

一种基于磁饱和变压器的 DSRD 脉冲电源设计*

史晓蕾¹, 陈锦晖^{1,2}, 王冠文², 王磊², 曾涛¹,
杨威¹, 王旭¹, 苏文同¹, 吴官健¹

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

摘要: 漂移阶跃恢复二极管(DSRD)具有开关速度快、重频高、工作电流大等优点,在脉冲功率技术中很有应用前景。研究了一种基于磁饱和变压器的 DSRD 泵浦电路拓扑结构,具有体积小、重量轻、可靠性高等特点。根据 DSRD 的工作要求,采用功率 MOSFET 作为初级开关,结合磁饱和变压器的升压和磁开关特性,设计了 DSRD 的泵浦电路。利用 Pspice 软件对电路进行了仿真分析,验证了电路原理的正确性。在仿真分析的基础上,完成了一台原理样机的设计和电路实验。实验结果表明,该电源样机在前级充电电压 800 V 条件下,50 Ω 负载上产生的脉冲幅值大于 7 kV,前沿小于 4.2 ns(10%~90%),半高宽约 10 ns。

关键词: 漂移阶跃恢复二极管; 磁饱和变压器; 纳秒脉冲电源; MOSFET

中图分类号: TL501

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202032.190387

Design of drift step recovery diode pulse power generator based on magnetic saturation transformer

Shi Xiaolei¹, Chen Jinhui^{1,2}, Wang Guanwen², Wang Lei², Zeng Tao¹,
Yang Wei¹, Wang Xu¹, Su Wentong¹, Wu Guanjian¹

(1. School of Nuclear Science and Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

2. Accelerator Division, Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Drift step recovery diode (DSRD) has a great application prospect in pulse power technology for its notably short switching-off time, high repetition rate and large working current. In this paper, a DSRD pump circuit topology based on magnetic saturation transformer is studied. The topology is small, light and reliable. According to the operating requirements of DSRD, a pump circuit was designed. It consists of a power MOSFET primary switch and a magnetic saturation transformer with boost and saturation characteristics. The circuit was simulated by Pspice software, which confirmed the principles of the circuit. Based on the simulation analysis, a prototype was designed and its circuit experiment was implemented. The experiment indicates that when the charging voltage is 800 V, the pulse amplitude on resistor load of 50 Ω is larger than 7 kV, the rise time is less than 4.2 ns (10%–90%) and the FWHM is about 10 ns.

Key words: drift step recovery diode; magnetic saturation transformer; nanosecond pulse power generator; MOSFET

高压快脉冲电源是同步加速器注入冲击器(kicker)系统的重要组成设备,随着加速器应用的发展,其对注入冲击器脉冲电源提出了越来越高的要求。我国正在设计建造的高能同步辐射光源(High Energy Photon Source),要求其储存环的带状线冲击器(strip-line kicker)脉冲电源的脉冲底宽小于 10 ns,脉冲峰值电压(50 Ω 负载上)大于 ± 18 kV,且对波形的稳定性和时间精度等均有较高要求^[1]。

产生脉冲的速度(前沿上升时间)首先取决于开关的速度,目前常用的气体开关如闸流管,以及大多商用大功率半导体开关如 IGBT, IGCT 等无法满足开关速度要求。RF-MOSFET 和雪崩三极管开关虽然具有 ns 级甚至亚 ns 级快速导通的能力,但是单管功率较小,往往需要几十甚至几百只管子利用特定的功率叠加拓扑线路串并联起来工作,导致功率元件数量多、结构复杂、不易维修且成本较高^[2,3]。

* 收稿日期:2019-09-28; 修订日期:2019-12-26

基金项目:国家自然科学基金项目(11675194, 11475200)

作者简介:史晓蕾(1993—),男,博士研究生,研究方向为加速器注入系统脉冲电源;shixl@ihep.ac.cn。

自 20 世纪末期,一类基于器件内部等离子体物理现象的半导体器件得到了大量研究,特别是俄国约飞研究所发明的漂移阶跃恢复二极管(DSRD)。它是一种特殊掺杂结构(p+p-n-n+)的高压大功率二极管,其pn结具有ns甚至亚ns量级的恢复时间,从而可实现对反向电流的快速关断。由于DSRD开关具有功率容量大、速度快、重复频率高以及寿命长等优点,目前已有许多相关的应用研究^[4-5]。美国SLAC实验室的A. Krasnykh等人,通过使用氩闸流管和磁开关等不同的开关控制DSRD的前级泵浦电路,研制出幅值15 kV,上升下降时间小于2 ns的脉冲电源^[6-7];德国的FID公司以及俄国的Megaimpulse公司等,利用DSRD, SAS等器件生产了一系列ns及ps级脉冲电源,结构非常紧凑^[8]。国内中科院高能物理研究所的陈锦晖等人,利用MOSFET控制的感应叠加线路作为DSRD的泵浦电路,研制了一台电源样机,可在50 Ω负载上产生上升时间2.6 ns,底宽10 ns,幅值±18 kV的电脉冲^[1]。引入DSRD开关后,可以降低对初级开关速度和功率的要求,减少了功率元件的数量以及设备的体积和重量。

根据DSRD的特性,设计合适的泵浦电路,是DSRD脉冲电源应用中的关键环节。磁开关是一种利用磁性材料的非线性特性而设计的开关,利用电感的饱和来实现开关状态的转换,常用于饱和电抗器、饱和变压器等,具有成本低廉,可靠性高等特点。本文主要研究了一类基于磁饱和变压器的DSRD脉冲电源,首先简述了脉冲电源电路的工作原理,并结合仿真软件确定了电路的参数,完成了原理样机的设计制作,并给出了实验结果。

1 脉冲电源电路设计

DSRD工作时,首先需要给它提供一个持续100 ns左右的正向脉冲电流,在pn结中注入电子-空穴等离子体;紧接着,在正向脉冲电流结束后,产生一个反向电流,尽可能快速地抽取pn结区储存的载流子,此时能量被储存在电感或脉冲形成线上;当抽取和注入的电荷量相等时,随着pn结的恢复,DSRD迅速关断,电感或脉冲形成线上储存的能量被切换到负载电阻上形成快速前沿的高压脉冲^[9-11]。DSRD脉冲电源泵浦电路的关键,是需要提供百纳秒量级的双极性脉冲电流,同时,为了得到最大的输出幅值,需要控制泵浦电路参数,使得DSRD在储能电感能量达到最大时关断。

为了实现上述DSRD泵浦电路功能,拓扑线路通常需要两级换路开关。本课题研究的拓扑线路前级开关采用的是MOSFET,后级开关采用的是磁饱和和变压器开关。该泵浦线路结构简单可靠,可为DSRD提供所需的泵浦电流^[12-14],其电路原理如图1所示,其中T1是含铁芯的可饱和变压器。

该电路的工作过程可分为四个阶段。第一阶段,直流电源给初级电容 C_0 充电;第二阶段,开关S1闭合, C_0 上存储的电荷通过变压器T1,经过DSRD给电容 C_1 充电,在DSRD上产生一个100 ns级的正向电流,电容 C_1 的电压快速增大,回路的谐振电感主要受变压器漏感影响;第三阶段,当电容 C_1 充电结束时,变压器已接近饱和,随着电容反向放电,进一步加速了变压器的饱和过程,此时,电容 C_1 通过变压器次级绕组快速放电,储存的能量从电容 C_1 转移到次级绕组饱和和电感上;第四阶段,当反向抽取和正向注入的电荷量相等时,DSRD迅速关断,电流从变压器次级绕组切换到负载 R 上,产生高压脉冲。

变压器T1采用1:n匝的升压变压器绕组结构,能够获得更大的变压比,即在相同初级充电电压条件下,次级电容 C_1 可以充到更高的电压,从而在负载上得到更大幅度的脉冲。虽然升压变压器无法降低充电电源和开关S1的功率要求,但是可以降低前级充电和放电回路中各个元件的电压等级,对于降低设备的制造成本、提高可靠性具有重要意义。通过选择合适的电路参数,可以使得DSRD在反向电流的最大点附近关断,获得最大幅度的输出电压。由于脉冲形成过程的最后阶段,变压器处于饱和状态,脉冲的宽度同时受到DSRD恢复时间和变压器饱和和电感的影响。

为在50 Ω电阻负载上得到峰值不小于18 kV、底宽约10 ns的电压脉冲,根据一阶 RL 电路的放电特性,电脉冲的后沿

$$t_f = 5L/R = 10 \text{ ns} \quad (1)$$

这里 L 是变压器副边的饱和电感, R 是负载电阻,由式(1)可以得出饱和电感约100 nH。如果要求反向抽取的时间为40~50 ns,由 LC 电路的振荡周期

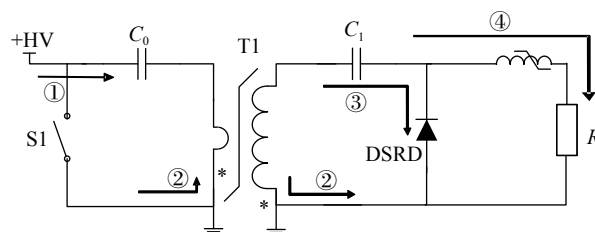


Fig. 1 Simplified scheme of the pulse generator

图1 脉冲电源电路原理图

$$T/2 = \pi \sqrt{LC} \quad (2)$$

可以得出次级电容 C_1 应取 2 nF 左右。要在 50 Ω 负载获得 18 kV 的高压脉冲, 储能电感上的峰值电流至少应达到 360 A, 根据能量守恒定律, 由电感及电容储能相等关系:

$$\frac{1}{2}LI^2 = \frac{1}{2}CU^2 \quad (3)$$

可以推出次级电容 C_1 充电电压约 2 800 V。DSRD 正向泵浦时间取 100 ns, 则由式 (2) 可知正向泵浦阶段谐振电感(以漏感为主)约 512 nH。考虑到线圈电感和匝数的关系以及各器件的损耗, 初步选择变压器匝数比为

$$w_1 : w_2 = 1 : 4 \quad (4)$$

为得到最大的能量转换效率, 两电容的取值应满足

$$\frac{C_0}{C_1} \approx \left(\frac{w_2}{w_1}\right)^2 \quad (5)$$

即初级电容 C_0 为 32 nF, 按照理想变压器变比计算, 电容 C_0 上充电电压至少需要 700 V。

利用电路仿真软件 Pspice, 可以根据不同的电路参数进行仿真计算, 验证电路原理的正确性。脉冲电源的 Pspice 模型如图 2(a) 所示, 耦合电感的磁芯可根据材料的特性进行调整, 匝数比为 1 : 4, 设置了电感 L_1 作为饱和电感(同时也作为谐振电感的一部分), 开关 S_4 模拟 DSRD 的开关特性, 仿真结果见图 2(b), (c)。通过仿真分析, 验证了该电路前级的开关和磁芯变压器能够产生 DSRD 工作所需的电流波形。在充电电压 700 V 时, 次级电容电压最大约 1 600 V, 小于变压器变比, 原因主要是变压器励磁电感较小, 在正向泵浦电流末期, 变压器磁芯已经接近饱和。该电路的正向泵浦时间约 120 ns, 电流峰值约 45 A, 此时变压器初级电流为 180 A; 反向泵浦电流峰值约 160 A。脉冲幅值和底宽受电感 L_1 和变压器电感影响, 输出电压约 7 kV, 底宽约 15 ns。

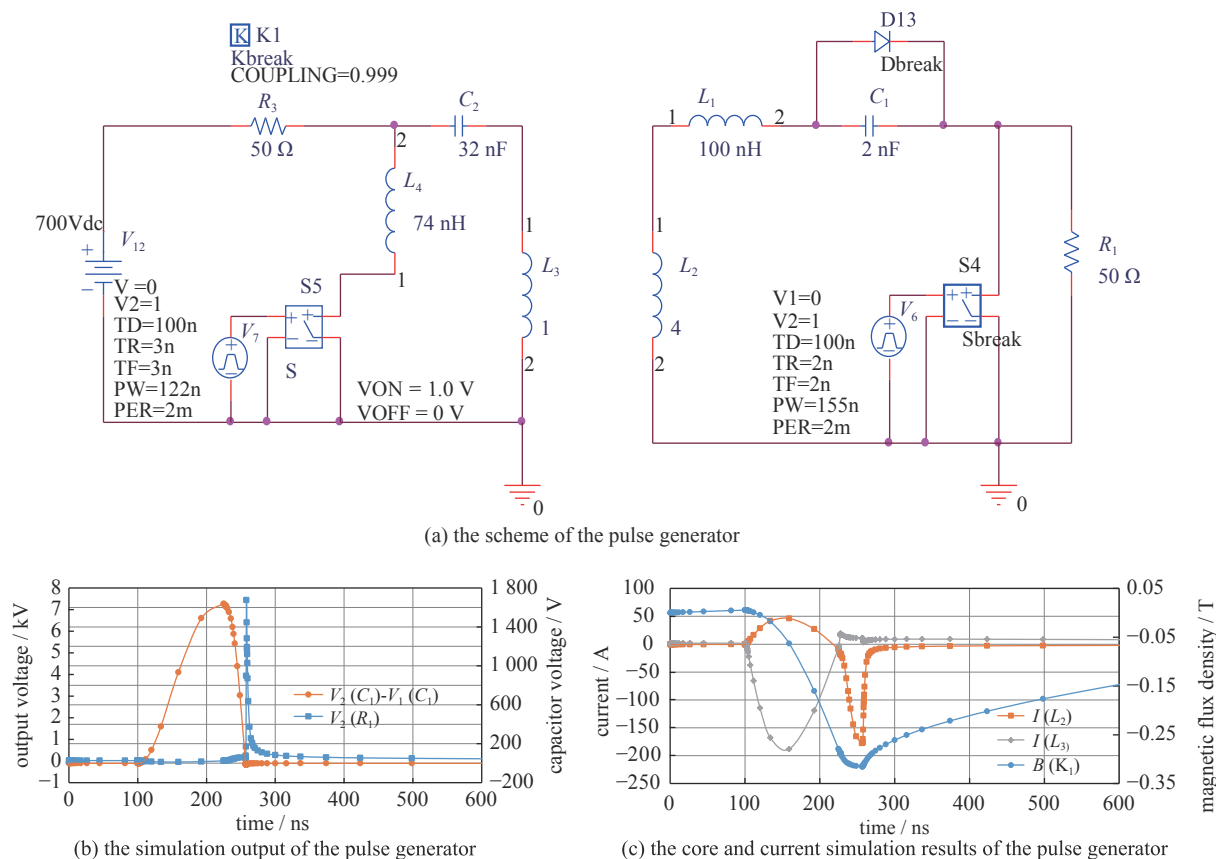


Fig. 2 Simulation model and result of the DSRD pulse generator

图 2 DSRD 脉冲电源电路仿真模型及仿真结果

根据电路计算和仿真结果可知, 要在前级充电电压一定时得到最大幅值的脉冲, 即在次级电容上得到最大的储能, 变压器应在次级电流换向点附近饱和。为在 50 Ω 负载上得到幅值大于 18 kV 的脉冲, 初级开关 S_1 的功率需大于 1 500 V/400 A。脉冲后沿按照饱和电感和负载组成的 RL 电路进行放电, 因此需准确控制饱和电感的数值。

2 原理样机的制作

根据设计和仿真结论,以及对功率半导体和磁性材料的调研情况,制作了一台脉冲电源的原理样机,如图3所示,样机总体尺寸约21 cm×15 cm×6 cm。实验电路所使用的DSRD,器件尺寸为 $\phi 12\text{ mm}\times 5\text{ mm}$,其主要特性见表1。

考虑到工作电压和电流的要求,初级开关S1选择Cree公司的C2M0045170D型SiC MOSFET,该器件的漏源击穿电压 $V_{\text{DSmax}}=1\ 700\text{ V}$,导通及关断时间 t_r, t_f 均小于20 ns,漏极连续电流 $I_{\text{D}}=72\text{ A}$,脉冲电流 $I_{\text{Dpulse}}=160\text{ A}$,可通过并联使用,满足功率需求。变压器磁芯选择镍锌铁氧体磁环,磁环尺寸约47 mm×27 mm×28 mm,变压器匝数比为1:4,副边采用多绕组并联以降低漏感及饱和电感。初级储能电容采用薄膜电容,容值33 nF,耐压3 000 V,次级电容使用高压陶瓷电容,容值1.8 nF,耐压30 kV。输出电压脉冲利用50 Ω 的同轴线RG214,经过衰减器连接到示波器进行测量。

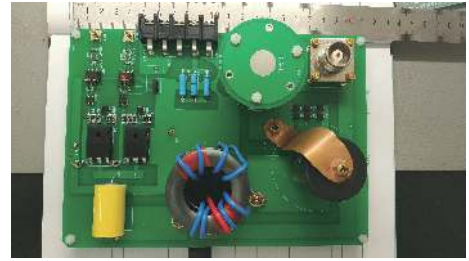


Fig. 3 Prototype of the DSRD pulse generator
图3 脉冲电源实验电路

表1 DSRD主要特征参数

Table 1 The main parameters of DSRD

no.	paramaters	symbol	test conditions	bridge limit		unit
				minimum	maximum	
1	positive voltage	V_{F}	$I_{\text{F}}=10\text{ mA}$	—	8	V
2	reverse current	I_{R}	$V_{\text{R}}=500\text{ V}$	—	1	mA
3	breakdown voltage	$V_{(\text{BR})}$	$I_{\text{R}}=5\text{ mA}$	1 000	—	V
4	pulse voltage	V_{p}	$i\geq 300\text{ A}$	10	—	kV
5	pulse current	i	$V_{\text{p}}\geq 10\text{ kV}$	300	—	A
6	rise time	t_{r}	$V_{\text{p}}=10\text{ kV}$	—	3	ns
7	repetitive frequency	f_{R}	$V_{\text{p}}=10\text{ kV}, t_{\text{r}}\leq 3\text{ ns}$	10	—	kHz

该实验电路的时序控制电路,使用Altera公司的MAX II型CPLD芯片编程实现。时钟单元产生的时钟信号,经隔离芯片控制IXYS公司的IXDN614芯片,实现对MOSFET的驱动。

3 原理样机的初步测试

使用Tektronix公司的TDS5104B型示波器(带宽1 GHz,采样率5 GS/s)对产生的脉冲进行测量,高压脉冲衰减器衰减倍数为30 dB,带宽DC~1 500 MHz。测试得到的脉冲波形如图4所示。在前级充电电压800 V时,该电路在50 Ω 负载上产生的脉冲幅值约7 kV,脉冲前沿(10%~90%)小于4.2 ns,半高宽约10 ns。为了测试DSRD的泵浦电流,并判断饱和和变压器的状态,在DSRD支路中使用PEARSON公司的电流互感器进行了监测,测试得到的结果见图5。可以看出,实测DSRD的泵浦电流波形与其正常工作所要求的波形很接近,正向泵浦时间约130 ns,电流换向后的反向抽取电流时间较短,说明此时变压器已经饱和,抽取阶段的脉冲宽度主要受饱和和电感影响。

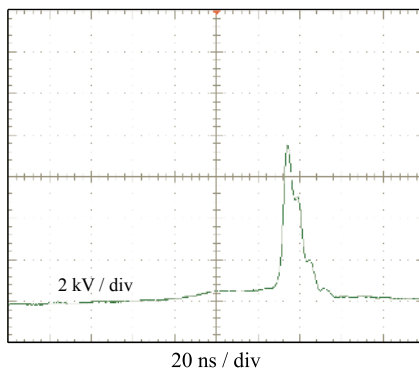


Fig. 4 Test waveform of pulse

图4 输出脉冲波形

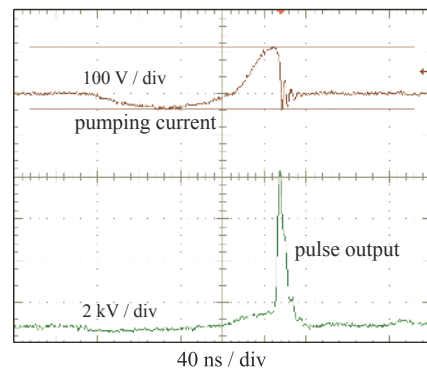


Fig. 5 Test waveform of pumping current by current transformer

图5 电流互感器测得的DSRD泵浦电流

初步测试结果表明,要继续增大输出脉冲的幅度,需要在正向泵浦阶段为次级电容储存更高的能量。可以提高前级充电电压的幅度,但同时需增加变压器磁芯截面积,保证变压器仍在电流换向点附近饱和,以获得较高的电压变换比。

4 结 论

本文研究了一种基于磁饱和变压器的DSRD脉冲电源,分析了该电路的工作原理和优势,并利用仿真软件研究了影响电路输出特性的主要参数。结合高能同步辐射光源注入 kicker 脉冲电源的要求,初步完成了一台原理样机的制作和测试。实验结果表明,该电路在充电 800 V 条件下,在 50 Ω 负载上即可获得 7 kV 的脉冲高压,脉冲半高宽约 10 ns。根据对电路的计算和仿真,该电源的性能还有很大的提升空间,通过优化电路布局、提高前级充电电压、选取更合适的磁芯材料等,预计可得到幅度更高、速度更快的脉冲输出。此外,该电路采用的是电感储能方式,输出脉冲后沿呈指数衰减,速度较慢,还无法满足高能同步辐射光源的要求,还需要通过非线性传输线等技术对波形进行整形。

参考文献:

- [1] 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)
- [2] 刘锡三. 高功率脉冲技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005. (Liu Xisan. High pulsed power technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005)
- [3] Cook E G. Review of solid-state modulators[C]//Proc of XX International Linac Conference. 2000.
- [4] 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): 311-215, 250. (Wu Jialin, Liu Yingkun. Research development of the high power semiconductor switching device DSRD[J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2015, 52(4): 311-215, 250)
- [5] 梁勤金,邓晓磊,石小燕,等. 新型半导体开关高压电磁脉冲产生技术[J]. *强激光与粒子束*, 2012, 24(2): 497-500. (Liang Qinjin, Deng Xiaolei, Shi Xiaoyan, et al. High voltage electromagnetic pulse generation using semiconductor switches[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(2): 497-500)
- [6] Krasnykh A. Overview of driver technologies for nanosecond TEM kickers[C]//Proceedings of the 7th International Particle Accelerator Conference. 2016, 3645-3647.
- [7] 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]//IEEE Power Modulator and High Voltage Conference. 2013: 328-331.
- [8] Lyublinsky A G, Korotkov S V, Aristov Y V, et al. Pulse power nanosecond-range DSRD-based generators for electric discharge technologies[J]. *IEEE Trans Plasma Science*, 2013, 41(10): 2625-2629.
- [9] Grekhov I V, Mesyats G A. Physical basis for high-power semiconductor nanosecond opening switches[J]. *IEEE Trans Plasma Science*, 2000, 28(5): 1540-1544.
- [10] Brylevsky V I, Efanov V M, Kardo-Sysyev A F, et al. Power nanosecond semiconductor opening plasma switches[J]//Proceedings of IEEE International Power Modulator Symposium. 1996: 51-54.
- [11] 张玲,周斌,谢义方,等. 基于漂移阶跃恢复二极管的超宽带探地雷达发射技术[J]. *强激光与粒子束*, 2009, 21(12): 1854-1858. (Zhang Ling, Zhou Bin, Xie Yifang, et al. Transmitter techniques for ultra-wideband ground penetrating radar based on drift step recovery diodes[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, 21(12): 1854-1858)
- [12] Min B D, Kim J H, Pavlov E, et al. A compact inductive type pulse generator using diodes as opening switch[C]//IEEE Pulsed Power Conference. 2005: 1364-1367.
- [13] Korotkov S V, Aristov Y V, Voronkov V B, et al. A small dynistor generator of high-power nanosecond pulses[J]. *Instruments and Experimental Techniques*, 2018, 61(1): 44-46.
- [14] Korotkov S V, Aristov Y V, Voronkov V B, et al. Semiconductor switches of laser pumping pulses of nanosecond duration[J]. *Instruments & Experimental Techniques*, 2009, 52(5): 699.