

实际尺寸慢正电子强束流 转换靶的计算机模拟*

于润升 王宝义 马创新 曹兴忠

裴国玺 魏龙 叶铭汉

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

摘要 采用 EGS4 程序包,对基于 BEPC(北京正负电子对撞机)LINAC(电子直线加速器)慢正电子强束流装置中的正电子源部分进行了模拟计算.结果表明,当 LINAC 运行于兼容模式时,慢正电子的产额最高可达到 $3.5 \times 10^6 e^+/s$ (1.5cm 厚、直径 10mm 的 Ta 靶), $4.3 \times 10^6 e^+/s$ (1.3cm 厚、直径 10mm 的 W 靶);当 LINAC 运行于长脉冲模式时,慢正电子的产额最高可以达到 $4.7 \times 10^8 e^+/s$ (1.3cm 厚、直径 10mm 的 Ta 靶)、 $5.9 \times 10^8 e^+/s$ (1.1cm 厚、直径 10mm 的 W 靶).采用 3 m 厚的水泥墙中嵌加长×宽×高等于 $1m \times 1m \times 0.2m$ 的铁板的屏蔽方案,将使得屏蔽墙外的能量沉积为零.

关键词 EGS4 LINAC 慢正电子强束流装置

1 引言

慢正电子束的获得已经使正电子湮没技术涉入当今十分活跃的表面、界面、团簇等科学研究领域.但是阻碍慢正电子技术发展及其应用的关键是束流强度和亮度.常规慢束实验室中的慢正电子流强因受放射源强度的限制难以高于 $10^6 e^+/s$,很难应用到象正电子显微镜等需要高强束流的实验中.为了突破这个障碍,国际上许多实验室均在这方面投入了大量精力,已建成的装置主要是使用能量从 14MeV—2.5GeV 不等的加速器来产生强度从 $10^6 e^+/s$ 到 $10^9 e^+/s$ 的慢正电子束流^[1-9].利用 BEPC 的 LINAC,我们将建立北京慢正电子强束流装置.在该装置中,对慢正电子产额起决定作用的是高能电子-正电子转换靶及靶后慢化体的布置.本文将介绍采用 EGS4 程序包模拟 BEPC LINAC 打靶产生正电子的过程,对靶后及慢化体中正电子的产额进行了模拟计算.与此同时,对转换靶室的辐射屏蔽进行了计算和讨论.

* 中国科学院九五重点项目 (KJ952-S1-416)和国家自然科学基金 (1980510)资助

2 计算模型

考虑如图 1 所示的物理模型, 该模型模拟实际装配几何(对于点入射源和纵向尺寸无限大靶的几何情况的模拟结果, 请见相关文章^[10]). 计算采用 EGS4 程序^[11]中的 Multi-slab 模型(在 HOWFAR 子程序中定义), 入射高能电子为一直径 5mm 的圆斑(强度均匀分布), 入射方向垂直于 Al 箔平面. 该模型中共有 13 个区域, 其中第 6 个区域为高能电子-正电子转换靶, 计算过程中, 通过考察正电子产额与其厚度关系来寻找最佳的厚度, 即最大正电子产额时的厚度. 第 8 个区域为百叶窗式钨箔慢化体(每片厚度为 25 μm , 每片宽度均为 5mm; 10 片时片间距为 1.0833mm, 即均布在长度为 10 mm 的范围内). 图 1 中所示各区域的数字值均代表其沿高能电子入射方向的厚度, 对于其高度和宽度在计算时也加以了限制: 2 片 Al 箔、高能电子-正电子转化靶、慢化体均为直径 10mm 的圆片; 铁板高和宽均为 100cm; 水泥墙高和宽均为 300cm; 区域 5、区域 7 和区域 9

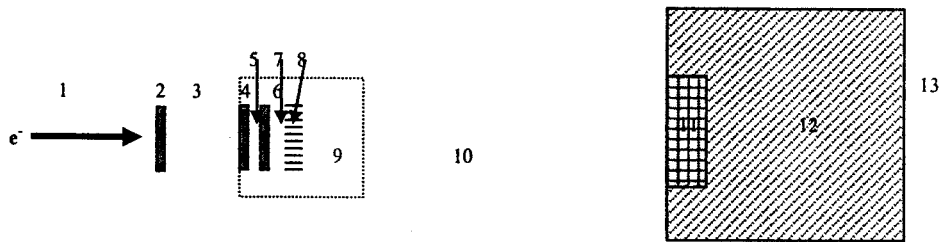


图 1 计算物理模型

1: 真空; 2: 0.1mm Al 箔; 3: 20cm 空气; 4: 0.1mm Al 箔; 5: 5cm 真空; 6: 厚度 1—2cm 改变的转换靶; 7: 5mm 真空; 8: 5mm 的慢化体箔; 9: 50cm 真空; 10: 250cm 空气; 11: 20cm 铁板; 12: 200cm 水泥墙; 13: 墙外空气.

的真空段高度均为 100cm; 区域 3 和区域 10 的空气段的高度均为 300cm, 即与水泥墙的高度相同.

高能电子、正电子和 γ 光子在各个区域的截止能量均取为 1MeV[ECUT=1.511MeV, PCUT=1.0 MeV], 原因是考虑低于此能量时, 将无正负电子对效应发生, 即对正电子产额将无贡献.

针对 LINAC 运行于目前的兼容模式(电子能量: 1.55GeV, 脉宽 2.5ns, 峰值电流 1000 mA, 重复频率 12.5pps, 平均功率 48.44W, 入射电子 $1.95 \times 10^{11}/\text{s}$) 和长脉冲模式(电子能量: 1.0GeV, 脉宽 2.5 μs , 峰值电流 100mA, 重复频率 25pps, 平均功率 6.25kW, 入射电子 $3.9 \times 10^{13}/\text{s}$) 两种情况, 分别进行了模拟计算.

3 计算结果及讨论

3.1 正电子产额

表 1 和表 2 分别示出了当 LINAC 运行于兼容模式和长脉冲模式时转换靶后快正电

子产额比例和慢化体中能量低于 1 MeV 的正电子产额比例。

如果慢化体中能量小于 1MeV 的正电子从慢化体表面以慢正电子形式发射的几率为 1.0×10^{-4} , 则由前面的计算结果可知, 当 LINAC 运行于兼容模式时, 慢正电子的产额最高可达到 $3.5 \times 10^6 e^+/s$ (1.5cm 厚、直径 10mm 的 Ta 靶), $4.3 \times 10^6 e^+/s$ (1.3cm 厚、直径 10mm 的 W 靶); 当 LINAC 运行于长脉冲模式时, 慢正电子的产额最高可以达到 $4.7 \times 10^8 e^+/s$ (1.3 cm 厚、直径 10mm 的 Ta 靶), $5.9 \times 10^8 e^+/s$ (1.1cm 厚、直径 10mm 的 W 靶)。

表 1 兼容模式下靶后快正电子和慢化体中的正电子产额

靶厚/cm	靶后快正电子产额比例(e^+/e^-)		钨箔慢化体中能量小于 1MeV 正电子比例(e^+/e^-)	
	Ta 转换靶	W 转换靶	Ta 转换靶	W 转换靶
1.0	3.18	3.59	0.15	0.21
1.1	3.42	3.73	0.16	0.22
1.2	3.58	3.79	0.17	0.22
1.3	3.69	3.80	0.17	0.22
1.4	3.75	3.74	0.18	0.21
1.5	3.77	3.65	0.18	0.21
1.6	3.71	3.49	0.17	0.20
1.7	3.66	3.35	0.17	0.20
1.8	3.61	3.16	0.16	0.19
1.9	3.42	2.96	0.16	0.18
2.0	3.26	2.75	0.16	0.17

表 2 长脉冲模式下靶后快正电子和慢化体中的正电子产额

靶厚/cm	靶后快正电子产额比例(e^+/e^-)		钨箔慢化体中能量小于 1MeV 正电子比例(e^+/e^-)	
	Ta 转换靶	W 转换靶	Ta 转换靶	W 转换靶
1.0	2.32	2.52	0.11	0.15
1.1	2.41	2.55	0.12	0.15
1.2	2.50	2.54	0.12	0.15
1.3	2.52	2.50	0.12	0.15
1.4	2.51	2.39	0.12	0.14
1.5	2.46	2.28	0.12	0.13
1.6	2.40	2.15	0.11	0.13
1.7	2.29	2.02	0.11	0.12
1.8	2.19	1.87	0.11	0.12
1.9	2.07	1.73	0.10	0.11
2.0	1.96	1.57	0.10	0.10

3.2 各区域的能量沉积

采用图 1 所示几何, 对应正电子产额最高的情况下 (兼容模式 1.5 cm Ta 靶、1.3cm W 靶; 长脉冲模式 1.3 cm Ta 靶、1.1cm W 靶), 各个区域的能量沉积状况示于表 3. 图 2 给出了转换靶内沿径向和轴向能量沉积分布状况。

表3 各区域的能量沉积比例

区域	兼容模式(入射功率 48.44W)		长脉冲模式(入射功率 6.25kW)	
	1.5cm Ta 靶	1.3cm W 靶	1.3cm Ta 靶	1.1cm W 靶
1	0.0021399	0.0022599	0.0024504	0.0025864
2	0.0000277	0.0000275	0.0000428	0.0000430
3	0.0000375	0.0000374	0.0000566	0.0000567
4	0.0000277	0.0000277	0.0000428	0.0000430
5	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000
6	0.2211749	0.2296464	0.2093578	0.2067908
7	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000
8	0.0024843	0.0029754	0.0026402	0.0032084
9	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000
10	0.0042819	0.0041349	0.0045015	0.0043820
11	0.4867960	0.4544729	0.4889042	0.4661253
12	0.0102368	0.0095418	0.0096998	0.0092770
13	0.0000005	0.0000007	0.0000004	0.0000006
上述 13 个区域 以外空间	0.2727928	0.2968755	0.2823035	0.3074868

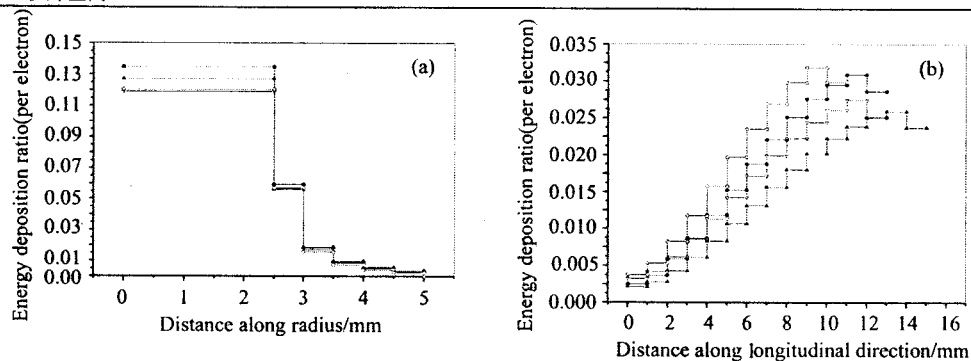


图2 LINAC 不同运行模式下转换靶内的能量沉积比例

(a) 沿径向的能量沉积比例; (b) 沿轴向的能量沉积比例。

▲为 1.5cm Ta 靶, $E_e=1.55\text{GeV}$; ●为 1.3cm W 靶, $E_e=1.55\text{GeV}$;▽为 1.3cm Ta 靶, $E_e=1.0\text{GeV}$; ○为 1.1cm W 靶, $E_e=1.0\text{GeV}$ 。

3.3 辐射屏蔽

当水泥墙中附加长 \times 宽 \times 厚等于 $1\text{m}\times 1\text{m}\times 0.2\text{m}$ 的铁板, 对应 1m, 2m, 3m 厚的水泥墙时墙外能量的沉积比例情况示于表 4。

表4 不同墙厚、不同 LINAC 运行模式下墙外能量的沉积比例

墙厚/m	兼容模式(入射功率 48.44W)		专用模式(入射功率 6.25kW)	
	1.5cm Ta 靶	1.3cm W 靶	1.3cm Ta 靶	1.1cm W 靶
1	0.0000900	0.0000880	0.0000807	0.0000782
2	0.0000005	0.0000007	0.0000004	0.0000006
3	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000

由上面的计算结果可知, 采用 3m 厚的水泥墙中嵌加长×宽×高等于 1m×1m×0.2m 的铁板的屏蔽方案, 将使得屏蔽墙外的能量沉积为零, 从而达到理想的屏蔽效果。

参考文献(References)

- 1 Begemann M, Gräff G, Herminghaus H et al. Nucl. Instr. and Meth., 1982, 201:287
- 2 Howell R H, Fluss M J, Rosenberg I J et al. Nucl. Instr. and Meth., 1985, B10/11:373.
- 3 Tanaka H, Nakanishi T. Nucl. Instr. and Meth., 1991, B62:259
- 4 Okada S, Sunaga H. Nucl. Instr. and Meth., 1991, B56/57:604
- 5 Kurihara T, Shirakawa A, Enomoto A et al. Applied Surface Science, 1995, 85:178
- 6 Kanazawa I, Ito Y, Hirose M et al. Applied Surface, 1995, 85:124
- 7 Suzuki R, Kobayashi Y, Mikado T et al. Mat. Sci. Forum, 1992, 105—110:1993
- 8 Ley R. Mat. Sci. Forum, 1992, 105—110:1927-1930
- 9 Mohri A, Tanaka H, Yuyama T. Mat. Sci. Forum, 1995, 175—178:967
- 10 YU Runsheng, WEI Long, PEI Guoxi et al. Nuclear Techniques, 2000, 23(6):405
- 11 Walter R. Nelson, Hideo Hirayama, David W.O. Rogers. The EGS4 Code System, Stanford University, SLAC-265 Report. 1985

Computer Simulation for the Real-Sized Electron-Positron Converter on BEPC-LINAC Based Slow Positron Beam*

YU Run-Sheng WANG Bao-Yi MA Chuang-Xin CAO Xing-Zhong PEI Guo-Xi
WEI Long YE Ming-Han

(Institute of High Energy Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract This paper describes the simulation by EGS4 code for the positron converter on BEPC LINAC-based slow positron beam and the radiation shield. Results show that the slow positron yield will be $3.5 \times 10^6 e^+/s$ (Ta target, 1.5cm thick, $\phi 10\text{mm}$) or $4.3 \times 10^6 e^+/s$ (W target, 1.3cm thick, $\phi 10\text{mm}$) when the LINAC is running under the parasitic mode. Meanwhile, the slow positron yield will be $4.7 \times 10^8 e^+/s$ (Ta target, 1.3 cm thick, $\phi 10\text{mm}$) or $5.9 \times 10^8 e^+/s$ (W target, 1.1 cm thick, $\phi 10\text{mm}$) when the LINAC is running under the long-pulse-width mode. A 3m thick concrete wall inserted with a 1m long \times 1m wide \times 0.2m thick Fe plate is needed for the radiation shield and placed behind the positron converter.

Key words EGS4, LINAC, slow positron beam