

ДИНИСТОРНЫЙ КОММУТАТОР МОЩНЫХ НАНОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ

© 2023 г. С. В. Коротков^{а,*}, Ю. В. Аристов^а, К. А. Козлов^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 03.03.2023 г.

После доработки 11.03.2023 г.

Принята к публикации 12.03.2023 г.

Описан мощный коммутатор на основе блока динисторов с ударной ионизацией, который имеет рабочее напряжение 16 кВ и способен на частоте 300 Гц коммутировать наносекундные импульсы тока с амплитудой ~3 кА. Приведены результаты компьютерного моделирования процесса его включения, определены перспективы увеличения коммутируемой мощности.

DOI: 10.31857/S0032816223040134, EDN: RBDVWO

Высокая эффективность полупроводниковых коммутаторов наносекундных импульсов тока может быть обеспечена только при очень малом времени их переключения в хорошо проводящее состояние. В настоящее время наименьшее время включения имеют описанные в работах [1–3] четырехслойные кремниевые структуры, которые запускаются наносекундным импульсом напряжения, нарастающим со скоростью >1 кВ/нс. Такой способ запуска был предложен в работе [4]. Он обеспечивает нарастание напряжения на полупроводниковой структуре до величины, существенно превышающей напряжение стационарного пробоя, время развития которого составляет десятки наносекунд. В результате напряженность поля в базовых областях полупроводниковой структуры становится достаточной для инициации процесса ударной ионизации кремния. Процесс ударной ионизации позволяет обеспечить высокую проводимость за время <1 нс.

В работах [5–7] описаны оригинальные четырехслойные кремниевые структуры с субнаносекундным временем включения – динисторы с ударной ионизацией (SID – Shock Ionized Dynistors). Их основное достоинство – возможность эффективно включаться при сравнительно малой мощности запускающего воздействия.

Принцип работы SID позволяет включать высоковольтные блоки последовательно соединенных SID-структур общим наносекундным импульсом высокого напряжения. В работе [8] приведены результаты исследования блока SID с рабочим напряжением 12 кВ, состоящего из шести последовательно соединенных опытных SID-

структур, имеющих диаметр 24 мм. Эффективное включение этого блока достигалось, когда выходное напряжение цепи управления (ЦУ) нарастало со скоростью более 5 кВ/нс, а выходной ток ЦУ в процессе переключения SID-структур был не менее 300 А.

В данной статье приведены результаты исследования более мощного блока SID, с рабочим напряжением 16 кВ, состоящего из восьми динисторных структур, имеющих диаметр 24 мм, которые были изготовлены в условиях промышленного производства в ПАО “Электровыпрямитель” (г. Саранск, Россия).

Для проведения исследований был разработан генератор мощных наносекундных импульсов. Его электрическая схема показана на рис. 1.

В схеме на рис. 1 зарядное напряжение U_0 накопительного конденсатора C_0 первоначально приложено к блоку SID и к цепи $C-D$. Включение блока SID осуществляется с помощью размыкающего ключа с наносекундным временем выключения, выполненного в виде блока последовательно соединенных дрейфовых диодов с резким восстановлением (DSRD – Drift Step-Recovery Diodes), впервые описанных в работе [9]. Эффективная работа блока DSRD обеспечивается ЦУ, которая подробно описана в работе [10]. Она разработана на основе схемотехнического решения, представленного в работе [11].

Принцип действия схемы на рис. 1 заключается в следующем. После включения ключа K конденсатор C_1 быстро перезарядается. Ток перезарядки протекает через цепь DSRD– L_2 – C_2 и через

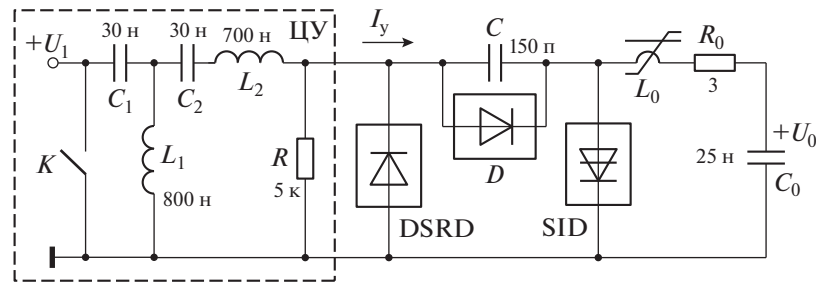


Рис. 1. Электрическая схема опытного генератора. L_0 – один виток, сердечник – феррит N87 (EPCOS), 2 кольца размером $29.5 \times 19 \times 14.9$ мм; D – K100F (2 последовательно); DSRD – 35 диодных структур, имеющих диаметр 20 мм; SID – 8 динисторных структур, имеющих диаметр 24 мм; K – высоковольтный интегральный импульсный тиристор [12].

индуктивность L_1 . В результате происходит зарядка конденсатора C_2 , и через блок DSRD в прямом направлении протекает принципиально короткий ток, обеспечивающий эффективное накопление заряда в DSRD-структурах. Длительность этого тока составляет ~ 300 нс. Затем конденсаторы C_1, C_2 разряжаются по цепи L_2 –DSRD, и через блок DSRD в обратном направлении протекает быстро нарастающий ток, который за время ~ 200 нс выносит из DSRD-структур весь накопленный заряд. В результате блок DSRD выключается за время ~ 2.5 нс, и ток I_y (~ 350 А), протекающий через индуктивность L_2 , коммутируется в цепь C –SID.

Ток I_y осуществляет перезарядку конденсатора C и быструю зарядку собственной емкости C_{SID} блока SID ($C_{SID} \ll C$). В результате напряжение на динисторных структурах резко нарастает до величины напряжения переключения. В процессе включения SID-структур через них продолжает протекать ток I_y , который обеспечивает высокую интенсивность процесса ударной ионизации. До момента включения блока SID дроссель L_0 имеет

большую индуктивность и исключает возможность перераспределения тока I_y в цепь конденсатора C_0 . Сердечник дросселя L_0 насыщается спустя несколько наносекунд после включения блока SID. В результате индуктивность дросселя уменьшается, и ток I_0 разряда конденсатора C_0 резко нарастает. В интервале между моментом включения блока SID и моментом насыщения сердечника дросселя L_0 через блок SID протекает ток цепи управления, обеспечивающий высокую проводимость SID-структур. Такой режим достигается благодаря использованию диодного блока D .

На рис. 2 показана осциллограмма напряжения на блоке SID в процессе его переключения. Она получена при использовании в цепи разряда конденсатора C_0 токоограничивающего резистора с сопротивлением 500 Ом. Осциллограмма измерена при использовании опытного высоковольтного делителя напряжения с сопротивлением ~ 500 Ом, который калибровался при измерении импульсов напряжения с фронтом 300 нс с помощью генератора

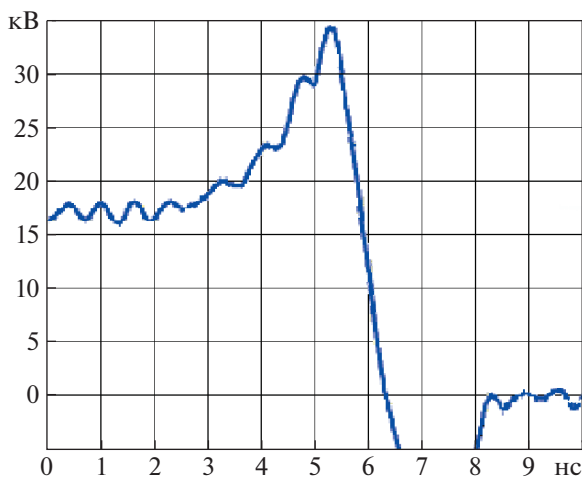


Рис. 2. Осциллограмма напряжения на блоке SID.

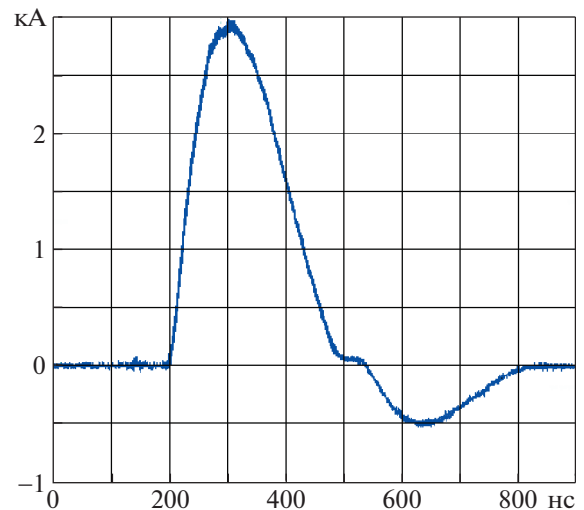


Рис. 3. Осциллограмма тока через блок SID.

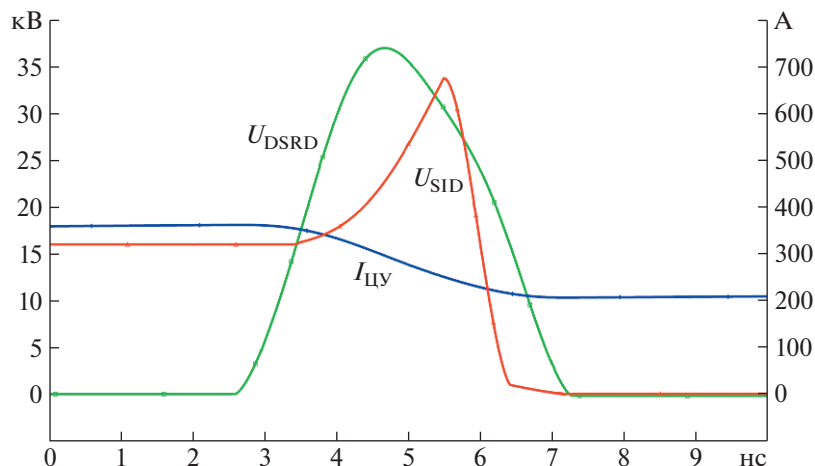


Рис. 4. Расчетные кривые напряжения на блоке SID (U_{SID}), выходного тока цепи управления ($I_{ЦУ}$) и напряжения на блоке DSRD (U_{DSRD}).

LeCroy 9210. Делитель подключался к блоку SID через малогабаритный конденсатор.

На рис. 3 приведена осциллограмма тока через блок SID, полученная на частоте 300 Гц при напряжении $U_0 = 16$ кВ. Амплитуда тока составляет ~ 3 кА, длительность ~ 250 нс. Осциллограмма измерена с помощью малогабаритного датчика тока, разработанного в фирме Pearson Electronics.

На рис. 4 приведены результаты компьютерного моделирования процесса включения блока SID, выполненного с помощью пакета программ OrCAD. Кривые $I_{ЦУ}$, U_{SID} , U_{DSRD} иллюстрируют

выходной ток цепи управления и падение напряжения на блоках SID и DSRD.

Моделируемая схема показана на рис. 5. Блок SID в процессе нарастания запускающего напряжения моделировался как блок обратносмещенных диодов. В качестве этих диодов и диодов блока DSRD использовались модели диодов из пакета программ OrCAD. Коэффициенты в формулах, описывающих вольт-фарадные характеристики диодов OrCAD, выбирались так, чтобы получить совпадение с зависимостями, измеренными для структур DSRD и SID в диапазоне напряжений до 300 В. Время жизни в моделях диодов OrCAD задавалось ~ 10 мкс. Включение блока SID моделировалось включением ключа K_1 . Величина напряжения включения ключа K_1 определялась как сумма напряжений включения диносторных структур блока SID. Величина этих напряжений (~ 4 кВ) задавалась исходя из результатов исследования используемых SID-структур, проведенного на стенде, описанном в работе [7]. Величины $L_{SID} = 20$ нГн, $L_1 = 10$ нГн и $R_1 = 50$ мОм подбирались таким образом, чтобы расчетная кривая напряжения U_{SID} хорошо соответствовала осциллограмме на рис. 2.

Таким образом, результаты исследований разработанного блока SID с рабочим напряжением 16 кВ свидетельствуют о его высокой эффективности в режиме коммутации мощных наносекундных импульсов тока. Принцип работы рассмотренного блока SID позволяет увеличивать коммутируемую мощность путем увеличения рабочего напряжения, определяемого количеством последовательно соединенных SID-структур. Недостатком такого решения является то, что при большом количестве SID-структур чрезмерно увеличивается выходное напряжение цепи управления. Так, например, при запуске блока SID с рабо-

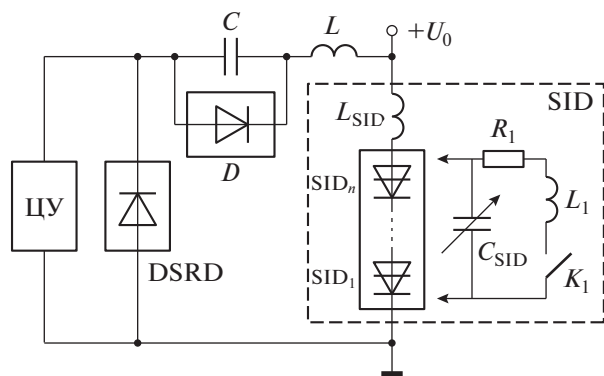


Рис. 5. Моделируемая схема коммутатора на основе блока SID. ЦУ, C, D – цепь управления и разделительные элементы, соответствующие схеме на рис. 1; DSRD – блок диодов с напряжением статического пробоя 1.3 кВ; SID – блок диносторных структур с напряжением статического пробоя 2.7 кВ; SID₁, SID_n – диносторные структуры; L, L_{SID} – монтажные индуктивности; C_{SID} – суммарная емкость диносторных структур; R₁, L₁, K₁ – элементы цепи, моделирующей включение блока SID.

чим напряжением 24 кВ расчетное напряжение на блоке DSRD составляет ~53 кВ. Такое напряжение требует создания соответствующей изоляции с использованием специальных изолирующих материалов. Поэтому рассмотренную схему SID-коммутатора с одной цепью управления, по-видимому, целесообразно применять для переключения блоков SID с рабочим напряжением <20 кВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Efanov V.M., Kardo-Sysoev A.F., Tchashnikov I.G., Yarin P.M. // Proc. of 1996 International Power Modulator Symposium. FL, USA, Boca Raton, 1996. P. 22. <https://doi.org/10.1109/MODSYM.1996.564440>
2. Grekhov I., Korotkov S., Rodin S. // IEEE Trans. on Plasma Science. 2008. V. 36. № 2. Part 1. P. 3782. <https://doi.org/10.1109/TPS.2008.918661>
3. Gusev A.I., Lyubutin S.K., Rukin S.N., Tsyranov S.N. // IEEE Trans. on Plasma Science. 2016. V. 44. № 10. Part 1. P. 1888. <https://doi.org/10.1109/TPS.2016.2542343>
4. Grekhov I., Kardo-Sysoev A. // Soviet Technical Physics Letters. 1979. V. 5. № 8. P. 395.
5. Коротков С.В., Аристов Ю.В., Воронков В.Б. // ПТЭ. 2019. № 2. С. 24. <https://doi.org/10.1134/S0032816219010130>
6. Коротков С.В., Аристов Ю.В., Жмодиков А.Л., Коротков Д.А. // ПТЭ. 2020. № 5. С. 75. <https://doi.org/10.31857/S0032816220050171>
7. 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>
8. Коротков С.В., Аристов Ю.В., Коротков Д.А. // ПТЭ. 2022. № 5. С. 70. <https://doi.org/10.31857/S003281622205007X>
9. Grekhov I., Efanov V., Kardo-Sysoev A., Shenderov 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)
10. Korotkov S., Aristov Yu., Zhmodikov A. // IEEE Trans. on Plasma Science. 2022. V. 50. № 4. P. 954. <https://doi.org/10.1109/TPS.2022.3156386J>
11. Sanders J., Kuthi A., Gundersen M.A., Moore W.H. Patent No. US 8, 115, 343 B2. 2012.
12. Грехов И.В., Жмодиков А.Л., Коротков С.В., Прижимнов С.Г., Фоменко Ю.Л. // ПТЭ. 2016. № 3. С. 32. <https://doi.org/10.1134/S0020441216020202>