

МОЩНЫЙ ДИОДНО-ДИНИСТОРНЫЙ ГЕНЕРАТОР ДЛЯ ГАЗОРАЗРЯДНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

© 2021 г. С. В. Коротков^{а,*}, А. Л. Жмодиков^а

^а Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН
Россия, 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26

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

Поступила в редакцию 12.04.2021 г.

После доработки 13.04.2021 г.

Принята к публикации 14.04.2021 г.

Рассмотрен генератор импульсов высокого напряжения, содержащий выходную цепь на основе последовательно соединенных блоков реверсивно включаемых динисторов и диодов с резким восстановлением. На нагрузке 50 Ом он формирует импульсы напряжения с фронтом 4 нс и амплитудой 24 кВ. Приведены результаты использования генератора для создания разрядов в атмосферном воздухе. На частоте 100 Гц генератор формирует импульсы разрядного тока с амплитудой 1.7 кА и фронтом 900 нс и коммутирует в канал разряда энергию ~3 Дж. Показана возможность существенного увеличения коммутируемой энергии.

DOI: 10.31857/S0032816221050049

В настоящее время хорошо известны импульсные устройства, в которых используется электрический пробой газового промежутка (лазеры, излучатели частиц с высокой энергией, плазменные установки для синтеза полезных элементов и разложения вредных химических соединений, различное биологическое оборудование и т.д.). В этих устройствах заполненный газом межэлектродный промежуток пробивается при приложении импульса высокого напряжения. После пробоя в канал разряда вкладывается энергия, требуемая для конкретной плазменной технологии. Производительность газоразрядных технологий повышается при увеличении объема образованной неравновесной плазмы, который определяется расстоянием между электродами. При увеличении межэлектродного расстояния повышается напряжение пробоя газового промежутка. Высокая эффективность плазменных технологий достигается при создании большой напряженности электрического поля в процессе развития разряда. Для этого требуется короткий (наносекундный) фронт инициирующего пробоя импульса высокого напряжения. Так как после пробоя газоразрядного промежутка сопротивление канала разряда мало, то для коммутации в разряд большой электрической мощности необходим большой ток. Причем длительность разрядного тока, как правило, невелика и определяется характерным временем плазменных реакций.

Таким образом, генераторы для питания газоразрядных устройств должны сначала формировать импульс высокого напряжения с наносекундным фронтом, а затем коммутировать в канал разряда достаточно большой ток. Рабочая частота таких генераторов определяется техническими характеристиками используемых устройств и может достигать несколько килогерц.

Хорошо известны [1–3 и др.] килогерцовые генераторы мощных наносекундных импульсов высокого напряжения на основе дрейфовых диодов с резким восстановлением (DSRD – drift step-recovery diodes) [4–6 и др.]. В этих генераторах используется выходная цепь, содержащая последовательно соединенные накопительный конденсатор, индуктивный накопитель энергии и прерыватель тока в виде блока DSRD. Сначала через блок DSRD пропускается принципиально короткий (<500 нс) импульс прямого тока, который создает резко неоднородное распределение концентраций электронов и дырок в базовых областях диодов и обеспечивает зарядку накопительного конденсатора. В процессе разряда накопительного конденсатора через блок DSRD протекает быстро нарастающий обратный ток, который обеспечивает вывод из диодных структур накопленных носителей и выключение блока DSRD. При очень малой (<300 нс) длительности и оптимальной плотности этого тока время выключения блока DSRD составляет несколько наносекунд. В процессе выключения блока DSRD ток, протекающий через

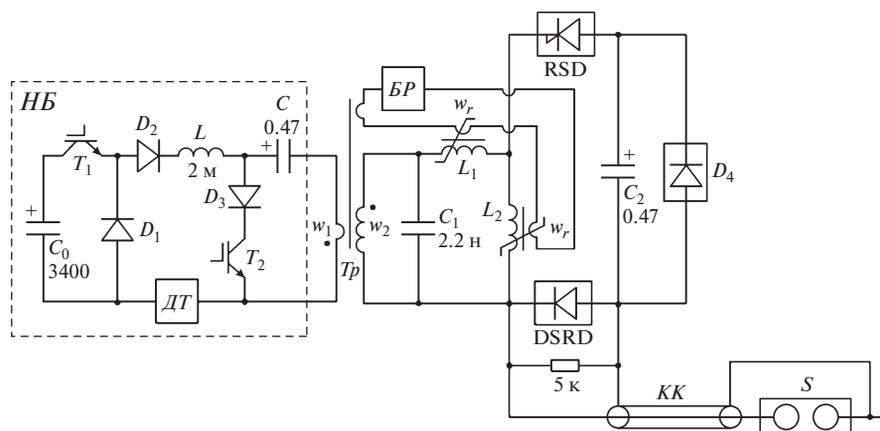


Рис. 1. Электрическая схема диодно-динисторного генератора. *НБ* – низковольтный блок, *БП* – блок размагничивания, *ДТ* – датчик тока, *КК* – коаксиальный кабель, *S* – искровой разрядник; T_1 – IRG6S60B120KDP, T_2 – IRG6S60B120KDP (2 параллельно); D_1 – D_3 – 80APF12, D_4 – 80APF12 (4 последовательно); RSD – диаметр структур 16 мм (2 последовательно), DSRD – диаметр структур 16 мм (25 последовательно); L_1 , L_2 – феррит Еrcos 63 × 38 × 50 мм, 15 витков (L_1), 4 витка (L_2), w_r – одновитковые обмотки размагничивания; T_p – сплав 2НСП 64 × 40 × 60 мм, $w_1 = 1$, $w_2 = 15$; *КК* – РК50 (3 мм).

индуктивный накопитель, коммутируется в нагрузку. Амплитуда импульса напряжения на нагрузке определяется произведением коммутируемого тока на сопротивление нагрузки. Величина коммутируемой энергии определяется величиной энергии, накопленной в индуктивном накопителе к моменту выключения блока DSRD.

Так как время накопления энергии в индуктивном накопителе ограничено максимально допустимой длительностью обратного тока через блок DSRD, а скорость нарастания этого тока ограничена собственной индуктивностью накопителя, то большая величина энергии, коммутируемой в нагрузку, может быть обеспечена только при большом напряжении зарядки накопительного конденсатора. Так, например, в [3] выходная энергия генератора ~0.1 Дж достигалась при напряжении зарядки накопительного конденсатора ~12 кВ.

Более высокая выходная энергия генератора при существенно меньшем напряжении зарядки накопительного конденсатора может быть получена при использовании схемы, представленной на рис. 1. Эта схема содержит блок DSRD, который формирует фронт и амплитуду импульсов выходного напряжения, и блок реверсивно включаемых динисторов (RSD – reversely switched dynistors) [7–10 и др.], который обеспечивает выключение блока DSRD и коммутацию энергии в нагрузку.

RSD являются четырехслойными кремниевыми приборами тиристорного типа. В отличие от тиристоров они не имеют электрода управления и переключаются путем кратковременного реверса блокируемого напряжения. При приложении не-

большого обратного напряжения через структуры RSD протекает равномерно распределенный по площади ток управления, обуславливающий накопление запускающих носителей. При восстановлении исходной полярности напряжения эти носители обеспечивают быстрое включение RSD, которое происходит одновременно по всей рабочей площади. В результате RSD имеют очень малые потери энергии при коммутации мощных быстро нарастающих импульсов тока.

Схема на рис. 1 содержит повышающий трансформатор T_p , цепь магнитного сжатия C_1 , L_1 и выходную цепь, состоящую из последовательно соединенных накопительного конденсатора C_2 , блока RSD, дросселя L_2 и блока DSRD. В качестве нагрузки используется искровой разрядник S , который подключен к блоку DSRD с помощью коаксиального кабеля *КК*. Импульсное питание цепи магнитного сжатия обеспечивает низковольтный блок *НБ*. Блок размагничивания *БП* обеспечивает протекание через одновитковые обмотки w_r , дросселей L_1 , L_2 тока ~3 А, который приводит сердечники дросселей в рабочее состояние.

Исходно конденсаторы C и C_2 заряжены до напряжения 1 кВ и 3.5 кВ. При включении транзистора T_2 конденсатор C быстро (~900 нс) разряжается через обмотку w_1 трансформатора T_p . Ток вторичной обмотки T_p обеспечивает зарядку конденсатора C_1 до напряжения ~14 кВ. Так как в исходном состоянии дроссель L_1 имеет большую индуктивность, то в процессе зарядки C_1 напряжение на дросселе L_2 мало. В момент окончания процесса зарядки конденсатора C_1 происходит насыщение сердечника дросселя L_1 . В результате

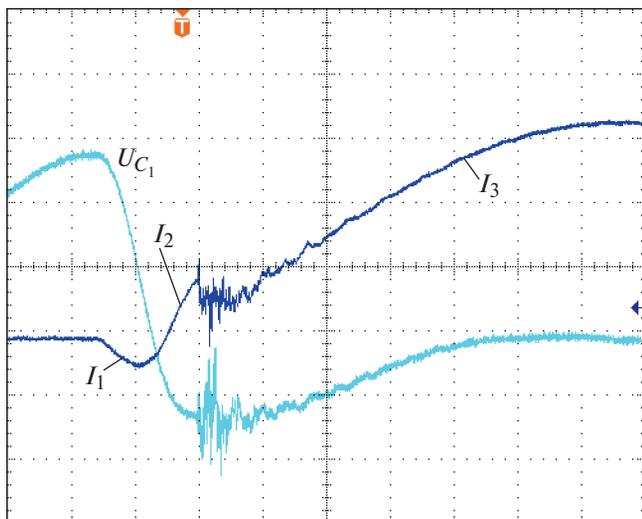


Рис. 2. Осциллограммы напряжения на конденсаторе C_1 (U_{C_1}) и тока через цепь RSD– C_2 –DSRD (I_1 , I_2 , I_3). Масштаб по вертикали: тока – 500 А/деление, напряжения – 5 кВ/деление; по горизонтали – 200 нс/деление.

индуктивность дросселя L_1 резко уменьшается и напряжение на дросселе L_2 резко нарастает. Когда напряжение на дросселе L_2 становится больше напряжения зарядки конденсатора C_2 , в цепи RSD– C_2 –DSRD формируется ток I_1 с амплитудой ~ 250 А и длительностью ~ 200 нс (см. рис. 2). Этот ток протекает через блок RSD в обратном направлении, а через блок DSRD в прямом направлении. В результате в структурах динисторов и диодов накапливается заряд запускающих носителей.

Полярность тока через блоки RSD и DSRD изменяется после насыщения сердечника дросселя L_2 . Так как индуктивность насыщенного дросселя L_2 очень мала, то через блок RSD резко нарастает ток разряда конденсатора C_2 . В результате к блоку RSD прикладывается прямое напряжение, и он без задержки включается и коммутирует в блок DSRD быстро нарастающий ток I_2 . Этот ток протекает через блок DSRD в обратном направлении и обуславливает его выключение. В момент выключения блока DSRD ток I_2 (~ 500 А) коммутируется в коаксиальный кабель KK с волновым сопротивлением 50 Ом. В результате на входе кабеля формируется импульс напряжения с амплитудой ~ 24 кВ и фронтом ~ 4 нс (см. рис. 3).

На конце кабеля KK напряжение нарастает до момента пробоя разрядника S , который происходит при напряжении ~ 38 кВ (см. рис. 4).

После пробоя разрядника S конденсатор C_2 разряжается через межэлектродный промежуток. В результате формируется разрядный ток I_3 (см. рис. 2) с амплитудой 1.7 кА и фронтом ~ 900 нс.

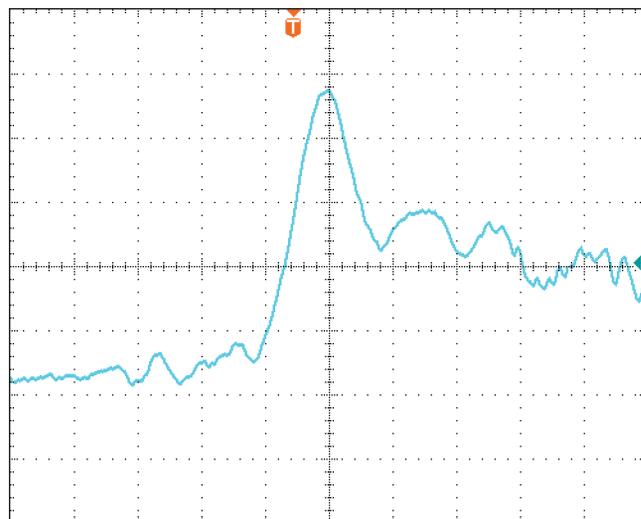


Рис. 3. Осциллограмма напряжения на входе кабеля KK . Масштаб по вертикали 5 кВ/деление, по горизонтали – 4 нс/деление.

Диодный блок D_4 обеспечивает униполярную форму разрядного тока. В процессе протекания разрядного тока в разрядник S коммутируется энергия, запасенная в конденсаторе C_2 (~ 3 Дж).

Как видно из осциллограмм на рис 2, при запуске блока RSD конденсатор C_1 перезаряжается до обратного напряжения ~ 6.5 кВ. Остающаяся в нем энергия возвращается в блок HB , а затем эффективно используется при следующей зарядке конденсатора C .

Принцип работы блока HB описан в работе [11]. Он заключается в следующем.

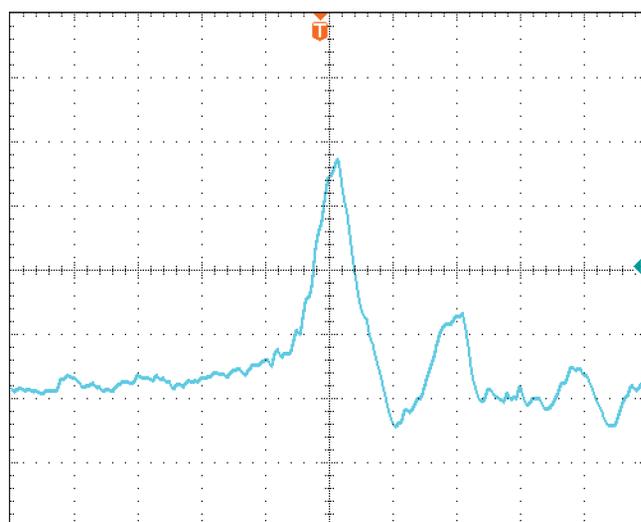


Рис. 4. Осциллограмма напряжения на разряднике S . Масштаб по вертикали 10 кВ/деление, по горизонтали – 4 нс/деление.

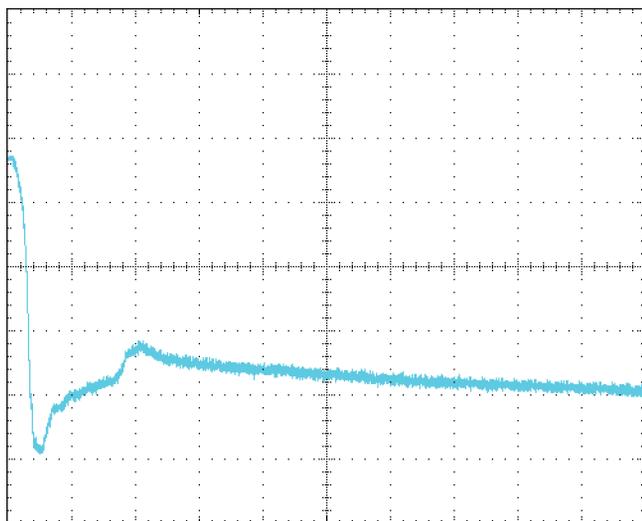


Рис. 5. Осциллограмма напряжения на блоке RSD. Масштаб по вертикали 1 кВ/деление, по горизонтали – 200 нс/деление.

В исходном состоянии конденсатор C_0 заряжен до напряжения ~ 300 В. После включения транзисторов T_1, T_2 через индуктивность L и датчик тока $ДТ$ протекает линейно нарастающий ток разряда конденсатора C_0 . В момент, когда этот ток достигает заданной величины, датчик тока $ДТ$ формирует сигнал, по которому осуществляется выключение транзисторов T_1, T_2 . В результате происходит коммутация энергии из индуктивности L в конденсатор C . При включении транзистора T_2 эта энергия коммутируется в конденсатор C_1 . После окончания процесса коммутации транзистор T_2 не выключается до следующего цикла зарядки конденсатора C .

Рекуперация энергии, остающейся в конденсаторе C_1 после его перезарядки, осуществляется следующим образом. Обратное напряжение на конденсаторе C_1 обуславливает протекание тока по цепи $C-D_3-T_2$ и перезарядку конденсатора C до обратного напряжения. Затем конденсатор C перезарядается до напряжения исходной полярности по цепи $ДТ-D_1-D_2-L$ и в индуктивность L передается энергия, которая возвратилась в блок $НБ$ из конденсатора C_1 . В момент, когда на конденсаторе C восстанавливается исходная полярность напряжения, ток, протекающий через индуктивность L , коммутируется в цепь D_3-T_2 и практически не изменяется до момента включения транзистора T_1 . При включении T_1 диод D_1 выключается, и через индуктивность L протекает ток разряда конденсатора C_0 . Когда этот ток нарастает до заданной величины, транзисторы T_1, T_2 выключаются и конденсатор C заряжается до рабочего напряжения.

Исследование рассмотренного генератора проводилось на частоте 100 Гц, которая ограничивалась мощностью блока зарядки конденсатора C_2 . В наших экспериментах использовался разрядник S , который имел электроды сферической формы и был заполнен атмосферным воздухом. Блок RSD состоял из двух последовательно соединенных диодисторов с диаметром структур 16 мм и рабочим напряжением 2 кВ. Блок DSRD состоял из 25 последовательно соединенных диодов с диаметром структур 16 мм и рабочим напряжением 1 кВ.

На рис. 5 показана осциллограмма напряжения на блоке RSD при протекании разрядного тока. Из осциллограммы следует, что в рассмотренном режиме коммутационные потери энергии в блоке RSD малы и допускают его использование на частоте >1 кГц. Увеличение амплитуды разрядного тока может быть получено при увеличении емкости конденсатора C_2 .

Так как предельная амплитуда тока через RSD и DSRD пропорциональна их рабочей площади, а групповое соединение этих приборов достаточно надежно, то более высокий уровень импульсной и средней мощности генераторов, построенных по рассмотренной схеме, можно получить при увеличении диаметра структур диодисторов и диодов и при увеличении их количества.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коротков С.В., Аристов Ю.В., Козлов А.К., Коротков Д.А., Люблинский А.Г., Спичкин Г.Л. // ПТЭ. 2012. № 5. С. 99.
2. Lyublinsky A.G., Korotkov S.V., Aristov Y.V., Korotkov D.A. // IEEE Transactions on Plasma Science. 2013. V. 41. Issue 10. Part 1. P. 2625. <https://doi.org/10.1109/TPS.2013.2264328>
3. Коротков С.В. Кузнецов А.С., Аристов Ю.В. // ПТЭ. 2021. № 5. С. 53.
4. Грехов И.В., Ефанов В.М., Кардо-Сусоев А.Ф., Шендерей С.В. // Письма в ЖТФ. 1983. Т. 9. № 7. С. 435.
5. Grekhov I.V., Efanov V.M., Kardo-Susoev A.F., Shenderay S.V. // Solid State Electronics. 1985. V. 28. № 4. P. 597.
6. Коротков С.В., Воронков В.Б., Аристов Ю.В. // ПТЭ. 2015. № 4. С. 48. <https://doi.org/10.7868/S0032816215040072>
7. Grekhov I.V., Gorbatyuk A.V., Kostina L.S., Korotkov S.V., Iakovthuk N.S. // Solid-State Electronics. 1983. V. 26. № 11. P. 1132.
8. Коротков С.В. // ПТЭ. 2002. № 4. С. 5.
9. Korotkov S.V., Lyublinsky A.G., Aristov Y.V., Zhmodikov A.L., Kozlov A.K. // IEEE Transactions on Plasma Science. 2013. V. 41. Issue 10. Part 1. P. 2879. <https://doi.org/10.1109/TPS.2013.2267555>
10. Коротков С.В., Жмодиков А.Л. // ПТЭ. 2011. № 1. С. 68.
11. Коротков С.В., Коротков Д.А., Аристов Ю.В., Жмодиков А.Л. // ПТЭ. 2021. № 3. С. 50. <https://doi.org/10.1134/S0020441221030283>