

“预聚束器-斩波器”结构对慢正电子束流束团化的影响模拟

刘龙朋^{1,2} 刘福雁² 裴士伦³ 况 鹏² 王宝义² 张 鹏² 张怀强¹ 曹兴忠²

1(东华理工大学 核科学与工程学院 南昌 330013)

2(中国科学院高能物理研究所 多学科研究中心 北京 100049)

3(中国原子能科学研究院 回旋加速器研究设计中心 北京 102413)

摘要 慢正电子湮没寿命谱测量是一种灵敏度高且可以无损探测材料微观缺陷的重要分析方法,束流束团化系统是实现该技术的核心部件,主要用来产生满足寿命测量时间分辨的束团并提供正电子产生的时间信号。本文选用 Parmela 程序,基于“预聚束器-斩波器”束团化系统,模拟计算了不同束流参数对 150 ps(半高宽)束团化结果的影响并与“斩波器-预聚束器”束团化系统的计算结果做了对比,结果表明:提高束流能量、降低束流能散以及缩小束斑尺寸有利于提高束团化效率。数据显示:当束流能量 ≥ 500 eV、能散 ≤ 5 eV、束斑 ≤ 12 mm,“预聚束-斩波器”束团化系统的正电子利用率 $\geq 20\%$ 、聚束效率 $\geq 85\%$;且在相同束流参数下,“预聚束器-斩波器”束团化系统的正电子利用率要优于“斩波器-预聚束器”。

关键词 慢正电子束流,束团化,聚束效率,正电子利用率, Parmela

中图分类号 TL824

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.090202

Simulating the effect of “Prebuncher-Chopper” on pulsing slow positron beam

LIU Longpeng^{1,2} LIU Fuyan² PEI Shilun³ KUANG Peng² WANG Baoyi² ZHANG Peng²
ZHANG Huaqiang¹ CAO Xingzhong²

1(School of Nuclear Science and Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, China)

2(Multi-discipline Research Center, Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

3(China Institute of Atomic Energy, Cyclotron Research and Design Center, Beijing 102413, China)

Abstract [Background] Slow positron annihilation lifetime spectrum measurement is an important analytical method for high sensitivity and non-destructive detection of material micro-defects. Pulsed positron system is the core component of this technology. [Purpose] This study aims to obtain periodic positron pulses with high time resolution for lifetime measurement and to provide a signal marking the time of positron generation. [Methods] In this paper, the Parmela program was applied to simulate and calculate the effect of different beam parameters on positrons bunching based on the "Prebuncher-Chopper" pulsed system. Effect of different beam parameters on 150 ps (half-width) bunching was simulated and compared with calculation results of "Prebuncher-Chopper" bunching

国家自然科学基金(No.11575205、No.11805210)、中国科学院科研仪器设备研制项目(No.YJKYYQ20180007)资助

第一作者:刘龙朋,男,1992年出生,2017年毕业于华北水利水电大学,现为硕士研究生,研究领域为正电子湮没谱学技术

通信作者:王宝义, E-mail: wangboy@ihep.ac.cn; 张怀强, E-mail: zhanghq821@163.com

收稿日期:2019-05-06, 修回日期:2019-07-05

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.11575205, No.11805210), the Scientific Instrument Developing Project of Chinese Academy of Sciences (No.YJKYYQ20180007)

First author: LIU Longpeng, male, born in 1992, graduated from North China University of Water Resources and Electric Power in 2017, master student, focusing on study of positron annihilation spectroscopy technology

Corresponding author: WANG Baoyi, E-mail: wangboy@ihep.ac.cn; ZHANG Huaqiang, E-mail: zhanghq821@163.com

Received date: 2019-05-06, revised date: 2019-07-05

system. **[Results]** The results show that increasing beam energy, reducing beam energy spread and reducing beam spot size are beneficial to improve pulse efficiency. Moreover, when the positron beam energy is greater than 500 eV, the energy spread is less than 5 eV and the beam spot is less than 12 mm, the positron utilization ratio is more than 20% and the bunching efficiency is more than 85% using "Prebuncher-Chopper" pulsed system. **[Conclusion]** In contrast to the "Chopper-Prebuncher" system, "Prebuncher-Chopper" pulsed system can provide a higher positron utilization rate under the same beam parameters. Meanwhile, the time resolution (≤ 150 ps) and the bunching efficiency ($\leq 85\%$) meet the measurement requirement.

Key words Slow positron beam, Pulsed system, Positron utilization ratio, Bunching efficiency, Parmela

慢正电子湮没寿命谱测量是正电子谱学测量技术中具有代表性和主要的实验方法,主要利用慢正电子束流能量的单一性和连续可调的特点,通过测量慢正电子在材料中的存活时间,从而可以表征材料微观缺陷的类型、浓度和分布^[1]。基于²²Na正电子源的常规正电子寿命谱测量,以正电子产生释放1.28 MeV特征能量为时间起始信号、以正电子湮没释放0.511 MeV特征能量为时间停止信号,而经慢化体作用后产生的慢正电子和²²Na正电子源释放的1.28 MeV特征能量失去了关联,无法直接作用于慢正电子寿命测量,因此需要将时间连续的慢正电子束流束团化,在提供时间信号的同时,脉冲束团要满足材料寿命测量的时间分辨率。

国际上已建成的束团化装置中,大多采用“斩波器-预聚束器”束团化系统,斩波装置将正电子束脉冲化并提供寿命测量的时间信号,聚束装置将脉冲束团压缩到满足寿命测量的时间分辨率,该装置以德国慕尼黑小组^[2]和日本的ETL(Electrotechnical Laboratory)^[3]为代表。此结构优点在于斩波装置位于聚束部分之前,斩出脉冲束团的时间宽度可调,而且斩波装置远离探头,可避免正电子在斩波装置上湮没引起的噪声本底;但是缺点也很明显,提前斩波会导致束流强度降低并引起束流输运过程中的能量偏移,并且还会降低束团的占空比,导致束团化正电子利用率较低^[2]。Ohdaira等^[4]通过增大斩波束长来提高150 ps(半高宽)束团正电子计数,但是聚束装置分为三部分(1st prebuncher、2nd prebuncher和main-buncher),结构复杂、系统体积较大;Willutzki^[5]和Masaki等^[6]提出“预聚束器-斩波器”束团化系统,束团时间分辨率在满足150 ps(半高宽)的同时,信噪比最高达到了5 000:1。

不论是“斩波器-预聚束器”束团化系统,还是“预聚束器-斩波器”束团化系统,在保证束团信号具有高时间分辨率的前提下,实验中更关心的是该时间分辨率下正电子利用率和聚束效率的大小,正电子利用率决定脉冲束团中正电子数量,聚束效率决定脉冲束团信号品质,这两个数值是评估束团化系

统的重要参数。因为“预聚束器-斩波器”束团化系统可以提前将时间连续的正电子束周期性压缩至局域高密度正电子束流,再由斩波器完整斩出这部分束团,这样会增加进入主聚束器的正电子数,所以在提高正电子利用率方面具有优势。

实际上,如果调制电场可以加载理想聚束信号,且忽略束流能散的情况下,只需要一个聚束器就可以得到高时间分辨率的脉冲束团。由于聚束信号和束流能散的限制,在束团化过程中会有部分正电子成为束团本底,因此需要斩波器完成去本底的任务,这在一定程度上也决定了正电子利用率的大小。

在确定束团化结构的基础上,束流参数(束流能量、能散和束斑)是影响束团化效果的主要因素,虽然国内外都有正电子聚束系统的搭建,但都没有详细评估束团化效果的具体方法。本文基于“预聚束器-斩波器”束团化系统(图1),在完成150 ps(半高宽)束团聚束的基础上,通过量化评估指标,系统研究了束流参数对束团化结果的影响,并在不同束流参数下与“斩波器-预聚束器”束团化系统的模拟结果作了比较。

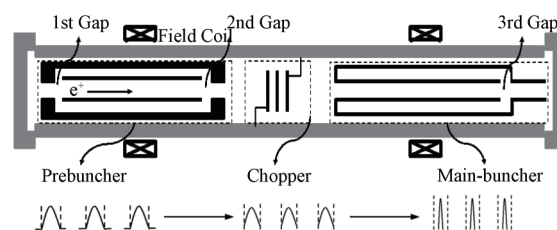


图1 “预聚束器-斩波器”束团化系统
Fig.1 The “Prebuncher-Chopper” pulsed system

1 束流束团化原理及系统介绍

“预聚束器-斩波器”束团化系统由预聚束器、斩波器和主聚束器以及一段漂移管构成。基本工作原理是在正电子束流运动轨迹上设置若干个随时间变化的狭缝电场,使不同时间通过的正电子获得不同的调制能量,从而产生速度差,再经过一段漂移距离后在时间焦点处形成约150 ps(半高宽)的正电子束团。

1.1 预聚束器

预聚束器是将时间连续的正电子束流周期性压缩至局域高密度正电子束流,一般为多电极多狭缝结构。本文采用三电极双狭缝结构的预聚束器^[7](图2),工作频率37.5 MHz。两边电极接静电位,中间电极加载正弦波聚束信号,整个预聚束腔体轴向电场分布如图3所示。根据正弦波速调管聚束理论,正电子束经过两个狭缝电场得到的调制能量为^[8-9]:

$$\Delta E = eV_m \sin \omega t_2 - eV_m \sin \omega t_1 \quad (1)$$

式中: V_m 为最大聚束电压; ω 为正弦波调制电压的角频率; t_1 、 t_2 分别为正电子束流进入狭缝1、狭缝2的时刻。当 $t_2 - t_1 = T/2$ 时,调制能量 ΔE 最大,调制作用效果最好(T 为正弦波调制电压的工作周期)。

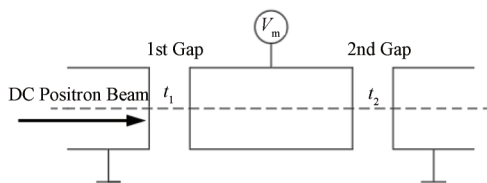


图2 预聚束器原理简图
Fig.2 Principle diagram of prebuncher

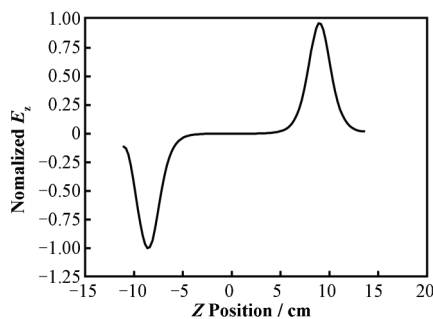


图3 预聚束器狭缝电场分布
Fig.3 Gaps electric field distribution of prebuncher

1.2 斩波器

斩波器是将预聚束器周期性产生的高密度正电子束团斩出,可根据正电子束团能量进行选择斩波,满足 $E_{\text{low}} \leq E_c \leq E_{\text{high}}$ 的正电子才能通过从而完成斩波。原理如图4。其中:a电极接地,防止电位对正电子束速度发生调制作用;b电极接斩波电位 V_b ,能量高于此电位的正电子通过,低于此电位正电子被阻挡,斩波时间宽度 $\Delta t_{\text{chopper}}$ 根据需要可调,斩波位置与斩波信号由延时调节;c电极接地,补偿斩波引起的能量损失。斩波器信号与主聚束器信号保持周期性同步,保证斩波后的脉冲束团可以再次聚束(模拟为理想斩波,没有考虑斩波信号的上升沿和下降沿)。

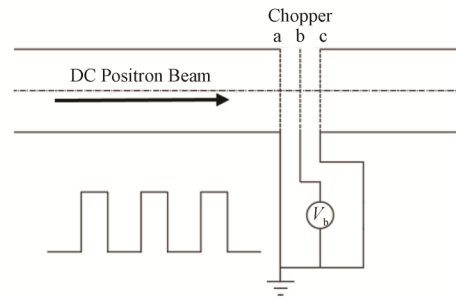


图4 斩波器原理图
Fig.4 Principle diagram of chopper

1.3 主聚束器

主聚束器采用 $\lambda/4$ 同轴谐振器(如图5),通过馈入150 MHz TM_{010} 型微波信号构造聚束电场^[3,10],并完成150 ps(半高宽)束团聚束的任务。正电子束流经过主聚束器狭缝电场后获得的调制能量由式(2)决定^[11]:

$$\Delta E = -2ME_m L = - \int_{-L}^{+L} E_m f(z) e^{j(\frac{\omega z}{v} + \phi_0)} dz \quad (2)$$

式中: E_m 是调制狭缝内沿轴向分布的最大电场; $f(z)$ 为聚束狭缝轴向电场的分布函数; v 为正电子速度; ω 为谐振场的角频率; ϕ_0 为正电子进入聚束电场的相位; M 是电子注耦合系数^[11]。通过匹配斩波束团进入主聚束狭缝电场的相位,束团时间分辨可以再次聚束到150 ps(半高宽)。

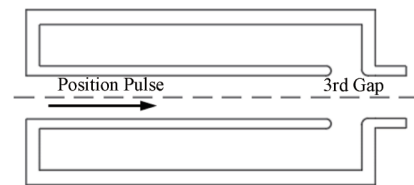


图5 主聚束器结构简图
Fig.5 Structure diagram of main-buncher

慢正电子束流通过束团化系统作用后产生150 ps(半高宽)束团,在达到样品前设置加速电极,使束团能量0.5~30 keV可调,从而满足样品表面或近表面的慢正电子寿命测量^[12]。

2 束团化模拟

慢正电子束流的基本参数包括:束流能量、束流能散以及束斑大小。束流能量可根据需要设置不同的举电位;束流能散与正电子源和慢化体有关,表1^[13-14]给出以 ^{22}Na 为正电子源几种常见慢化体对应的慢化效率以及能散;束斑是决定束流形状的物理量,其尺度影响正电子在束流中的分布以及实验样品大小的选择。

表1 几种常见正电子慢化体的慢化效率以及引起的束流能散
Table 1 The moderator efficiency of some common positron moderators and the resulting beam energy spread

慢化体 Moderator	烟熏氧化镁 Smoked MgO	碳化硼 B ₄ C	碳化金 Carbonized gold	金属钨 Metal W	惰性气体 Inert gas (Ne, Ar, Kr)
慢化效率 Moderating efficiency	3×10^{-5}	1×10^{-7}	9×10^{-5}	1×10^{-4}	1×10^{-2}
能散(²² Na) Energy spread (²² Na)	1.2 eV	0.25 eV	0.3 eV (⁵⁸ Co)	1.5~1.8 eV	~5 eV

本文拟选择国际通用的粒子动力学模拟程序 Parmela^[15], 该软件是一种在直线电子加速器设计中广泛采用的设计软件, 可以模拟出任意时刻、任意位置粒子的输运状态, 还可以模拟二维、三维状态下点与点的空间电荷计算, 而且可以与电场仿真软件 Superfish^[16]配合起来使用。

束团化原理是将先到聚束器的正电子减速、后到的正电子加速, 从而产生速度差达到聚束目的。如果用正弦波(37.5 MHz~26 ns)作为束团化聚束信号(图6), 主要利用正弦波的线性部分($\pm\pi/2$)作为近似理想调制信号。

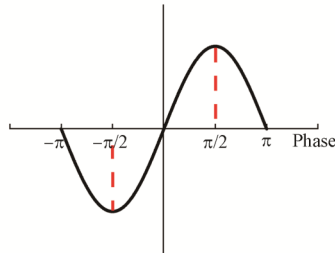


图6 正弦波聚束信号
Fig.6 Sine wave bunching signal

定义:

斩波效率 ε_1 : 斩波束团中正电子数与初始束流总正电子数的比值;

聚束效率 ε_2 : 脉冲化的束团时间分布在 150 ps (半高宽) 内的正电子占比;

正电子利用率 η : 聚束后 150 ps (半高宽) 脉冲束团中正电子存在概率;

$$\varepsilon_1 = \frac{N_1}{N} \quad \varepsilon_2 = \frac{n}{N_1} \quad \eta = \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 \quad (3)$$

式中: N_1 为斩波束团的正电子数; n 为聚束后 150 ps (半高宽) 脉冲束团中正电子数; N 为一个周期 (37.5 MHz~26 ns) 内正电子总数。以下为束团化模拟结果(仅考虑一个周期)。

2.1 “预聚束器-斩波器”束团化系统斩波束长

由于斩波器位于预聚束器之后, 如果斩波束长太宽会导致束团正电子本底增多, 造成聚束效率降

低; 斩波束长太窄会导致进入主聚束器的正电子数偏少, 造成正电子利用率降低, 因此斩波束长的选择至关重要。以束流能量~500 eV、能散~5 eV 以及束斑~6 mm, 模拟不同斩波束长对系统正电子利用率和聚束效率的影响, 如图7所示。

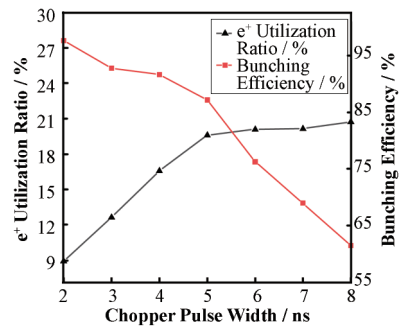


图7 “预聚束器-斩波器”束团化系统斩波束长
Fig.7 Chopper pulse width for the “Prebuncher-Chopper” pulsed system

可以发现, 斩波束长 ≤ 5 ns 时, 聚束效率 $\geq 85\%$, 但正电子利用率逐渐减小; 斩波束长 > 5 ns 时, 正电子利用率逐渐增大并趋近于 21%, 但聚束效率已经低于 65%; 有文献表明, 当束团包含 80%~90% 正电子时, 束团信号品质较高, 对实验测量结果不会引起太大误差^[17], 本文以聚束效率 $\geq 85\%$ 为评估指标, 选择斩波束长~5 ns。

2.2 束流能量对束团化正电子利用率和聚束效率的影响

正电子源(²²Na、⁵⁸Co、⁶⁸Ge 等)衰变产生的正电子能量大多处于 0.5~2.0 MeV^[18-19] 在经慢化体作用后可得到 eV 量级的低能慢正电子束。束流能量作为慢正电子束流重要特征参数, 必须满足聚束系统要求^[8]。由于预聚束器两调制狭缝的间距为束团在半个聚束周期内走过的距离, 所以在改变束流能量的同时, 需要改变束流能量下的狭缝间距。基于束流能散~5 eV、束斑~6 mm 的基础参数, 运用程序 Parmela 模拟, 结果如图8所示。

可以看出, 随着束流能量的增加, 正电子利用率和聚束效率逐渐变大, 有利于束团化效果的提高。

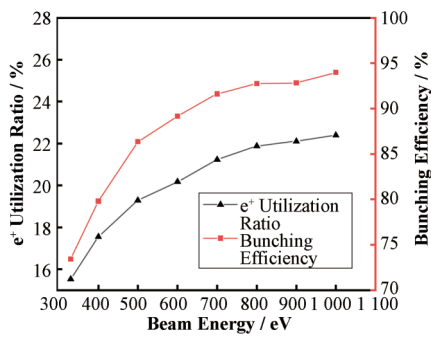


图8 束流能量对束团化效率的影响
Fig.8 The effect of beam energy on pulsing efficiency

实际上,束流能量影响束团化结果可由式(4)^[10]表示:

$$\Delta t = L \sqrt{\frac{m_e}{8e}} \frac{\Delta E}{E^{3/2}} \quad (4)$$

式中: L 为束团漂移长度; ΔE 为束流能散; E 为束流能量;固定 L 、 ΔE 可以得到束流能量引起的束团展宽 Δt 。可以发现, Δt 与 E 成反比,即保证其它束流参数一定的情况下,提高束流能量可以降低 Δt ,进而提高束团化结果。但是,模拟过程中发现,束流能量越大,需要的调制电压越大,对放大器和信号发生器的性能要求越高。所以,对于束流能量的选择,不仅要保证束团化效果最好,还要兼顾仪器硬件性能是否可以满足。

2.3 束流能散对束团化正电子利用率和聚束效率的影响

束流能散是束流能量的离散程度^[20],主要受正电子源和慢化体材料的影响。束团化系统的实质是聚束系统调制电压产生时间聚焦运动和束流能散引起时间展宽的叠加效果,前者是由系统本身调节因素决定,后者由束流能量品质决定,为确定束流能散对束团化结果的影响,以束流能量~500 eV、束斑大小~6 mm为模拟参数,结果如图9所示。

结果表明:在其它束流参数一定的情况下,束流

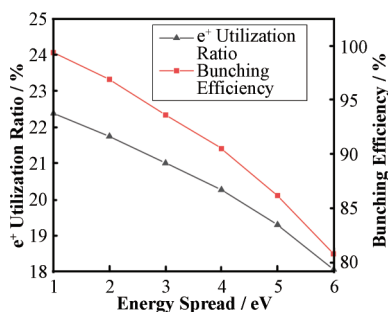


图9 不同束流能散对束团化效率的影响
Fig.9 The effect of beam energy spread on pulsing efficiency

能散越大,束团化效果越差,可见,降低束流能散有利于提高束团化效果,因此正电子源和慢化体材料的选择对慢正电子束团化系统有着重要影响。

2.4 束斑大小对束团化正电子利用率和聚束效率的影响

慢正电子束流密度在横截面沿径向按高斯分布,离束流中心越远,正电子密度越小,将边缘处两对称点之间的最大距离定义为正电子束斑^[17]。束斑越大,正电子在束流中的分散程度越大。在束流能量~500 eV、能散~5 eV情况下,模拟束斑 $\phi \leq 15$ mm对束团化效果的影响,如图10所示。

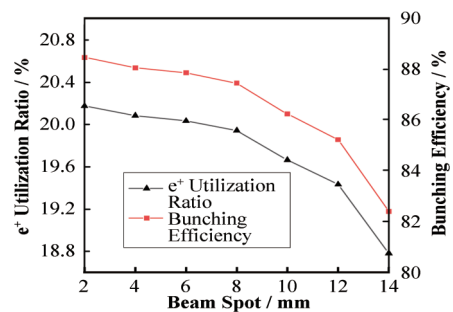


图10 束斑大小对束团化效率的影响
Fig.10 The effect of beam spot size on pulsing efficiency

由图10看出,随着束斑的增大,束团化效果逐渐变差。这是因为腔体狭缝电场分布的不均匀,导致离中心距离越远的电场越弱,而束斑越大,靠近边缘的慢正电子越多,因此大多数正电子无法感受到聚束信号最终成为束团本底,所以减小束斑尺度也是提高束团化效果的途径之一;另一方面,正电子利用率和聚束效率变化趋势相同,也验证了正电子束在横截面是以高斯形式分布,大多数正电子位于束流中心而被聚束利用。

综合计算结果可以发现:当束流能量 ≥ 500 eV、束流能散 ≤ 5 eV、束斑 ≤ 12 mm,预聚束器前置系统得到150 ps(半高宽)正电子束团的聚束效率均 $\geq 85\%$ 。

3 “预聚束器-斩波器”与“斩波器-预聚束器”束团化系统模拟结果对比

3.1 “斩波器-预聚束器”束团化系统斩波束长

与“预聚束器-斩波器”束团化系统类似,“斩波器-预聚束器”束团化系统同样需要确定满足聚束要求的斩波束长。以“预聚束器-斩波器”束团化系统达到的束团信号品质(聚束效率 $\geq 85\%$)为标准,正电子利用率越高,则斩波束长越合适。固定束流能量~500 eV、能散~5 eV以及束斑~6 mm,不同斩波束长对束团化效果的影响如图11所示。

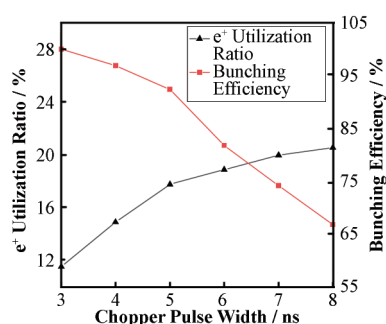


图 11 “斩波器-预聚束器”束团化系统斩波束长
Fig.11 Chopper pulse width for the “Chopper-Prebuncher” pulsed system

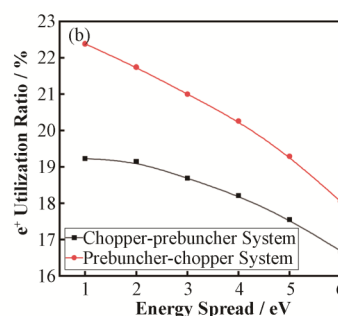
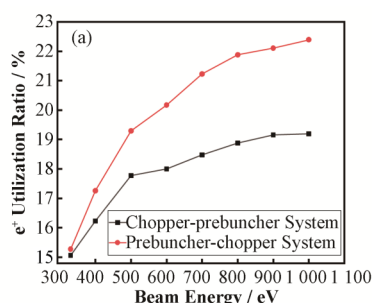


图 12 两系统束团化结果对比
(a) 相同束流能量对正电子利用率的影响, (b) 相同束流能散对正电子利用率的影响

Fig.12 Comparison of pulsing results of two systems

(a) The effect of the same beam energy on the positron utilization, (b) The effect of the same beam energy spread on the positron utilization

对比模拟结果,无论是相同束流能量,还是束流能散,“预聚束器-斩波器”均比“斩波器-预聚束器”束团化系统的正电子利用率高。逻辑上来说,在相同斩波束长和相同聚束效率下,先斩波结构的束团化方案得到的束团时间展宽应该更小,这也在模拟过程中得到了验证,但是先聚束结构的束团化方案得到的束团时间分辨已经达到 150 ps(半高宽),例如:当束流能量 ≥ 500 eV、束流能散 ≤ 5 eV时,“预聚束-斩波器”束团化系统 150 ps(半高宽)正电子束团的聚束效率 $\geq 85\%$,完全满足实际实验测量要求,因此提高正电子利用率来缩短测量时间就显得更为重要了。

4 结语

“预聚束器-斩波器”束团化方案不仅为慢正电子寿命谱测量系统提供了更高的正电子利用率,还保证了脉冲束团信号具有高时间分辨率(≤ 150 ps)和高聚束效率($\geq 85\%$)的优点,在实际样品测量中不但可以保证准确测量正电子湮没时间,而且还提高了测量效率。

本文在固定束团化系统结构和工作参数的基础上,选用电场仿真软件 Superfish 和粒子运输模拟程

序 Parmela,通过量化评估指标,模拟计算得出:在“预聚束器-斩波器”束团化系统中,提高束流能量、降低束流能散和减小束斑尺度可以提高束团化效果;且在束流能量 ≤ 1000 eV、能散 ≤ 6 eV,“预聚束器-斩波器”束团化系统的正电子利用率在“斩波器-预聚束器”基础上提高了 17%,且可以预见,随着束流能量的增加和能散的降低,正电子利用率会提高得更为乐观。

3.2 不同束流参数下的束团化结果对比

由§2 结论可知,当束团能量 ≥ 500 eV、能散 ≤ 5 eV以及束斑 ≤ 12 mm时,“预聚束器-斩波器”束团化系统聚束效率 $\geq 85\%$ 。固定束斑大小 ~ 6 mm,模拟两系统在不同束流能量和能散下的正电子利用率,如图 12 所示。

各项参数的模拟对慢正电子束流束团化系统的设计提供了方案参考和数据支持。

参考文献

- 1 Fischer C G, Connell S H, Coleman P G, *et al.* A slow positron beam study of natural and synthetic diamonds[J]. *Applied Surface Science*, 1999, **149**(1-4): 221-226. DOI: 10.1016/S0169-4332(99)00205-6.
- 2 Schödlbauer D, Kögel G, Speer P, *et al.* Lifetime measurements with a pulsed slow positron beam[J]. *Physica Status Solidi A*, 1987, **102**(2): 549-554. DOI: 10.1002/pssa.2211020210.
- 3 Suzuki R, Ohdaira T, Mikado T. A positron lifetime spectroscopy apparatus for surface and near-surface

- positronium experiments[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2000, **58**(5 – 6): 603 – 606. DOI: 10.1016/S0969-806X(00)00226-7.
- 4 Ohdaira T, Muramatsu M, Suzuki R, *et al.* Development of a Na-22 based pulsed slow positron beam for depth-selective PALS[J]. Physica Status Solidi C, 2007, **4**(10): 4020–4022. DOI: 10.1002/pssc.200675823.
- 5 Willutzki P, Störmer J, Kögel G, *et al.* An improved pulsed low-energy positron system[J]. Measurement Science and Technology, 1994, **4**(5): 548 – 554. DOI: 10.1088/0957-0233/5/5/013.
- 6 Masaki Maekawa, Atsuo Kawasuso. Development of pulsed positron beam line with compact pulsing system [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B, 2012, **270**: 23 – 27. DOI: 10.1016/j.nimb.2011.10.001.
- 7 祖秀兰, 杨海素, 姜本超, 等. 正弦波速调管聚束理论在 ns-200 加速器上的应用[J]. 强激光与粒子束, 2004, **16** (07): 950–952.
ZU Xiulan, YANG Haisu, LOU Benchao, *et al.* Application of buncher method of sine wave bunching klystron on ns-200 accelerator[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2004, **16**(07): 950–952.
- 8 Suzuki R, Kobayashi Y, Mikado T, *et al.* Slow positron pulsing system for variable energy positron lifetime spectroscopy[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1991, **30**(3B): L532. DOI: 10.1143/JJAP.30.L532.
- 9 Willutzki P, Störmer J, Kögel G, *et al.* An upgraded version of a pulsed positron beam[J]. Materials Science Forum, 1995, **175** – 178: 237 – 240. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.175-178.237.
- 10 Schödlbauer D, Speer P, Kögel G, *et al.* A pulsing system for low energy positrons[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B, 1988, **34**(2): 258 – 268. DOI: 10.1016/0168-583X(88)90752-5.
- 11 马雁云, 裴士伦, 曹兴忠, 等. 北京慢正电子强束流束团化系统设计[J]. 高能物理与核物理, 2006, (02): 166–170. DOI: 10.3321/j.issn:0254-3052.2006.02.017.
MA Yanyun, PEI Shilun, CAO Xingzhong, *et al.* Design of a pulsing system for Beijing intense slow positron beam [J]. High Energy Physics and Nuclear Physics, 2006, (02): 166 – 170. DOI: 10.3321/j.issn: 0254-3052.2006.02.017.
- 12 Valkealahti S, Nieminen R M. Monte Carlo calculate on of keV electron and positron slowing down in solids[J]. Applied Physics A, 1984, **35**(1): 51 – 59. DOI: 10.1007/BF00620300.
- 13 郁伟中, 袁佳平. 正电子慢化体的研究和进展[J]. 物理, 2001, **30**(2): 95–99. DOI: 10.3321/j.issn:0379-4148.2001.02.007.
YU Weizhong, YUAN Jiaping. The generation and development of the moderators for slow positron beam[J]. Physics, 2001, **30**(2): 95 – 99. DOI: 10.3321/j.issn:0379-4148.2001.02.007.
- 14 Gullikson E M, Jr Mills A P. Positron dynamics in rare-gas solids[J]. Physical Review Letters, 1986, **57**(3): 376. DOI: 10.1103/PhysRevLett.57.376.
- 15 Daniel Feldman, Liu Z W, Pran Nath. PAMELA positron excess as a signal from the hidden sector[J]. Physical Review D, 2009, **79**(6): 063509. DOI: 10.1103/PhysRevD.79.063509.
- 16 Hirose T, Dobashi K, Kurihara Y, *et al.* Polarized positron source for the linear collider, JLC[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 2000, **455** (1): 15–24. DOI: 10.1016/S0168-9002(00)00686-0.
- 17 任黎明, 陈宝钦. 电子束曝光高斯分布束斑的 Monte Carlo 模拟[J]. 微细加工技术, 2001, (03): 60–63.
REN Liming, CHEN Baoqin. Monte Carlo simulation of gauss-distribution beam spot in electron beam lithography[J]. Microfabrication Technology, 2001, (03): 60–63.
- 18 Saito H, Nagashima Y, Kurihara T, *et al.* A new positron lifetime spectrometer using a fast digit-oscilloscope and BaF₂ scintillators[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 2002, **487**(3): 612 – 617. DOI: 10.1016/S0168-9002(01)02172-6.
- 19 王少阶, 陈志权, 王波, 等. 应用正电子谱学[M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 2008.
WANG Shaojie, CHEN Zhiqian, WANG Bo, *et al.* Applied positron spectroscopy[M]. Wuhan: Hubei Publishers of Science and Technology, 2008.
- 20 Szilágyi E. Energy spread in ion beam analysis[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2000, **161** – **163**: 37 – 47. DOI: 10.1016/S0168-583X(99)00671-0.