

1 MV 6Ω Blumlein 传输线的研究*

赵仲宏 李悌兴 夏能樵 张奇
郑宝鸿 苏耀文 吴萌 汪青

(中国科学院电子学研究所)

提 要

本文研究了 1MV 6Ω 水介质 Blumlein 传输线,给出了本装置的基本参数,对传输线中各主要部件和主要物理过程,例如充电和快脉冲形成的过程都进行了理论分析和计算,并与实验结果作了比较。

一、引 言

自从 1960 年新的脉冲功率源诞生以来,相对论强流电子束加速器在国外得到迅速发展^[1,2],国内也有一些单位着手研制。

电子束加速器包括三个主要部分,一个储能器,如 Marx 发生器;一个脉冲形成网络,如 Blumlein 传输线;一个用于产生电子束的二极管。本文重点描述第二部分。

二、总体指标和参数

本装置的总体指标为: 输出脉冲电压 1MV, 传输线特性阻抗 6Ω, 脉宽约 85ns。

Blumlein 传输线作为一个快速脉冲形成段, 它被初级储能部件微秒 Marx 发生器激励, 当脉冲形成网络放电时, 它输出一个负的窄脉冲, 并馈至真空二极管, 用来产生电子束

Marx 发生器是由 18 级 0.36μF、100 kV 的电容器组成^[3]。当每级充电电压为 70 kV 时, 储能为 15900J, 最高输出电压为 1.26MV, 脉宽约 1μS, 等效串联电感为 15μH, 等效放电电阻为 5Ω。

Blumlein 传输线包含三个同轴圆筒, 组成内线, 外线和传输段, 如图 1 所示。其特性波阻抗的一般表达式为

$$Z_i = (60/\sqrt{\epsilon_r}) \ln(r_{i+1}/r_i), \quad (1)$$

式中 r_i 为同轴线的内半径; r_{i+1} 为外半径; Z_i 为特性波阻抗 ($i = 1, 2, 3$, 其中 1 指内线, 2 指外线, 3 指传输段); ϵ_r 为相对介电常数。

* 1986 年 3 月 29 日收到, 1987 年 3 月 13 日修改定稿。

相应各线的电容量为

$$C_i = 2\pi\epsilon_0\epsilon_r l_i / \ln(r_{i+1}/r_i) \text{ (F)}, \quad (2)$$

式中 $\epsilon_0 = 8.86 \times 10^{-14}$, l_i 为各线的长度。各线的泄漏电阻 R_{wi} 为

$$R_{wi} = \epsilon_0\epsilon_r\rho / C_i \text{ (\Omega)}, \quad (3)$$

式中 $\rho = 1-1.5 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$ 。

这台 Blumlein 传输线用去离子水作储能介质, 因为水的储能密度可高达 $160\text{kJ}/\text{cm}^3$, 另外水线还能做得十分紧凑。我们选用内、外线等阻抗设计各参量, 全部设计值和计算值列于表 1^[4]。

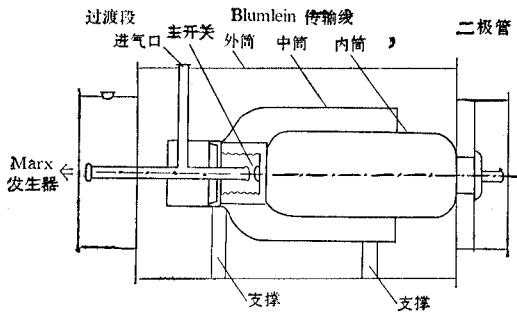


图 1 Blumlein 传输线原理图

表 1 Blumlein 传输线各参量

	外半径/内半径 (cm)	阻抗 $Z_i(\Omega)$	长度 $l_B(\text{cm})$	电容量 $C_i(\text{nF})$	洩漏电阻 $R_{wi}(\text{k}\Omega)$
内线	43.8/28	3	90.3	8.988	1.2
外线	69/44.6	2.93	111.3	11.359	0.93
传输段	69/28	5.93	39.7	1.96	5.42

J. C. Martin 曾给出在均匀液体介质中, 击穿场强 E_{BD} 的数学表达式

$$E_{BD} = k / (t_e^{1/3} A^{1/10}), \quad (4)$$

式中 A 是电介质的面积, t_e 是高电压有效持续时间, 以超过击穿电压的 63% 的时间来确定 t_e 。

$$t_e = \frac{\pi}{2} \left[\frac{L_m C_m (C_1 + C_2)}{C_m + C_1 + C_2} \right]^{1/2}, \quad (5)$$

式中 $L_m = 16 \times 10^{-6}\text{H}$, $C_m = 20 \times 10^{-9}\text{F}$ 。代入(5)式, 算出 $t_e = 0.63 \times 10^{-6}\text{s}$ 。(4)式中的常数 k 依赖于极化, 在水中, 用 mks 制, $k_+ = 1.2 \times 10^5$, $k_- = 2.4 \times 10^5$ 。

下面计算各圆筒表面实际场强与允许场强的比值, 以估算本装置设计是否合理。同轴线的场强由下式表示

$$E = V_B / [r_1 \ln(r_2/r_1)]. \quad (6)$$

算出各筒的参量列于表 2。可以看出这些参量的选择是很保守的。实验也证明在三同轴圆筒之间未发生过击穿现象。

表 2 Blumlein 线各筒表面实际场强和允许场强

	$E(\text{kV}/\text{cm})$	$K = E/E_{\text{允许}}$
内筒外表面	79.8	0.565
中筒内表面	51.0	0.198
中筒外表面	51.4	0.2
外筒内表面	33.2	0.27

三、装置技术

1. 局部区域场强的考虑

在内筒端部和主开关相接的区域(见图2),应给予特殊考虑. 在这个区域中,有三种介质,所以需要分析在不均匀介质中的场强分布. 经不均匀介质中场的数值计算^[9],得该区域电场分布如图3曲线①所示. 可以看出,在尼龙筒表面根部场强太高,易引起场击穿. 故需对该区域的电极形状做某些修改,以改善场强分布. 如在内筒端部加一个凸状圆环,如图4所示,则尼龙筒表面根部的电场强度将大大减弱,见图3曲线②. 采取此措施后,可免除高压击穿的危险. 在 $r_0 = 75\text{mm}$ 处的场强分布如图3曲线③所示,最高场强在开关球隙处. 这正是过压开关所需要的特性.

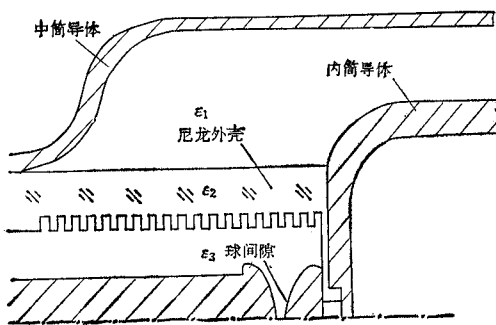


图2 主开关附近区域的电极结构和介质配置.

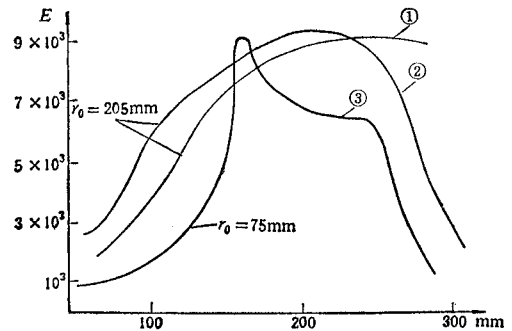


图3 电场分布

曲线①为原内筒电极形状下,尼龙介质面上的电场分布. 曲线②为内筒电极端加凸环后,尼龙介质面上的电场分布. 曲线③为 $r_0 = 75\text{mm}$ 面上的电场分布.

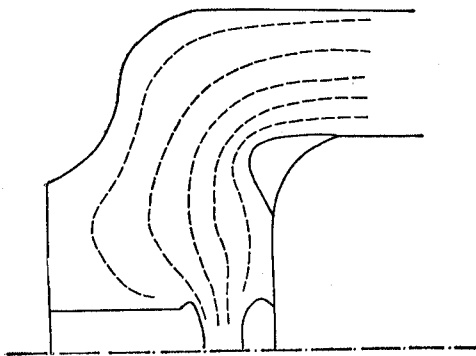


图4 内筒端部加凸状圆环后,主开关区域附近的电位分布

2. 主开关

主开关位于同轴传输线的内筒和中筒之间. 当中筒被 Marx 发生器充电至额定值

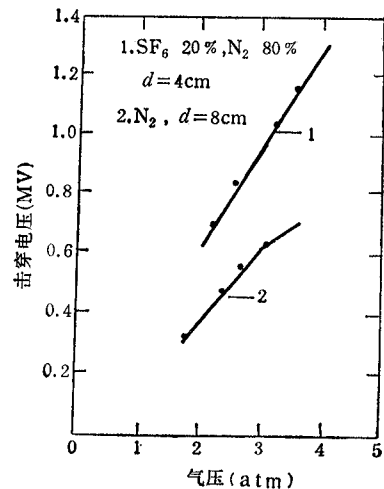


图5 Blumlein 传输线主开关特性曲线

时,主开关过压击穿. 开关中充以绝缘气体. 曾使用过纯氮气、氮和 SF₆ (按比例 0.8:0.2 配置)的混合气体两种介质. 测出主开关工作特性示于图 5. 其它参量为: 主开关极间距离在 0—10cm 内可调,开关极板直径为 14cm, 火花通道电感为 86nH, 火花电阻为 0.1Ω, 主开关上升时间 28.9ns.

3. 参量测量

对传输线的内线和外线以及传输段的电容量和泄漏电阻进行了测量, 结果列于表 3. 由测试结果可知与理论计算基本相符.

表 3 传输线各线的泄漏电阻和电容量的测量值

	内 线	外 线	传 输 段
$R_{wi}(k\Omega)$	1.17	0.747	3.74
$C_i(nF)$	9.2	11.4	2.88

4. 充电电流

Marx 发生器对 Blumlein 线充电. 其等效电路如图 6 所示. 当 K_1 接通时, 充电电流 i 为

$$i = I_0 e^{-(R_s/2L_m)t} \text{sh}(\omega\sqrt{\gamma^2 - 1}t), \quad (7)$$

式中

$$\omega = \sqrt{\omega_m^2 + \omega_B^2} = \sqrt{\frac{1}{L_m C_m} + \frac{1}{L_m C_B}}, \quad (8)$$

$$\gamma = R_s / [2\sqrt{L_m/C_m + L_m/C_B}]. \quad (9)$$

R_s 为 Marx 发生器回路电阻 (5Ω), L_m 为 Marx 发生器等效串联电感和馈线电感之和 (16×10^{-6} H), C_m 为 Marx 发生器的输出电容, C_B 为传输线电容.

将各值代入(9)式, 算出

$$\gamma = 0.06875. \quad (10)$$

对于 $\gamma \ll 1$ 的情况, (7)式则为

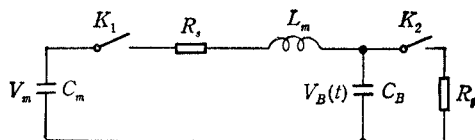


图 6 Marx 发生器对 Blumlein 线充电的等效电路

$$i = \frac{V_m}{\omega L_m \sqrt{1 - \gamma^2}} e^{-(R_s/2L_m)t} \sin(\omega\sqrt{1 - \gamma^2}t). \quad (11)$$

当 $t_m = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{1}{\omega\sqrt{1 - \gamma^2}} = 0.6298 \mu\text{s}$ 时, $i = i_{\max}$,

$$i_{\max} = \frac{V_m}{\omega L_m \sqrt{1 - \gamma^2}} e^{-(R_s/2L_m)t_m} \quad (12)$$

令 $V_m = 540\text{kV}$, 由(12)式算出

$$i_{\max} = 13.3\text{kA} \quad (13)$$

在上述电压(V_m)下用罗果夫线圈测量了 Marx 发生器对 Blumlein 线充电的电流波形, 结果如图 7 所示, 测得充电电流最大值 i'_{\max} 为

$$i'_{\max} = 14.5\text{kA} \quad (14)$$

(13)式与(14)式比较, 偏差 8.9%。理论计算和实验结果基本吻合。

5. 预脉冲电压

由(12)式得

$$V_g/V_m = \frac{L_g}{L_m \sqrt{1 - \gamma^2}} e^{-(R_s/2L_m)t_m} = 0.0562 \times 10^6 L_g \quad (15)$$

式中 V_m 为 Marx 发生器对传输线的充电电压, V_g 为充电电感上的压降。在表 4 中给出了几个不同的 L_g 所对应的 V_g/V_m 值。从图 8 所示的 Blumlein 线输出电压波形可以看出预脉冲与主脉冲幅度之比为 18%。与表 4 中所给数据相符。

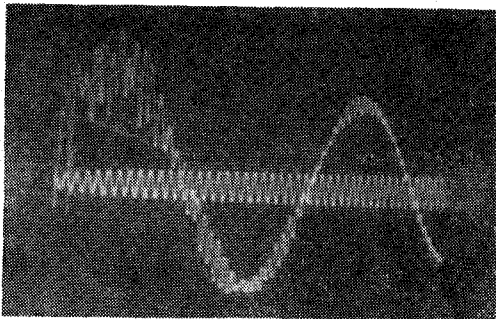


图 7 Marx 发生器对 Blumlein 线充电的电流波形。罗果夫线圈(带磁芯)为 50 匝, 负载电阻为 1.9Ω , 示波器灵敏度为 17.3V/mm (波形缩小一半), 时标为 10MHz 。

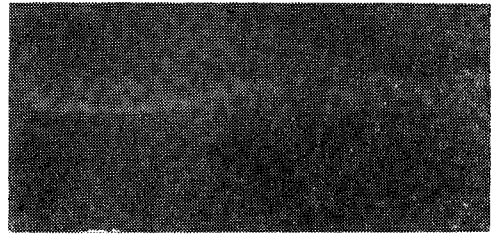


图 8 Blumlein 线输出电压波形 左边幅度小的是预脉冲电压, 右边幅度大的是主脉冲电压。波形缩小了一半, 时标为 10MHz 。

表 4 对应不同 L_g 值的预脉冲电压与充电电压之比

$L_g(\mu\text{H})$	3.2	2.5	2.1
$V_g/V_m(\%)$	18	14	12

因充电电感跨接在内、外导体之间, 所以当 Marx 发生器对传输线充电时, 引起一个预脉冲电压 V_g 加在二极管上。它对二极管的正常工作极为不利。为了消除预脉冲电压, 在传输线内导体和二极管之间需加一个抑制预脉冲电压的开关。在本装置中, 用直径为 70mm 、长为 40mm 的有机玻璃棒作预脉冲开关。对预脉冲电压而言, 此开关等效于一个电容, 对主脉冲电压, 它被过压击穿。

为了估算配置上述预脉冲开关后, 对预脉冲电压抑制的能力, 可以认为预脉冲开关的电容 C_s 与二极管的电容 C_T 串接在一起(见图 9), 则可按电容分压来计算预脉冲电压的分配情况。用 Q 表测量了 C_s 和 C_T 值, 结果列于表 5。由表中所列数据可以看出

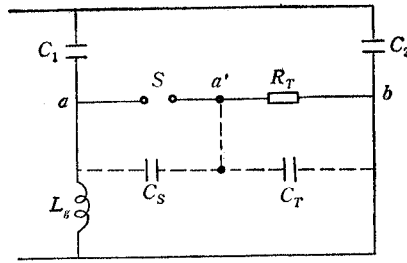


图9 预脉冲开关和二极管的等效电路
 C_1, C_2 为内、外线电容, S 为预脉冲开关, C_s 为预脉冲开关电容, R_T 为二极管内阻, C_T 为二极管电容, L_s 为充电电感

表 5

预脉冲开关	$C_s = 8(\text{pF})$	$V_s/V_g = 74\%$	$V_s/V_m = 8.8\%$
二极管	$C_T = 23(\text{pF})$	$V_T/V_g = 26\%$	$V_T/V_m = 3.1\%$

V_T/V_m 的估算值还是偏大了一点,但是当采用碳毡阴极时,此比值可下降。

6. Marx 发生器对 Blumlein 线的能量传输效率

根据图 6 的等效电路,放电电阻 R_p 是由 Marx 发生器的输出电阻(大于 $10^4\Omega$)和传输线内线、外线泄漏电阻($\sim 10^3\Omega$)并联在一起构成的。 R_p 可近似认为

$$R_p \approx \frac{R_{\omega 1} R_{\omega 2}}{R_{\omega 1} + R_{\omega 2}} \quad (16)$$

为了分析 K_1 和 K_2 接通时的迴路方程,须经拉氏变换等一系列运算,然后得到电压 $V_B(t)$ 的表达式:

$$V_B(t) = V_m \omega_B^2 \left\{ \frac{e^{p_1 t}}{(p_1 - p_2)(p_1 - p_3)} + \frac{e^{p_2 t}}{(p_2 - p_1)(p_2 - p_3)} + \frac{e^{p_3 t}}{(p_3 - p_1)(p_3 - p_2)} \right\} \quad (17)$$

在一般情况下, p_1, p_2, p_3 的解析式十分复杂,为了便于叙述,根据不同迴路参量来分别讨论。当 $R_s = 0, R_p = \infty$ 时

$$V_B(t)/V_m = \frac{C_m}{C_m + C_B} (1 - \cos \omega t) \quad (18)$$

能量最大传输效率为

$$\eta_{M-B} = \frac{4C_B C_m}{(C_m + C_B)^2} \quad (19)$$

此时 Marx 发生器把能量无损地转移到传输线上。当 $C_m = C_B$ 时,能量传输效率达 100%。这显然是一种理想状态。实际上 $R_s \neq 0, R_p \neq \infty$, 因而要引起能量损耗。此时能量传输效率近似为:

$$\eta_{M-B} = \frac{C_m C_B}{C_m + C_B} \left[1 + e^{-\pi / \sqrt{(2\omega \tau_s)^2 - 1}} \right]^2 \left[1 - \frac{3\pi C_m}{\omega R_p (C_m + C_B)^2} \right], \quad (20)$$

式中 $\tau_s = L_m/R_s, R_p \approx 350\Omega, R_s = 5\Omega$, 将文中各量代入(20)式,求得 Marx 发生器对 Blumlein 线的能量传输效率的理论值为:

$$\eta_{M-B理} = 72\% \quad (21)$$

Marx 发生器对 Blumlein 线充电的电压波形示于图 10. 连同图 7 充电电流波形一起, 用微处理器算出 Blumlein 线获得了 2000J 能量. 此时 Marx 发生器每级电容器充电 30kV, 总储能 2916J, 因而算出能量传输效率的实验值为

$$\eta_{M-B实} = 69\% \quad (22)$$

(21)式与(22)式相比, 只偏差 2%, 因而理论值与实验值吻合很好.

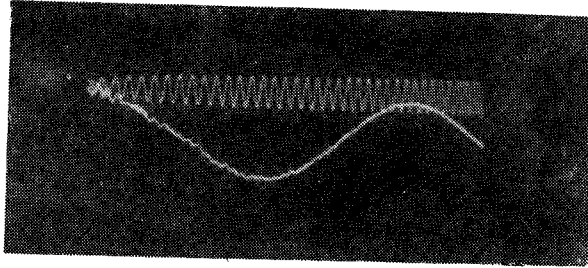


图 10 Marx 对 Blumlein 线充电的电压波形
波形缩小一倍, 时标 10MHz

7. Blumlein 线对二极管的能量传输效率

当 Blumlein 线的双线已充上电压 V_{Bmax} 后, 主开关击穿, 有一个 $(-V_{Bmax})$ 电压波在内线和外线中传播. 若传输线无限长, 波在传输线上的传播只有一次反射. 实际上, 传输线的长度总是有限的, 在传输线的端点上会产生反射波和透射波. Blumlein 双线向二极管放电, 波在 Blumlein 双线上多次反射的过程, 可由下面的矩阵来表示:

$$\begin{pmatrix} a_k \\ b_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\alpha_1 & \beta_2 \\ -\beta_1 & \alpha_2 \end{pmatrix}^{k-1} \begin{pmatrix} a_1 \\ b_1 \end{pmatrix}, \quad (23)$$

式中

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1 &= (R_T + Z_2 - Z_1)/(R_T + Z_2 + Z_1), \\ \beta_1 &= 2Z_2(R_T + Z_1 + Z_2), \\ \alpha_2 &= (R_T + Z_1 - Z_2)/(R_T + Z_1 + Z_2), \\ \beta_2 &= 2Z_1/(R_T + Z_1 + Z_2), \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

其中 R_T 为二极管阻抗. 由(23)式可求得 Blumlein 双线放电时二极管上的电压降为

$$0 \leq t < \tau^*, \quad u_{RT}^{(0)}/V_{Bmax} = 0, \quad (25)$$

$$\tau^* \leq t < 3\tau^*, \quad u_{RT}^{(1)}/V_{Bmax} = -\frac{2R_T}{R_T + Z_1 + Z_2}, \quad (26)$$

$$3\tau^* \leq t < 5\tau^*, \quad u_{RT}^{(3)}/V_{Bmax} = -\frac{2R_T}{R_T + Z_1 + Z_2} \cdot \frac{2(Z_1 - Z_2)}{R_T + Z_1 + Z_2}. \quad (27)$$

由(26)、(27)式可知, 二极管电压由 Blumlein 双线与二极管阻抗匹配来决定. 其中

$$\tau^* = l_B \sqrt{L_0 C_0},$$

$L_0 \approx 0.2 \ln(r_2/r_1) \mu\text{H}/\text{m}$, $C_0 = \epsilon_r/[18 \ln(r_2/r_1)] \text{nF}/\text{m}$, l_B 为内线、外线各自的长度, ϵ_r 为介质的相对介电常数. 此时 Blumlein 双线到二极管的能量传输效率为:

$$\eta_{B-T} = \frac{16R_T Z_1 Z_2}{(R_T + Z_1 + Z_2)^2 (Z_1 + Z_2)}. \quad (28)$$

当 $R_T = Z_1 + Z_2$, 且 $Z_1 = Z_2 = R_T/2$ 时,

$$\eta_{B-T} = 1, \tag{29}$$

当 R_T 稍大于 $(Z_1 + Z_2)$ 时, 对效率影响并不显著, 此时二极管电压降 u_{RT} 可略大于 V_{Bmax} .

表 6 电子束实验测量值

充电电压 $u_0(kV)$	Blumlein输出电压		二极管峰值电流		电子束峰值功率		电子束能量 $E(J)$	效率 %
	$V_B(kV)$	$\tau(ns)$	$I_0(kA)$	$\tau(ns)$	$p(GW)$	$\tau(ns)$		
70	904	85	119	100	129	70	7187	45

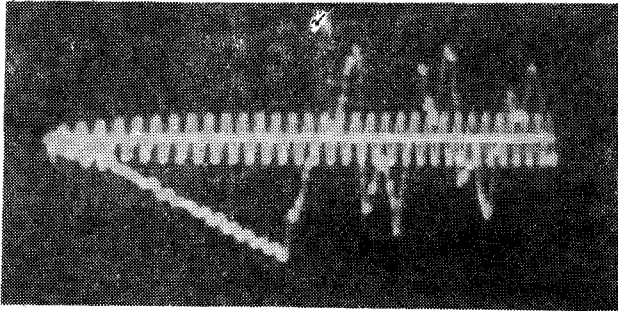


图 11 Marx 发生器输出电压波形
OK-19 示波器, 时标为 $10MHz$.

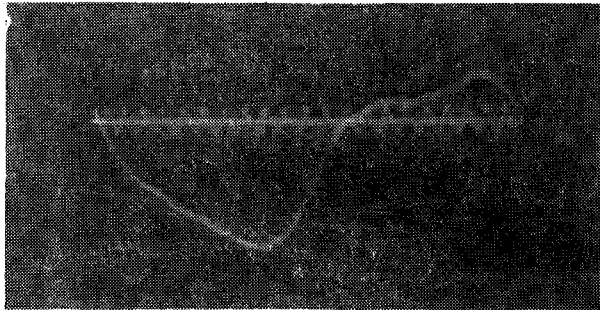


图 12 Blumlein 传输线输出电压波形
OK-19 示波器, 时标为 $100MHz$.

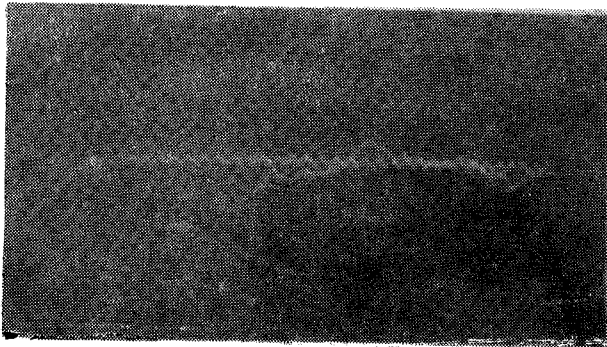


图 13 二极管电流波形
电阻分压器阻值为 $2.53 \times 10^{-3}\Omega$, OK-19 示波器, 时标为 $100MHz$.

8. 电子束实验

曾用过多种阴极包括碳毡阴极, 这里仅举单针阴极的数据: 阴阳极间距为 25 mm, Marx 发生器每级充电 70kV, Marx 发生器输出电压波形如图 11 所示, Blumlein 线输出电压波形如图 12 所示, 二极管电流波形如图 13 所示, 所有数据都送微处理机处理, 结果列于表 6. 本装置已正常运转一千多次, 情况良好.

参加过本装置阶段工作的还有顾之玉、曹秋生、王绍英和王培刚等同志. 本装置的设计和加工是和长沙工学院 205 教研室合作进行的, 作者在此表示感谢.

参 考 文 献

- [1] J. A. Nation, *Particle Accelerators*, 10(1979), 1.
- [2] J. Harrison et al., *Fifth Symposium on Engineering Problems of Fusion Research*, 1973, p. 640.
- [3] 张 奇等, 10¹¹W 强流相对论性电子束加速器, 原子能科学技术, 20(1986), 643—648.
- [4] 赵仲宏等, 10¹¹W 强流电子束加速器的物理设计, 中国科学院电子学研究所内部资料.
- [5] 郭铸九, 不均匀介质场和击穿电压的数字计算, 中国电子学会第 4 届真空电子学会年会报告, 咸阳, 1984 年. 12 月

A 1MV 6Ω BLUMLEIN TRANSMISSION LINE

Zhao Zhonghong, Li Tixing, Xiao Nengqiao, Zhang Qi,
Zheng Baohong, Su Yaowen, Wu Meng, Wang Qing

(*Institute of Electronics, Academia Sinica*)

A 1MV 6Ω Blumlein transmission line with water-dielectric is presented. Some basic parameters of this equipment are given. Major components and physical processes such as charging by Marx generator and fast pulse-forming, are theoretically analysed and calculated. The obtained results are compared with the experimental ones.