

КОММУТАТОРЫ МОЩНЫХ НАНОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ ТОКА
НА ОСНОВЕ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ БЛОКОВ ДИНИСТОРОВ
С УДАРНОЙ ИОНИЗАЦИЕЙ© 2022 г. С. В. Коротков^{а,*}, Ю. В. Аристов^а, Д. А. Коротков^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 11.03.2022 г.

После доработки 01.04.2022 г.

Принята к публикации 02.04.2022 г.

Описаны моноблочный и модульный коммутаторы мощных импульсов тока с рабочим напряжением 12 кВ, выполненные на основе последовательно соединенных динисторов с ударной ионизацией. Исследованы процессы переключения этих коммутаторов. Определена зависимость коммутационных потерь энергии от мощности импульса управления. Показана возможность коммутации наносекундных импульсов тока с амплитудой несколько килоампер на частоте несколько сотен герц.

DOI: 10.31857/S003281622205007X

Потери энергии в коммутаторах наносекундных импульсов тока во многом определяются временем их переключения. В связи с этим большой интерес представляют описанные в работах [1–4] кремниевые полупроводниковые приборы, которые имеют разную конструкцию, но переключаются за время < 1 нс. Такое малое время включения достигается в результате использования предложенного в работе [5] способа запуска наносекундным импульсом высокого напряжения, который инициирует процесс ударной ионизации кремния. Носители тока, созданные в процессе ударной ионизации, обеспечивают высокую проводимость полупроводниковых коммутаторов сразу после их включения.

В данной статье приведены результаты исследований мощных коммутаторов с субнаносекундным временем включения, выполненных в виде блоков последовательно соединенных динисторов с ударной ионизацией (SID – Shock Ionized Dynistors), впервые описанных в работе [6]. Как показали исследования [7, 8], определенным достоинством этих динисторов является то, что их эффективное включение может быть обеспечено сравнительно маломощными цепями управления.

На рис. 1 приведена схема разработанного генератора мощных наносекундных импульсов на основе силовой цепи $C_0-R_0-L_0$ и блока SID с рабочим напряжением 12 кВ. Переключение блока SID осуществляется с помощью цепи управления

ЦУ, содержащей размыкающий ключ в виде высоковольтного блока дрейфовых диодов с резким восстановлением (DSRD – Drift Step Recovery Diodes), впервые описанных в работе [9]. Наносекундное время выключения блока DSRD обеспечивается цепью магнитного сжатия на основе повышающего трансформатора Tr , накопительного конденсатора C_1 и транзисторного ключа T с рабочим напряжением 1.2 кВ.

Принцип работы генератора заключается в следующем. В исходном состоянии конденсаторы C_1, C_0 заряжены до напряжений U_1, U_0 . Напряжение U_1 блокирует ключ T , напряжение U_0 приложено к блоку SID и к разделительной цепи $C-D$, которая исключает приложение высокого напряжения к блоку DSRD. После включения ключа T конденсатор C_1 разряжается через первичную обмотку w_1 трансформатора Tr . В результате через вторичную обмотку w_2 протекает ток, который обеспечивает накопление заряда в диодах блока DSRD и зарядку конденсатора C_2 . Этот ток имеет принципиально малую длительность (~ 350 нс), которая необходима для эффективной работы DSRD. В момент окончания процесса зарядки конденсатора C_2 сердечник трансформатора Tr насыщается. При этом индуктивность обмотки w_2 резко уменьшается, и конденсатор C_2 быстро разряжается по цепи $L-DSRD-w_2$. Протекающий через индуктивность L ток I_L выносит из диодов блока DSRD весь накопленный заряд за время

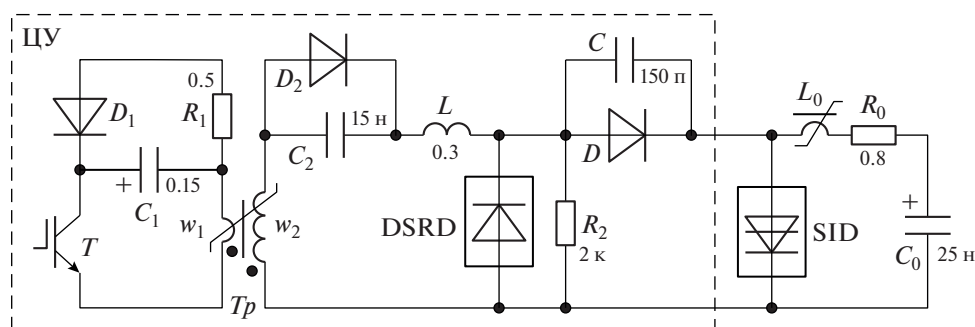


Рис. 1. Электрическая схема генератора наносекундных импульсов на основе блока SID. ЦУ – цепь управления; DSRD – 25 диодов с диаметром структур 16 мм; D – К100 (2 последовательно); D_1 – HER608; D_2 – HER608 (4 последовательно); T – IRGPS60B120KDP (2 параллельно); T_p – сердечник, феррит N87 (EPCOS), 8 колец размером $25.3 \times 14.8 \times 10$ мм, $w_1 = 1$, $w_2 = 3$; L_0 – сердечник феррит N87 (EPCOS), 5 колец размером $16 \times 9.6 \times 6.3$ мм, $w = 1$.

~150 нс. В результате диоды синхронно выключаются за время ~3 нс.

В процессе выключения диодов напряжение на блоке DSRD быстро нарастает и распределяется между цепью C–D, блоком SID и индуктивностью монтажных проводов, обеспечивающих их соединение. При этом через блок SID протекает ток управления I_y , который обеспечивает зарядку близких по величине собственных емкостей диодисторов. Когда напряжение на диодисторах блока SID нарастает до величины, достаточной для иницирования процесса ударной ионизации, они включаются.

При запуске блока SID дроссель L_0 имеет большую индуктивность, которая до момента включения диодисторов исключает возможность отклонения тока I_y в силовую цепь L_0 – R_0 – C_0 . После включения блока SID к дросселю L_0 прикладывается напряжение зарядки конденсатора C_0 , и его сердечник перемагничивается до состояния насыщения. После насыщения сердечника индуктивность дросселя резко уменьшается, и ток в силовой цепи быстро нарастает. В интервале между моментом включения блока SID и моментом насыщения сердечника дросселя L_0 через цепь C–D и блок SID протекает ток I_y , который осуществляет модуляцию проводимости диодисторов.

В наших экспериментах использовался малогабаритный блок SID с размерами $70 \times 35 \times 110$ мм. Он состоял из шести последовательно соединенных диодисторов, которые имели диаметр 24 мм и предельно допустимое стационарное напряжение 2.5 кВ. Фотография блока SID приведена на рис. 2.

Диодисторы были помещены во фторопластовый корпус. Для подвода тока использовались плоские шины. Электрический контакт между шинами и диодисторами осуществлялся прижимным устройством на основе массивных дюралевых пластин, закрепленных между пластинами из капрлона. Прижимное усилие создавалось центральным винтом и стабилизировалось с помощью пружинных шайб.

На рис. 3 показаны осциллограммы напряжения на блоке SID в процессе его переключения при разной амплитуде тока I_L , которая регулировалась путем изменения напряжения зарядки накопительного конденсатора C_1 . Осциллограммы U_1 , U_2 , U_3 соответствуют току I_L с амплитудой 350, 250 и 200 А соответственно. Они получены при использовании в силовой цепи резистора R_0 с большим сопротивлением (1 кОм), который устранял влияние силового тока.



Рис. 2. Блок SID с рабочим напряжением 12 кВ.

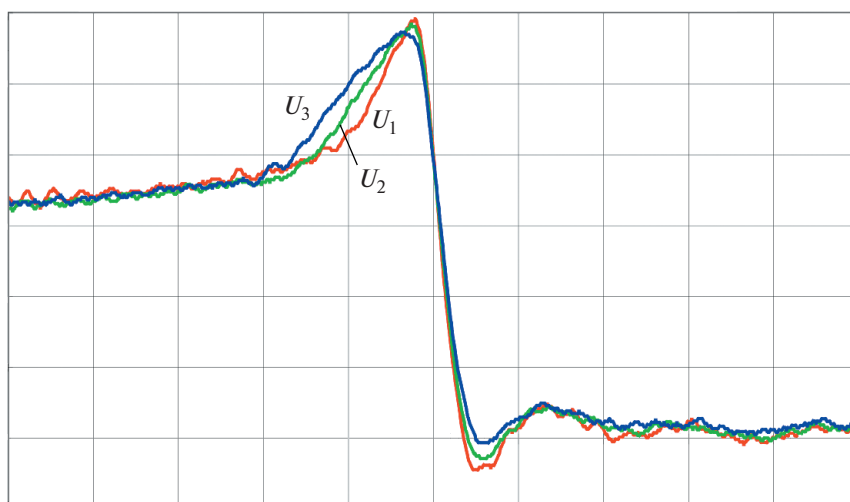


Рис. 3. Осциллограммы напряжения на блоке SID при токе I_L с амплитудой 350 А (U_1), 250 А (U_2) и 200 А (U_3). Масштаб: по вертикали — 4 кВ/деление, по горизонтали — 2 нс/деление.

Согласно осциллограммам, при $I_L = 350$ А скорость нарастания напряжения на блоке SID составляет ~ 5 кВ/нс. В этих условиях блок SID включается при напряжении ~ 24 кВ, которое в 1.6 раза превышает суммарную величину предельно допустимых стационарных напряжений динисторов. Время включения блока SID меньше 1 нс.

При уменьшении тока I_L скорость нарастания напряжения на блоке SID уменьшается и при $I_L = 200$ А составляет ~ 4 кВ/нс. При такой скорости нарастания запускаяющего напряжения уменьшается напряжение на блоке SID в момент его включения и увеличивается время включения блока SID, по-видимому, из-за уменьшения интенсивности процесса ударной ионизации.

В процессе исследований была измерена амплитуда импульса напряжения на блоке DSRD. Из-за падения напряжения в цепи $C-D$ и на индуктивности монтажа она на 4 кВ превышала амплитуду напряжения на блоке SID.

На рис. 4 приведены осциллограммы импульсов силового тока (I_{01} , I_{02}) и кривые падения напряжения (U_1 , U_2) на блоке SID, рассчитанные из соответствующих осциллограмм путем вычитания напряжения, падающего на индуктивности блока. Эксперименты проводились при зарядке конденсатора C_0 до напряжения 12 кВ. Индексами 1, 2 обозначены токи и напряжения, полученные при токах I_L с амплитудой 350 и 250 А соответственно.

Измерение напряжения на блоке SID осуществлялось высоковольтным делителем, способным достоверно измерять сигналы с фронтом ≥ 0.5 нс. Делитель был калиброван при измерении импульсов напряжения с фронтом 0.25 нс, полученных с помощью генератора испытательных

импульсов И1-15. Нижним плечом делителя являлся коаксиальный кабель с волновым сопротивлением 50 Ом, верхним — малогабаритный резистор с сопротивлением 470 Ом, скомпенсированный медным экраном. Делитель подключался к блоку SID через разделительный конденсатор. Для измерения тока I_0 использовался датчик тока Pearson current monitor 410.

Как видно из рис. 4, при уменьшении амплитуды тока I_L с 350 до 250 А падение напряжения на блоке SID существенно увеличивается, что свидетельствует о менее однородном распределении силового тока по площади динисторов. При увеличении тока I_L с 350 до 450 А падение напряжения на блоке SID практически не изменялось, поэтому можно считать, что в рассмотренных условиях запуска оптимальным является ток I_L с амплитудой 350 А. При таком токе I_L потери энергии в блоке SID при коммутации импульса тока I_{01} с амплитудой 2.5 кА составляют примерно 320 мДж.

Такие небольшие потери энергии определили сравнительно малый нагрев блока SID при коммутации импульсов тока I_{01} с частотой 150 Гц. При охлаждении потоком воздуха установившаяся температура корпуса блока SID составляла $\sim 70^\circ\text{C}$. Меньший нагрев блока SID можно обеспечить при использовании охладителей, прижатых к токоподводящим шинам. Но при этом динисторы в центральной части блока будут охлаждаться менее интенсивно, чем крайние динисторы.

Более равномерный отвод тепла от динисторов был обеспечен путем разделения блока SID на 3 модуля. Каждый модуль состоял из двух последовательно соединенных динисторов. Между модулями размещались охладители. Фотография опыт-

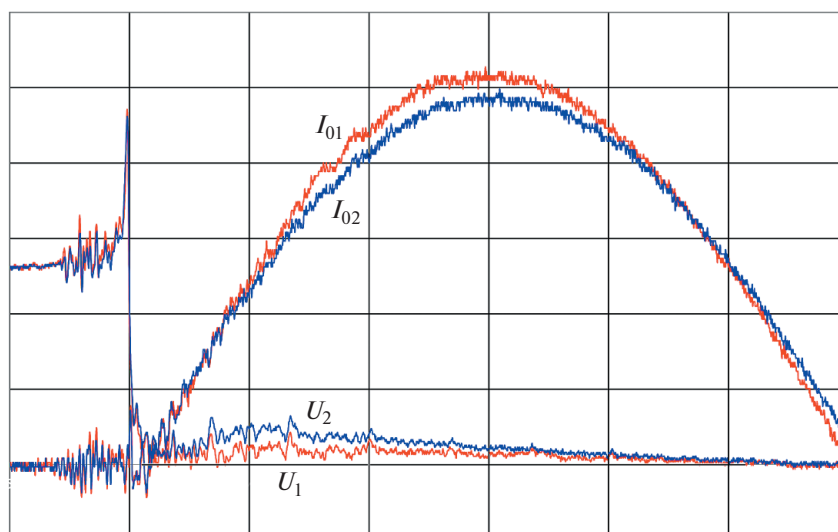


Рис. 4. Осциллограммы силового тока I_{01} , I_{02} и напряжения U_1 , U_2 на блоке SID при токах I_L с амплитудами 350 А и 250 А соответственно. Масштаб по вертикали: напряжения – 5 кВ/деление, тока – 500 А/деление; по горизонтали – 50 нс/деление.

ного образца блока SID модульной конструкции показана на рис. 5.

При запуске модульного блока SID цепью управления ЦУ (см. рис. 1) амплитуда импульсов напряжения на блоке DSRD оказалась чрезмерно велика (33 кВ при токе $I_L = 350$ А). В результате потребовалось увеличить количество диодов в блоке DSRD и принять определенные меры по

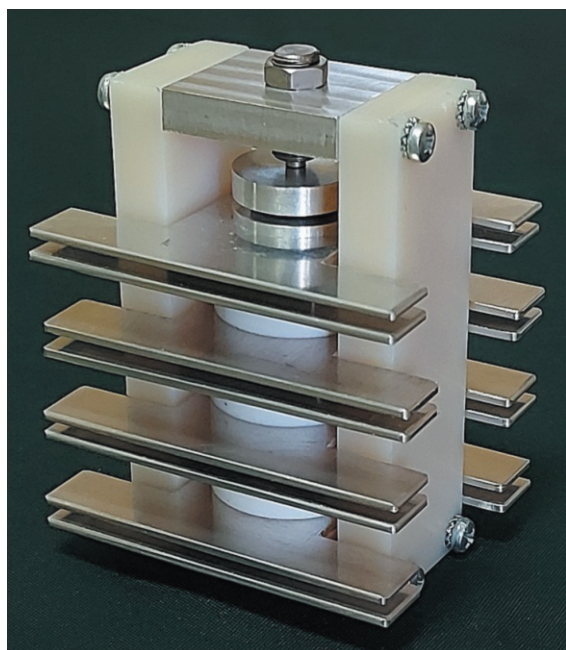


Рис. 5. Модульный блок SID с рабочим напряжением 12 кВ.

усилению изоляционной прочности трансформатора Tp . Такое большое напряжение было обусловлено сравнительно большой индуктивностью модульного блока, включающей в себя индуктивности модулей и индуктивности охладителей.

В связи с этим была разработана схема запуска модульного блока SID, приведенная на рис. 6. В этой схеме переключение модулей SID_1 – SID_3 осуществляется с помощью индивидуальных цепей управления ЦУ₁–ЦУ₃, которые включаются одновременно. Дроссель L_0 задерживает резкое нарастание силового тока на время, которое превышает временной разброс моментов срабатывания цепей управления ЦУ₁–ЦУ₃. В результате переключение запаздывающего модуля происходит при очень малом токе в силовой цепи, влиянием которого можно пренебречь.

В опытном SID-коммутаторе цепи управления ЦУ₁–ЦУ₃ построены так же, как и цепь ЦУ на рис. 1. Они формируют импульсы тока I_L с такой же амплитудой (350 А). Поскольку модули SID_1 – SID_3 имеют малую собственную индуктивность и содержат только два диода, напряжение на них в момент включения составляет ~ 7.5 кВ. При этом амплитуда напряжения на используемых в цепях ЦУ₁–ЦУ₃ блоках DSRD не превышает 9 кВ, и в этих блоках используются только 10 последовательно соединенных диодов. Поскольку в исходном состоянии к модулям прикладывается третья часть напряжения U_0 , в разделительных цепях C – D используется только один диод К100. Рассмотренная структура модульного коммутатора позволила на 25% снизить потери энергии в цепях ЦУ₁–ЦУ₃ по сравнению с цепью ЦУ на рис. 1.

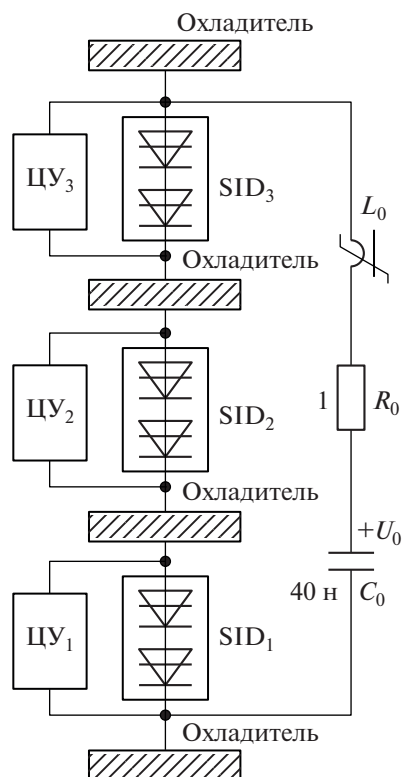


Рис. 6. Электрическая схема генератора на основе модульного блока SID. ЦУ – цепи управления; L_0 – сердечник, феррит N87 (EPCOS), 8 колец размером $16 \times 9.6 \times 6.3$ мм, $w = 1$.

В результате эффективный запуск модулей SID_1 – SID_3 достигался при меньшем напряжении зарядки накопительных конденсаторов C_1 и при меньших размерах трансформаторов T_p .

При обдуве воздухом модульный блок SID был способен коммутировать импульсы тока с амплитудой 3 кА и длительностью 400 нс, следующие с частотой 500 Гц. Исследования проводились без подбора комплектующих элементов в цепях управления ЦУ₁–ЦУ₃. При этом максимальный разброс моментов включения модулей SID_1 – SID_3 не превышал 5 нс.

Определенным достоинством рассмотренного модульного способа переключения высоковольт-

ных блоков SID является то, что он позволяет интенсивно отводить тепло от динисторов при использовании охладителей с большими габаритами. При этом сравнительно большая собственная индуктивность охладителей не препятствует формированию наносекундных импульсов запуска динисторов.

Таким образом, результаты исследований разработанных SID-коммутаторов с рабочим напряжением 12 кВ свидетельствуют о том, что они способны эффективно коммутировать импульсы тока с амплитудой несколько килоампер, нарастающие со скоростью десятки ампер в наносекунду. Принципы работы SID позволяют существенно увеличить рабочее напряжение SID-коммутаторов и использовать их в генераторах наносекундных импульсов со средней мощностью несколько киловатт.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Efanov V., Kardo-Sysoev A., Tchashnicov I., Yarin P. // Proc. 22nd Int. Power Modulator Symp. Ft. USA, Boca Raton, 1996. P. 22.
<https://doi.org/10.1109/MODSYM.1996.564440>
2. Grekhov I., Korotkov S., Rodin S. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2008. V. 36. Iss. 2. Part 1. P. 378.
<https://doi.org/10.1109/TPS.2008.918661>
3. Коротков С.В., Аристов Ю.В., Воронков В.Б., Жмодиков А.Л., Коротков Д.А., Люблинский А.Г. // ПТЭ. 2009. № 5. С. 90.
4. Gusev A.I., Lyubutin S.K., Rukin S.N., Tsyranov S.N. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2016. V. 44. Iss. 10. Part 1. P. 1888.
<https://doi.org/10.1109/TPS.2016.2542343>
5. Grekhov I., Kardo-Sysoev A. // Sov. Tech. Phys. Lett. 1979. V. 5. Iss. 8. P. 395.
6. Коротков С.В., Аристов Ю.В., Воронков В.Б. // ПТЭ. 2019. № 2. С. 24.
<https://doi.org/10.1134/S0032816219010130>
7. Коротков С.В., Аристов Ю.В., Жмодиков А.Л., Коротков Д.А. // ПТЭ. 2020. № 5. С. 75.
<https://doi.org/10.31857/S0032816220050171>
8. Korotkov S.V., Aristov Yu.V., Korotkov D.A., Zhmodikov A.L. // Review of Scientific Instruments. 2020. V. 91. 084704.
<https://doi.org/10.1063/5.0015284>
9. Grekhov I., Efanov V., Kardo-Sysoev A., Shenderoy S. // Solid State El. 1985. V. 28. № 6. P. 597.