

## ГЕНЕРАТОР МОЩНЫХ НАНОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ НА ОСНОВЕ БЛОКА ДРЕЙФОВЫХ ДИОДОВ С РЕЗКИМ ВОССТАНОВЛЕНИЕМ И БЛОКА ДИНИСТОРОВ С УДАРНОЙ ИОНИЗАЦИЕЙ

© 2022 г. С. В. Коротков<sup>а,\*</sup>, Ю. В. Аристов<sup>а</sup>, А. Л. Жмодиков<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН  
Россия, 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26

\*e-mail: korotkov@mail.ioffe.ru

Поступила в редакцию 24.12.2021 г.

После доработки 11.01.2022 г.

Принята к публикации 12.01.2022 г.

Разработан малогабаритный высокоэффективный генератор наносекундных импульсов с выходной энергией ~400 мДж на основе блока дрейфовых диодов с резким восстановлением и блока динисторов с ударной ионизацией. Генератор позволяет коммутировать в нагрузку 50 Ом импульсы напряжения с амплитудой ~30 кВ и фронтом ~3 нс. Показана возможность существенного увеличения выходного напряжения и выходной энергии генератора.

DOI: 10.31857/S0032816222030107

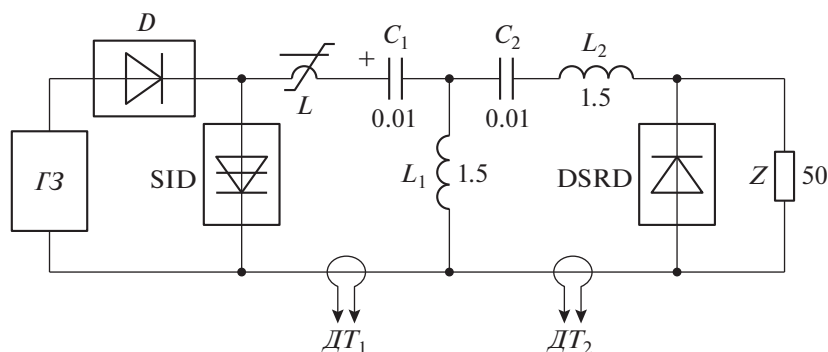
В генераторах мощных наносекундных импульсов коммутируемая в нагрузку энергия обычно аккумулируется при зарядке емкостного накопителя энергии (н.э.), выполненного в виде конденсатора, или при пропускании тока через индуктивный н.э., выполненный в виде катушки индуктивности. В генераторах с емкостным н.э. для коммутации тока в нагрузку используется замыкающий ключ, соединенный последовательно с конденсатором. В генераторах с индуктивным н.э. ток в нагрузке формируется с помощью размыкающего ключа. Когда этот ключ выключается, протекающий через катушку индуктивности ток коммутируется в нагрузку, которая подключена параллельно. Определенным достоинством генераторов с индуктивным н.э. является то, что при таком же, как и в генераторах с емкостным н.э., быстродействии ключей они позволяют получить большую скорость нарастания тока в нагрузке, так как она не ограничивается индуктивностью конденсатора. Кроме того, в генераторах с индуктивным н.э. напряжение источника питания может быть существенно меньше амплитуды импульса напряжения на нагрузке, которая определяется произведением выходного тока на сопротивление нагрузки.

Малое время выключения современных полупроводниковых приборов позволяет их эффективно использовать в генераторах наносекундных импульсов с индуктивным н.э. Наименьшее время выключения (единицы и доли наносекунд) имеют SOS-диоды (SOS – Semiconductor Opening

Switch) [1] и дрейфовые диоды с резким восстановлением (DSRD – Drift Step Recovery Diodes) [2]. SOS-диоды имеют существенно большую допустимую плотность тока по сравнению с DSRD. Достоинством DSRD является меньшее время выключения по сравнению с SOS-диодами, имеющими такое же рабочее напряжение.

В статье приведены результаты исследования мощного генератора, содержащего блок последовательно соединенных DSRD, принцип работы которых заключается в следующем. При накачке DSRD электронно-дырочной плазмой путем пропускания принципиально короткого (<500 нс) прямого тока (тока накачки) обеспечивается резко неоднородное накопление электронов и дырок в базовых областях диодов. После окончания тока накачки при пропускании через DSRD импульса обратного тока (тока выкачки) с принципиально коротким фронтом ( $\leq 300$  нс) накопленный заряд выносится и создаются условия для быстрого выключения DSRD. Время выключения DSRD составляет 0.5–3 нс и зависит от конструкции диодов и длительности импульсов тока накачки и выкачки. При соединении в высоковольтный блок DSRD выключаются синхронно, если токи накачки и выкачки являются общими для всех диодов. В результате достигается высокая надежность высоковольтных блоков DSRD.

В DSRD-генераторах для формирования тока выкачки к блоку DSRD подключается цепь, состоящая из последовательно соединенных индуктивности  $L$ , замыкающего ключа  $K$  и конденсато-



**Рис. 1.** Электрическая схема опытного генератора. ГЗ – генератор запуска, ДТ – датчики тока; L – сердечник, феррит N87 (EPCOS),  $16 \times 9.6 \times 30$  мм,  $w = 1$ ; D – VMI K100UF (2 последовательно).

ра C, заряженного до напряжения  $U_C$ . После включения ключа K конденсатор C разряжается через индуктивность L и блок DSRD, который предварительно накачан электронно-дырочной плазмой. В результате через блок DSRD протекает ток выкачки, и происходит передача энергии из конденсатора C в индуктивность L. При выключении блока DSRD в нагрузку коммутируется ток  $I_L$ , протекающий через индуктивность L. Величина коммутируемой в нагрузку энергии определяется энергией, накопленной в индуктивности L в момент выключения блока DSRD:  $E = 0.5(LI_L^2)$ . Поскольку длительность тока выкачки принципиально мала, а скорость нарастания этого тока пропорциональна отношению  $U_C/L$ , для увеличения энергии, коммутируемой в нагрузку, требуется увеличить напряжение зарядки конденсатора C. В связи с этим в DSRD-генераторах с большой выходной энергией необходимо использовать высоковольтные замыкающие ключи, способные эффективно коммутировать мощные субмикросекундные импульсы тока выкачки. Разработка таких ключей является сложной задачей.

Результаты наших недавних исследований показали возможность эффективного формирования мощных импульсов тока субмикросекундной длительности с помощью высоковольтных замыкающих ключей в виде блоков последовательно соединенных динисторов с ударной ионизацией (SID – Shock-Ionized Dynistors) [3, 4].

SID относятся к классу кремниевых четырехслойных полупроводниковых приборов [5–8], которые включаются за время  $< 1$  нс импульсом высокого напряжения, нарастающим со скоростью  $> 1$  кВ/нс и инициирующим процесс ударной ионизации кремния. Основным достоинством SID является то, что для их переключения требуется меньшая мощность запускающего импульса. Малое время включения SID определяет

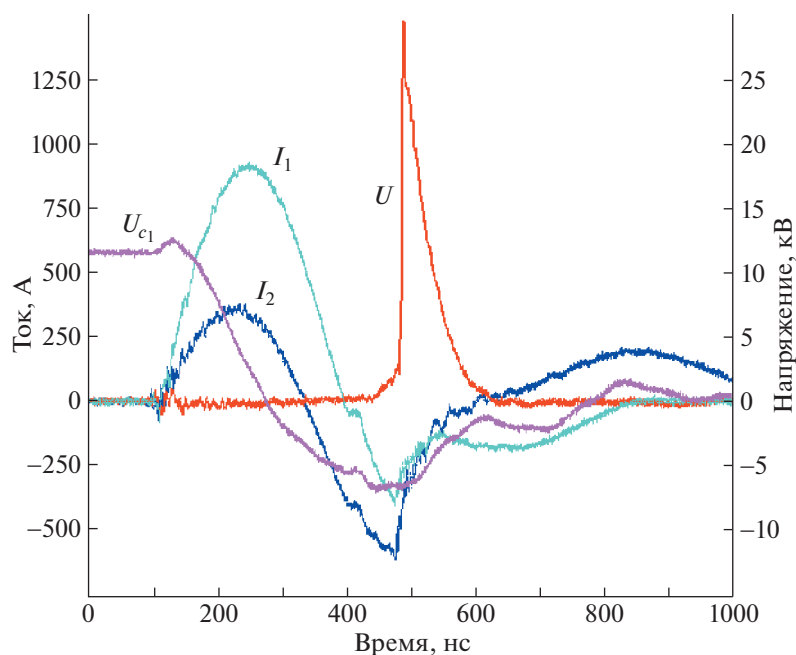
малые потери энергии при коммутации мощных субмикросекундных импульсов тока.

Принцип работы SID позволяет включать высоковольтные блоки последовательно соединенных динисторов общим наносекундным импульсом высокого напряжения. В результате обеспечивается возможность разработки надежных блоков SID с рабочим напряжением десятки киловольт, способных коммутировать импульсы тока с амплитудой несколько килоампер и длительностью десятки наносекунд.

На рис. 1 приведена электрическая схема разработанного генератора мощных наносекундных импульсов высокого напряжения на основе высоковольтного блока DSRD с рабочим напряжением 35 кВ, состоящего из 35-ти последовательно соединенных диодов с диаметром структур 20 мм, и высоковольтного блока SID с рабочим напряжением 12 кВ, который был выполнен из шести последовательно соединенных динисторов с рабочим напряжением 2.3 кВ и диаметром структур 12 мм. Схема разработанного генератора построена на основе схемы, предложенной в работе [9].

В схеме на рис. 1 после включения блока SID конденсатор  $C_1$  быстро перезарядается до существенного обратного напряжения. Ток перезарядки протекает через цепь DSRD– $L_2$ – $C_2$  и индуктивность  $L_1$ . В результате происходит зарядка конденсатора  $C_2$  ( $C_2 = C_1$ ), и через блок DSRD протекает короткий ток накачки. Затем конденсаторы  $C_1, C_2$  разряжаются через индуктивность  $L_2$ , и через блок DSRD протекает быстро нарастающий ток выкачки. При выключении блока DSRD протекающий через индуктивность  $L_2$  ток коммутируется в нагрузку Z.

На рис. 2 приведены осциллограммы токов и напряжений, иллюстрирующие работу генератора. Осциллограммы  $I_1, I_2$  получены при измерении токов, протекающих соответственно через блок SID и блок DSRD.



**Рис. 2.** Осциллограммы токов и напряжения, полученные при исследовании генератора:  $I_1$ ,  $I_2$  — токи через блок SID и блок DSRD соответственно;  $U_{C_1}$ ,  $U$  — напряжения на конденсаторе  $C_1$  и нагрузке  $Z$  соответственно.

Осциллограммы  $U_{C_1}$  и  $U$  получены при измерении напряжения соответственно на конденсаторе  $C_1$  и нагрузке  $Z = 50$  Ом. Согласно осциллограммам, амплитуда и длительность импульса тока накачки блока DSRD составляют соответственно  $\sim 270$  А и  $\sim 230$  нс. Для достижения такого тока накачки через блок SID пропускается импульс тока с амплитудой  $\sim 900$  А и длительностью  $\sim 300$  нс.

При такой длительности блок SID способен эффективно коммутировать токи со значительно большей амплитудой (до нескольких килоампер), поэтому потери энергии в этом блоке малы. Блок DSRD выключается через  $\sim 150$  нс после коммутации в него тока выкачки, когда этот ток достигает величины  $\sim 650$  А.

На рис. 3 приведена осциллограмма импульса напряжения на нагрузке, представленная в другом масштабе. Амплитуда импульса составляет  $\sim 30$  кВ, длительность фронта  $\leq 3$  нс. Представленные осциллограммы были получены с помощью цифрового осциллографа Tektronix TDS3052C с полосой 500 МГц. Для измерения токов  $I_1$ ,  $I_2$  использовались датчики тока  $DT_1$  и  $DT_2$  производства фирмы Pearson Electronics, Inc (модель 410). Для измерения напряжения на нагрузке использовался изготовленный в ФТИ широкополосный делитель напряжения хорошо известной конструкции. Нижним плечом делителя являлся коаксиальный кабель с волновым сопротивлением 50 Ом, верхним — малогабаритный резистор с сопротивлением 470 Ом, скомпенсированный мед-

ным экраном. Делитель тестировался при измерении сигналов от апробированного генератора низковольтных импульсов с временем нарастания  $\sim 0.3$  нс. Воспроизводимый фронт составлял  $\sim 0.5$  нс. Для измерения напряжения на конденсаторе  $C_1$  использовался пробник Tektronix P6015A.

Нагрузка была выполнена в виде сборки параллельно соединенных малоиндуктивных резисторов, охлаждаемых потоком воздуха. Это обеспечивало возможность длительной работы генератора при частоте следования выходных импульсов  $\sim 1$  кГц.

Вычисленная по осциллограммам на рис. 3 выходная энергия генератора равняется  $\sim 400$  мДж, что составляет  $\sim 50\%$  от величины энергии, исходно накопленной в конденсаторе  $C_1$ . Полученный к.п.д. (50%) является высоким для мощных DSRD-генераторов. Так, например, близкий к этому значению к.п.д. был получен в DSRD-генераторе [10] при коммутации в нагрузку 50 Ом маломощных наносекундных импульсов с амплитудой 1.15 кВ и длительностью  $< 15$  нс. При увеличении амплитуды импульсов до 2.2 кВ к.п.д. этого генератора уменьшился до 24%. В наших экспериментах [11, 12] DSRD-генераторы наносекундных импульсов с энергией 30–50 мДж, выполненные на основе повышающих трансформаторов с насыщающимися сердечниками, имели к.п.д.  $\sim 40\%$ .

В схеме на рис. 1 включение блока SID осуществляется с помощью генератора запуска ГЗ. Диод  $D$  исключает возможность приложения к ГЗ напряжения зарядки конденсатора  $C_1$ . После

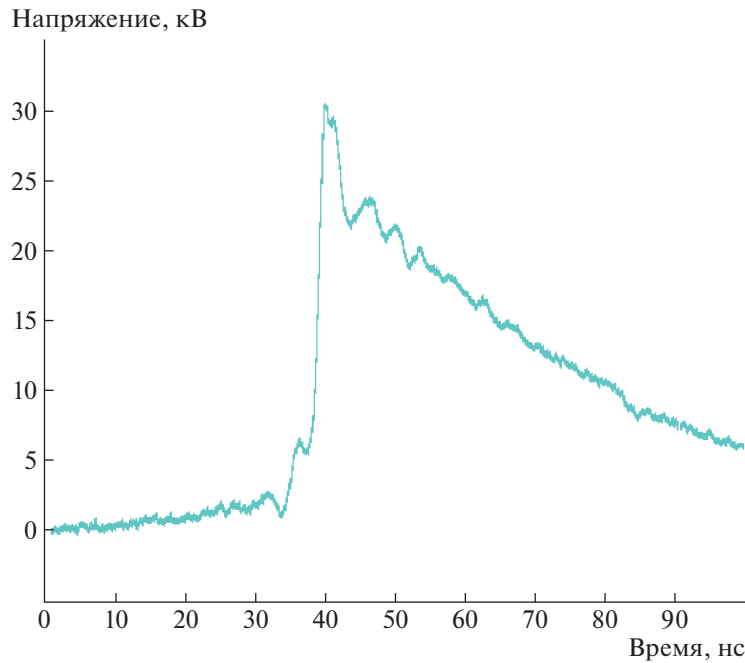


Рис. 3. Осциллограмма импульса напряжения на нагрузке  $Z$ .

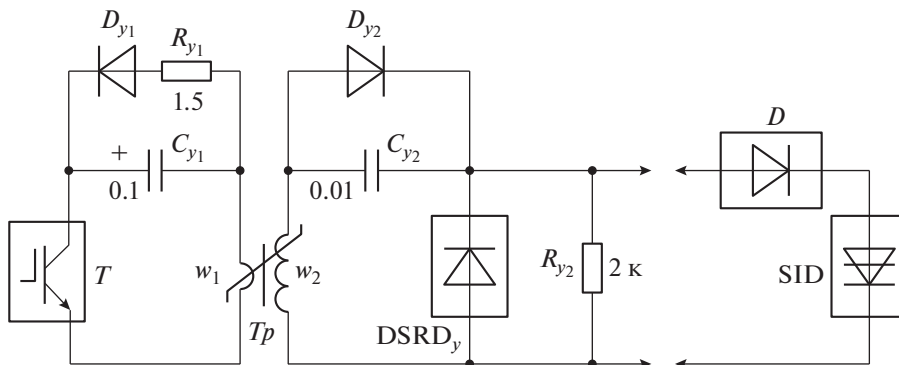


Рис. 4. Электрическая схема генератора запуска.  $T_p$  – сердечник феррит N87 (EPCOS),  $25.3 \times 14.8 \times 60$  мм,  $w_1 = 1$ ,  $w_2 = 3$ ;  $T$  – IRGPS60B120KDP (2 параллельно);  $D_{y1}$  – HER 608,  $D_{y2}$  – HER 608 (4 последовательно).

включения ГЗ его выходное напряжение быстро нарастает до величины, превышающей величину силового напряжения, приложенного к блоку SID. В результате через цепь  $D$ –SID протекает ток управления, обеспечивающий быструю зарядку собственных емкостей диодисторов в блоке SID до напряжения, инициирующего процесс ударной ионизации в их структурах. До момента включения блока SID дроссель  $L$  имеет большую индуктивность и препятствует протеканию тока управления через конденсатор  $C_1$ . После включения блока SID сердечник дросселя  $L$  насыщается. В результате индуктивность дросселя становится очень мала и практически не влияет на процесс разряда конденсатора  $C_1$ .

Генератор запуска ГЗ был выполнен по схеме, представленной на рис. 4. Схема содержит мало-мощный блок  $DSRD_y$  в виде 16-ти последовательно соединенных диодов диаметром 12 мм, а также трансформатор  $T_p$  и блок транзисторов  $T$ .

Исходно конденсатор  $C_{y1}$  заряжен до напряжения  $\sim 1$  кВ. При включении транзисторного блока  $T$  осуществляются разряд  $C_{y1}$  через обмотку  $w_1$  трансформатора  $T_p$  и зарядка конденсатора  $C_{y2}$  через обмотку  $w_2$ . Импульс тока зарядки  $C_{y2}$  является импульсом тока накачки блока  $DSRD_y$ . Он имеет амплитуду  $\sim 100$  А и длительность  $\sim 250$  нс. В момент окончания процесса зарядки  $C_{y2}$  происходит насыщение сердечника  $T_p$ , индуктивность

обмотки  $w_2$  резко уменьшается, конденсатор  $C_{y2}$  быстро разряжается по цепи  $DSRD_y-w_2$ , и через блок  $DSRD_y$  протекает ток выкачки. Когда блок  $DSRD_y$  выключается, в обмотке  $w_2$  индуцируется импульс высокого напряжения, и ток, протекающий через эту обмотку, коммутируется в цепь  $D-SID$ . В результате обеспечиваются условия для включения блока  $SID$ .

Таким образом, разработанный генератор на основе малогабаритных ключей в виде блока  $SID$  и блока  $DSRD$  позволяет формировать на нагрузке 50 Ом импульсы напряжения с амплитудой ~30 кВ, нарастающие со скоростью ~10 кВ/нс. Его основными достоинствами являются большая величина выходной энергии (~400 мДж) и достаточно высокая эффективность (~50%). Принципы построения разработанного генератора обеспечивают возможность увеличения амплитуды выходного напряжения и величины выходной энергии при возрастании выходного тока и входного напряжения.  $SID$ -ключи позволяют увеличить входное напряжение до нескольких десятков киловольт. Блоки  $DSRD$  также могут иметь рабочее напряжение порядка десятков киловольт. Они надежно работают при параллельном соединении [13] и могут обеспечить коммутацию килоамперных импульсов выходного тока. Поэтому реальным представляется создание генераторов наносекундных импульсов с выходным напряжением десятки киловольт и выходной энергией несколько джоулей. Физические принципы работы  $SID$  и  $DSRD$  позволяют обеспечить работу таких генераторов на частоте несколько кГц. Это обуславливает возможность разработки генераторов наносекундных импульсов высокого напряжения с фронтом в единицы наносекунд и средней мощностью несколько киловатт.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рукин С.Н. // ПТЭ. 1999. № 4. С. 5.
2. Grekhov I.V., Efanov V.M., Kardo-Sysoev A.F., Shenderoy S.V. // Solid-State Electron. 1985. V. 28. P. 597.
3. Коротков С.В., Аристов Ю.В., Воронков В.Б. // ПТЭ. 2019. № 2. С. 24.  
<https://doi.org/10.1134/S0032816219010130>
4. Korotkov S.V., Aristov Yu.V., Korotkov D.A., Zhmodikov A.L. // Rev. Sci. Instrum. 2020. V. 91. P. 084704.  
<https://doi.org/10.1063/5.0015284>
5. Efanov V.M., Kardo-Sysoev A.F., Tchashnicov I.G., Yarin P.M. // Proc. of 1996 International Power Modulator Symposium. IEEE. Boca Raton, FL, USA, 1996. P. 22.
6. Grekhov I.V., Korotkov S.V., Stepaniants A.L., Khristyuk D.V., Voronkov V.B., Aristov Y.V. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2005. V. 33. Issue 4. P. 1240.  
<https://doi.org/10.1109/TPS.2005.852349>
7. Grekhov I.V., Korotkov S.V., Rodin P.B. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2008. V. 36. Issue 2. P. 378.  
<https://doi.org/10.1109/TSP.2008.918661>
8. Gusev A.I., Lyubutin S.K., Rukin S.N., Tsyranov S.N. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2016. V. 44. Issue 10. Part 1. P. 1888.  
<https://doi.org/10.1109/TPS.2016.2542343>
9. Sanders J., Kuthi A., Gundersen M.A., Moore W.H. Patent No. US 8, 115, 343 B2. 2012
10. Merensky L.M., Kardo-Sysoev A.F., Shmilovitz D., Kessar A.S. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2013. V. 41. Issue 11. P. 3138.  
<https://doi.org/10.1109/TPS.2013.2284601>
11. Lyublinsky A.G., Korotkov S.V., Aristov Yu.V., Korotkov D.A. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2013. V. 41. Issue 10. P. 2625.  
<https://doi.org/10.1109/TPS.2013.2264328>
12. Коротков Д.А., Коротков С.В., Спичкин Г.Л., Федотова Л.М. // ПТЭ. 2017. № 2. С. 126.  
<https://doi.org/10.7868/S0032816217020094>
13. Коротков С.В., Аристов Ю.В., Козлов А.К., Коротков Д.А., Люблинский А.Г., Спичкин Г.Л. // ПТЭ. 2012. № 5. С. 99.