

基于LINAC慢正电子源的EGS4模拟*

于润升 魏 龙 裴国玺 王宝义 陈红民 张天保

(中国科学院高能物理研究所, 核分析技术开放研究实验室 北京 100080)

孟伯年 李大庆

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

摘要 介绍基于BEPC LINAC和BFEL LINAC(北京正负电子对撞机和北京自由电子激光装置电子直线加速器)慢正电子束设备中正电子源部分的Monte-Carlo模拟过程。结果表明, 从Ta靶出射的快正电子产额在BEPC LINAC和 BFEL LINAC运行于兼容模式时分别为 $1.84 \times 10^{10}/s$ 和 $3.9 \times 10^{11}/s$ 。若慢化体慢化效率在 10^{-4} 量级, 基于BEPC LINAC和 BFEL LINAC慢正电子束的慢正电子产额分别为 $10^8-10^9/s$ 和 $10^7-10^8/s$ 。

关键词 EGS4, 电子直线加速器, 慢正电子束流设备

中图分类号 O572.21, O571.33, O411.2

1 EGS4简介

EGS4程序系统^[1,2]是模拟光子-电子在任意几何中耦合输运的通用软件包, 可用于各种问题的电子-光子迁移。可模拟的带电粒子的动能范围从几十keV到几千GeV, 更高或更低的能量物理真实性将难以保证。光子的能量范围从1keV到几千GeV。用户需编制的程序包括主程序、AUSGAB子程序、SHOWER子程序, 其中主程序包含了入射粒子的参数及许多变量的初始化, AUSGAB子程序是用来定义输出形式的, SHOWER子程序定义了入射粒子的运动几何。用户编写过程实际上是在上述程序中对许多固定函数进行赋值及限制, 定义好初始条件及所需结果, 具体的各种物理过程如韧致辐射、康普顿散射、瑞利散射的计算由该程序包自己进行。主程序编译后产生的可执行程序在运行时, 需要调入由PEGS4程序产生的靶材料数据, 利用EGS4可以对高能电子打靶所发生的物理过程进行精确求解。

2 BEPC LINAC正电子源的计算

2.1 正电子产额、能谱及角分布

计算的靶材为Ta和W, 打靶高能电子束的能量为1.55GeV, 蒙特卡罗事件数目为10000, 图1—3是以Ta靶为例, 表示当LINAC运行在兼容模式下, 所有出射正电子的数目及它们的能谱和发射角度的性质。因统计了所有的出射正电子(即统计正电子数目时, 未对出射正电子的发射角度和能量进行限制), 所以图1显示出正电子数目比较高;从图2可见, 正电子主要集中于6MeV左右。当正电子能量小于6MeV时, 正电子数目随其能量的增加而提高;而当其能量高于6MeV时, 曲线逐渐下降并趋于零。图3表明出射正电子的角分布在电子入射方向上占优势。

* 中国科学院九五重点项目(KJ952-S1-416)和国家自然科学基金(19805010)资助项目

收稿日期: 2000-01-07

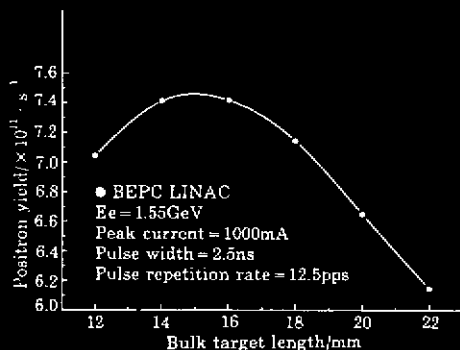


图1 未对发射角度和能量限制时正电子产额随Ta靶厚度变化关系(BEPC)

Fig.1 Relation between positron yields and bulk tantalum target thickness without angular and energy restriction

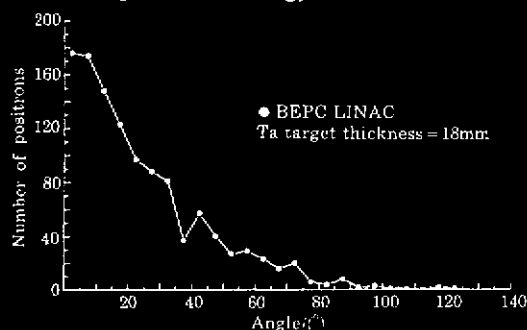


图3 出射正电子的角分布(BEPC)

Fig.3 Angular distribution of emitting positrons

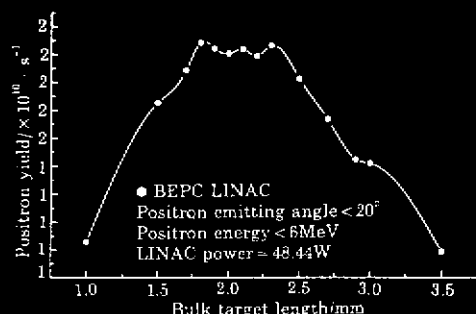


图4 对发射角度和出射能量限制后的正电子产额与Ta靶厚度关系(BEPC)

Fig.4 Relation between positron yields and bulk tantalum target thickness with angular and energy restriction

出射正电子总产额分别为 $1.84 \times 10^{10} \text{ e}^+/\text{s}$ (Ta) 和 $1.87 \times 10^{10} \text{ e}^+/\text{s}$ (W)。从理论上讲, 正电子产额应高于上面的数值, 因为大于 6.0 MeV 的正电子仍占有相当比例, 它们中的一部分可被慢化成慢正电子。

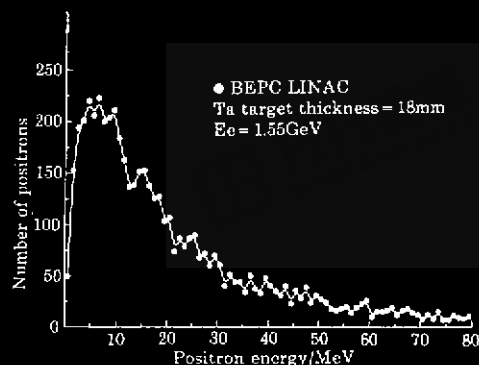


图2 出射正电子能谱(BEPC)

Fig.2 Positron energy spectrum

因为对慢正电子的贡献主要来源于能量为 0.1—6.0 MeV 及发射角小于 20° 的高能正电子, 所以, 相对于不同靶材和靶厚的正电子产额如图4和图5所示。从图4和图5可见, 对于Ta靶和W靶, 当厚度均为 18 mm 时, 正电子产额最大。当入射电子束能量为 1.55 GeV 时, 对Ta靶, 每电子对应的正电子产额为 $0.0944 \text{ e}^+/\text{s}$; 对W靶, 为 $0.0955 \text{ e}^+/\text{s}$ 。当LINAC运行在兼容模式 (2.5 ns, 1000 mA, 12.5 pps, 48.44 W) 下时,

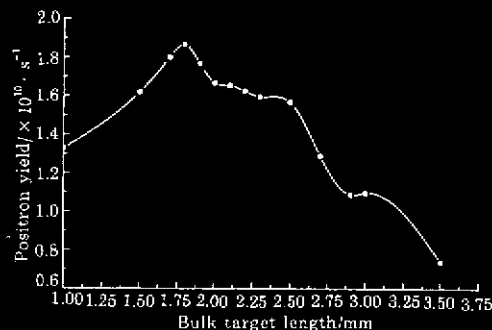


图5 对发射角度和能量限制后的正电子产额与W靶厚度关系(BEPC)

Fig.5 Relation between positron yields and bulk tungsten target thickness with angular and energy restriction

从靶出射的能量连续分布的正电子要经慢化体慢化成慢正电子。慢化效率随初始正电子

能量的增加而降低,虽然慢化效率依赖于慢化体材料及结构,但慢化效率随能量的变化规律是不变的。日本Jaeri的计算结果表明,热化正电子数量以及慢正电子的产额与靶厚及入射电子能量存在一定依存关系,其中热化正电子数量随初始正电子能量的增加而迅速减少,当初始正电子能量分别为1、2、3、4、5MeV时,热化正电子产额分别为0.472、0.213、0.0575、0.0186、0.0161。

综合考虑热化效率、入射电子能量及靶材几方面因素,在LINAC运行在1.55GeV时,可选定厚为18mm的Ta或W作为靶,按照慢化效率为 10^{-4} 量级计算,慢正电子产额为 $10^6-10^7 \text{ e}^+/\text{s}$ 左右。

2.2 靶的尺寸及其布置

当Ta靶和W靶取最佳厚度(18mm)时,计算在靶的出射面上正电子的几何分布状况,可以决定靶的面积。图6示出了正电子数目沿Ta靶后表面径向上的分布。从图6可以看出,正电子在0—0.5mm范围内分布较多,当半径达到5mm时,正电子数目已经非常少。图7形象地显示了出射正电子束斑的形状及大小。所以,直径为1cm的靶足以满足要求,工程设计时可适当增加靶面积,以便为加速器运行参数改变时留有余地。

慢化体与Ta靶或W靶之间的距离的变化对慢正电子产额会有一定影响,程度大小有待理论上进一步模拟计算,实验得出的结论是最多相差3倍左右^[8]。

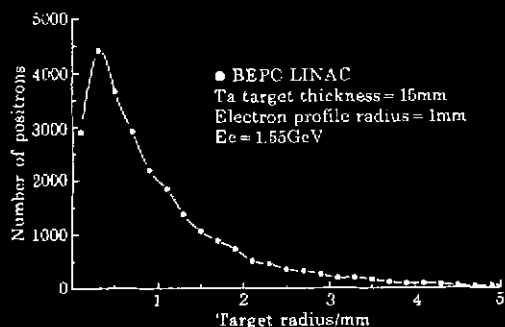


图6 正电子数目在Ta靶出射面上的分布(BEPC)
Fig.6 Positrons distributed at the out surface of tantalum target

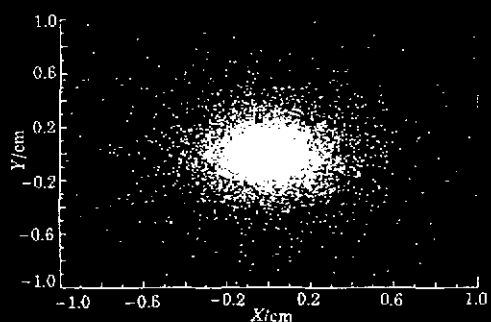


图7 正电子在Ta靶出射面上的几何分布(BEPC)
Fig.7 Distribution of the outgoing positrons on the surface of Ta target

2.3 正电子靶的发热及冷却

正电子靶材要经受几十W直至kW量级的电子束的辐射,有很高的瞬态能量沉积,靶材的发热及相应冷却措施是必须考虑的。特别是W,它较脆,当强脉冲束流打到W靶上时,靶是处于瞬态加热的情况下,在反复的热应力下,W较容易断裂,所以,W靶必须在良好的水冷状态下。假定入射电子束束斑半径为1mm,沿法线方向(电子入射方向)每1mm厚度W靶的能量吸收如图8所示。

沿靶径向积分,得到的总的能量吸收在入射功率为48.44W的情况下,W靶为15.3W;Ta靶为12.6W。但是随入射能量的增大,靶材中能量吸收的径向分布范围就变小,最终会和入射电子束尺度相当。图9为厚18mm的W靶沿径向每0.5mm长度范围内吸收的能量分布。从图9可以看出,在半径为0.5mm的入射范围内能量吸收非常集中。在1.55GeV、48.44W运行的情况下,对W靶最大的能量吸收为 $947 \text{ W}/\text{cm}^3$;对Ta靶最大的能量吸收为 $759 \text{ W}/\text{cm}^3$ 。W的

比热容为 $0.197\text{J/g}\cdot^{\circ}\text{C}$ 、密度为 19.25g/cm^3 ，不考虑散热，则在1s时间内，靶上能量集中区的温度会升高至 357°C ，W的沸点为 $5700\pm 200^{\circ}\text{C}$ ，若无冷却措施，W很容易积累热量而导致熔化。粗略估计，流量为 $4\text{cm}^3/\text{s}$ 的循环水足以使靶达到安全的热平衡状态(24°C 的水温升 1°C 、靶心温度保持约 61°C)。

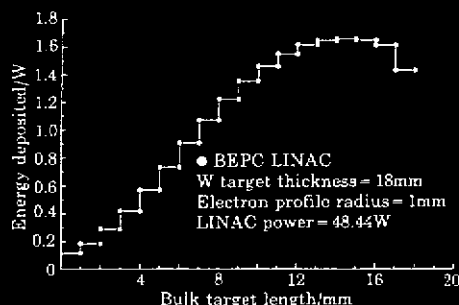


图8 高能电子在W靶内的纵向注入能量分布 (BEPC)

Fig.8 Vertically deposited energy in the tungsten target

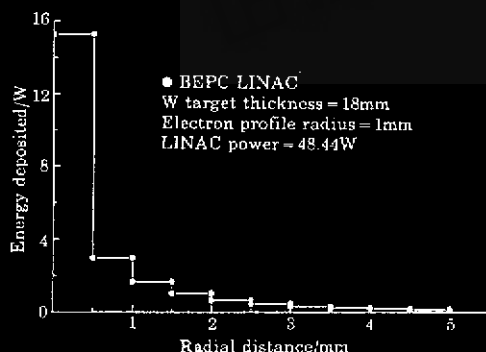


图9 高能电子沿W靶径向的注入能量分布 (BEPC)

Fig.9 Energy of electrons deposited along radial direction in the W target

3 BFEL LINAC正电子源的计算

3.1 计算过程与结果

模拟计算的目的是找出最佳的靶材厚度及尺寸、对应的正电子产额、出射正电子的能量及角度分布、正电子束斑的大小等。我们先后采用半径为5mm的圆片状Ta和W作为靶材，通过PEGS4程序产生所需输入的靶材料数据。考虑到尽量接近工程的真实性，利用EGS4程序，在计算过程中考虑了靶材的尺寸限制，凡是脱离靶尺寸大小的物理过程一律忽略；因一般说来要对靶进行磁屏蔽，所以没有考虑磁场的影响。电子束垂直靶横截面注入，靶材料前后的空间均为真空。首先在未限制出射正电子发射角的情况下进行了一系列计算。

当LINAC运行在兼容模式下($E_e = 30\text{MeV}$, $4\mu\text{s}$, 200mA , 3.125pps , 75W)，从2mm至25mm改变Ta靶和W靶厚度，计算此时正电子产额的结果示于图10和图11。从图中可见，当Ta靶厚度为5mm、W靶厚度为4.5mm时的正电子产额最高，以Ta靶为例，得到兼容模式下正电子的最高产额为 $3.9\times 10^{11}\text{e}^+/\text{s}$ 。

图12和图13分别表示正电子在厚度为5mm的Ta靶内及Ta靶后表面上的几何分布。计算过程中将截止能量定为 0.7MeV ，低于该能量的电子和正电子将忽略其级联簇射物理过程。当束斑半径小于4mm时，出射的正电子的能量分布及角度分布示于图14和图15，从图中得知，正电子的能量集中在 5MeV 附近，角度集中在 30° — 40° 左右。

因为角度及能量相对集中的出射正电子对慢正电子产额贡献是最大的，因此有必要对出射正电子的发散角及能量进行限制并计算。当限制出射正电子的能量不高于 5MeV 、发散角分别为 20° 、 30° 、 40° 时，每入射电子对应的正电子产额分别为 0.08% 、 0.36% 和 3.1% 。

因为BFEL LINAC与BEPC LINAC相比能量较小，从靶出射的正电子发散角大，所以在布置靶和慢化体之间的距离及慢化体的尺寸时，最好将等间距分布的各个慢化体片与靶

垂直紧密接触,使慢正电子产额最高。

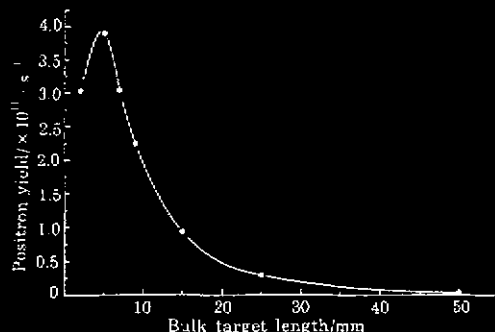


图10 正电子产额随Ta靶厚度变化关系(BFEL)
Fig.10 Relation between positron yields and bulk tantalum target thickness

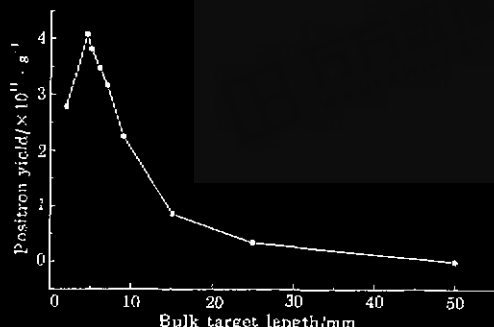


图11 正电子产额随W靶厚度变化关系(BFEL)
Fig.11 Relation between positron yields and bulk tungsten target thickness

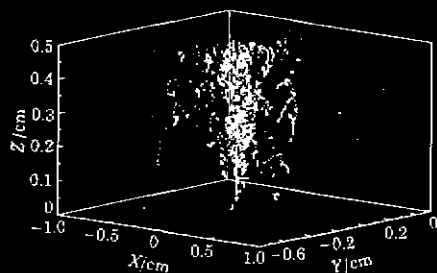


图12 正电子在Ta靶内的几何分布(BFEL)
Fig.12 Distribution of positrons in the Ta target

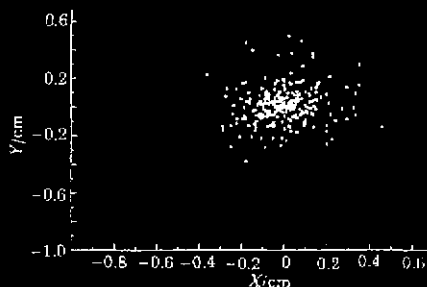


图13 正电子在Ta靶出射面上的几何分布(BFEL)
Fig.13 Distribution of the outgoing positrons on the surface of Ta target

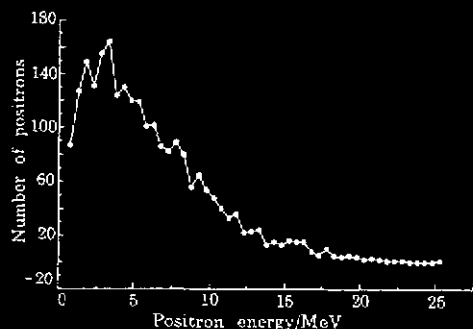


图14 出射正电子的能谱(BFEL)
Fig.14 Energy spectrum of the emitting positrons

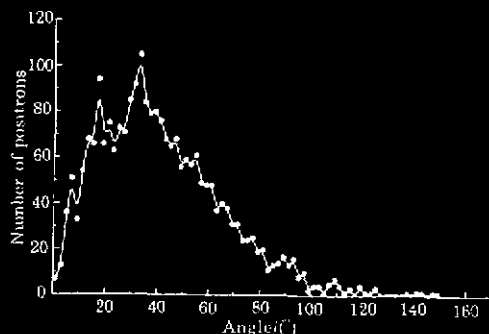


图15 出射正电子的角分布(BFEL)
Fig.15 Angular distribution of the emitting positrons

3.2 靶的冷却及增大产额的其它方法

以上数据是在LINAC运行于兼容模式下的结果,若运行于专用模式下,正电子产额将增加1—2个量级。工程上仍然有许多需要解决的问题,首先是靶的冷却,因为LINAC装置在兼容模式和专用模式下的束流功率分别为75W和3.75kW, Ta靶心处(半径0—0.5mm)的能

量沉积在这两种模式下分别为 $79\text{W}/\text{cm}^3$ 和 $3.95\text{kW}/\text{cm}^3$, 温度最高将到 1199°C 。另外, 为提高慢正电子产额, 通常需要在Ta或W的周围包以 Al_2O_3 、 MgO 、BN等材料^[4], 利用它们与从Ta靶或W靶出射的 γ 光子反应生成短寿命核素, 作为二次正电子源, 从而达到最大限度地增加正电子产额之目的。

参 考 文 献

- 1 Walter R N, Hideo Hirayama, David W O. Rogers. The EGS4 code system. Stanford University: SLAC-265 Report. 1985
- 2 XU Shuyan. User Guides for EGS4 Code (in Chinese). Beijing: Institute of Chinese Atomic Energy Science, 1994
- 3 Ley R. Mater Sci Forum, 1992, 105—110:1927—1930
- 4 Dorikens M, Dorikens-Vanpraet L, Segers D. Appl Phys, 1987, A43:257—259

EGS4 simulation for positron source on LINAC—based slow positron beam line

YU Runsheng WEI Long PEI Guoxi WANG Baoyi
CHEN Hongmin ZHANG Tianbao

*(Laboratory of Nuclear Analysis Techniques, Institute of High Energy Physics,
the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)*

MENG Bonian LI Daqing

(Institute of Chinese Atomic Energy Science, Beijing 102413)

Abstract

A Monte-Carlo simulation about the positron source used on the BEPC and BFEL LINAC-based slow positron beam lines was reviewed. The results showed that when the BEPC LINAC was operated under parasitic condition, the fast positron yield of BEPC LINAC-based Slow Positron Beam Line were $1.84 \times 10^{10} \text{e}^+/\text{s}$ for Ta target, the slow positron yield was about 10^6 to $10^7 \text{e}^+/\text{s}$. When the BFEL LINAC was operated under parasitic condition, the fast positron yield was $3.9 \times 10^{11} \text{e}^+/\text{s}$ and the slow positron yield was about 10^7 to $10^8 \text{e}^+/\text{s}$.

Key words EGS4, Electron linear accelerator, Slow positron beam line

CLC O572.21, O571.33, O411.2