



·脉冲功率技术·

非线性传输线在 DSRD 脉冲电源中的应用*

史晓蕾¹, 陈锦晖^{1,2}, 王冠文¹, 王磊¹, 刘鹏¹

(1. 中国科学院高能物理研究所加速器中心, 北京 100049; 2. 中国科学院大学核科学与技术学院, 北京 100049)

摘 要: 加速器技术的发展, 对注入引出系统的 kicker 脉冲电源提出了新的技术要求。注入引出系统冲击磁铁不仅要求脉冲电压高, 底宽达到 ns 量级, 还对波形的稳定性和前后残余电压有很高要求。漂移阶跃恢复二极管 (DSRD) 因其速度快、工作电流大等优点, 在 ns 级脉冲电源中应用前景广泛, 但其工作过程中会存在预脉冲等使脉冲波形偏离理想形态的因素。基于一种已有的 DSRD 脉冲电源, 使用非线性传输线对脉冲进行整形, 同时对脉冲的前后边沿进行锐化, 缩短脉冲边沿的时间, 大幅减小脉冲前后的残余电压, 提高电源的性能。完成了一台电源样机的设计和实验, 实验结果表明, 该样机在 50 Ω 负载上产生的脉冲幅值约 10 kV, 前后边沿时间 (10%~90%) 约 2 ns, 底宽 (3%~3%) 小于 8 ns。

关键词: 带状线冲击器; 纳秒脉冲电源; 漂移阶跃恢复二极管; 非线性传输线

中图分类号: TL501

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.230068

Application of nonlinear transmission line in DSRD pulse generator

Shi Xiaolei¹, Chen Jinhui^{1,2}, Wang Guanwen¹, Wang Lei¹, Liu Peng¹

(1. Accelerator Division, Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

2. School of Nuclear Science and Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: There is an increasingly higher requirement on the pulse source of kicker in the injection and extraction system with the development of accelerators. As a special nanosecond switch, Drift Step Recovery Diode (DSRD) has a great application prospect in pulse power technology for its notably short switching-off time and large working current. However, there are some factors such as pre-pulse that make the pulse waveform deviate from the ideal shape. A prototype of pulse generator was designed and tested. It is based on a basic DSRD circuit, at the same time, the Non-Linear Transmission Line (NLT) is used to shape the pulse, compress the edge and reduce the residual voltage. Its circuit experiment shows that the pulse amplitude on resistor load of 50 Ω is about 10 kV, the rise time and fall time are about 2 ns (10%~90%) and the bottom width (3%~3%) is less than 8 ns.

Key words: strip-line kicker, nano-second pulser, DSRD, non-linear transmission line

高能同步辐射光源 (HEPS) 是我国正在建造的基于储存环的准衍射极限光源, 是我国首台高能量同步辐射装置, 其设计指标达到了国际先进水平, 能够满足我国生物、化工、材料等领域的前沿科研需求^[1]。HEPS 的设计方案对注入引出系统 kicker 脉冲电源提出了一系列新要求。HEPS 储存环的在轴置换注入方案要求脉冲磁场能够对 6 GeV 的电子束逐束团的偏转, 其带状线冲击器 (strip-line kicker) 脉冲电源输出波形的底宽要小于 10 ns (3%~3%), 脉冲电压 (50 Ω) 大于 ±15 kV。为了实现累积注入, 其设计中还预留了在轴纵向注入的升级方案, 该方案要求的脉冲底宽要小于 4 ns (3%~3%)^[2-3]。

和常规的纳秒脉冲电源相比, kicker 脉冲电源除了对电压幅值、边沿时间有要求, 还对波形的稳定性、定时精度、脉冲前后残余电压的幅度有较高的要求, 如果脉冲波形稳定性较差或者脉冲前后有一定幅值的残余电压, 则会导致注入效率下降, 并对相邻循环束造成扰动, 因此脉冲底宽的计算方式不同于常规电源的 10%~10%, 而是要求 3%~3%^[2-3]。目前国内外已有许多相关研究, 技术路线主要有两种: 一种是采用雪崩三极管或射频场效应晶体管 (RF-MOSFET) 作为脉冲电源的主开关, 利用功率叠加技术提高电路总的输出功率。合肥先进光源 (HALS) 的预研

* 收稿日期: 2023-03-31; 修订日期: 2023-07-20

基金项目: 国家自然科学基金项目 (11675194; 11475200)

联系方式: 史晓蕾, shixl@ihep.ac.cn。

中,利用雪崩三极管制作了一台 kicker 脉冲电源样机,该样机使用 20 级雪崩管进行串联叠加,输出电压为 3 kV (50 Ω),底宽约 7 ns^[4]。美国先进光源 ALS-U 的在轴置换注入 kicker 脉冲电源^[5],采用了 8 路并联的场效应晶体管 (MOSFET) 并使用 8 级感应叠加线路,得到脉冲边沿小于 10 ns,幅值为 ± 5.3 kV (50 Ω) 的电脉冲。这类电源通常要使用大量的半导体器件,导致电路结构复杂,不易维护^[6];另一种思路是利用漂移阶跃恢复二极管 (DSRD) 或半导体断路器 (SOS) 等一类基于器件内等离子体现象的断路器,这类器件速度快、功率大且寿命很长^[7]。美国斯坦福直线加速器实验室 (SLAC) 利用 DSRD 开展了许多研究,研制出了幅值 15 kV、边沿时间小于 2 ns 的脉冲电源^[8-9],国内中国科学院高能物理研究所陈锦晖等人,利用 DSRD 作为主开关,研制了一台底宽约 10 ns,幅值 ± 17 kV 的脉冲电源^[3]。虽然这类器件的关断速度很快,所使用的开关器件相对较少,但是电源得到的波形相较于理想的 kicker 脉冲波形还有一定差距,因此还需要对脉冲进行一定程度的整形。

非线性传输线 (NLT) 是一种常用的脉冲整形技术^[10-11],可以对脉冲边沿进行锐化,并且大幅抑制脉冲前后的残余电压,具有成本低、可靠性高等优点,目前已有不少相关的研究。本文基于一类常见的 DSRD 电源,研究了一种利用 NLT 对电脉冲进行整形、锐化脉冲前后边沿、减小脉冲前后残余电压的方法。本文首先简述了电源和 NLT 的工作原理,然后设计了电路实验来进行验证,实验证明该方案能有效对波形进行整形,提高脉冲电源的性能。

1 DSRD 脉冲电源的工作原理

DSRD 是一种具有特殊掺杂结构的二极管,其 PN 结具有 ns 甚至亚 ns 级的快速恢复时间。在它工作时,首先需要给它提供一个百 ns 量级的正向脉冲电流,向 PN 结中注入电子-空穴等离子体;在正向脉冲电流结束后,紧接着产生一个反向脉冲电流,尽可能快地抽取 PN 结区存储的载流子,此时能量被存储到电感或脉冲形成线上。当抽取和注入的电荷量相等时,PN 结恢复,DSRD 迅速关断,存储在电感或形成线上的能量被切换到负载上形成前沿极快的脉冲^[7,12-14]。

常见的 DSRD 脉冲电源有多种,根据储能方式的不同可以分为电感储能和脉冲形成线 (PFL) 储能两类,根据控制开关的数量又可分为单开关型和双开关型^[9]。为了在电阻负载上得到窄脉宽的脉冲,通常选择脉冲形成线作为储能元件。

图 1 所示是一种 PFL 储能的 DSRD 脉冲电源,电路工作时,首先闭合开关 S_1 ,电容 C_0 经 L_1 、 C_1 、DSRD 放电,为 DSRD 提供正向电流,同时为电容 C_1 充电;当电流换向时,开关 S_2 闭合,电容 C_1 放电,为 DSRD 提供反向电流,同时将能量存储在 PFL 上;当反向电流阶段抽取的电荷量和注入阶段相等时,DSRD 迅速关断,储存在 PFL 中的能量迅速转移至负载上。

图 1 所示电路的理想输出波形为方波,脉冲的平顶时间由 PFL 的长度决定。但是,电路实际得到的输出波形往往会偏离理想形态,影响电源的性能。首先,由于 DSRD 和负载相并联,而 kicker 负载的等效电阻通常为 50 Ω ,DSRD 的导通内阻比较而言是一个无法忽略的值,因此在 DSRD 正向泵浦过程以及其反向抽取阶段刚开始时,负载上存在一定幅值的电流,从输出的波形上看,就是在主脉冲之前存在一个与主脉冲反向,幅度约几百伏的脉冲(通常称之为预脉冲)。此外,这也会导致主脉冲刚开始阶段的时间较长,即幅度小于 10% 阶段所持续的时间较长。

其次,电路中存在一些杂散的电容电感,会使脉冲后沿幅度小于 10% 阶段所持续的时间较长,并且有可能使脉冲后沿产生过冲。

图 2 为图 1 所示的 DSRD 脉冲电源的一个典型输出波形,可以看到在脉冲前约 150 ns 处存在一个较明显的预脉冲,且该脉冲波形的前沿峰值 10% 以下阶段持续时间很长。如果计算该波形 10%~10% 的脉冲时间,仅有约 10 ns,但是如果计算 3%~3% 的脉冲时间,则超过 20 ns。

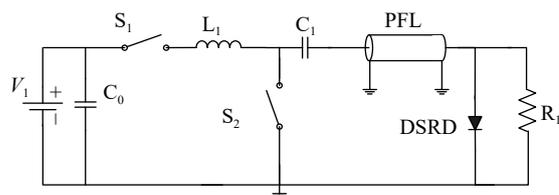


Fig. 1 Simplified scheme of the DSRD pumping circuit with inductor energy

图 1 一种 PFL 的 DSRD 脉冲电源电路原理图

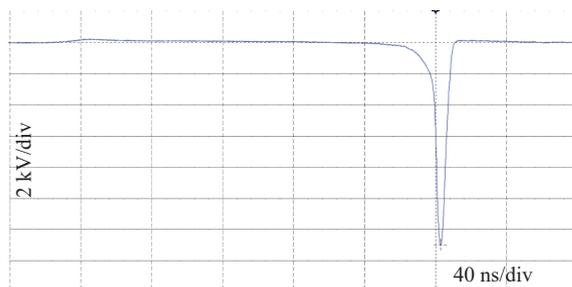


Fig. 2 Pulse output of DSRD pumping circuit (2 kV/div, 40 ns/div)

图 2 图 1 所示 DSRD 脉冲电源的输出波形

根据上面的分析和测试波形可知, DSRD 泵浦电路中存在许多会使波形偏离理想形态的因素, 从而对 kicker 脉冲电源性能产生不利影响, 因此需要对电源输出的波形进行进一步的整形。

2 非线性传输线的工作原理

非线性传输线(NTL)是一种常用的脉冲整形方法, 其中最常用的是由铁氧体制成的同轴型非线性传输线。传输线的结构如图 3 所示, 它是在常规同轴传输线的内导体外侧增加了一层铁氧体^[10-11,15]。

铁氧体非线性传输线锐化脉冲边沿的原理如图 4 所示。铁氧体具有非线性磁导率, 随着外部磁化电流的增大, 其磁导率先逐渐增大到最大值, 接着迅速下降, 当达到饱和后, 相对磁导率只有个数。根据电磁波传播速度式(1), 当电磁波刚入射到传输线时, 励磁电流较小, 铁氧体开始磁化, 此时磁导率较大, 传输线的阻抗很大且波的传播速度较慢; 当电磁波沿传输线传输时, 随着励磁电流增大, 铁氧体发生饱和, 磁导率迅速下降, 因此, 后续电流幅值较大的电磁波的传播速度相对更快, 同时, 由于铁氧体的磁化, 消耗了电磁波前沿的能量。

$$v = \frac{c}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r}} \quad (1)$$

式中: v 为电磁波速; c 为真空中的光速; μ_r 为介质相对磁导率; ϵ_r 为介质相对介电常数。

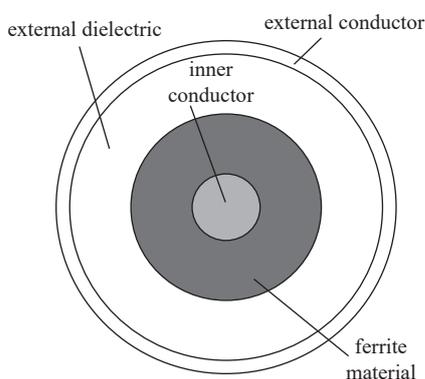
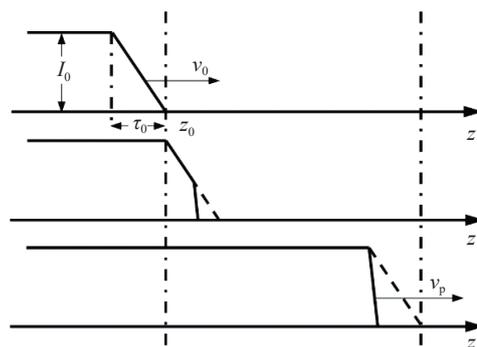


Fig. 3 Structure of the NTL (cross section)

图 3 非线性传输线的结构



I_0 : amplitude of current; v_0 : velocity of incident wave; τ_0 : the front edge of incident wave; v_p : velocity of shock wave

Fig. 4 Process of the stable shock wave in ferrite NTL

图 4 铁氧体非线性传输线锐化脉冲边沿原理

从整体来看, 脉冲前沿中幅值较大的尾部会逐渐追上头部, 使得脉冲前沿更陡。随着脉冲的传播, 被锐化的边沿会稳定在一定幅值, 宏观上看就是脉冲边沿被压缩了。

根据铁氧体非线性传输线锐化边沿的原理, 如果用其锐化脉冲前沿, 则可能延缓脉冲后沿的时间, 因此, 为了同时对脉冲的前后沿进行锐化得到底宽很窄的波形, 需要利用两根非线性传输线。以图 1 所示的 PFL 储能型脉冲电源为例, 增加了非线性传输线的电路原理如图 5 所示。

NTL_1 用来锐化脉冲前沿, NTL_2 用来锐化脉冲后沿。它们在 DSRD 关断之前处于高阻抗状态, 而在 DSRD 关断时, 电流同时入射到 NTL_1 、 NTL_2 两条非线性传输线中。 NTL_2 是终端短路传输线, 当电脉冲传播到 NTL_2 的尾部时, 头部已被锐化的电脉冲全反射回入射端, 形成了负载上脉冲的后沿, DSRD 和负载相当于被短路, 因此负载上的电压迅速降为零。

除了对脉冲边沿的锐化作用, 非线性传输线还有助于减小负载上脉冲前后的残余电压, 由于脉冲前的预脉冲是在 DSRD 关断前, 并联负载分流所引起的, 增加了 NTL_1 后, DSRD 关断之前, NTL_1 始终处于高阻抗状态, 减小了负载上的分流, 同时脉冲后沿被 NTL_2 迅速截断, 从而使得脉冲前后的残余电压都非常小。

3 电路设计与实验

根据 DSRD 的工作原理, 以及对半导体器件和磁性材料的调研情况, 制作了一台以图 5 为原理的 DSRD 脉冲电源, 如图 6(a)所示。图 6(b)为实验所使用的非线性传输线。四个并联的 SiC-MOSFET 作为泵浦电路的初级开

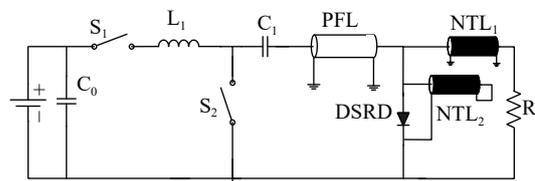


Fig. 5 Simplified scheme of the pulse generator

图 5 利用非线性传输线对脉冲整形的电路原理

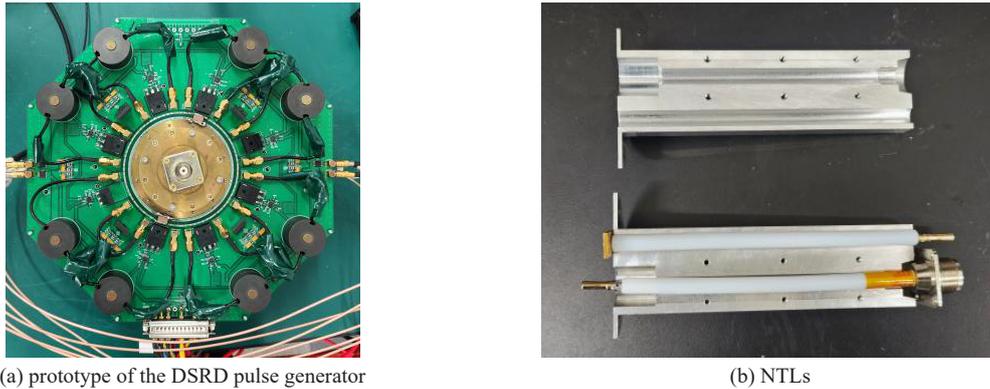


Fig. 6 Prototype of the pulse generator

图 6 脉冲电源实验电路

关 S_1 , 八个并联的 SiC-MOSFET(均为 Cree 公司的 C2M0045170D)作为电路的次级开关 S_2 。储能电容 C_0 容值为 $2.4 \mu\text{F}$, 电感 L_1 约 20 nH , C_1 为 10 nF , PFL 的长度约 30 cm 。表 1 所示为所使用的 DSRD 的主要电气参数。

表 1 DSRD 主要特征参数
Table 1 Main parameters of DSRD

parameter	test conditions	limit	
		min	max
forward voltage V_f/V	$I_f=10 \text{ mA}$	-	8
pulse voltage V_p/kV	$I \geq 300 \text{ A}$	10	-
pulse current I/A	$V_p \geq 10 \text{ kV}$	300	-
pulse edge t_r/ns	$V_p=10 \text{ kV}$	-	3
operating frequency f_r/kHz	$V_p=10 \text{ kV}, t_r \leq 3 \text{ ns}$	10	-

根据铁氧体材料的特性, 磁化状态转换的时间与磁场强度成反比, 因此, 要获得一个极窄的脉冲边沿, 磁环的半径必须足够小。为了实现阻抗匹配, 非线性传输线饱和后的阻抗应等于与其相连同轴线的阻抗。根据这两个条件确定磁环和非线性传输线的横向尺寸。然后再结合计算^[10-11]与脉冲电源的电压幅值确定其长度。非线性传输线使用的铁氧体为高导磁的镍锌铁氧体, 表 2 为非线性传输线的尺寸。

表 2 非线性传输线的主要参数
Table 2 Main parameters of NTL

inner diameter of ferrite/mm	outer diameter of ferrite/mm	inner diameter of outer conductor/mm	length of NTL ₁ /mm	length of NTL ₂ /mm
1.65	3.0	8	160	110

利用示波器测试电源的输出波形。在直流充电电压约 850 V 的条件下, 图 7 所示是使用了 NTL 整形后电源的输出波形。可以看到, 和图 2 相比, 使用了 NTL 后, 电脉冲的波形不仅边沿时间更短, 而且前后几乎没有残余电压。两种条件下输出参数的对比见表 3, 使用了 NTL 后电源脉冲的底宽大幅度减小。

对电源的初步测试表明, 非线性传输线能够较大幅度地减小脉冲前后沿的时间, 同时减小脉冲前后的残余电压, 从而在负载上得到一个非常干净的脉冲, 这对于 kicker 脉冲电源是非常有利的。它的缺点主要是磁化过程中会有较大的能量损失, 从而导致脉冲幅值有所下降, 另外, 已确定尺寸的非线性传输线工作电压变化范围较小, 不易对输出电压进行大幅度的调节。

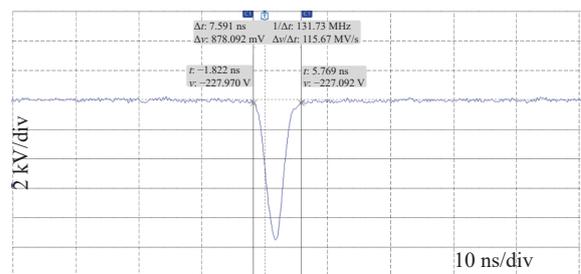


Fig. 7 Test waveform with NTLs(2 kV/div, 10 ns/div)

图 7 使用非线性传输线整形后的脉冲波形

4 结 论

本文研究了一种利用非线性传输线对 DSRD 脉冲电源波形整形的方法, 分析了非线性传输线的工作原理, 在

表 3 电源输出脉冲的参数
Table 3 parameters of output pulse

	peak voltage/kV	rise time (10%-90%)/ns	fall time (10%-90%)/ns	bottom width (3%-3%)/ns
without NTLs	12.9	4	8	>20
with NTLs	9.5	2	2	<8

DSRD 脉冲电源的基础上, 通过增加铁氧体非线性传输线, 对脉冲进行整形, 锐化脉冲的前后沿并减小脉冲前后残余电压。根据对原理的分析, 设计了一台电源的样机并完成了初步实验。该电源可在 $50\ \Omega$ 的负载上得到幅值约 10 kV, 底宽(3%~3%)小于 8 ns 的脉冲。实验结果表明, 使用非线性传输线能够较大幅度地减小脉冲前后沿的时间, 同时减小脉冲前后的残余电压, 该方法有助于提高 kicker 脉冲电源的性能, 使其更好地满足注入引出系统对快脉冲电源的要求。后续还需要对非线性传输线的参数进行进一步研究, 并在不同结构的脉冲电源上进行实验, 从而能够得到速度更快、幅值更高的脉冲电源。

参考文献:

- [1] Xu Gang, Cui Xiaohao, Duan Zhe, et al. Progress of lattice design and physics studies on the high energy photon source[C]//Proceedings of the 9th International Particle Accelerator Conference. 2018: 1375-1378.
- [2] 焦毅, 白正贺. 第四代同步辐射光源物理设计与优化[J]. 强激光与粒子束, 2022, 34: 104004. (Jiao Yi, Bai Zhenghe. Physics design and optimization of the fourth-generation synchrotron light sources[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2022, 34: 104004)
- [3] 陈锦晖, 王磊, 施华, 等. HEPS在轴注入冲击器系统及快脉冲电源样机研制[J]. 强激光与粒子束, 2019, 31: 040017. (Chen Jinhui, Wang Lei, Shi Hua, et al. Application of fast pulsed power supply to high energy photon source[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2019, 31: 040017)
- [4] Shang L, Liu W, Lu Y, et al. Status of the R&D for HALS injection system[C]//Proceedings of the 10th International Particle Accelerator Conference. 2019.
- [5] Steier C, Anders A, Luo T, et al. On-axis swap-out R&D for ALS-U[C]//Proceedings of IPAC 2017. 2017: 2821-2823.
- [6] Cook E G. Review of solid-state modulators[C]//Proceedings of the XXth International Linac Conference. 2000.
- [7] 吴佳霖, 刘英坤. 高功率半导体开关器件DSRD的研究进展[J]. 微纳电子技术, 2015, 52(4): 211-215,250. (Wu Jialin, Liu Yingkun. Research development of the high power semiconductor switching device DSRD[J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2015, 52(4): 211-215,250)
- [8] Benwell A, Burkhart C, Krasnykh A, et al. A 5KV, 3MHz solid-state modulator based on the DSRD switch for an ultra-fast beam kicker[C]//2012 IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference. 2013: 328-331.
- [9] Krasnykh A. Overview of driver technologies for nanosecond TEM kickers[C]//Proceedings of the 7th International Particle Accelerator Conference. 2016: 3645-3647.
- [10] 谭延桢, 王明宝. 铁氧体同轴线的特性及其应用[J]. 传输线技术, 1980(5): 10-13,20. (Tan Yanzhen, Wang Mingbao. Characteristics and application of ferrite coaxial line[J]. *Optical Fiber & Electric Cable and Their Applications*, 1980(5): 10-13,20)
- [11] 铁氧体形成线课题组. 铁氧体形成线概况[J]. 传输线技术, 1978(2): 1-16. (Ferrite Forming Line Research Group. Overview of ferrite formation line[J]. *Transmission Line Technology*, 1978(2): 1-16)
- [12] Grekhov I V, Mesyats G A. Physical basis for high-power semiconductor nanosecond opening switches[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2000, 28(5): 1540-1544.
- [13] Brylevsky V I, Efanov V M, Kardo-Sysyev A F, et al. Power nanosecond semiconductor opening plasma switches[C]//Proceedings of 1996 International Power Modulator Symposium. 1996: 51-54.
- [14] Lyublinsky A G, Korotkov S V, Aristov Y V, et al. Pulse power nanosecond-range DSRD-based generators for electric discharge technologies[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2013, 41(10): 2625-2629.
- [15] 乔中兴. 铁氧体填充非线性同轴传输线相关特性的研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2016: 17-21. (Qiao Zhongxing. Investigation of ferrite-filled coaxial nonlinear transmission lines related features[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2016: 17-21)