

文章编号: 1001-4322(2007)01-0160-05

螺旋线型脉冲形成线匝间击穿与输出波形的研究*

刘振祥, 张建德, 刘金亮, 杨建华, 冯加怀, 罗 玲

(国防科学技术大学 光电科学与工程学院, 长沙 410073)

摘 要: 针对螺旋线型脉冲形成线放电过程的匝间击穿问题, 采用数值模拟的方法研究了影响螺旋线上轴向电场的因素。模拟结果表明: 螺旋线的螺旋角越大、开关的上升沿越小、负载的阻值越小则越容易造成匝间击穿; 针对输出波形的前沿上冲和下凹问题, 通过数值模拟和实验方法研究了加速器内阻抗不匹配段对输出波形的影响, 结果表明: 改变螺旋线与开关之间连接段的阻抗以及开关和二极管之间过渡段的阻抗, 使之接近于螺旋线阻抗, 并使电长度减小, 可以消除波形的前沿上冲和下凹, 得到近似方波的高电压脉冲输出。

关键词: 螺旋线型脉冲形成线; 匝间击穿; 轴向电场; 前沿上冲; 下凹

中图分类号: TL503 **文献标识码:** A

脉冲功率源小型化是脉冲功率技术的发展趋势, 为了满足一些高功率微波源对长脉冲的应用需求, 采用一段螺旋线取代加速器中的同轴线型脉冲形成线, 可以显著减小加速器的体积, 这种方法已经得到了成功应用^[1-7], 但在文献[1]中提到, 当采用螺旋带型螺旋线时, 出现了匝间击穿问题, 另外, 由于螺旋线型脉冲形成线内存在阻抗不匹配问题, 使得负载输出波形出现了一个 20 ns 的前沿上冲。其它的螺旋线型加速器也出现了类似的情况, 但都没有作进一步的分析。

为了更加详细地分析脉冲形成线内的电磁场分布和变化情况, 采用数值模拟的方法是一种有效的途径, 文献[1, 6]利用 Karat 程序模拟螺旋线型脉冲形成线的放电波形和电磁场分布情况, 得到的结果与实验符合得比较好。Karat 程序由于采用了离散边界的方法, 能够处理复杂的边界条件, 可以用于模拟螺旋线内的电磁场分布和变化情况。本文通过数值模拟的方法分析了螺旋线型脉冲形成线内引起匝间击穿和造成前沿上冲的原因, 提出了解决的方法, 为螺旋线型脉冲形成线的设计提供参考。

1 模拟模型

在 Karat 模拟程序中建立的物理模型如图 1 所示。模型关于 z 轴旋转对称, 主要由内筒螺旋线、外屏蔽筒、绝缘电介质、开关和负载等组成。在螺旋线的两端有两段用于连接固定螺旋线的导体, 称为连接段; 在开关和二极管之间有一段传输线, 称为过渡段。开关和负载都是用非色散的电介质表示的, 可以通过改变其电导率来改变电阻。模型的主要几何参数为: 螺旋线内筒半径 10 cm, 长度 80 cm, 螺旋角 80° ; 外筒半径 19 cm, 长度 110 cm。根据文献[8-9]给出的公式, 可以计算出水介质螺旋线的特征阻抗为 22Ω 。为了将螺旋线内的电磁场情况与同轴线的进行比较, 还建立了一个同样尺寸的同轴线型脉冲形成线模拟模型。脉冲形成线在初始时刻已经充电, 充电电压为 1 MV。

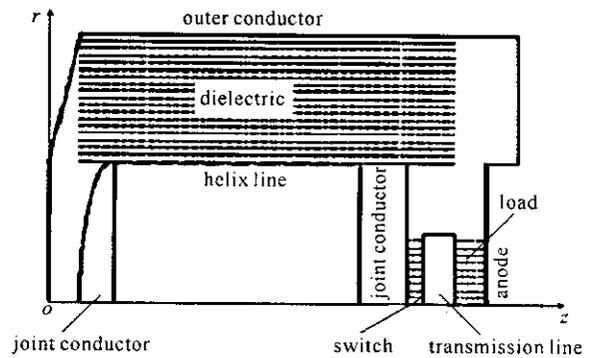


Fig. 1 Model of numerical simulation

图 1 数值模拟模型

2 模拟结果与分析

2.1 螺旋线上的轴向电场大小

在形成线中间靠近螺旋线表面取一点作为诊断点, 两脉冲形成线放电过程中电场在诊断点的变化情况分

* 收稿日期: 2006-08-29; 修订日期: 2006-12-29

基金项目: 国家 863 计划项目资助课题

作者简介: 刘振祥(1967—), 男, 副教授, 博士生, 主要从事脉冲功率技术研究; lzx_hunan@sina.com。

别如图 2 和图 3 所示(图中 E_r 和 E_θ 分别为诊断点处沿径向电场和角向电场),可以看出,同轴线内的电场几乎不存在轴向电场 E_z 分量,而在螺旋线内的 E_z 分量不能忽略,在电压波前经过的一段时间内,电场的轴向分量达到了几十 kV。模拟发现,影响 E_z 的大小的因素主要有螺旋角、开关上升沿和负载的大小。

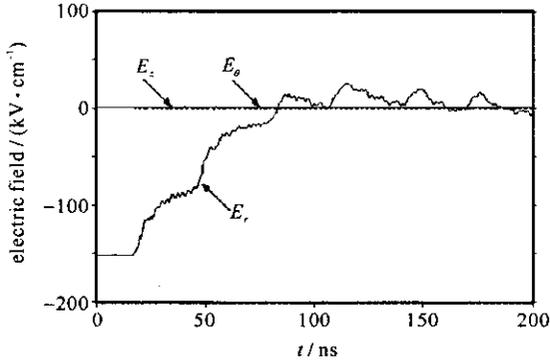


Fig. 2 Electric field of coaxial PFL when discharging

图 2 同轴线形 PFL 放电过程中的电场变化情况

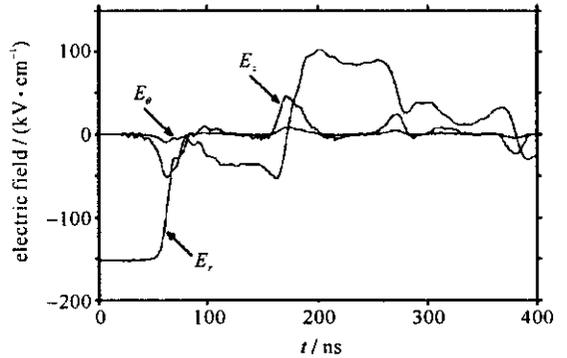


Fig. 3 Electric field of helical PFL when discharging

图 3 螺旋线形 PFL 放电过程中的电场变化情况

2.1.1 螺旋角的影响

模拟发现,螺旋角越大,轴向电场的极大值也越大,其大小与螺旋角的正切函数近似成正比,如图 4 所示。这是因为 $E_z \propto -\Delta u / \Delta z$, 其中 Δu 是螺旋线上电压波前沿的幅值, Δz 是电压波前沿在传播方向分布宽度,由文献[8]可知,电磁波沿螺旋线的传播速度与螺旋角的正切函数成反比,即 $V_0 \propto 1/\tan\psi$, 螺旋角越大,电压波的传播速度越小,其前沿沿着 z 轴的分布宽度越小,轴向电场也就越大。

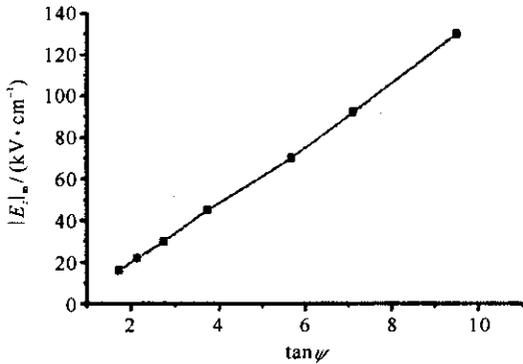


Fig. 4 Maximum axial electric field vs helical angles

图 4 轴向电场的极大值随螺旋角的变化

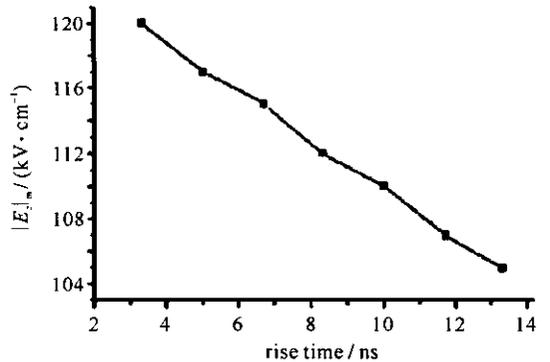


Fig. 5 Maximum axial electric field vs rise time of the switch

图 5 轴向电场的极大值随开关上升沿的变化

2.1.2 开关上升沿的影响

图 5 是在不同上升沿情况下,螺旋线上轴向电场的极大值的变化情况。当波的传播速度一定时,开关上升沿越小,电压波的前沿在 z 轴的分布宽度越小,轴向电场越大。

2.1.3 负载的影响

图 6 是轴向电场极大值随负载的变化情况。从图中可以看出,负载越小,轴向电场的极大值越大,当负载为 0 时其值最大。这是因为负载越小,电压波的反射系数越小,螺旋线上入射电压波 u_+ 和反射电压波 u_- 的差值越大,叠加后的电压波沿前沿越陡,轴向电场的极大值也越大。

2.2 加速器内的阻抗不匹配段对输出波形的影响

图 7 和图 8 分别是同轴线型加速器和螺旋线型加速器输出到负载的电压波形。可以看出,螺旋线型加速器形成脉冲的脉宽要大几倍,但出现了一个前沿上冲和一个下凹,这样的输出波形不利于驱动微波源。根据文献[1]中的分析和模拟结果发现,输出波形的前沿上冲是

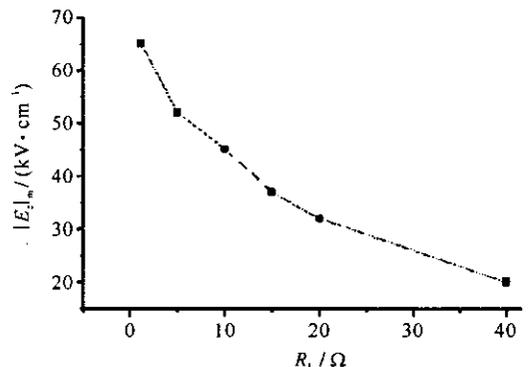


Fig. 6 Maximum axial electric field vs loads

图 6 轴向电场极大值随负载阻抗的变化

根据文献[1]中的分析和模拟结果发现,输出波形的前沿上冲是

由螺旋线和开关之间的连接段引起的,而下凹是因为过渡段的阻抗小于负载和螺旋线的阻抗造成的。

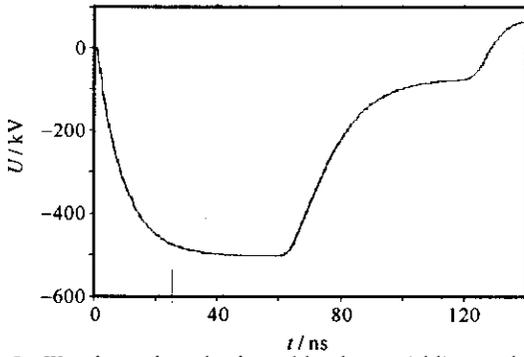


Fig. 7 Waveform of a pulse formed by the coaxial line accelerator

图 7 同轴线性加速器产生的电压波形

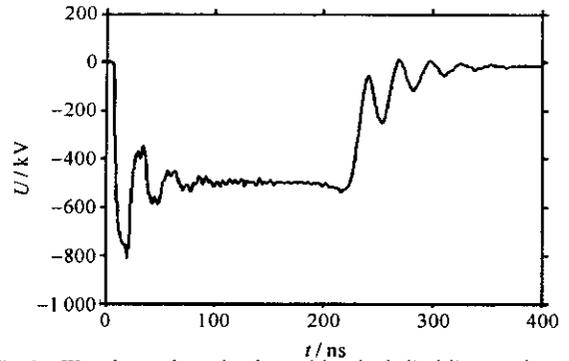


Fig. 8 Waveform of a pulse formed by the helical line accelerator

图 8 螺旋线性加速器产生的电压波形

2. 2. 1 连接段的影响

为了研究连接段的影响,在模拟过程中,使负载和过渡段的阻抗均与螺旋线的特征阻抗相等,只改变连接段的阻抗大小。模拟结果显示,当连接段的阻抗小于螺旋线的阻抗时,输出脉冲就会有一个前沿上冲,而且连接段的阻抗越小,上冲幅度越大(见图 9),这是因为连接段的阻抗越小,电压波在过渡段的反射系数就越大,传到负载时上冲就越严重。如果不改变连接段的阻抗值,只改变其电长度,则上冲的幅度不变,但电长度越大,上冲的宽度也越大(见图 10)。在实际的螺旋线型脉冲形成线加速器中,连接段的阻抗一般小于螺旋线的特征阻抗,当其阻抗大于螺旋线的特征阻抗时,不会出现前沿上冲,但会使输出脉冲的上升沿增大。

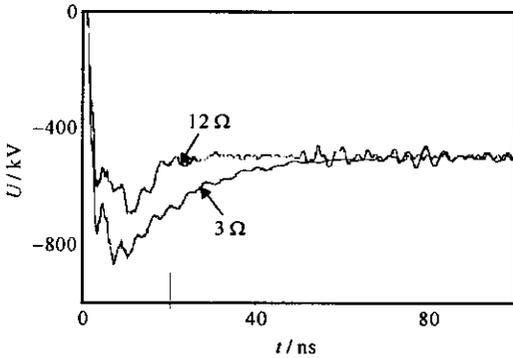


Fig. 9 Influence of the impedance of the joint section on the upshot

图 9 连接段阻抗对上冲的影响

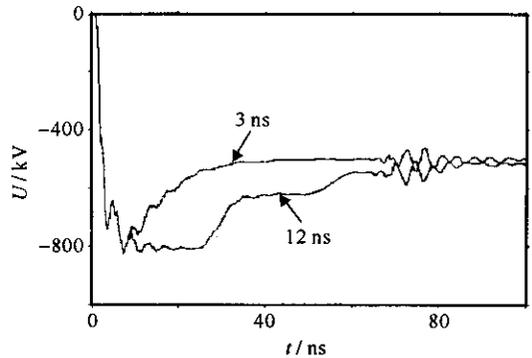


Fig. 10 Influence of the electric length of the joint section on the upshot

图 10 连接段电长度对上冲的影响

2. 2. 2 过渡段的影响

在连接段的阻抗小于螺旋线的特征阻抗时,如果过渡段的阻抗也小于这一特征阻抗,则输出波形就会出现下凹,而且过渡段阻抗越小,下凹越严重(见图 11),这是由于过渡段阻抗越小,形成线到过渡段的电压透射系数越小,传播到负载的电压就越小,模拟还发现,过渡段电长度越大,下凹的宽度也越大(见图 12)。如果过渡

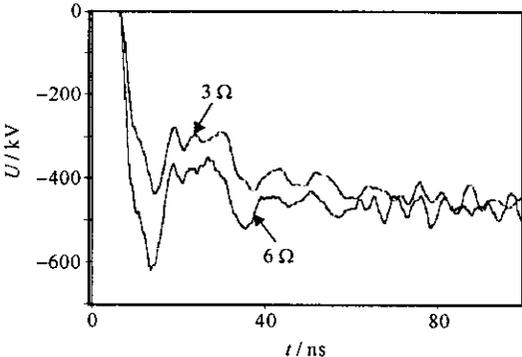


Fig. 11 Influence of the impedance of the transition section on the hollow of the pulse

图 11 过渡段阻抗对脉冲下凹的影响

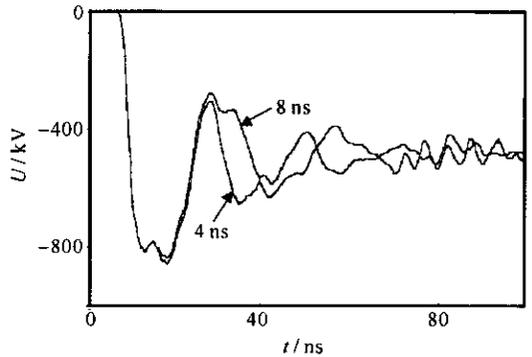


Fig. 12 Influence of the electric length of the transition section on the hollow of the pulse

图 12 过渡段电长度对脉冲下凹的影响

段的阻抗大于螺旋线和连接段的特性阻抗,则不会出现下凹,但会使输出波形上升沿增大。

3 实验验证

为了对上述模拟结果进行实验验证,我们设计了一套螺旋线型脉冲形成线加速器,其结构如图 13 所示。充有水电介质时螺旋线的特性阻抗为 20Ω ,螺旋线的内筒前端与开关之间有一同轴连接段(见图 14),长度为 6 cm ,阻抗为 4.3Ω ,在开关于负载之间加了一段长 10 cm 的过渡段,其阻值与填充的电介质有关。

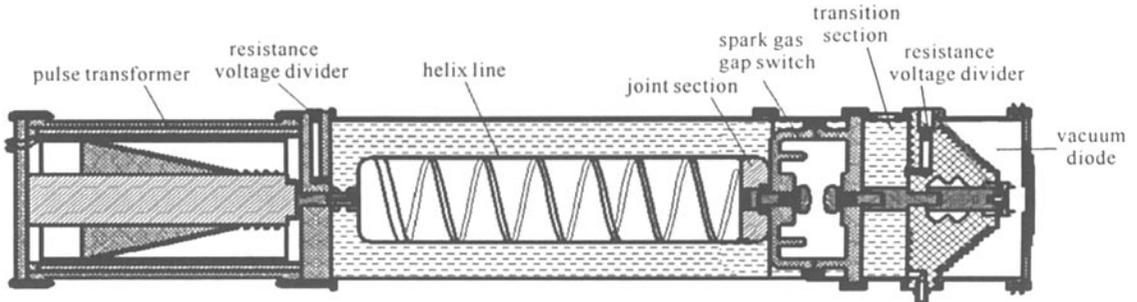


Fig. 13 Schematic of the helix forming line accelerator

图 13 螺旋线型脉冲形成线加速器结构图

螺旋线内筒的匝间距确定的方法为:利用 Karat 程序对螺旋线表面轴向电场的分布和变化情况进行模拟,当形成线内充有水介质($\epsilon_r = 80$),充电电压为 1 MV (要求工作电压 800 kV)、开关上升沿为 3 ns 时(通常情况下,开关的上升沿大于 3 ns),负载电阻为 0.1Ω 的情况下,螺旋线表面附近距离螺旋线表面 0.3 cm 一点的轴向电场强度极大值小于 120 kV/cm 。螺旋线用 0.5 cm 厚的不锈钢管沿螺旋方向开槽加工制成,电压波波前在螺旋线匝间渡越时间约 30 ns ,沿轴向分布宽度约 19 cm ,根据 Martin 经验公式计算可知,去离子水中匝间脉冲的正极击穿场强 E_b 大于 200 kV/cm ,因此确定匝间距为 1 cm 。考虑到电压波在端部要发生反射,电场分布比较复杂,将匝间距在端部渐变为 2 cm 。

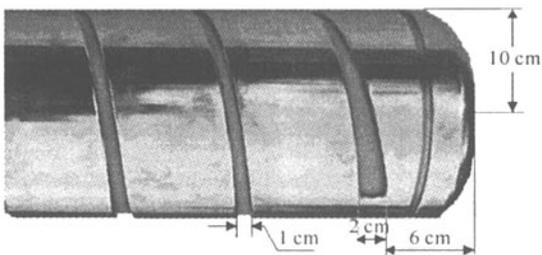


Fig. 14 Inner conductor in the helical line

图 14 螺旋线内筒结构图

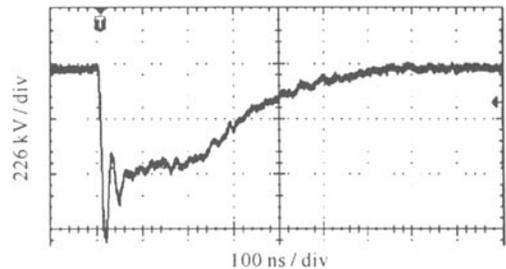


Fig. 15 Voltage waveform on the diode

图 15 二极管电压波形

在过渡段中充满去离子水,其阻抗为 6Ω ,使用带阳极网的虚阴极振荡器作负载,测得输出电压波形如图 15 所示,脉冲前沿出现了一个上冲和一个下凹。上冲是由连接段造成的,而下凹则是由于过渡段阻抗小于负载和螺旋线的阻抗引起的。要削弱或消除负载电压脉冲的上冲,就必须使同轴连接段的阻抗尽量接近于螺旋线的阻抗,同时还应尽量减小其电长度。我们用高分子材料($\epsilon_r = 2.3$)加工了一个长 10 cm 的高阻抗环,内径为 10 cm ,外径为 18 cm ,如图 16 所示。将它套在同轴段后,这一段的特性阻抗变为 23Ω ,电长度变为 0.5 ns 。为了消除输出电压脉冲的下凹,将过渡段内的绝缘介质改用变压器油,其阻抗变为 35Ω ,电长度也变为 0.5 ns 。图 17 是加上高阻抗环后输出的电压波形,前沿上冲和下凹都消失了,是一个近似方波的脉冲。

4 结论

数值模拟与实验分析表明:采用数值模拟的方法可以分析脉冲形成线内的电磁场分布和变化情况,为设计和实验提供参考,在设计螺旋线型脉冲形成线时,可以根据螺旋线的螺旋角、开关的上升沿和负载的阻值确定螺旋线的匝间距;通常情况下,螺旋线型脉冲形成线输出脉冲的前沿上冲是由于螺旋线和开关之间的连接段阻抗偏小造成的,下凹是由于开关与负载之间的过渡段阻抗偏小造成的,它们的电长度越大,上冲和下凹的宽度也越大。为了使输出波形平整,在设计时应尽量使它们的阻抗接近于螺旋线的阻抗,同时还应尽量减小它们的电

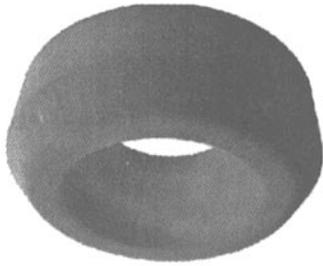


Fig. 16 The high impedance annulus

图 16 高阻抗环实物图

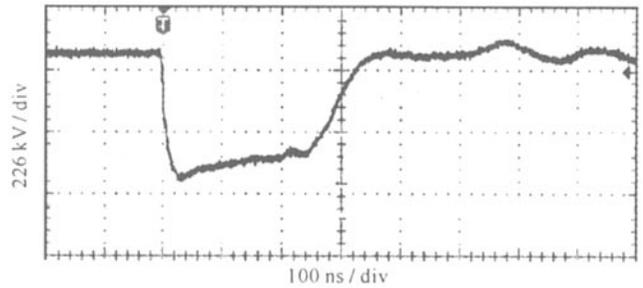


Fig. 17 Voltage waveform on the diode with

high impedance annulus on the pulse forming line

图 17 加高阻抗环时得到的电压波形

长度。

参考文献:

- [1] Korovin S D, Gubanov V P, Gunin A V, et al. Repetitive nanosecond high-voltage generator based on spiral forming line[C]//IEEE International Conference on Pulsed Power Plasma Science, 2001, **2**:1249.
- [2] Gubanov V P, Gunin A V, Korovin S D, et al. Periodically pulsed high voltage generator based on Tesla transformer and spiral forming line [C]//IEEE International Conference on Pulsed Power Plasma Science, 2001:336.
- [3] Gubanov V P, Gunin A V, Korovin S D, et al. A nanosecond high-voltage periodically pulsed generator based on a helix forming line[J]. *Pribory i Tekhnika Eksperimenta*, 2002, **45**(1):73-75.
- [4] Mesyats G A, Korovin S D, Gunin A V, et al. Repetitively pulsed high-current accelerators with transformer charging of forming lines[J]. *Laser and Particle Beams*, 2003, **21**(2):197-209.
- [5] 梁川,夏连胜,章林文.螺旋线型水介质 Blumlein 线的初步研究[J].高电压技术, 2004, **30**(1):43-44. (Liang C, Xia L S, Zhang L W. Primary research on water helical Blumlein line. *High Voltage Engineering*, 2004, **30**(1):43-44)
- [6] 杨建华,钟辉煌,舒挺,等.水介质 Blumlein 型螺旋脉冲形成线的研究[J].强激光与粒子束, 2005, **17**(8):1191-1194. (Yang J H, Zhong H H, Shu T, et al. Water-dielectric Blumlein type of PFL with spiral line. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(8):1191-1194)
- [7] 刘振祥,张建德.螺旋线型水介质长脉冲形成线的研究[J].强激光与粒子束, 2006, **18**(12):2078-2081. (Liu Z X, Zhang J D. Research on water-dielectric helix long-pulse forming line. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(12):2078-2081)
- [8] Kino G S. Circuit theory of coupled transmission system[J]. *Journal of Applied Physics*, 1962, **33**(10):3002-3008.
- [9] Paik S F. Design formulas for helix dispersion shaping[J]. *IEEE Transaction on Electron Devices*, 1969, **16**(12):1010-1014.

Breakdown between adjacent turns and output waveform of helix pulse forming line

LIU Zhen-xiang, ZHANG Jian-de, LIU Jin-liang, YANG Jian-hua, FENG Jia-huai, LUO Ling
(College of Opto-Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: To investigate the problem of breakdown between the adjacent turns of the helix pulse forming line (PFL), the influences on the axial electric field of the helix PFL were analyzed numerically. Numerical results indicated that it was easier to breakdown between the adjacent turns if the helix angle was bigger, the rise time of the switch or the load value was smaller. To study the problem of the upshot and hollow on the output pulse, the influences on the waveform caused by the impedance mismatched sections in helix PFL accelerator were analyzed numerically and experimentally. An approximate square high voltage pulse was obtained by making the impedances of the joint section (between the helix line and switch) and the transition section (between switch and load) close to that of the helix line and minishing their electric lengths.

Key words: Helix pulse forming line; Breakdown between the adjacent turns; Axial electric field; Upshot on risetime; Hollow