

ГЕНЕРАТОР ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ НАНОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ
НА ОСНОВЕ ДИНИСТОРОВ С УДАРНОЙ ИОНИЗАЦИЕЙ© 2023 г. С. В. Коротков^{а,*}, А. Л. Жмодиков^а, Д. А. Коротков^а^аФизико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН
Россия, 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26

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

Поступила в редакцию 06.04.2023 г.

После доработки 10.05.2023 г.

Принята к публикации 29.05.2023 г.

Описан генератор мощных наносекундных импульсов, состоящий из четырех эстафетно включающихся каскадов. Каждый каскад содержит накопительный конденсатор с рабочим напряжением 8 кВ и блок последовательно соединенных динисторов с ударной ионизацией. Показана возможность коммутации в нагрузку 30 Ом импульсов тока с амплитудой 800 А и фронтом 4 нс, следующих с частотой 100 Гц. Определены перспективы увеличения выходного напряжения и выходной энергии генератора.

DOI: 10.31857/S0032816223060034, EDN: XVFP1V

Для обеспечения высокой эффективности генераторов наносекундных импульсов требуются коммутаторы с субнаносекундным временем переключения в хорошо проводящее состояние. Малый разброс моментов включения, большой срок службы и малое время выключения дают определенные преимущества полупроводниковым коммутаторам.

В настоящее время наиболее мощными полупроводниковыми коммутаторами с субнаносекундным временем включения являются описанные в работах [1–4] двухэлектродные кремниевые структуры тиристорного типа (динисторы), принцип действия которых впервые изложен в работе [5]. Они переключаются импульсом высокого напряжения с наносекундным фронтом. В процессе приложения к динисторной структуре быстро нарастающего наносекундного импульса напряжения лавинный пробой развиться не успевает, и напряженность поля в ее базовых областях достигает величины, достаточной для инициирования ударной ионизации. Созданные в результате ударной ионизации носители тока обеспечивают очень быстрое (менее наносекунды) переключение динисторной структуры в состояние с высокой проводимостью, которое затем поддерживается благодаря двухсторонней инжекции носителей тока из эмиттеров.

В работах [6–9] показана высокая эффективность генераторов мощных наносекундных импульсов с коммутаторами на основе оптимизированных динисторов с ударной ионизацией (SID –

Shock Ionized Dynistors), впервые описанных в работах [10–12]. Эти генераторы содержат высоковольтный накопительный конденсатор, который разряжается через нагрузку при включении блока последовательно соединенных SID-структур. Переключение SID осуществляется либо одновременно с помощью общей цепи управления, либо эстафетно, когда цепь управления запускает небольшое количество динисторных структур, а остальные включаются с помощью дополнительных конденсаторов, формирующих волну перенапряжения. Основным недостатком таких генераторов является то, что амплитуда их выходного напряжения не может быть больше напряжения зарядки накопительного конденсатора.

Эстафетный запуск SID определяет возможность разработки многокаскадных SID-генераторов, выполненных по известной схеме Аркадьева–Маркса, которая обеспечивает формирование выходного напряжения путем суммирования напряжений каскадов, выполненных на основе сравнительно низковольтных накопительных конденсаторов.

Для подтверждения этой возможности был разработан опытный четырехкаскадный SID-генератор, в котором напряжение каскада U_0 составляло 8 кВ. Каждый каскад содержал дисковый накопительный конденсатор КВИ-3 емкостью 2.2 нФ и блок SID, состоящий из четырех динисторных структур, расположенных между алюминиевыми цилиндрическими электродами в трубчатом корпусе из фторопласта. Структуры SID имели диа-

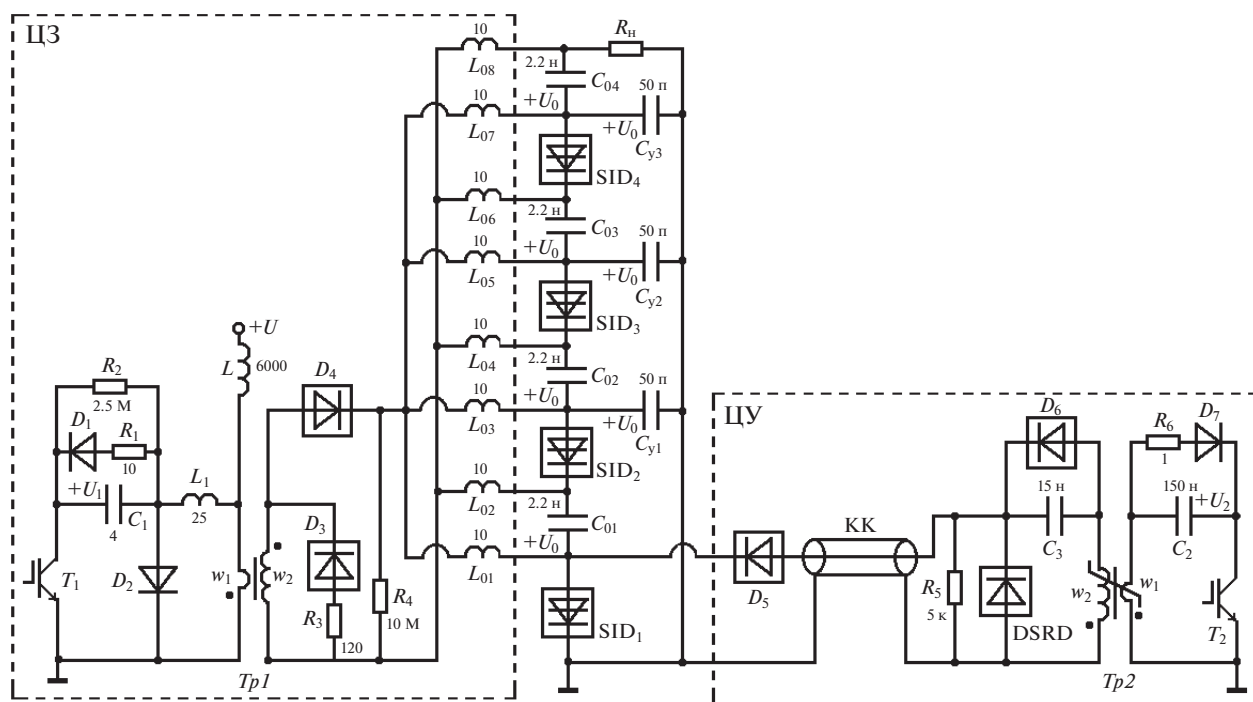


Рис. 1. Электрическая схема опытного генератора. T_1, T_2 – IRG6S60B120KDP (2 параллельно); D_1, D_7 – HER308 (2 последовательно), D_2 – HER508 (2 последовательно), D_3 – PG309 (2 параллельно), D_4 – HER308 (16 последовательно), D_5 – K100UF (2 параллельно), D_6 – HER308 (3 последовательно); КК – кабель РК75; DSRD – блок из 24 диодных структур с диаметром 16 мм; $Tp1$ – сердечник из аморфного пермаллоя 2НСП, 8 колец размером $64 \times 40 \times 10$ мм, $w_1 = 4$, $w_2 = 75$; $Tp2$ – сердечник из феррита N87 (EPCOS), 8 колец размером $25.3 \times 14.8 \times 10$ мм, $w_1 = 1$, $w_2 = 3$.

метр 16 мм и допускали приложение стационарного напряжения 2.5 кВ. При фронте запускающего воздействия ~ 2.5 нс SID-структуры переключались при напряжении ~ 4.6 кВ.

Электрическая схема генератора показана на рис. 1. Она содержит блоки SID_1 – SID_4 , нагрузку R_n , накопительные конденсаторы C_{01} – C_{04} и запускающие конденсаторы C_{y1} – C_{y3} . В исходном состоянии все конденсаторы заряжены до одинакового напряжения U_0 с помощью цепи заряда ЦЗ. Длительность процесса зарядки (~ 15 мкс) определяется длительностью тока, который протекает через обмотку w_2 повышающего трансформатора $Tp1$ после включения транзисторного ключа T_1 . Индуктивности L_{01} – L_{08} исключают взаимное влияние конденсаторов C_{01} – C_{04} в процессе формирования импульса напряжения на нагрузке. Цепь постоянного тока (~ 1 А) на основе дросселя L стабилизирует магнитное состояние сердечника трансформатора $Tp1$.

Включение блока SID_1 первого каскада осуществляется цепью управления ЦУ. Остальные блоки SID переключаются эстафетно с помощью конденсаторов C_{y1} – C_{y3} .

Цепь управления выполнена по схеме, рассмотренной в работе [7]. Формирование запуска-

ющих наносекундных импульсов высокого напряжения осуществляется с помощью диодного прерывателя тока в виде блока последовательно соединенных структур DSRD (Drift Step-Recovery Diodes), впервые описанных в работе [13]. После включения транзисторного ключа T_2 через блок DSRD протекает прямой ток с амплитудой ~ 210 А и принципиально малой длительностью (~ 350 нс). В результате происходит зарядка конденсатора C_3 , и в DSRD-структурах создается запас электронно-дырочной плазмы. В момент окончания прямого тока сердечник трансформатора $Tp2$ насыщается, индуктивность обмотки w_2 резко уменьшается и через блок DSRD протекает ток разряда C_3 с принципиально малым фронтом (~ 100 нс). Этот ток обеспечивает вывод из структур DSRD всего накопленного заряда и их выключение за время < 3 нс.

В процессе выключения DSRD-структур на входе кабеля КК формируется наносекундный импульс напряжения с амплитудой ~ 27 кВ, которая определяется произведением волнового сопротивления кабеля на ток обмотки w_2 в момент выключения блока DSRD. В результате на конце кабеля создается импульс напряжения с амплитудой, превышающей U_0 , и через диод D_5 протекает выходной ток ЦУ. Этот ток осуществляет быст-

рую зарядку емкости блока SID_1 до напряжения включения $U_m \approx 18$ кВ, которое определяется суммой напряжений включения динисторных структур.

После включения блока SID_1 в емкость блока SID_2 коммутируется ток разряда конденсаторов C_{y1}, C_{01} , скорость нарастания которого определяется монтажной индуктивностью цепи $C_{y1}-SID_2-C_{01}-SID_1$. В результате напряжение на SID_2 быстро увеличивается от исходной величины $U_0 = 8$ кВ до напряжения включения U_m . Так как $U_m > 2U_0$, то для включения блока SID_2 требуется достаточно большая емкость конденсатора C_{y1} . После включения блока SID_2 конденсаторы C_{y2}, C_{02}, C_{01} начинают разряжаться через емкость блока SID_3 , и напряжение на SID_3 резко нарастает до напряжения включения U_m . Включение блока SID_3 приводит к эстафетному включению блока SID_4 . В результате в нагрузку R_n коммутируется импульс тока разряда последовательно соединенных конденсаторов $C_{01}-C_{04}$.

Условия работы запускающих конденсаторов $C_{y1}-C_{y3}$ определяют большое напряжение их перезарядки в процессе формирования выходного напряжения генератора. Высокая надежность этих конденсаторов обеспечивается простотой их конструкции. Один электрод конденсаторов выполнен в виде алюминиевого цилиндра и изолирован несколькими слоями скотча в виде полиимидной пленки шириной 30 мм и толщиной 42 мкм. В качестве второго электрода используется скотч в виде медной ленты шириной 5 мм и толщиной 100 мкм, который располагается на внешнем слое пленочной изоляции оппозитно цилиндрическому электроду. Емкость запускающего конденсатора определяется диаметром цилиндрического электрода, толщиной пленочной изоляции и шириной ленточного электрода.

На рис. 2 показана конструкция каскадов SID -генератора.

Цилиндрические электроды запускающих конденсаторов обмотаны изолирующей пленкой 1 и расположены между динисторными блоками 2 и накопительными конденсаторами 3. Электрический контакт с потенциальной шиной 4 и заземленной шиной 5 осуществляется с помощью прижимного устройства, которое содержит алюминиевые фланцы 6, 7 и пластины 8, 9, выполненные из капролона. Прижимное усилие создается болтом 10 и передается с помощью пружинных шайб 11. Малая индуктивность цепи разряда накопительных конденсаторов достигается в результате использования шины 12, подключенной бифилярно цепи, состоящей из блоков 2 и конденсаторов 3. Шина 12 соединена с ленточными электродами 13

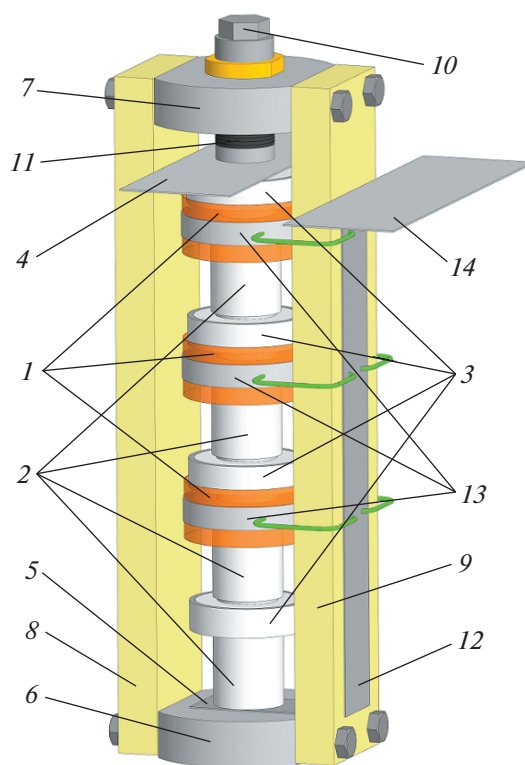


Рис. 2. Конструкция каскадов SID -генератора. 1 – изолирующая пленка; 2 – динисторные блоки; 3 – накопительные конденсаторы; 4, 5 – потенциальная и заземленная шины соответственно; 6, 7 – алюминиевые фланцы прижимного устройства; 8, 9 – выполненные из капролона пластины прижимного устройства; 10 – болт для обеспечения прижимного усилия; 11 – пружинные шайбы; 12 – шина; 13 – ленточные электроды; 14 – выходная шина.

запускающих конденсаторов и с выходной шиной 14. Нагрузка подключается между шинами 4, 14.

Генератор был исследован в условиях естественного охлаждения при частоте выходных импульсов 100 Гц. Нагрузка была выполнена в виде сборки малоиндуктивных резисторов и имела сопротивление ~ 30 Ом.

На рис. 3 приведены осциллограммы напряжения на блоке SID_1 (рис. 3а) и на запускающих конденсаторах C_{y1}, C_{y2} , и C_{y3} (соответственно рис. 3б–3г), измеренные щупом Tektronix P6015A.

Осциллограмма на рис. 3а свидетельствует о том, что напряжение на блоке SID_1 за время ~ 2.5 нс нарастает до запускающей величины ~ 19 кВ, которая обуславливает его очень быстрое переключение в состояние с высокой проводимостью. Из осциллограмм на рис. 3б–3г видно, что в исходном состоянии конденсаторы $C_{y1}-C_{y3}$ заряжены до напряжения 8 кВ. Короткий всплеск напряжения обусловлен их подзарядкой выходным током ЦУ в процессе запуска SID_1 . После включе-

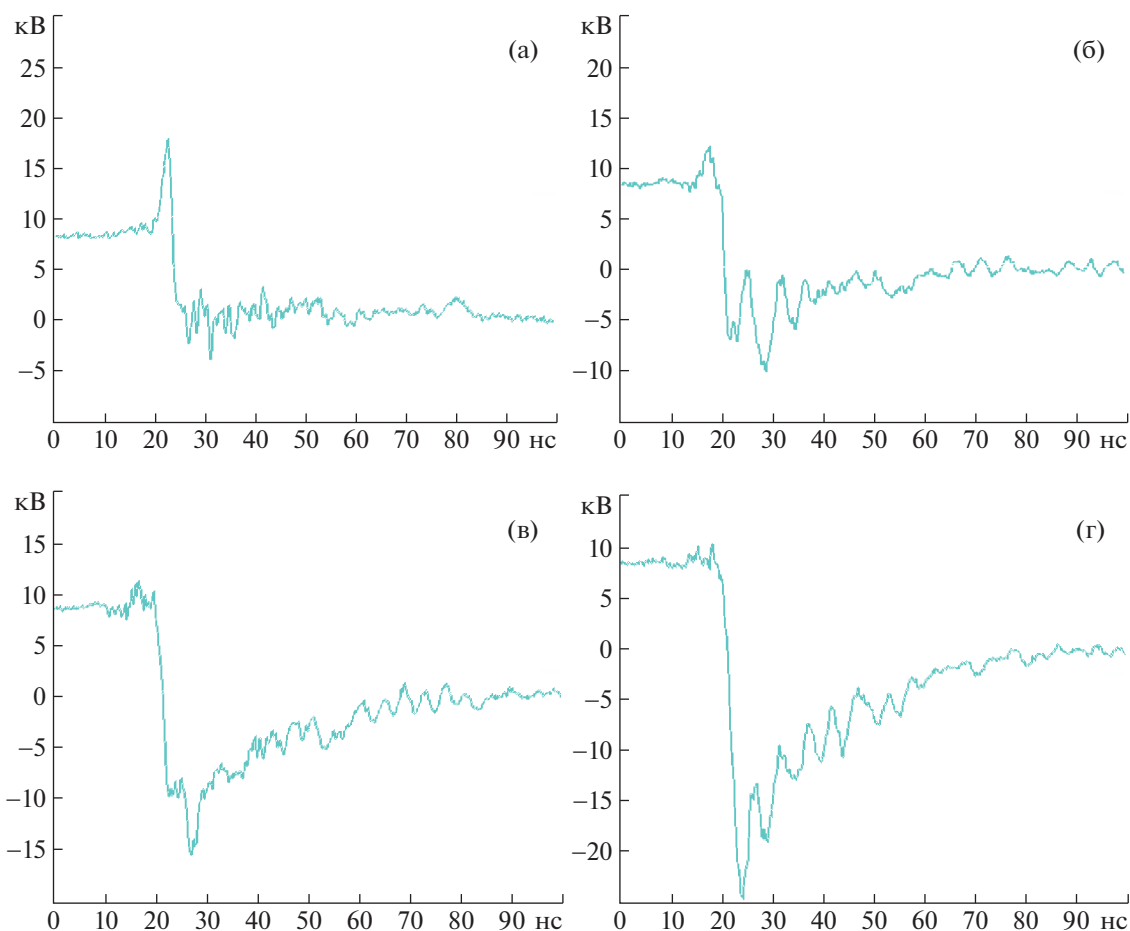


Рис. 3. Осциллограммы напряжения на блоке SID_1 (а) и на конденсаторах C_{y1} (б), C_{y2} (в), C_{y3} (г).

ния SID_1-SID_4 в $C_{y1}-C_{y3}$ отщепляются токи разряда конденсаторов $C_{01}-C_{04}$. В результате $C_{y1}-C_{y3}$ перезаряжаются до большого обратного напряжения.

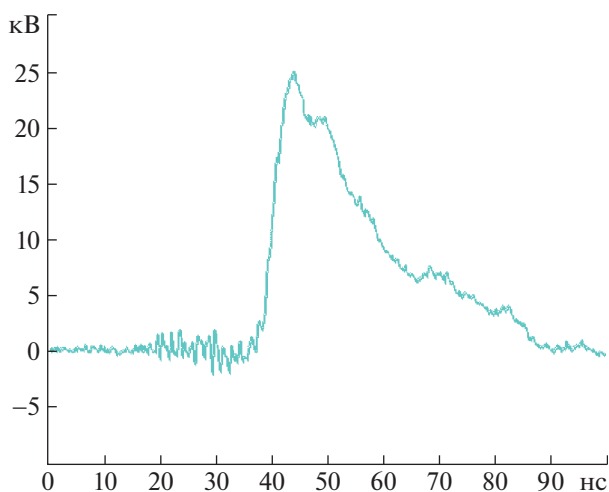


Рис. 4. Осциллограмма напряжения на нагрузке.

На рис. 4 показана осциллограмма напряжения на нагрузке. Она измерена широкополосным делителем с сопротивлением ~ 500 Ом, который обеспечивал достоверное измерение сигналов с фронтом >0.5 нс. Конструкция делителя подробно описана в работе [14]. Так как нагрузка имеет сопротивление 30 Ом, то амплитуда и скорость нарастания выходного тока составляют соответственно 800 А и 200 А/нс.

Таким образом, проведенные исследования показали, что опытный SID -генератор за время ~ 4 нс способен коммутировать импульсную мощность ~ 20 МВт. Увеличение выходной энергии генератора может быть получено в результате увеличения емкости каскадов, а повышение выходного напряжения — путем использования дополнительных каскадов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Efanov V.M., Kardo-Sysoev A.F., Tchashnikov I.G., Yarin P.M. // Proc. of 1996 International Power Modulator Symposium. Boca Raton, FL, USA, 1996. P. 22. <https://doi.org/10.1109/MODSYM.1996.564440>

2. Grekhov I., Korotkov S., Rodin S. // IEEE Transactions on Plasma Science. 2008. V. 36. № 2. Part 1. P. 378. <https://doi.org/10.1109/TPS.2008.918661>
3. Korotkov S.V., Aristov Yu.V., Voronkov V.B., Zhmodikov A.L., Korotkov D.A., Lyublinskii A.G. // Instrum. and Exp. Tech. 2009. V. 52. № 5. P. 695. <https://doi.org/10.1134/S0020441209050091>
4. Gusev A.I., Lyubutin S.K., Rukin S.N., Tsyranov S.N. // IEEE Transactions on Plasma Science. 2016. V. 44. № 10. Part 1. P. 1888. <https://doi.org/10.1109/TPS.2016.2542343>
5. Grekhov I., Kardo-Sysoev A. // Soviet Technical Physics Letters. 1979. V. 5. № 8. P. 395.
6. Коротков С.В., Аристов Ю.В., Коротков Д.А. // ПТЭ. 2022. № 5. С. 70. <https://doi.org/10.31857/S003281622205007X>
7. Коротков С.В., Аристов Ю.В. // ПТЭ. 2022. № 5. С. 65. <https://doi.org/10.31857/S0032816222050068>
8. Коротков С.В., Аристов Ю.В., Козлов К.А. // ПТЭ. 2023. № 4. С. 70. <https://doi.org/10.31857/S0032816223040134>
9. Коротков С.В., Аристов Ю.В., Жмодиков А.Л., Коротков Д.А. // ПТЭ. 2023. № 4. С. 74. <https://doi.org/10.31857/S0032816223040146>
10. Коротков С.В., Аристов Ю.В., Воронков В.Б. // ПТЭ. 2019. № 2. С. 24. <https://doi.org/10.1134/S0032816219010130>
11. Коротков С.В., Аристов Ю.В., Жмодиков А.Л., Коротков Д.А. // ПТЭ. 2020. № 5. С. 75. <https://doi.org/10.31857/S0032816220050171>
12. Korotkov S.V., Aristov Yu.V., Korotkov D.A., Zhmodikov A.L. // Review of Scientific Instruments. 2020. V. 91. Art. № 084704. <https://doi.org/10.1063/5.0015284>
13. Grekhov I., Efanov V., Kardo-Sysoev A., Shenderoy S. // Solid State Electronics. 1985. V. 28. № 6. P. 597. [https://doi.org/10.1016/0038-1101\(85\)90130-3](https://doi.org/10.1016/0038-1101(85)90130-3)
14. Белкин В.С., Шульженко Г.И. Препринт 91-51. Ротапринт ИЯФ СО АН СССР. Новосибирск, 1991.