究堆慢正电子源是获得高强度慢正电子束流的有效方式, 国际上已建成多座装置并获得广泛应用. 与常规同位素慢正电子源相比, 研究堆慢正电子源的物理过程复杂, 影响末端束流强度的因素众多, 对其进行深入研究与合理建模是未来在中国绵阳研究堆 (CMRR) 上构建慢正电子源的基础. 本文厘清了研究堆慢正电子产生的关键过程与物理机理, 建立了预测末端正电子束流强度的理论模型, 找到了影响其末端强度的主要物理量: 快正电子体产生率、慢化体有效表面积、慢化体扩散距离、慢正电子从表面被提取到靶环末端的效率、及束流系统提取效率. 用多种实验结果对模型进行校验, 包括多个同位素慢正电子源的效率测量值, 以及 PULSTAR 研究堆慢正电子源测量结果, 充分验证了模型正确性. 根据模型对各物理量的影响因素进行了分析, 找到了需着重关注的影响因素, 对未来源/靶结构的设计给出建议.

关键词: 研究堆慢正电子源, 机理与模型, 慢正电子束流强度**PACS:** 28.50.Dr, 41.75.Fr, 29.27.-a**DOI:** 10.7498/aps.66.082802

1 引言

慢正电子对缺陷及原子尺度结构极为敏感, 能探测距离表面几个原子层厚度内的信息, 是材料近表面缺陷研究的有力工具. 在研究堆上构建中子诱发的慢正电子源是获得高强度慢正电子束的有效途径, 末端强度可达到 10^8 — 10^9 e^+/s ^[1]. 很高的束流强度使得后端谱仪性能显著提升, 尤其是正电子扫描显微镜 (SPM)、二维角关联正电子湮没技术 (2D-ACAR) 这类需要高积分正电子注入量的谱仪系统. 假如 ^{22}Na 正电子源 SPM 进行一次 2 维 (2D) 扫描需要几天时间, 使用研究堆正电子源只需要 10 min 就可以得到同样测量精度. 目前, 国外已经构建了五个研究堆中子源: FRM-II 堆的 NEPOMUC 源、北卡罗来纳大学研究堆的 PULSTAR 源、Delft 堆的 POSH 源、德克萨斯大学 TRIGA-II 堆的 TIPS、京都大学 KUR 研究堆的慢正电子源. 在 Petten 的高通量堆 HFR 上, 研究人员正在尝试构建超过 10^{10} e^+/s 的慢正电子源 HIPOS. 这些装置

的简要信息在表 1 中给出, 其中 NEPOMUC 装置是当前世界上最强的慢正电子源.

极高的强度使得后端多种谱仪的构建成为可能. 在 NEPOMUC 上^[5,6], 已经有正电子湮没诱发俄歇电子谱仪 (PAES)、符合多普勒展宽谱仪 (CDBS)、脉冲慢正电子束装置 (PLEPS) 多台谱仪投入使用, 另外 SPM, 2D-ACAR 两台谱仪正在建造中. 在 PULSTAR 堆上, 建成了正电子湮没寿命谱仪 (PAS) 谱仪^[4]. 在 POSH 正电子源上, 建成了 2D-ACAR 谱仪^[7]. 这些谱仪装置在表面物理学研究中发挥了巨大作用, 取得了众多卓越成果. 例如 Eijt 等^[8] 在荷兰 Delft 堆的 POSH 正电子源上, 用 2D-ACAR 装置对 CdSe 纳米晶体表面电子结构进行了研究测量. Hugenschmidt 等^[9] 则在 NEPOMUC 源上, 对 Al 及铝合金的表面缺陷进行了 CDBS 扫描. Hengstler-Eger 等^[10] 使用了 NEPOMUC 源的 DBS 谱仪对不同温度下 AREVA's M5 铝合金重离子辐照后位错环演化行为进行了测量研究.

* 国家自然科学基金 (批准号: 11405151, 11475152) 和中国工程物理研究院中子物理实验室基金 (批准号: 2014BC02) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: amdom@sohu.com

表1 国际上现有研究堆慢正电子源概况
Table 1. Research reactor based slow positron sources.

正电子源/研究堆	机构	堆功率/MW	强度 e^+ /s	反应	状况
NEPOMUC/FRM-II	德国慕尼黑技术大学	20 [2]	1×10^9 (实验)	镅	运行 [3]
			3×10^9 (升级)	铂/铂	1997 至今
PULSTAR	美国北卡罗来纳大学	1	10^9 (最大)	镅	运行 [4]
			5×10^8 (常规)	钨/钨	2005 至今
POSH/Delft	荷兰 Delft 技术大学	2	7×10^7	铜/钨	1996
TIPS/TRIGA-II	美国德克萨斯大学	1	10^6	铜	1999, 2006
KUR	日本京都大学	1	1.4×10^6	钨	2014 建成

构建研究堆慢正电子源意义巨大,但是受制于研究堆建设应用情况,国内慢正电子装置多基于 ^{22}Na 同位素源,末端强度不高.中国科学技术大学近代物理系于1990年建成了我国第一台慢正电子束装置,采用20 mCi的 ^{22}Na 作为正电子源,获得慢正电子束强度约为 $10^5 e^+$ /s.2006年武汉大学[11,12]建成了一台具有高慢化效率和正电子寿命测量功能的正电子束装置,使用50 mCi的 ^{22}Na 为正电子源,固体氘作慢化体,得到 $5 \times 10^6 e^+$ /s的慢正电子束.中国科学院高能物理研究所2003年建成了一台加速器慢正电子束装置IHEP,采用北京正负电子对撞机电子直线加速器电子打靶的方式作为初级正电子源,经过准直后慢正电子束流强度可以达到 $2.5 \times 10^5 e^+$ /s[13,14].并计划在对撞机二期工程改造(BEPC II)后,将慢正电子束流强度提高到 $10^8 e^+$ /s[14],但此工作未见后续报道.

随着CMRR堆的正式运行,堆大厅有可供安装正电子转换装置的孔道与空间,具备了建设高强度正电源的条件.不过构建研究堆慢正电子源挑战巨大、历时漫长.以NEPOMUC源为例,从1997年开始基于FRM的高强度正电子束的原型验证装置的研究[15,16],构建了 $2 \times 10^8 e^+$ /s慢正电子束.FRM关闭后,2002年开始研究人员将精力投入到新FRM-II堆的正电子源构建上[17],新的源用铂代替钨作为转换靶和慢化体.2008年[18],在NEPOMUC束流管内安装了新的堆内 γ 转换器和铂慢化体,使得1 keV能量的束流强度达到 $9 \times 10^8 e^+$ /s,并持续稳定运行.2013年后又对NEPOMUC进行了升级[3,5],用 ^{113}Cd 富集度80%的镅使其寿命大大延长,将镅位置向堆芯推进5 cm,慢正电子束强度达到 $3 \times 10^9 e^+$ /s.

在工程构建之前,需要首先厘清研究堆慢正电

子源的物理机理,并建立正确的预测模型,这是所有工作的基础.不同于同位素慢正电子源,研究堆慢正电子源的初始正电子来自高能 γ 光子与高 Z 物质发生电子对效应,产生体同时也是快正电子的慢化体.整个物理过程更为复杂,需要细致考虑各个步骤,这正是本文的关注点.国际上已有一些模型描述该过程[19,20],不过一些因素并未充分考虑,多数以同位素源为对象[21].本文首先阐述研究堆慢正电子源的基本结构与产生过程,推导并给出了整个过程的物理模型;计算并分析了慢正电子从表面被提取到靶环末端的效率这一特有参数;用同位素慢正电子源与PULSTAR研究堆源从多个方面校验了物理模型与重要参数;最后对各个参数的影响进行了讨论并对未来国内构建研究堆慢正电子源给出了建议.

2 研究堆慢正电子源的基本结构、产生过程与物理模型

2.1 基本结构与物理过程

获得慢正电子源的方法有两种:用放射性核素的 β^+ 衰变,如常用的 ^{22}Na 源,产生最高能量0.545 MeV连续能谱分布的快正电子,然后用慢化体进行慢化;另一种是通过能量大于1.02 MeV的 γ 光子与高 Z 物质发生电子对效应产生快正电子,用慢化体进行慢化.基于研究堆或加速器慢的慢正电子源属于后一种方式.研究堆慢正电子源包括两部分:慢正电子产生部分与慢正电子提取引出部分.慢正电子产生部分由镅吸收体、周期排列的钨或铂靶组成;慢正电子提取引出部分由提取电透镜、螺线管系统组成.

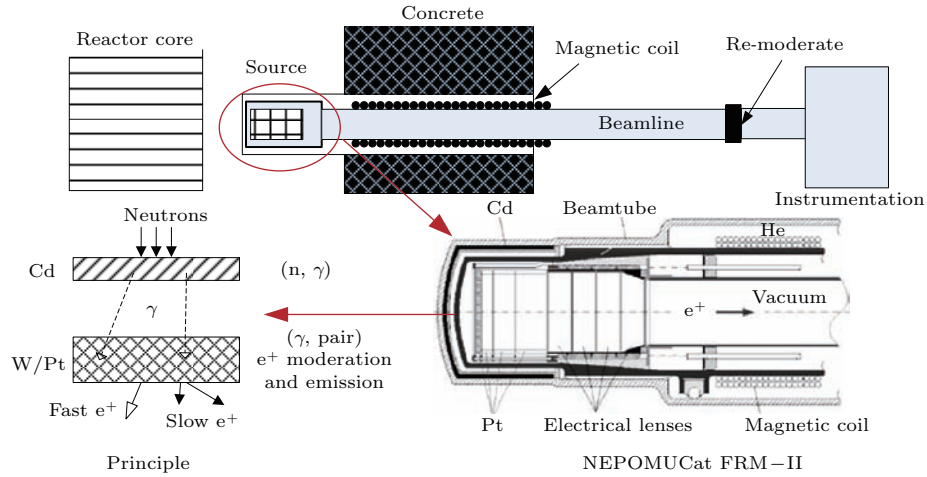


图1 研究堆慢正电子源原理图
Fig. 1. Scheme of Reactor based slow positron source.

装置一般安装在研究堆活性区外侧。包覆在前端面与钨靶外侧面的镉用以吸收中子并产生高强度、高能量的瞬发 γ 光子，镉每吸收一个中子会释放2.37个能量大于1 MeV的光子。钨或铂靶既是快正电子的产生体，又是快正电子的慢化体： (γ, pair) 反应产生的初始快正电子平均能量约800 keV，经过慢化后形成慢正电子并在靶体表面发射。慢正电子在经过若干次碰撞-再发射后，有一部分可以到达靶出口位置进入电透镜。提取电透镜一般由3到5个电极组成，其作用是对整个范围电子实现有效聚焦与提取。螺线管将电极提取出来的正电子有效传输到末端。基本过程和原理如图1所示。

2.2 同位素慢正电子源预测模型

透射型同位素慢正电子源结构简单、易于测量、实验结果众多，慢化物理过程本质相同，对其讨论有助于将研究堆慢正电子源产生的物理本质从复杂情况中剥离出来，厘清物理过程，验证基本模型的正确性。Seeger和Britton^[22]对正电子慢化与扩散的理论进行了详细的论述与推导，这里仅对关键过程进行梳理。

对各向同性发射的快正电子，如²²Na，假设快正电子束入射强度为 I_0 ，射入深度 x 后的强度变为 $I(x)$ ，可以用下式描述其强度沿垂直入射表面方向的衰减^[23]：

$$\frac{I(x)}{I_0} = \exp(-\alpha_+ x), \quad \alpha_+ = \frac{17\rho}{E_{\max}^{1.43}}, \quad (1)$$

其中 α_+ 是衰减系数， ρ 为材料密度， E_{\max} 为正电子最大能量(单位为MeV)。认为在厚度为 dx 区域内，

慢正电子的产生量等于入射束流在该区域的衰减量，因而对厚度为 D 的慢化体，在其表面 r_0 区域正好慢化并能逃逸出表面的慢正电子强度 Em_{th} 为

$$\begin{aligned} Em_{\text{th}} &= \left. \frac{dI(x)}{dx} \right|_{x=D} \cdot r_0 \varepsilon_{e^+} p_{\text{mod}} \\ &= \alpha_+ \exp(-\alpha_+ D) \cdot r_0 \varepsilon_{e^+} p_{\text{mod}}, \quad (2) \end{aligned}$$

式中 r_0 是慢正电子穿行距离， $r_0 = 0.14L_+$ ，其中 L_+ 是慢正电子扩散距离，对退火很好的单晶钨， $L_+ = 100 \text{ nm}$ ； ε_{e^+} 是慢正电子在 r_0 区域内均匀产生时的逃出概率，取为0.25； p_{mod} 是慢正电子穿过表面考虑正电子素、表面复合后的比例，取为0.4^[24]。这样，入射快正电子的慢化效率 ξ 可表示为

$$\begin{aligned} \xi &= \frac{Em_{\text{th}}}{I_0} \\ &= \alpha_+ \cdot \exp(-\alpha_+ D) \cdot r_0 \cdot \varepsilon_{e^+} \cdot p_{\text{mod}}. \quad (3) \end{aligned}$$

2.3 研究堆慢正电子源强度预测模型

区别于同位素慢正电子源，研究堆慢正电子产生过程涉及中子吸收、 γ 电子对反应、正电子慢化与发射多个物理行为，此外还需考虑正电子从靶表面发射到最终提取到末端整个过程中的束流输运问题。我们定量给出后端出口位置慢正电子强度 I ，如下式：

$$I = Em_{\text{th}} \times \eta_1 \times \eta_2, \quad (4)$$

其中 η_1 是慢正电子从表面被提取到靶环末端的效率； η_2 是束流系统提取效率； Em_{th} 是从钨箔表面发射的慢正电子强度，由下式决定：

$$Em_{th} = A \cdot P \cdot r_0 \cdot \varepsilon_{e^+} \cdot p_{mod}, \quad (5)$$

式中, A 是靶的有效表面积; P 是单位体积快正电子产生率; 其他符号含义同前. 下面简要给出 (5) 式的推导过程 (如图 2 所示).

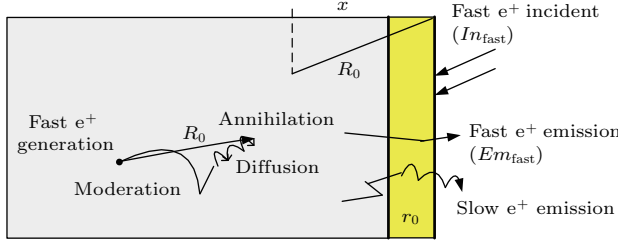


图 2 (网刊彩色) 研究堆慢正电子源慢化体原理

Fig. 2. (color online) Principle of research reactor based slow positron moderator.

假设慢正电子单位体积产生率为 P' , 左侧产生的快正电子在黄色区域 r_0 单位体积内恰好被慢化成为慢正电子的速率为

$$P'_{left} = \frac{\int_0^{R_0} A \cdot P \cdot \frac{\left(\frac{x}{R_0} - \frac{x-r_0}{R_0}\right)}{2} dx}{A \cdot r_0} = \frac{P}{2}, \quad (6)$$

其中, x 是快正电子产生位置距离右边界的深度, 积分上限取 R_0 , R_0 是快正电子快正电子射程 (从产生到湮没的直线距离). 由于右侧 (入射快正电子) 产生的快正电子在该黄色区域内慢正电子产生率与左侧相同, 故

$$P' = P'_{left} + P'_{right} = P. \quad (7)$$

分析从右表面逃逸的速率: 认为慢正电子在临近表面的 r_0 区域内时才会扩散出表面, 橙色区域内慢正电子均匀产生. 这样

$$\begin{aligned} Em_{th} &= \int_0^{r_0} AP' \cdot \varepsilon_{e^+} p_{mod} \left(\frac{1-x/r_0}{2}\right) \cdot dx \\ &= A \cdot P \cdot r_0 \cdot \varepsilon_{e^+} \cdot p_{mod} \end{aligned} \quad (8)$$

于是得证. 在推导中采用了几个假设 (物理量).

1) 对于黄色区域从左侧入射的快正电子等于从右侧入射的快正电子. 这是因为研究堆慢正电子源由多个靶 (环) 并列放置组成, 高度方向较长, 快正电子即使穿过一个钨箔, 也最终会被其他钨箔吸收.

2) 快正电子均匀产生. 由于沿厚度向钨箔累积厚度不超过 2 mm, 高能光子穿过靶后衰减很少.

且钨将整个钨靶区域全部包覆, 产生的高能光子在钨靶区域分布虽不均匀, 但不影响积分结果.

3) 慢正电子穿行距离 r_0 . 扩散长度 L_+ 与慢正电子产生地点到被吸收点穿行距离 r_0 并非一个概念, 对于平板型源 $r_0 = \sqrt{2} \cdot L_+$. 简要推导如下: 对于一个强度为 S 的平面源 (各向同性), 根据扩散理论, 距离 r 处慢正电子通量为

$$\phi(r) = \frac{S \cdot L_+ \cdot e^{-r/L_+}}{2 \cdot D_+}. \quad (9)$$

在其消失位置取厚度 dr 的平板薄层, 则在此区域消失率为 $-L_+^{-1} \cdot \phi(r) \cdot dr$, 所以 r 的二次距 r_0^2 可表示为

$$\begin{aligned} r_0^2 &= \frac{\int_0^\infty r^2 \cdot \frac{\phi(r)}{L_+} dr}{\frac{\phi(r)}{L_+} dr} \\ &= 2L_+^2 \Rightarrow r_0 = \sqrt{2} \cdot L_+. \end{aligned} \quad (10)$$

2.4 研究堆慢正电子源的慢化效率

比对同位素源, 定义研究堆慢正电子源的慢化效率 ξ 为慢化体表面放出的慢正电子强度与产生快正电子强度 (表面入射强度 In_{fast} 与出射强度 Em_{fast} 和) 之比:

$$\xi = \frac{Em_{th}}{In_{fast} + Em_{fast}}. \quad (11)$$

假设产生的快正电子射程为 R_0 , 由于研究堆慢正电子源靶是周期排列的钨/铂环, 可以认为积分上限即为 R_0 , 故

$$\begin{aligned} Em_{fast} &= \int_0^{R_0} A \cdot P \cdot dx \cdot \left(\frac{1-x/R_0}{2}\right) \\ &= \frac{A \cdot P \cdot R_0}{4} = In_{fast}. \end{aligned} \quad (12)$$

于是根据定义, 可以得到慢化体效率 ξ 的表达式为

$$\xi = 2 \cdot \frac{r_0}{R_0} \cdot \varepsilon_{e^+} \cdot p_{mod}. \quad (13)$$

对于研究堆慢正电子源的钨环, $R_0 \approx 300 \mu\text{m}$, 这样 $L_+ = 100 \text{ nm}$ 时, $\xi \approx 9 \times 10^{-5}$. 这与 ^{22}Na 本质相同. 在 ^{22}Na 中 $\alpha_+ = 0.078 \mu\text{m}^{-1}$, 故钨对 ^{22}Na 的慢化效率要比钨高一个量级.

3 慢正电子从表面被提取到靶环末端的效率 η_1

3.1 PULSTAR 源的效率 η_1 分析

效率 η_1 是研究堆慢正电子源特有关键问题. 慢正电子从慢化体表面以 2 eV 左右的初始能量各向同性发射后, 在电场作用下, 可飞行到靶末端. 不过由于电场分布、靶尺寸限制等原因, 仅有部分正电子能够到达末端, 不同的结构设计的 η_1 值差异明显. 本节采用 SIMION 8.1 软件对 η_1 进行模拟分析.

对 PULSTAR 源建模: 2 个 $\phi 10 \times 25.4$ mm 钨环串联排布, 电压 60 V, 末端为栅网; 慢正电子以 2.8 eV 的初始能量从内表面均匀发射, 初始角度各向同性; 慢正电子碰撞到内表面时再发射概率按照 58% 考虑 [25], 再发射的角度各向同性, 通过

LUA 语言编写脚本程序实现随机抽样. 计算得到 PULSTAR 的 $\eta_1 = 0.26$, 与文献 [19] 中给出的结果基本一致.

3.2 主要影响因素讨论

我们不仅关心 η_1 的具体值, 更关心影响 η_1 的主要因素: 尺寸 (深度-直径比, $b:s$)、提取电压和靶电极数. 本质上发射效率是这三者的“三维”函数, 不过采用“分离变量”法逐一讨论更为便捷. 下面的讨论基于前述 PULSTAR 模型.

$b:s$ 的影响: 对于 $b:s$ 恒定的靶, 尺寸变化不影响 η_1 . 固定钨环电势 60 V, 由图 3 (a) 可以看到, $b:s$ 越大 η_1 越低, 不过 η_1 与有效面积之积 ($A \cdot \eta_1$) 在 $b:s \approx 3$ 时达到最大, 与文献 [26] 实验结果一致. 这是因为提取依靠电势梯度, $b:s$ 越小, 电势变化在出口处越集中, 如图 4 所示, 靠近底部的慢正电子就越难以逃出.

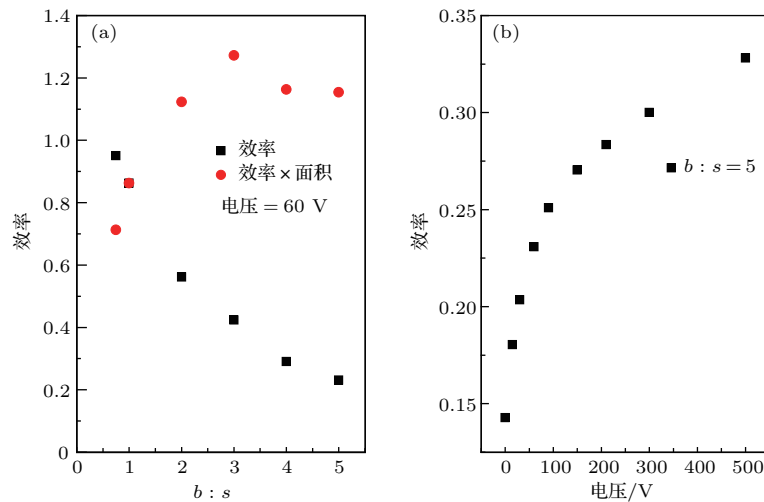


图 3 (a) η_1 , $A \cdot \eta_1$ 与 $b:s$ 的关系, 钨管电势 60 V 末端栅网 0 V; (b) $b:s = 5$ 时电压与效率 η_1 的关系
Fig. 3. (a) η_1 and $A \cdot \eta_1$ vs. the $b:s$ ratio for the constant extracting voltage of 60 V and grid voltage 0 V; (b) extracting efficiency vs. extracting voltage for the constant $b:s$ ratio.

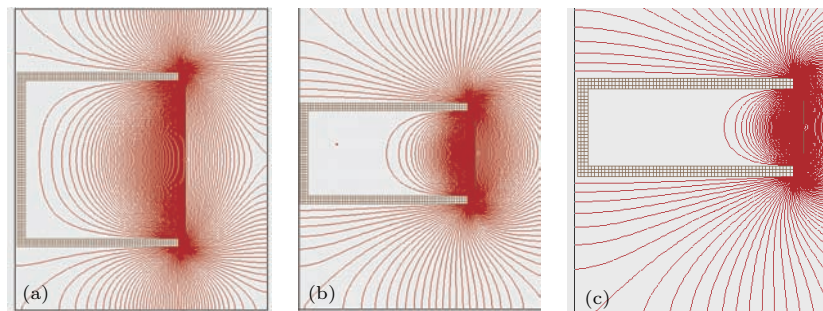


图 4 钨环电势 60 V 出口栅网电势 0 V 时不同 $b:s$ 情况的等势线分布 (a) $b:s = 1$; (b) $b:s = 2$; (c) $b:s = 3$
Fig. 4. Potential contours in the tungsten tube with tungsten tube voltage of 60 V and the exit grid 0 V for different $b:s$ ratio: (a) $b:s = 1$; (b) $b:s = 2$; (c) $b:s = 3$.

提取电压的影响: 恒定 $b : s = 5$, 改变栅网与靶的电势差. 可以看到, 提取电压从0增加到30 V后效率明显提升, 不过当电压高于100 V以后, 增加效果逐渐趋缓, 如图3(b)所示.

靶电极数量: 所有环总长恒定为51 mm, 末端栅网电势为0, 最高电势为120 V, 将其分为2个、3个、4个、8个电极, 电势递减, 增加电极有利于提取, 如图5. 这是因为更多的电极使得整个钨环内等势线分布均匀, 如图6, 正电子在这样的从后到

前近乎均匀的加速电场中更易于提出. 不过考虑到电极数量增加导致技术难度增加, 这对构建稳定可靠的系统并不可取.

靶末端正电子束流的横向发散也是一个重要考虑因素. 图7给出了 $b : s$ 分别为5 : 1(图7(a), (b))和1 : 1(图7(c), (d))的两种情况. 可以看到两种情况下都有明显的横向发散, 但平均值不超过 $\pm 20^\circ$.

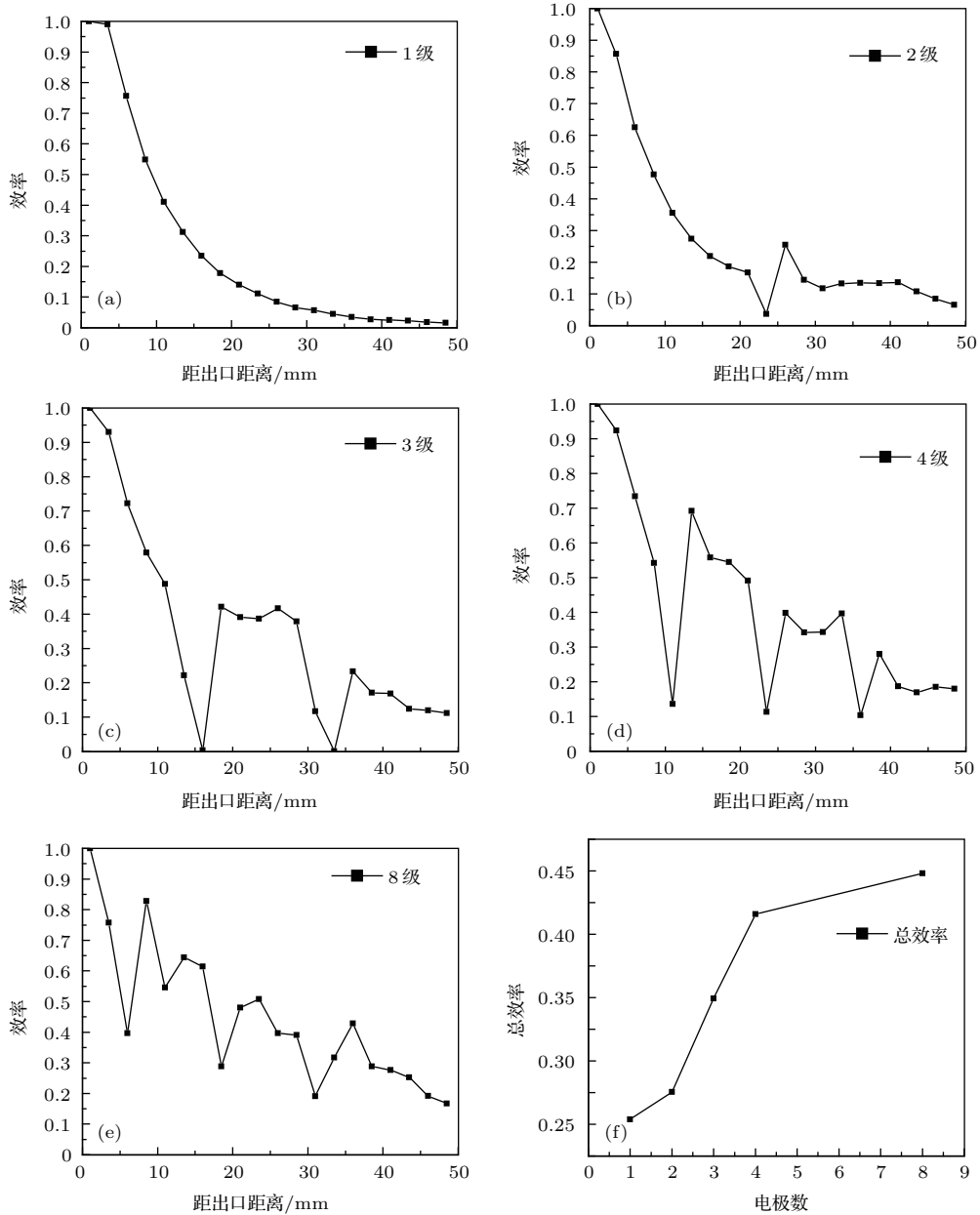


图5 不同电极布置各位置发射的正电子在栅网处的存活概率 (a) 1级; (b) 2级; (c) 3级; (d) 4级; (e) 8级; (f) 电极数与效率 η_1 的关系

Fig. 5. The survival probability as a function of starting distances from the exit grid for various number of banks: (a) 1; (b) 2; (c) 3; (d) 4; (e) 8; (f) efficiency η_1 vs. bank number.

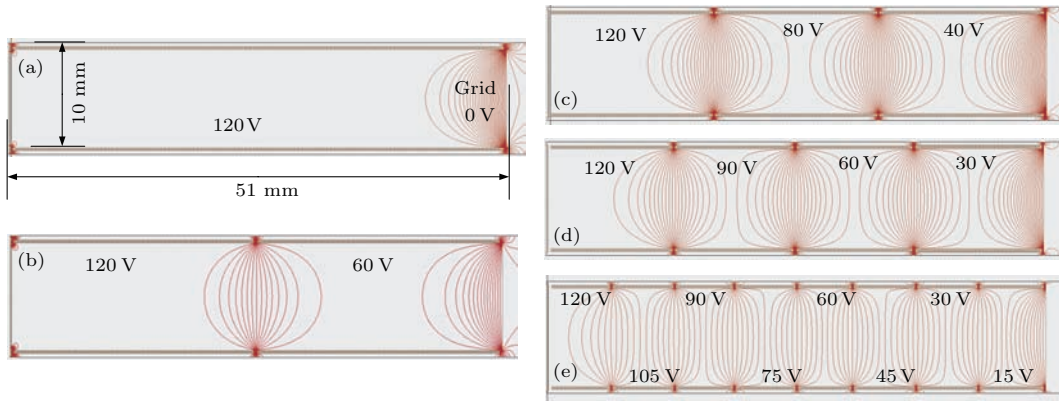


图6 不同电极布置内部的等势线 (a) 1级; (b) 2级; (c) 3级; (d) 4级; (e) 8级
Fig. 6. Potential contours for different electrode distribution: (a) 1; (b) 2; (c) 3; (d) 4; (e) 8.

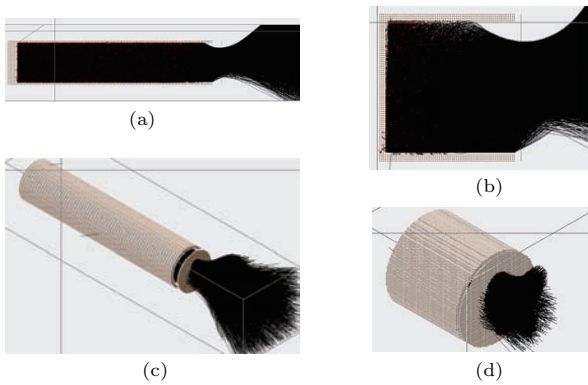


图7 出口处束流形状 (a) $b : s = 5$ 剖面图; (b) $b : s = 5$ 三维视图; (c) $b : s = 1$ 剖面图; (d) $b : s = 1$ 三维视图
Fig. 7. Positron flying direction and position out the exit grid: (a) Cutaway view for $b : s = 5$; (b) 3D view for $b : s = 5$; (c) cutaway view for $b : s = 1$; (d) 3D view for $b : s = 1$.

4 物理模型验证

4.1 同位素慢正电子源实例验证

同位素慢正电子源问题过程简单, 物理规律明确, 实验结果众多, 对其分析验证有益于验证2.2节中基本模型、基本参数的正确性, 也有助于分析对慢化效率的影响. 慢化效率结果列在表2中, 计算时, 单晶钨2100 °C以上退火 L_+ 取100 nm, 1200 °C退火 L_+ 取50 nm, 多晶钨在相同退火情况下扩散距离减半. 单晶镍在1400 °C退火 L_+ 取100 nm. 衰减系数^[27]取 $\alpha_+ = 17 \cdot \rho / E_{\max}^{1.43} = 0.078 \mu\text{m}^{-1}$.

可以看到, 精确的效率测量并非易事, 即使相同的退火条件, 不同实验者测得的结果差异也很大. 不过实验结果可以说明: (3)式基本正确; ε_{e^+} ,

p_{mod} 的取值是合理的; 单晶的性能好于多晶; 退火对结果影响很大.

4.2 PULSTAR研究堆慢正电子源实例验证

用PLUSTAR测量结果^[19,34]验证理论模型的正确性. PULSTAR慢正电子源安装在堆上的水平孔道, 正电子源外包壳直径约100 mm, 内径约80 mm, 包含了55个钨管(2100 °C充分退火), 按照六边形排列, 每个管直径为1 cm, 长2.5 cm, 壁厚50 μm , 总的有效面积约为865 cm^2 , 即只考虑钨圈内表面积, 结构如图8所示, 末端束流强度正常运行在 $5 \times 10^8 \text{ e}^+/\text{s}$. 按照文献报道, 来自堆芯大于1 MeV的光子通量 $2.7 \times 10^{12} \text{ p}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$, 能谱较软; 加装0.25 mm的镉后, 由镉的(n, γ)反应产生的1 MeV以上光子通量约 $5.3 \times 10^{12} \text{ p}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$, 能谱很硬.



图8 PULSTAR源环状钨靶/慢化体照片
Fig. 8. Photograph of converter/moderator bank used in the PULSTAR positron source.

按照真实的靶情况建立MCNP模型计算快正电子产生率 P , 由于镉吸收中子产生的 γ 能谱要比堆芯泄露的大于1 MeV的光子硬得多, 因而两部分需单独考虑. 以镉产生的光子能谱与通量为输入条件, 得到快正电子产生率 $P_1 = 2 \times 10^{12} \text{ e}^+/\text{cm}^3$; 以堆芯大于1 MeV的光子能谱与通量为输入条件, 得到快正电子产生率 $P_2 = 3.2 \times 10^{11} \text{ e}^+/\text{cm}^3$; 总的正电子体产生率为两部分之和, 即 $P = P_1 + P_2 = 2.3 \times 10^{12} \text{ e}^+/\text{cm}^3$.

$r_0, \varepsilon_{e^+}, p_{\text{mod}}$ 按照前述值考虑. 于是得到

$$Em_{\text{th}} = 865 \times 2.3 \times 10^{12} \times 140 \times 10^{-7} \times 0.25 \times 0.4 = 2.79 \times 10^9, \quad (14)$$

慢正电子从表面被提取到靶环末端的效率 η_1 取为0.26; 束流系统提取效率 η_2 取为0.8^[19]. 这样即得到末端强度 I 为

$$I = 2.79 \times 10^9 \times 0.26 \times 0.8 = 5.8 \times 10^8. \quad (15)$$

表2 透射同位素慢正电子源效率实验与理论值

Table 2. Experimental and calculation efficiency for transmission mode moderators.

靶与退火条件	厚度/ μm	实验效率	文献	L_+/ nm	计算效率
单晶钨, 1600 °C退火	1	4.20×10^{-4}	[28]	80	8.10×10^{-4}
多晶钨, 1600 °C退火	15	2.80×10^{-4}		40	1.36×10^{-4}
多晶钨, 1600 °C退火	4	3.60×10^{-4}	[29]	40	3.20×10^{-4}
多晶钨, 1600 °C退火	6	2.00×10^{-4}		40	2.74×10^{-4}
单晶钨, 2100 °C退火	1	5.90×10^{-4}		100	1.01×10^{-3}
单晶钨, 2100 °C退火*	1	9.10×10^{-4}		100	1.09×10^{-3}
多晶钨, 2100 °C退火	6	2.50×10^{-4}		50	3.42×10^{-4}
单晶镍, 1400 °C退火	0.3	6.60×10^{-4}	[30]	100	4.99×10^{-4}
单晶镍, 1400 °C退火	0.13	4.90×10^{-4}		100	5.02×10^{-4}
多晶镍, 1400 °C退火	2	2.50×10^{-4}		50	2.35×10^{-4}
多晶镍, 1400 °C退火	5	1.31×10^{-4}		50	2.11×10^{-4}
多晶镍, 1400 °C退火	7	1.25×10^{-4}		50	1.96×10^{-4}
单晶钨, 2000 °C退火不足1 h	1	5.30×10^{-5}	[31]	50	5.06×10^{-4}
多晶钨, 1800 °C退火不足1 h	3	2.30×10^{-4}		25	2.16×10^{-4}
单晶镍, 1000 °C退火	0.3	2.90×10^{-4}		50	2.50×10^{-4}
单晶镍, 1000 °C退火	0.5	6.50×10^{-4}		50	2.48×10^{-4}
单晶镍, 1000 °C退火	0.7	5.50×10^{-4}	[32]	50	2.46×10^{-4}
单晶镍, 1000 °C退火	1.0	4.20×10^{-4}		50	2.43×10^{-4}
单晶镍, 1000 °C退火	1.5	1.60×10^{-4}		50	2.39×10^{-4}
单晶钨, 1800 °C退火	0.1	5.40×10^{-4}		80	8.69×10^{-4}
单晶钨, 1800—2200 °C退火	0.2	8.80×10^{-4}		100	1.08×10^{-3}
单晶钨, 1600—2200 °C退火	0.2	8.30×10^{-4}	[33]	100	1.08×10^{-3}
单晶钨, 1800—2200 °C退火	1.1	8.10×10^{-4}		100	1.00×10^{-3}
单晶钨, 2200—2400 °C退火	1.2	6.20×10^{-4}		100	9.96×10^{-4}
单晶钨, 1600—2200 °C退火	1.2	6.20×10^{-4}		100	9.96×10^{-4}

注: *为反射型慢化体, 其他都是透射型.

Moxom 等^[19]在2007年分析认为末端束流强度为 $(4.1\text{--}8.2)\times 10^8\text{ e}^+/\text{s}^{-1}$, 分别对应50 nm扩散距离与100 nm扩散距离; Hawari 等^[4]在2011年报道慢正电子发射率 $(0.51\text{--}1.10)\times 10^9\text{ e}^+/\text{s}^{-1}$. 可以看到, 该模型很好地预测了PULSTAR的末端慢正电子强度, 与实验测量值以及前人分析结果基本一致.

5 讨论

研究堆的慢正电子源物理过程复杂, 影响因素众多. 末端束流强度 I 可按(4)式、(5)式评估. η_2 与一般束流提取系统类似, 通过合理设计可以达到90%以上, 本文不做讨论. 对另外4个因素 P , A , L_+ , η_1 讨论如下.

P 与高能光子场强度有关. 提高中子注量率可以有效提高 P 值, 光子在靶内强度的衰减不必考虑. 镉吸收体对中子场扰动很大, 入射中子注量率难以准确确定, 实验测量值不确定度一般在10%—20%左右.

L_+ 与靶内缺陷有关, 退火影响非常明显. 同位素慢正电子源实验表明, 即使相同靶厚度与类似退火温度, 不同实验者测得的效率差异也存在很大差异, 主要原因应是退火操作差异. 对研究堆慢正电子源, 多个装置均报道了其装置在启动24 h后效率有30%左右的衰减, 主要原因也应是缺陷累积导致 L_+ 的下降.

A 与 η_1 需综合考虑. I 与 A 成正比, PULSTAR采用多钨管排列、NEPOMUC采用底部蜂巢结构侧壁锯齿结构正是为了增加 A . η_1 与靶的设计有关, 受深度-直径比($b:s$)、提取电压、靶电极数影响明显: $b:s$ 越大, 效率越低. 但对于底面积恒定的结构, 增加深度可有效增加面积 A , 综合考虑 $b:s=3:1$ 时 $A\cdot\eta_1$ 最大; 提取电压取越高越好, 不过100 V左右的提取电压已经合适; 尽管增加靶电极有利于提取, 但考虑到技术难度的增加与可靠性的降低, 采用1级结构为佳.

针对未来在CMRR堆上构建慢正电子源, 给出靶结构的设计建议如下: 1) 尽可能使用单晶钨或铂箔材料; 2) 尽量增大表面积 A 并控制靶的深度, 建议 $b:s$ 取3; 3) 靶需要良好的退火操作; 4) 中子吸收体要尽量贴近靶.

预测未来CMRR堆构建慢正电子源的可能强

度. 拟将装置构建在重水箱孔道中, 由于孔道尺寸限制, 靶结构外径无法超过60 mm, 参考PULSTAR的钨环结构, 选用 $\Phi 10\times 30$ mm的钨管, 内部最多可以布置20个环, 有效面积160 cm². 由MCNP计算得到此处放入靶结构后镉产生的高能光子注量率约 $3.3\times 10^{13}\text{ n}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$, 对应快正电子产生率 $P=1.2\times 10^{13}\text{ e}^+/\text{cm}^3\cdot\text{s}$. $b:s=3:1$ 时, $\eta_1=0.4$, $\eta_2=0.8$. 代入(3)式和(4)式可得末端束流约为 $8.5\times 10^8\text{ e}^+/\text{s}$. 需要说明的是, 这只是初步估计, 详细的设计论证尚在进行中.

6 结论

本研究厘清了研究堆慢正电子源的产生过程与物理机理, 建立了末端正电子束流强度的理论模型, 找到了影响其末端强度的主要物理量, 对慢正电子从表面被提取到靶环末端效率 η_1 进行了分析. 选用多组同位素正电子源转换效率测量实验的结果, 验证了基本模型与基础参数的正确性, 计算值与实验值基本符合; 采用PULSTAR慢正电子源验证了整个物理模型, 我们的模型预测末端束流强度为 $5.8\times 10^8\text{ e}^+/\text{s}$, 与实验测量值 $(0.51\text{--}1.1)\times 10^9\text{ e}^+/\text{s}$ 符合得很好. 本文的模型与参数是CMRR堆上构建高强度慢正电子源的理论基础, 可以有效指导未来的靶设计与实验工作.

参考文献

- [1] Golge S, Vlahovic B 2012 *Proceedings of IPAC New Orleans, Louisiana, USA, May 20–25, 2012* p1464
- [2] Hugenschmidt C, Brunner T, Legl S, Mayer J, Piochacz C 2007 *Phys. Status Solidi* **4** 3947
- [3] Hugenschmidt C, Ceeh H, Gigl T, Lippert F 2013 *J. Phys.: Conf. Ser.* **443** 012079
- [4] Hawari A I, Gidley D W, Moxom J, Hathaway A G, Mukherjee S 2011 *J. Phys.: Conf. Ser.* **262** 012024
- [5] Hugenschmidt C, Piochacz C, Reiner M, Schreckenbach K 2012 *New J. Phys.* **14** 778
- [6] Hugenschmidt C 2011 *J. Phys.: Conf. Ser.* **262** 12002
- [7] Falub C V, Eijt S W H, Mijnders P E, Schut H, van Veen A 2002 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A* **488** 478
- [8] Eijt S W H, van Veen A, Schut H, Mijnders P E, Denison A B 2006 *Nat. Mater.* **5** 23
- [9] Hugenschmidt C, Qi N, Stadlbauer M, Schreckenbach K 2009 *Phys. Rev. B* **80** 308
- [10] Hengstler-Eger R M, Baldo P, Beck L, Dorner J, Ertl K 2012 *J. Nucl. Mater.* **423** 170

- [11] Wu Y C, Hu Y, Wang S J 2008 *Prog. Phys.* **28** 83 (in Chinese) [吴奕初, 胡懿, 王少阶 2008 物理学进展 **28** 83]
- [12] Wu Y C 2005 *Prog. Phys.* **25** 258 (in Chinese) [吴奕初 2005 物理学进展 **25** 258]
- [13] Wang B Y, Ma Y Y, Wang P, Cao X Z, Qin X B, Zhang Z, Yu R S, Wei L 2008 *Chin. Phys. C* **32** 156
- [14] Cao X Z, Wang B Y, Wang P, Ma Y Y, Qin X B, Wei L 2006 *High Energ. Phys. Nucl.* **30** 1196 (in Chinese) [曹兴忠, 王宝义, 王平, 马雁云, 秦秀波, 魏龙 2006 高能物理与核物理 **30** 1196]
- [15] Triftshäuser G, Kogel G, Triftshäuser W 1997 *Appl. Surf. Sci.* **116** 45
- [16] Straßer B, Springer M, Hugenschmidt C, Schreckenbach K 1999 *Appl. Surf. Sci.* **149** 61
- [17] Hugenschmidt C, Kogel G, Repper R, Schreckenbach K, Sperr P, Straß B, Triftshäuser W 2002 *Nucl. Instrum. Meth. B* **192** 91
- [18] Hugenschmidt C, Löwe B, Mayer J, Piochacz C 2008 *Nucl. Instrum. Meth. A* **593** 616
- [19] Moxom J, Hathaway A G, Bodnaruk E W, Hawari A I, Xu J 2007 *Nucl. Instrum. Meth. A* **579** 534
- [20] Hugenschmidt C, Schreckenbach K, Habs D 2012 *Appl. Phys. B* **106** 241
- [21] Zecca A 2002 *Appl. Surf. Sci.* **19** 4
- [22] Seeger A, Britton D T 1999 *Appl. Surf. Sci.* **149** 287
- [23] Brandt W, Paulin R 1977 *Phys. Rev. B: Condens. Matter* **15** 2511
- [24] Suzuki R, Amarendra G, Ohdaira T, Mikado T 1999 *Appl. Surf. Sci.* **149** 66
- [25] Jørgensen L V, Labohm F, Schut H, van Veen A 1998 *J. Phys.: Condens. Matter* **10** 8743
- [26] Hugenschmidt C, Kogel G, Repper R, Schreckenbach K, Sperr P, Triftshäuser W 2002 *Nucl. Instrum. Meth. B* **198** 220
- [27] Teng M K, Shen D X 2000 *Positron Annihilation Spectroscopy and Its Applications* (Beijing: Atomic Energy Press) pp5–6 (in Chinese) [滕敏康, 沈德勋 2000 正电子湮没谱学及其应用 (北京: 原子出版社) 第5—6页]
- [28] Weng H M, Ling C C, Beling C D, Fung S, Cheung C K 2004 *Nucl. Instrum. Meth. B* **225** 397
- [29] Brusa R S, Naia M D, Galvanetto E, Scardi P, Zecca A 1992 *Mater. Sci. Forum* **105** 1849
- [30] Gramsch E, Throwe J, Lynn K G 1987 *Appl. Phys. Lett.* **51** 1862
- [31] Reurings F, Laakso A, Rytyslä K, Pelli A 2006 *Appl. Surf. Sci.* **252** 3154
- [32] Zafar N, Chevallier J, Laricchia G, Charlton M 1989 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **22** 868
- [33] Zafar N, Chevallier J, Jacobsen F M, Charlton M, Laricchia G 1988 *Appl. Phys. A* **47** 409
- [34] Hathaway A G, Skalsey M, Frieze W E, Vallery R S, Gidley D W 2007 *Nucl. Instrum. Meth. A* **579** 538

Key physics mechanism of the research reactor based slow positron source*

Wang Guan-Bo Li Run-Dong[†] Yang Xin Cao Chao Zhang Zhi-Hua

(Institute of Nuclear Physics and Chemistry, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

(Received 1 November 2016; revised manuscript received 22 January 2017)

Abstract

In the world there have been built five reactor based slow positron sources producing very intense beams, of which, the NEPOMUC source generates the highest intensity about 3×10^9 e⁺/s after updated. The beam intensity depends on the power of the core, the converter material, and the moderator geometry. It is important to have good knowledge of the influencing factors and relevant processes for building a positron source in China Mianyang Research Reactor (CMRR). In this paper, the basic mechanism and several pivotal processes are studied and modeled, including the high energy γ ray induced fast positron generated in target, the moderation of fast positron to slow positron, the emission of slow positron from surface, the extraction of slow positron from surface to external grid, and finally the focusing and transport by beam optic system. The beam intensity at the end of the solenoid can be deduced as $I = Em_{\text{th}} \times \eta_1 \times \eta_2$, where η_1 is the slow positron extraction efficiency from moderators, η_2 is the efficiency of lens extraction and solenoid transportation, and Em_{th} is the slow positron emission rate from surface. The value of Em_{th} can be expressed as $Em_{\text{th}} = A \cdot P \cdot \sqrt{2} \cdot L_+ \cdot \varepsilon_{e^+} \cdot p_{\text{mod}}$, where A is the effective surface area of the moderator, P is the generating rate of the fast positron in unit volume, L_+ is the slow positron diffusion length, ε_{e^+} is the branching ratio of surface positron (≈ 0.25), i.e. the ratio of positrons reaching the surface to that emitted freely, p_{mod} (≈ 0.4) is the probability of the emitted moderated positron. Therefore, attention should be paid to the values of P , L_+ , η_2 and A to enhance the beam intensity. P is in proportion to the neutron absorption rate by cadmium, which requires higher neutron flux of incidence. L_+ is sensitive to the moderator material and its annealing condition. For the well annealed single crystal tungsten, the value of L_+ is about 100 nm, while for that annealed at 1600 °C, it decreases to only 40 nm. The value of η_1 is related to the moderator depth/width ratio, the extraction voltage, and the moderator back layout. Although deeper ring can enlarge the moderator area A , the average extraction efficiency η_1 decreases obviously. Considering the product of η_1 and A , the recommended depth/width ratio is 3 : 1. Validations are performed by employing two types of experimental results, including several isotope slow positron sources and the PULSTAR reactor based source. The calculated efficiencies of isotope sources match well with the experimental measured results, which verifies our basic model and parameters. With these parameters and models, the intensity of PULSTAR reactor based positron source at system exit is calculated to be 5.8×10^8 e⁺/s, which matches well with the reported measured value of $(0.5\text{--}1.1) \times 10^9$ e⁺/s. Some suggestions are made and will be considered in our future design of positron source.

Keywords: research reactor based positron source, mechanism and models, positron beam intensity

PACS: 28.50.Dr, 41.75.Fr, 29.27.-a

DOI: 10.7498/aps.66.082802

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11405151, 11475152) and the Key Laboratory of Neutron Physics, China Academy of Engineering Physics (Grant No. 2014BC02).

† Corresponding author. E-mail: amdom@sohu.com