

ДИНИСТОРЫ С СУБНАНОСЕКУНДНЫМ
ВРЕМЕНЕМ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ© 2020 г. С. В. Коротков^{а,*}, Ю. В. Аристов^а, А. Л. Жмодиков^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 19.03.2020 г.

После доработки 02.04.2020 г.

Принята к публикации 03.04.2020 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований оптимизированных динисторов с ударной ионизацией (SID – shock-ionized dynistors) при коммутации мощных импульсов тока с наносекундной длительностью. Показано, что эффективность процесса переключения SID может быть повышена при введении в его четырехслойную структуру равномерно распределенных равновеликих диодных секций, суммарная площадь которых существенно меньше общей площади полупроводниковой структуры динистора. Приведены результаты сравнительных исследований оптимизированных SID, имеющих разную площадь структур и разное предельно допустимое напряжение в стационарном состоянии. Даны объяснения полученным результатам.

DOI: 10.31857/S0032816220050171

Высокая эффективность современных лазерных, электромагнитных и электроразрядных технологий достигается в результате использования мощных электрических импульсов с наносекундной длительностью. Малые потери энергии при их формировании могут обеспечить только коммутаторы с субнаносекундным временем переключения в хорошо проводящее состояние. При этом наиболее перспективными являются полупроводниковые коммутаторы, обладающие большим сроком службы и малым разбросом моментов срабатывания.

В этой связи большой интерес представляют работы [1–7 и др.] по исследованию различных четырехслойных кремниевых полупроводниковых приборов, которые включаются за время < 1 нс при приложении наносекундного импульса высокого напряжения. Такой способ переключения был впервые описан в [8]. Для его реализации необходимо, чтобы запускающее напряжение нарастало со скоростью > 1 кВ/нс. В этих условиях длительность запускающего воздействия оказывается меньше времени развития стационарного пробоя полупроводникового прибора и напряженность электрического поля в его структуре может нарасти до величины, достаточной для инициирования процесса ударной ионизации кремния.

Ударная ионизация определяет быструю генерацию электронно-дырочной плазмы и субнаносекундное время переключения в хорошо прово-

дящее состояние. Быстрое переключение в состояние с высокой проводимостью обеспечивает полупроводниковым приборам с ударной ионизацией уникальные возможности при коммутации мощных наносекундных импульсов тока.

В [9] представлены результаты пилотных исследований модифицированных динисторов с ударной ионизацией. Отличительной особенностью разработанных SID (shock-ionized dynistors) является то, что в p^+ - и n^+ -эмиттеры их $p^+ - n - p - n^+$ -структур были введены малогабаритные участки с проводимостью n^+ - и p^+ -типа (шунты). Они исключали возможность блокирования обратного напряжения, что позволило предельно уменьшить толщину слаболегированного n -слоя, определяющего основные коммутационные потери энергии.

В данной работе приведены результаты оптимизации конструкции SID, выполненные с целью повышения эффективности процесса их переключения.

Основным отличием оптимизированных SID является то, что n^+ - и p^+ -шунты анодного и катодного эмиттеров имеют одинаковые размеры и располагаются соосно (оппозитно относительно друг друга). В результате структура SID разбивается на тиристорные 1 и диодные 2 секции (рис. 1). Они имеют общий высоковольтный $p - n$ -переход и обеспечивают возможность приложения к динистору силового напряжения с прямой полярно-

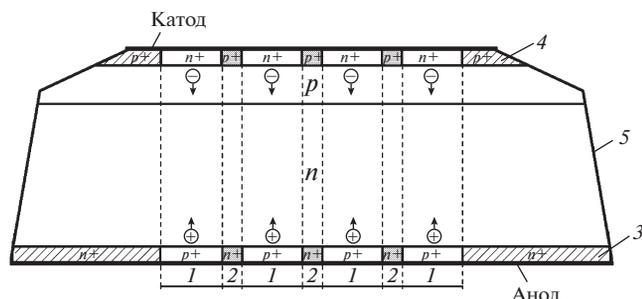


Рис. 1. Конструкция оптимизированного SID.

стью (“плюс” – на аноде). Охранные кольца 3, 4 препятствуют переносу электронно-дырочной плазмы к краевой поверхности 5 в процессе коммутации силового тока и устраняют возможность ее деградации.

Когда к SID приложено стационарное прямое напряжение U_0 , в базовых n - и p -слоях создается свободная от носителей тока область пространственного заряда (о.п.з.), ширина которой определяет собственную емкость тиристорных и диодных секций в стационарном состоянии. Напряженность поля достигает максимума на n - p -переходе. Параметры базовых слоев задаются таким образом, что при предельно допустимом U_0 границы о.п.з. не достигают эмиттеров, и напряженность поля в о.п.з. не превышает напряженность стационарного пробоя.

Переключение SID осуществляется путем приложения быстро нарастающего запускающего напряжения U_y , которое формируется при пропускании через его структуру достаточно мощного тока управления I_y . Этот ток обеспечивает быструю зарядку собственных емкостей тиристорных и диодных секций. В результате напряжение в о.п.з. резко нарастает, и ее границы расширяются. Включение SID происходит в момент, когда в области о.п.з. с сильным электрическим полем появляются “затравочные” носители, которые инициируют процесс ударной ионизации.

Результаты экспериментов [9] позволяют предположить, что “затравочными” носителями могут быть электроны и дырки, которые в процессе нарастания запускающего напряжения инжектируются из эмиттеров тиристорных секций в базовые слои. Если амплитуда U_y достаточно велика, то границы о.п.з. вплотную придвигаются к эмиттерам, что создает возможность инжектированным носителям достигнуть о.п.з. за очень короткое время.

Попавшие в о.п.з. носители ускоряются электрическим полем к p - n -переходу и в процессе нарастания U_y переносятся в ту часть о.п.з., где на-

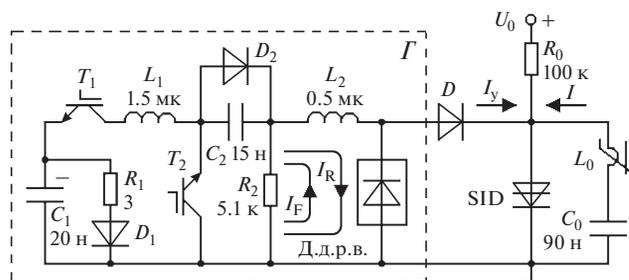


Рис. 2. Схема испытательного стенда. T_1 (T_2) – сборки транзисторов IRGPS60B120KDP [2] (T_2) параллельно, 2 (T_1) последовательно]; D – VMI K100UF, D_1 , D_2 – HER 508 [2] последовательно]; д.д.р.в. – диаметр структур 16 мм [12] последовательно]; L_0 – сердечник феррит 1000 НМ, 8 колец $10 \times 6 \times 2$, $w = 1$.

пряженность поля достаточна для ударной ионизации. Ударная ионизация обеспечивает очень быстрое заполнение тиристорных секций SID электронно-дырочной плазмой. В результате они переключаются в состояние с высокой проводимостью, величина которой определяется плотностью образованной плазмы.

Нами было исследовано влияние диодных секций на процесс переключения SID. Для проведения сравнительных исследований были изготовлены динисторы с базовой конструкцией (SID_0) и оптимизированные динисторы (SID_1). Структуры динисторов имели диаметр 20 мм и были изготовлены из пластин кремния с удельным сопротивлением $80 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ и толщиной 380 мкм по стандартной диффузионной технологии.

Диффузионные профили были выполнены так, что динисторы могли в стационарном состоянии блокировать напряжение $\sim 2.2 \text{ кВ}$. В SID_0 шунты n^+ и p^+ имели диаметр $\sim 250 \text{ мкм}$, расстояние между центрами шунтов n^+ составляло 0.8 мм, а между центрами шунтов p^+ – 1.2 мм. В SID_1 шунты n^+ и p^+ имели диаметр $\sim 300 \text{ мкм}$ и располагались оппозитно по осям, расположенным на расстоянии 0.8 мм друг от друга.

На рис. 2 приведена электрическая схема стенда, на котором проводились сравнительные исследования SID. Стенд содержит силовую цепь C_0 – L_0 , генератор наносекундных запускающих импульсов Γ и диод D , который разделяет силовую цепь и генератор Γ до момента включения SID.

В исходном состоянии конденсатор C_0 заряжен до силового напряжения U_0 . Это напряжение приложено к SID и диоду D . При включении генератора Γ через SID протекает ток управления I_y , осуществляющий зарядку его собственной емкости. В результате напряжение на SID быстро нарастает до момента его переключения. В процессе

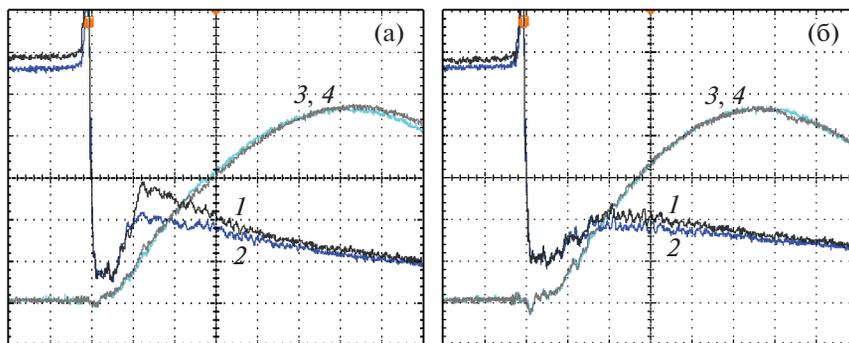


Рис. 3. Осциллограммы напряжения на SID₀ (1), SID₁ (2) и силового тока (3, 4) при токе управления 150 А (а) и 250 А (б). Масштаб по вертикали: напряжения – 400 В/деление, тока – 400 А/деление; по горизонтали – 20 нс/деление.

нарастания запускающего напряжения дроссель L_0 имеет большую индуктивность и препятствует ответвлению тока I_y в конденсатор C_0 . Через несколько наносекунд после включения SID сердечник дросселя L_0 насыщается, его индуктивность становится очень малой и практически не препятствует разряду C_0 . При этом в SID коммутируется силовой ток I .

Генератор Γ построен по схеме, рассмотренной в [10]. Он содержит индуктивный накопитель энергии L_2 , прерыватель тока в виде блока дрейфовых диодов с режимом восстановления (д.д.р.в.) [11] и коммутаторы T_1 , T_2 в виде блоков IGBT-транзисторов с форсированным запуском [12]. При включении коммутатора T_1 через блок д.д.р.в. в прямом направлении протекает короткий (~ 400 нс) ток I_F , являющийся током разряда конденсатора C_1 , предварительно заряженного до напряжения ~ 2 кВ.

В результате происходит зарядка конденсатора C_2 и накопление электронно-дырочной плазмы в диодных структурах блока д.д.р.в. В момент зарядки C_2 до максимального напряжения включается коммутатор T_2 , и через блок д.д.р.в. в обратном направлении протекает ток I_R . Он обеспечивает быстрый (~ 180 нс) вынос накопленной плазмы и очень быстрое (~ 2 нс) выключение диодов блока д.д.р.в. в момент, когда величина заряда, пропущенного через них при протекании тока I_R , достигает величины заряда, накопленного при протекании тока I_F .

Так как в момент разряда C_2 до нуля через диоды блока д.д.р.в. в обратном направлении пропускается такой же заряд, как ранее пропускался в прямом направлении при зарядке C_2 до максимального напряжения, то их выключение происходит в момент полного разряда C_2 при максимальном токе I_R , протекающем через индуктивность L_2 . В процессе выключения блока д.д.р.в.

ток индуктивности L_2 быстро коммутируется в SID и является током управления I_y .

В результате напряжение на SID резко нарастает до величины, при которой в тиристорных секциях его структуры инициируется процесс ударной ионизации. Он формируется при использовании энергии, накопленной в собственных емкостях тиристорных секций к моменту их переключения и энергии индуктивности L_2 , которая передается в SID при протекании тока управления.

Процесс ударной ионизации развивается интенсивно, если ток индуктивности L_2 в течение всего времени переключения SID обеспечивает высокое напряжение на его структуре, определяющее высокую напряженность электрического поля. Для этого энергия, накопленная в индуктивности L_2 к моменту включения SID, должна быть достаточно велика.

Сравнительные исследования SID₀ и SID₁ проводились при силовом напряжении ~ 2 кВ и разных токах управления.

На рис. 3 приведены осциллограммы падения напряжения на SID₀ (кривые 1) и SID₁ (кривые 2) при коммутации практически одинакового силового тока $I = 1.9$ кА (кривые 3, 4). Переключение динисторов осуществлялось током управления 150 А (рис. 3а) и 250 А (рис. 3б). Примерное равенство амплитуд силового тока в экспериментах с SID₀ и SID₁ обеспечивалось путем незначительного изменения напряжения зарядки силового конденсатора. При увеличении тока управления до 350 А падение напряжения на динисторах практически не изменялось.

Осциллограммы на рис. 4 иллюстрируют процесс переключения SID₀ (рис. 4а) и SID₁ (рис. 4б) при токах управления 150 и 250 А (кривые 1 и 2). Как видно из осциллограмм, напряжение на динисторах за время ~ 2 нс нарастает до уровня ~ 4 кВ,

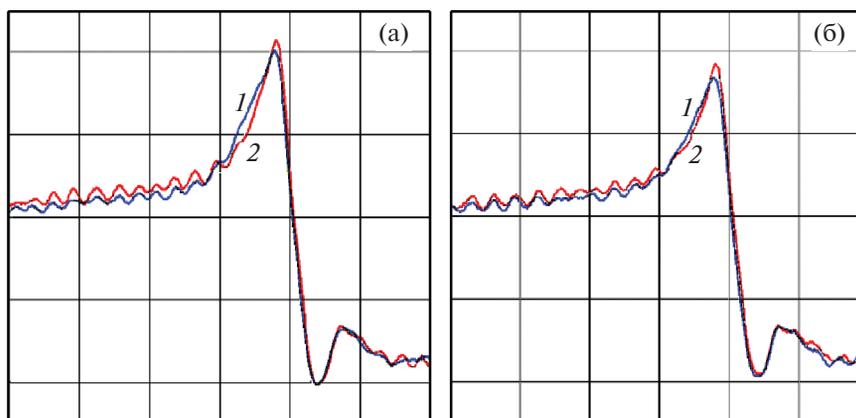


Рис. 4. Осциллограммы напряжения в процессе переключения SID_0 (а) и SID_1 (б) при токе управления 150 А (1) и 250 А (2). Масштаб по вертикали 1 кВ/деление, по горизонтали – 2 нс/деление.

при котором происходит их включение за время < 1 нс.

Из осциллограмм на рис. 3 следует, что при коммутации практически одинаковых импульсов силового тока падение напряжения на SID_0 и SID_1 имеет близкую величину при достаточно большом токе управления (250 А). При токе управления 150 А падение напряжения на SID_0 , выполненных с меньшей суммарной площадью шунтов анодного и катодного эмиттеров и без их осевого совмещения, существенно превышает падение напряжения на SID_1 , что свидетельствует о меньшей интенсивности процесса ударной ионизации в SID_0 .

Полученные результаты могут быть объяснены следующим образом.

В момент инициирования процесса ударной ионизации в тиристорных секциях SID_1 собственные емкости диодных секций его полупроводниковой структуры заряжены до высокого напряжения протекающим через них током управления I_y . В процессе переключения тиристорных секций через них протекает ток I_y и дополнительный ток I_d , являющийся током разряда собственных емкостей соседних диодных секций. В результате в тиристорные секции коммутируется дополнительная энергия, которая стимулирует развитие процесса ударной ионизации. Так как в SID_1 диодные секции плотно окружают тиристорные секции, то величина тока I_d может быть соизмерима с величиной тока I_y . При этом ток I_d существенно повышает интенсивность процесса ударной ионизации в тиристорных секциях, особенно в режимах переключения SID при недостаточно большом токе I_y .

В SID_0 суммарная площадь шунтов анодного и катодного эмиттеров меньше, чем в SID_1 , они расположены хаотично и не образуют диодных

секций. В результате интенсивность процесса ударной ионизации в структурах SID_0 определяется, в основном, величиной тока управления I_y . Если она недостаточна, то проводимость SID_0 после переключения снижается.

Нами были также исследованы коммутационные возможности оптимизированных SID с увеличенным диаметром структур, которые были способны блокировать более высокое стационарное напряжение.

Для проведения экспериментов были изготовлены опытные образцы SID с диаметром структур 24 мм, имеющие предельное стационарное напряжение 3.5 кВ (SID_2) и 2.5 кВ (SID_3). Структуры динисторов были изготовлены из пластин кремния с удельным сопротивлением 200 и 90 Ом · см и толщиной 700 и 400 мкм соответственно. Диодные секции в их полупроводниковых структурах имели такие же размеры и такую же плотность, как и в выше рассмотренных SID_1 .

На рис. 5 показаны типичные осциллограммы напряжения на SID_2 (кривые 1, 2) и SID_3 (кривые 3, 4) в процессе их переключения на стенде рис. 2 при отключенной цепи конденсатора C_0 (без коммутации силового тока). Они получены при токе управления $I_y = 350$ А и соответствуют разной величине силового напряжения U_0 : соответственно 2 и 3 кВ для SID_2 и 1 и 2 кВ для SID_3 . В этих условиях напряжение переключения SID_2 и SID_3 составляет соответственно 7.3 и 4.3 кВ. Оно примерно в 2 раза превышает величину предельного напряжения, которое SID_2 , SID_3 способны блокировать в стационарном состоянии.

На рис. 6а приведены типичные осциллограммы напряжения на SID_2 в процессе их переключения при токе управления 350, 250 и 150 А (кривые 1, 2, 3). На рис. 6б показаны аналогичные осцилло-

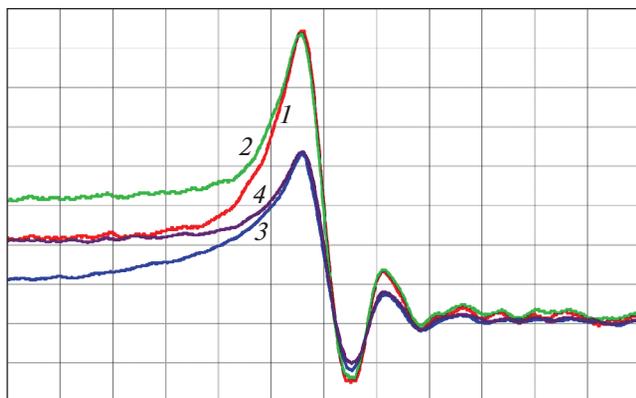


Рис. 5. Сравнение напряжений на высоковольтном SID_2 (1, 2) и низковольтном SID_3 (3, 4) при их переключении. Масштаб по вертикали 1 кВ/деление, по горизонтали – 2 нс/деление.

граммы, иллюстрирующие процесс переключения SID_3 .

Из осциллограмм на рис. 6б следует, что при уменьшении тока управления с 350 до 250 А напряжение на SID_3 в момент их включения практически не изменяется, что определяет одинаковые начальные условия для развития процесса ударной ионизации. При $I_y = 250$ А напряжение включения SID_2 (рис. 6а) становится немного меньше, чем при $I_y = 350$ А, что обуславливает возможность уменьшения интенсивности процесса ударной ионизации.

При токе управления 150 А SID_2 и SID_3 включаются при заметно меньшем напряжении. При этом на более высоковольтных SID_2 напряжение включения уменьшается сильнее, чем на SID_3 , что существенно влияет на развитие процесса ударной ионизации в его структуре. Об этом свидетельствует увеличение времени включения SID_2 .

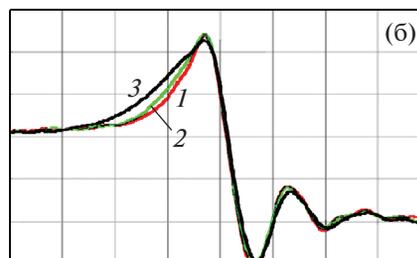
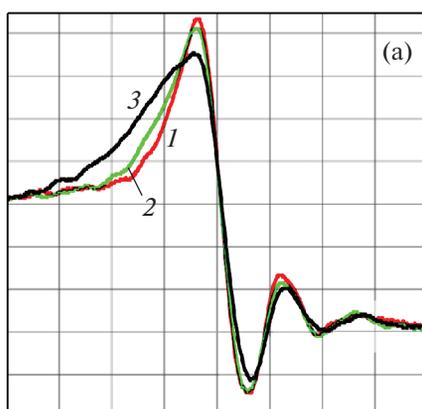


Рис. 6. Осциллограммы напряжения в процессе переключения высоковольтного SID_2 (а) и низковольтного SID_3 (б) при токе управления 350 А (1), 250 А (2) и 150 А (3). Масштаб по вертикали 1 кВ/деление, по горизонтали – 2 нс/деление.

На рис. 7а приведены типичные осциллограммы падения напряжения на SID_2 (кривая 1) и на SID_3 (кривая 2), полученные при коммутации импульсов силового тока (кривые 3, 4) с амплитудой 2 кА. Переключение динисторов осуществлялось током управления $I_y = 350$ А при силовом напряжении ~ 2 кВ. На рис. 7б показаны аналогичные осциллограммы, соответствующие току управления 250 А.

Из осциллограмм на рис. 7а следует, что при $I_y = 350$ А в процессе коммутации одинаковых импульсов силового тока с длительностью 220 нс SID_2 и SID_3 имеют близкое по величине падение напряжения, несмотря на разную толщину структур и удельное сопротивление исходного кремния. Осциллограммы на рис. 7б свидетельствуют, что при уменьшении тока управления до 250 А падение напряжения на SID_2 становится существенно больше, чем на SID_3 .

При дальнейшем уменьшении тока управления падение напряжения на динисторах возрастало, причем на SID_2 более резко, чем на SID_3 . При $I_y = 150$ А происходил пробой динисторов типа SID_2 .

При токе управления 350 А было продолжено сравнительное исследование динисторов в режиме коммутации импульсов силового тока с такой же амплитудой (2 кА), но с существенно большей длительностью (100 мкс). Для этого в схеме стенда на рис. 2 были увеличены индуктивность силовой цепи и емкость силового конденсатора C_0 . В этих условиях напряжение на SID_2 в максимуме силового тока было значительно больше, чем на SID_3 (соответственно 5 и 3 В).

Полученные результаты могут быть объяснены при рассмотрении осциллограмм на рис. 5, из которых следует, что напряжение на SID_2 в момент

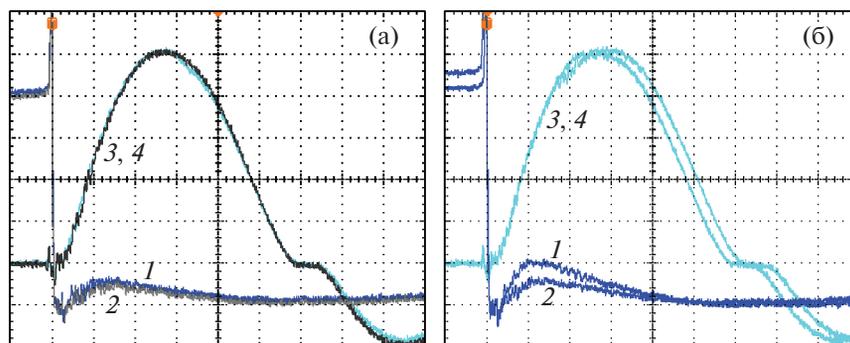


Рис. 7. Осциллограммы силового тока (3, 4) и напряжения на высоковольтном SID_2 (1) и низковольтном SID_3 (2) при токе управления 350 А (а) и 250 А (б). Масштаб по вертикали: напряжения – 400 В/деление, тока – 400 А/деление; по горизонтали – 40 нс/деление.

его переключения в 1.8 раза больше напряжения в момент включения SID_3 . Так как полупроводниковая структура SID_2 во столько же раз шире, то можно допустить, что включение SID_2 и SID_3 происходит в условиях с близкой напряженностью электрического поля в их структурах. В результате процессы ударной ионизации в SID_2 и SID_3 протекают примерно одинаково, что определяет близкую по величине проводимость после их переключения.

При протекании силового тока модуляция стационарной проводимости базовых слоев SID_2 , SID_3 осуществляется в результате диффузии электронов и дырок, инжектированных из эмиттеров. Так как скорость диффузии сравнительно мала, то при малой длительности силового тока проводимость диносторов к моменту его окончания возрастает незначительно по сравнению с начальной проводимостью после включения. При большой длительности силового тока падение напряжения на SID_2 , SID_3 соответствует стационарному значению.

Существенное уменьшение проводимости SID_2 при уменьшении тока управления до 250 А подтверждает, что даже небольшое снижение напряжения в момент их переключения (см. рис. 6а) сильно влияет на развитие процесса ударной ионизации. Разрушение высоковольтных SID_2 при $I_y = 150$ А свидетельствует о локализации силового тока.

Ближкие коммутационные потери энергии в SID_2 , SID_3 , полученные при достаточно больших токах управления, дают определенные преимущества более высоковольтным SID_2 , так как они могут быть использованы в цепях с более высоким силовым напряжением. Их основным недостатком является необходимость обеспечения более высокой мощности импульсов запуска по сравнению с SID_3 .

Сравнение напряжений на оптимизированных SID с диаметром 20 и 24 мм (рис. 3б и рис. 7а) показывает, что при коммутации близких по величине импульсов силового тока они изменяются фактически обратно пропорционально рабочей площади. Это свидетельствует о достаточно равномерном распределении силового тока. Можно предположить, что полученный результат обусловлен введением в структуры SID равномерно распределенных диодных секций, которые повышают однородность процесса переключения.

Таким образом, проведенные исследования показывают, что встроенные в структуры оптимизированных SID диодные секции позволяют повысить эффективность процесса их переключения. В этой связи создается возможность дальнейшей оптимизации конструкции SID путем изменения размеров и формы диодных секций. Так, например, интересным представляется использование диодных секций с сечением в виде квадратов или равносторонних шестиугольников. При этом тиристорные секции структуры SID будут полностью охвачены диодными секциями, что обеспечит более однородное влияние диодных секций на процесс их переключения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Efanov V., Kardo-Sysoev A., Tchashnicov I., Yarin P. // Proc. 22nd Int. Power Modulator Symp., Boca Raton, FL, USA. 1996. P. 22. <https://doi.org/10.1109/MODSYM.1996.564440>
2. Аристов Ю.В., Воронков В.Б., Грехов И.В., Козлов А.К., Коротков С.В., Люблинский А.Г. // ПТЭ. 2007. № 2. С. 87.
3. Grekhov I., Korotkov S., Rodin S. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2008. V. 36. № 2. Part 1. P. 378. <https://doi.org/10.1109/TPS.2008.918661>
4. Коротков С.В., Аристов Ю.В., Воронков В.Б., Жмодиков А.Л., Коротков Д.А., Люблинский А.Г. // ПТЭ. 2009. № 5. С. 90.

5. *Коротков С.В., Аристов Ю.В., Воронков В.Б., Коротков Д.А.* // ПТЭ. 2014. № 4. С. 67.
<https://doi.org/10.7868/S0032816214040065>
6. *Гусев А.И., Любутин С.К., Рукин С.Н., Цыранов С.Н.* // ПТЭ. 2015. № 3. С. 65.
<https://doi.org/10.7868/S0032816215020184>
7. *Gusev A., Lyubutin S., Rukin S., Tsyranov S.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2016. V. 44. № 10. Part 1. P. 1888.
<https://doi.org/10.1109/TPS.2016.2542343>
8. *Грехов И.В., Кардо-Сысоев А.Ф.* // Письма в ЖТФ. 1979. Т. 5. Вып. 15. С. 950.
9. *Коротков С.В., Аристов Ю.В., Воронков В.Б.* // ПТЭ. 2019. № 2. С. 24.
<https://doi.org/10.1134/S0032816219010130>
10. *Коротков С.В., Воронков В.Б., Аристов Ю.В.* // ПТЭ. 2015. № 4. С. 48.
<https://doi.org/10.7868/S0032816215040072>
11. *Grekhov I., Efanov V., Karido-Sysoev A., Shenderoy S.* // Solid State El. 1985. V. 28. № 6. P. 597.
12. *Коротков С.В., Аристов Ю.В., Жмодиков А.Л., Козлов А.К., Коротков Д.А.* // ПТЭ. 2018. № 1. С. 42.
<https://doi.org/10.7868/S0032816218010202>