

CNIC-01334
CAEP-0022

集体离子加速中子源研制方案

邓仁培 杨茂荣

(中国工程物理研究院, 成都, 610003)

摘 要

介绍了电子加速器进行集体离子加速在真空型漂移管中获得脉冲中子源的理论、实验, 列出了国内外一些实验室的现状和进展。根据要求, 提出了获得中子源方案的主要器件: Marx 发生器、水介质传输线、低阻抗二极管以及漂移管, 并给出了获得 10^9 中子/脉冲的中子源的主要参数。

Conceptual Design of Collective Ion Acceleration for Pulsed Neutron Source

(In Chinese)

DENG Renpei YANG Maorong
(China Academy of Engineering Physics, Chengdu, 610003)

ABSTRACT

Theoretical and experimental analysis of the collective acceleration of ions (CIA) by an electron beam to obtain pulse neutron source in an evacuated drift tube are presented, the progress and development in the world laboratories are given too. According to the requirement, the plan of neutron source produced by CIA is investigated, with Marx generator, water dielectric Blumlein line, low impedance diode and drift tube. These devices' main parameters for neutron intensity of 10^9 neutrons / pulse are given.

引言

根据工作需要,研制一台强中子源,要求在第一步提供 10^9 中子/脉冲的产额,第一步要求达到 $10^{11} \sim 10^{12}$ 中子/脉冲。这种中子源产额高,要求工作稳定、可靠。从目前来看,可以用多种方法来实现。而本文提出的用集体粒子加速来产生中子比较经济,工作可靠、稳定,是近年来世界上发展较快的一种技术。

1952年,两位瑞典科学家 Hannes Afsen 和 Olle Vernholm 进行了集体离子加速实验,到 1961年,原苏联科学家 A. A. PLYTTO 成功地进行了集体效应加速实验,以后美国科学家做了大量工作,使这领域的进展很快,对广大科学工作者富有吸引力。因为用这种方法可以在规模不大的装置上比较容易将粒子加速到高能量,而且在核能发展和惯性约束聚变研究及一些普通物理问题中具有丰富内容和现实应用的研究对象。

我国在集体离子加速方面早在七十年代后期就已做了不少工作,取得了一些结果。表 1 为国内外一些装置的技术指标。

表 1 国内外一些装置技术指标

序号	加速器型号	电子束能量/MeV	电子束流/kA	脉冲宽度/ns	中子数/脉冲	备注
1	FX-25	2	30	25	4×10^7	
2	FX-75	4~7	90	40	$1.7 \sim 4.5 \times 10^{11}$	
3	Febetrom	2	5	50	2.1×10^8	
4	前苏联	0.8	18	50	1.2×10^9	
5	LPC	1.5	30	50	4×10^{12}	真空型
6	AFWL	5	40	40	$\sim 10^{13}$	真空型
7	FPA-74	0.5	14	50	2.3×10^7	充气型

根据需求背景我们对具体的技术指标也分两步走。第一步,加速器能量 1 MeV, 电流 60 kA, 脉宽 50 ns, 中子产额 $10^8 \sim 10^9$ 中子/脉冲;第二步,加速器能量 2~3 MeV, 电流 100 kA, 脉宽 50 ns, 中子产额 $10^{12} \sim 10^{13}$ 中子/脉冲。本文是按第一步实施要求而撰写的。

1 集体离子加速工作原理简述

集体离子加速主要有两种类型:一是充气型集体离子加速,二是真空型集体离子加速。

1.1 充气型集体离子加速

充气型是在漂移管内充合适气压的本底气体,超过空间电荷限制流的电子束注入到漂移管中,束前端电子气体电离,形成等离子体通道,其中的离子在电子束形成的深势阱中

得到加速, 最大离子动能是电子束动能的 2~3 倍, Olsen 理论对其过程进行了比较完善的解释。

1.2 真空型集体离子加速

由于上述的充气型的等离子体密度较低(漂移管中存在临界气压), 因此离子流较低, 打靶的中子产额也较低, 一般只有 10^7 中子/脉冲(这种产额的中子源对我们来说是不够的)。我们主要研究真空型集体离子加速, 它可以把离子的能量加速到电子能量的许多倍。这样中子产额较高, 这方面 Luce 有较好的理论证明。加速器被触发之后, 电子束被阴极部件集中, 绝大多数电子从端部发出扩展, 而打在绝缘阳极部件的表面, 将绝缘阳极充至高电势, 而且撞击电子使阳极平面产生一稠密的等离子体, 高能电子恰好在等离子体边界之外构成虚阴极。而它在等离子体表面附近建立了强电场, 将正离子向虚阴极方向加速, 电子束所产生的空间电荷被离子中和, 因而使等离子体边界伸延。所以, 虚阴极将同正离子作一致运动而加速打靶。

我们再从 CIA 模型分四个阶段来说明

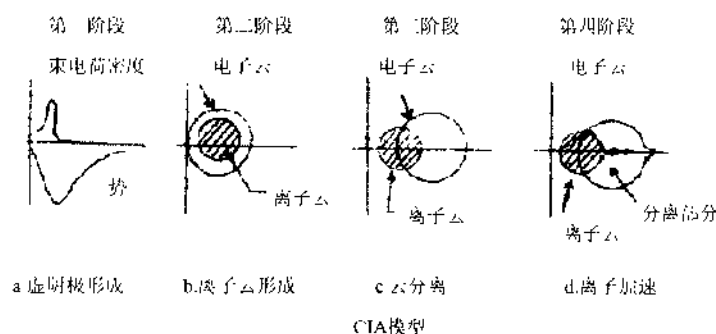


图1 集体离子加速原理示意图

第一阶段所示的是虚阴极形成阶段。这在束流高于极限流时发生, 大部分束粒子被虚阴极反射或径向散射, 在任何情况下, 在阳极附近形成深势阱, 从束密度分布来看是在势阱底附近形成高峰, 这阶段发展很快, 并安定于某种稳态方式。第二阶段表示离子在虚阴极区域的积累。由于原来的束电离了局域电子云, 在势阱底附近生成电子—离子对, 在电离时, 不仅是离子的数目增大, 电子数目也要增大, 以这种方式保持阳极附近的虚阴极, 因此在离子云和束电子云之间建立起动态平衡, 使之在系统中较没有离子时有人得多的总束电荷。第三阶段是云分离阶段。由于动态平衡并非稳定的, 陡降束流的感应电场使电子云分离, 这种不稳定与束流不稳定性有许多相似之处, 其生成条件是必须有足够人数目的离子。第四阶段是离子加速阶段。分离后在离子云边缘的局部离子群受到从离子云上体来的强大斥力, 同时又受到分离电子云的吸引力, 因此, 处于极强静电场区域这特殊的离子群将被加速至高能量。

2 集体离子加速中子源研究方案

本文的方案是为满足第一阶段用中子源技术指标而提出的。

2.1 设备组成

集体离子加速中子源系统设备如图 2 所示, 主要的技术指标: $E \approx 0.9 \text{ MeV}$; $I \approx 60 \text{ kA}$; $\tau \approx 50 \text{ ns}$; 中子产额约 10^9 中子/脉冲。

2.2 微秒 Marx 发生器

Marx 发生器作为初级能量存储器, 它产生一个微秒脉冲向水介质 Blumlein 传输线充电, 当主开关接通后, 电磁波开始在传输线中传播, 最后产生一个高压毫微秒脉冲, 加到二等离子体场发射二极管上, 则能产生很高的电流。

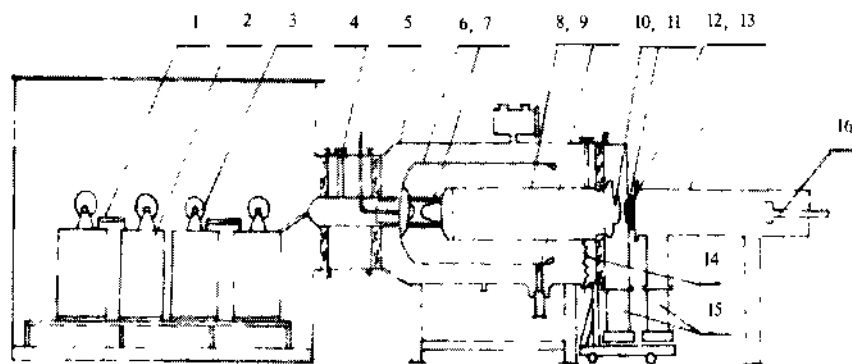


图 2 集体离子加速设备示意图

1. 水电阻; 2. 电容器; 3. 火花间隙; 4. 电阻分压器; 5. 外筒; 6. 中筒; 7. 主开关; 8. 内筒; 9. 绝缘支撑;
10. 阴极; 11. 分流器; 12. 阳极; 13. 漂移管; 14. 接地电感; 15. 真空机组; 16. 法拉第筒或后靶。

它由 22 级 60 kV , $0.22 \mu\text{F}$ 的电容器组成, 采用正负充电, 火花间隙开关共 11 个。整个 Marx 发生器密封在 3 m (长) $\times 2.5 \text{ m}$ (高) $\times 3 \text{ m}$ (宽) 的金属油箱内, 里面充满变压器油, Marx 发生器的所有球隙均由触发器小 Marx 进行外触发, 整个 Marx 动作时间短, 而且稳定可靠。Marx 发生器标称电压 1.32 MeV ; 冲击电容 $0.01 \mu\text{F}$; 最大储能 $Q_m = c_0 \mu_0^2 N / 2 = 8712 \text{ J}$ 。当充电 45 kV 时, Marx 发生器的输出电压 0.99 MeV ; 储能 4900 J 。

通过等效线路图 (见图 3) 可以计算 Marx 发生器向传输线充电时传输线上的电压, 电流随时间变化函数关系, 通过下面等效线路, 从回路方程, 经过拉氏变换, 最后得到 $V_T(t)$, $i_2(t)$ 的解析表达式。

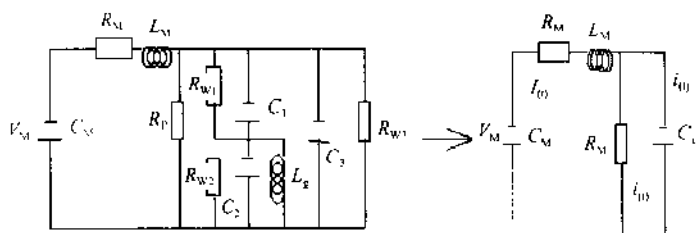


图 3 Marx 发生器等效线路图

2.3 水介质传输线

总体指标: 输出脉冲电压 1 MeV; 传输线特性阻抗 $6 \sim 10 \Omega$; 脉宽 50 ns。Blumlein 传输线作为一个快速脉冲形成段, 它被初级储能部件 Marx 发生器激励, Marx 发生器作为集中电容对传输线充电并在传输线中放电, 它输出一个负脉冲送至真空二极管用来产生电子束, 传输线起着承前启后并使脉宽的量级降低, 而对应的输出峰值功率增加的作用。

Blumlein 传输线由三个同轴圆柱组成内线外线和传输段, 见图 4。

传输线特性阻抗的一般表达式为

$$z_i = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_y}} e_n r_{i-1} / r_i$$

式中, r_i 为同轴线内直径, r_{i-1} 为同轴线的外直径, z_i 为特性阻抗 ($i=1, 2, 3$) Ω 。

相应各线的电容量为

$$C_i = \frac{2\pi \epsilon_o \epsilon_y e_i}{e_n r_{i-1} / r_i}$$

式中, $\epsilon_o = 8.86 \times 10^{-14}$, $\epsilon_i = 80$ (水)。

相应各线的泄漏电阻为

$$R_{wi} = \frac{\epsilon_o \epsilon_y \rho}{C_i}$$

式中, $\rho = 1.5 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$, 传输线长度为

$$l = \frac{c \cdot \tau}{2\sqrt{\epsilon_r}}$$

式中, c 为光速, $3 \times 10^{10} \text{ cm/s}$; τ 为输出脉冲宽度。

传输线长度 l 在线内介质确定后, 主要取决于负载上输出脉冲宽度 τ , 强流加速器场发射二极管要求加在其上的脉冲宽度在几十到一百毫微秒范围, 这就限制了传输线 l 不能太长, 另一方面, 主开关 s 具有接通时间, 二极管具有分布电容, 电感, 从而使传输线输

出电压具有一定的上升前沿, 这又要求传输线有足够的长度, 否则输出电压脉冲将无法上升至峰值, 从而大大降低电压及能量的传输效率。此外, 还必须兼顾到传输线电容 C_B 与 Marx 发生器串联电容 C_M 的比例, 一般要求 C_M 略大或等于 C_B 。

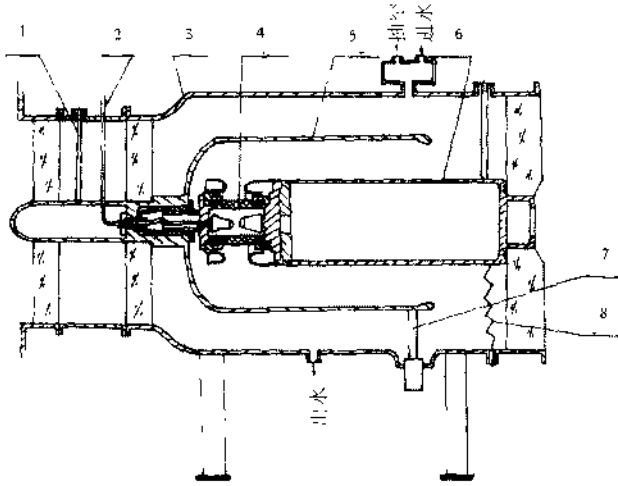


图 4 Blumlein 传输线示意图

1 电压分压器; 2. 气路; 3. 外筒; 4. 开关; 5 中筒; 6. 内筒; 7. 绝缘支撑; 8 接地电感。

我们设计 $\tau = 50 \text{ ns}$, 用去离子水作为绝缘介质($\epsilon_{\text{水}}=80$), 传输线长度

$$l = \frac{c\tau}{2\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{3 \times 10^{10} \times 50 \times 10^{-9}}{2 \times \sqrt{80}} = 85 \text{ cm}$$

双层同轴传输线的三个同轴圆柱导体的半径分别为 r_1, r_2, r_3 它们的大小主要由充电圆柱导体间的工作场强和一定物理要求(如传输线输出能量最大, 或产生 γ 剂量最大或为传输线单位体积储能最大)决定, 我们设计采用传输线输出能量最大, 内外传输线最大场强相等, 导体间冲击电压为 V_B , 内外传输线场强分别为 E_1 和 E_2 。

$$E_1 = \frac{V_B}{r_1 \ln r_2 / r_1} \quad E_2 = \frac{V_B}{r_2 \ln r_3 / r_2}$$

以等场强要求来设计, $E_1=E_2$, $r_1 \ln(r_2/r_1)=r_2 \ln(r_3/r_2)$ 。令 $X=r_2/r_1$, $Y=r_3/r_2$, 则 $\ln y = \ln x/X$ 。

以 J. C. Martin 实验各式为依据, 计算得 Blumlein 线的主要参数为: 内筒外半径 $r_1=20 \text{ cm}$; 中筒外半径 $r_2=40 \text{ cm}$; 外筒内筒半径 $r_3=75 \text{ cm}$ 。

传输线阻抗

$$z_1 = \frac{60}{\sqrt{80}} e_n x = \frac{60}{80} e_n \frac{40}{20} = 4.8 \Omega, \quad z_2 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} e_n y = \frac{60}{80} e_n \frac{75}{40} = 4.2 \Omega$$

$$z = z_1 + z_2 = 9 \Omega$$

2.4 低阻抗二极管

低阻抗二极管的工作过程可以从四个阶段来描述：(1) 初始阶段，这是由场发射开始引起“胡须”爆炸形成阴极等离子体阶段，二极管从开始状态变为有阻抗状态；(2) 空间电荷限制流动阶段，阴极等离子体层一旦形成后，它就以一定的速度膨胀而横越阴极-阳极间隙，这时期电流遵从 Langmuir-Child 定律，阻抗进一步下降；(3) 相对稳定箍缩阶段，这过程是使电子向轴线强烈地会聚，导致了在箍缩范围内很短的功率上升时间和较高的功率密度，是二极管功率输出阶段，阻抗于 y 互值，在阻抗曲线上有一“坪”的面；(4) 阻抗崩溃阶段，等离子体层相对运动，达到闭合，二极管阻抗迅速下降至零，二极管工作结束。所用径向绝缘的低阻抗场发射二极管见图 5。二极管能量约 0.9 MeV，电流约 60 kA，脉宽约 50 ns。

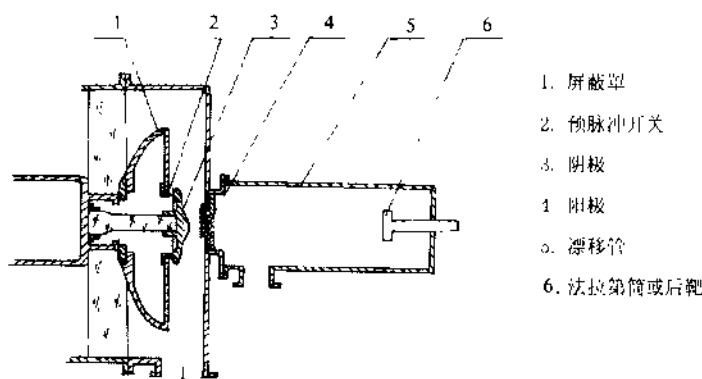


图5 二极管和漂移管结构图

2.5 漂移管及测量

这是用于束传输或离子流传输的部件，大致尺寸为 $\phi 150 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$ ，本底气压在 10^{-3} Pa 左右，阳极是用铝板做成，中心开一小孔，并盖上一层薄箔，箍缩束穿过薄箔注入传输室，用法拉第筒来测量电流，用核激活方法诊断离子，给阳极箔在漂移室的一侧涂氘化聚乙烯(CD_2)的薄层，在离阳极 20 cm 远处放置氘化物靶(厚的 CD_2)层面积大于 20 cm^2 ，用银激活计数器测量出由 D, He 反应产生中子。

3 结 论

从物理和技术上对集体离子加速中子源进行了分析和论证，本着尽快又经济的角度，提出了指标为：能量 0.9 MeV；电流 60 kA；脉宽 50 ns。水介质低阻抗强流脉冲加速器输出的强电子束，通过真空型漂移管打 CD_2 厚靶产生 $10^7 \sim 10^9$ 中子/脉冲产额，以满足实验

所需强中子源要求。

参 考 文 献

1. Unce J. S. 等著 黄世明译, 真空中的线性集体离子加速, 1985
2. Grossmann J. M. IEEE Trans. 1981, NS-28: (3) 2587~2589