

## СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНИСТОРОВ С УДАРНОЙ ИОНИЗАЦИЕЙ

© 2019 г. С. В. Коротков<sup>а,\*</sup>, Ю. В. Аристов<sup>а</sup>, В. Б. Воронков<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН  
Россия, 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26

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

Поступила в редакцию 21.06.2018 г.

После доработки 21.06.2018 г.

Принята к публикации 16.07.2018 г.

Приведены результаты исследований динисторов с ударной ионизацией (SID – shock-ionized dynistor), отличающихся величиной предельного напряжения, блокируемого в статическом состоянии, диаметром структур и профилем краевого контура (фаски). Показано, что SID с разным предельно допустимым напряжением при коммутации мощных импульсов тока наносекундной длительности имеют близкие по величине коммутационные потери энергии. Описаны эксперименты, косвенно подтверждающие равномерное распределение тока по рабочей площади SID после его переключения. Представлены результаты сравнительных исследований SID с прямой и обратной фаской, свидетельствующие о том, что они имеют разные коммутационные характеристики, и дано объяснение полученным результатам.

DOI: 10.1134/S0032816219010142

В статье приведены результаты сравнительных исследований кремниевых динисторов с ударной ионизацией (SID – shock-ionized dynistor), ранее рассмотренных в [1]. Они относятся к классу полупроводниковых приборов тиристорного типа [2–5 и др.], способных переключаться в хорошо проводящее состояние за время  $< 1$  нс при приложении короткого импульса перенапряжения, инициирующего процесс ударной ионизации.

SID имеют четырехслойную  $p^+ - n - p - n^+$ -структуру. Их основным отличием является то, что в  $p^+$ - и  $n^+$ -слои введены равномерно распределенные выходы на контакт соответственно с проводимостью  $n$ - и  $p$ -типа (шунты анодного и катодного эмиттеров). Такая конструкция определяет обратную проводимость  $p^+ - n - p - n^+$ -структуры, что позволяет [6 и др.] предельно уменьшить толщину слаболегированного  $n$ -слоя и обеспечить малые коммутационные потери энергии.

Исследуемые SID отличались величиной предельного напряжения, блокируемого в статическом состоянии, диаметром структур и профилем краевого контура (фаски).

Для проведения экспериментов использовался стенд, рассмотренный в [1]. Блок-схема стенда приведена на рис. 1.

Приложение к SID запускающего импульса напряжения с наносекундным фронтом нараста-

ния осуществляется в результате пропускания через его структуру мощного тока индуктивности  $L_y$  (тока управления  $I_y$ ). При включении ключа  $K$  ток  $I_y$  нарастает до требуемой величины, при выключении – коммутируется в динистор. В качестве ключа  $K$  использовался блок дрейфовых диодов с резким восстановлением [7], обеспечивающий время коммутации не более 2–3 нс.

Ток  $I_y$  быстро заряжает емкость структуры динистора до порогового напряжения  $U_m$ , при котором начинается ударная ионизация решетки кремния. Величина  $U_m$  существенно превышает величину предельно допустимого напряжения, которое SID может блокировать в статическом состоянии. В процессе ударной ионизации базовые слои динистора очень быстро заполняются электронно-дырочной плазмой, и он переключается.

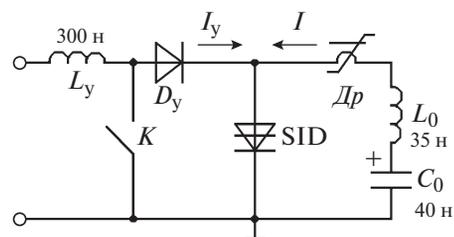
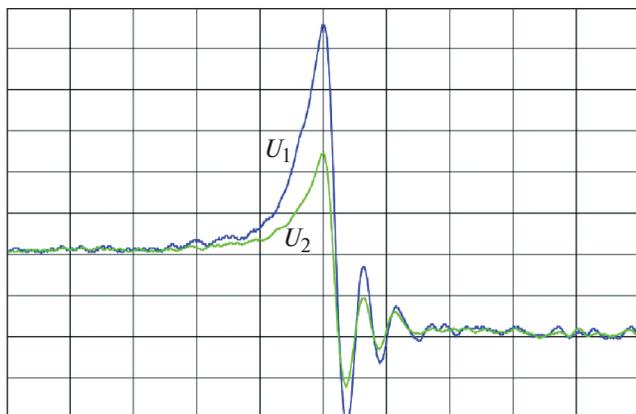


Рис. 1. Электрическая схема испытательного стенда.  $D_y$  – VMI K100UF;  $D_p$  –  $w = 1$ , сердечник 1000НМ, 8 колец  $10 \times 6 \times 2$  мм.



**Рис. 2.** Осциллограммы напряжения  $U_1$ ,  $U_2$  на SID с предельно допустимым напряжением соответственно 4 и 2.3 кВ при их переключении. Масштаб по вертикали 1 кВ/деление, по горизонтали — 2 нс/деление.

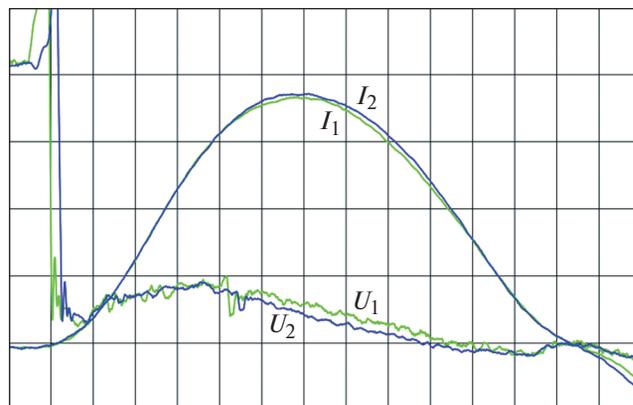
ется в хорошо проводящее состояние. После включения через SID протекает ток силовой цепи, являющийся током разряда конденсатора  $C_0$  через очень малую монтажную индуктивность  $L_0$  и дроссель насыщения  $D_p$ . В процессе переключения SID дроссель  $D_p$  препятствует ответвлению тока  $I_y$  в силовую цепь. Диод  $D_y$  разделяет силовую цепь и цепь индуктивности  $L_y$  до начала процесса переключения SID.

Исследовались динисторы с разным предельно допустимым статическим напряжением: 4 кВ (SID<sub>1</sub>) и 2.3 кВ (SID<sub>2</sub>). Их структуры имели диаметр 24 мм и были изготовлены из пластин кремния с удельным сопротивлением соответственно 230 и 70 Ом·см и соответственно толщиной 650 и 400 мкм. При этом в SID<sub>1</sub> толщина базовых *n*- и *p*-слоев составляла 500 и 80 мкм, а в SID<sub>2</sub> — 250 и 70 мкм.

На рис. 2 и 3 показаны типичные осциллограммы падения напряжения на SID<sub>1</sub>, SID<sub>2</sub> ( $U_1$ ,  $U_2$ ) при их переключении (рис. 2) и при коммутации мощных наносекундных импульсов силового тока  $I_1$ ,  $I_2$  (рис. 3). Они получены при силовом напряжении 2 кВ и токе управления  $I_y = 350$  А (такой ток обеспечивал эффективное переключение SID с диаметром 24 мм в экспериментах [1]).

Как видно из осциллограмм на рис. 2, включение SID<sub>1</sub>, SID<sub>2</sub> происходит спустя ~4 нс после приложения запускающего импульса напряжения. Напряжение в момент переключения примерно в 2 раза превышает величину предельного напряжения, которую они способны блокировать в статическом состоянии.

Из осциллограмм на рис. 3 следует, что при коммутации наносекундных импульсов тока  $I_1 \approx I_2$  исследуемые динисторы имеют примерно одинаковую проводимость, несмотря на существенное



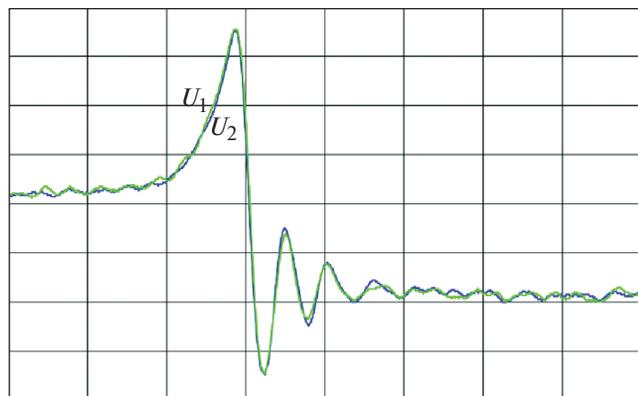
**Рис. 3.** Осциллограммы напряжения  $U_1$ ,  $U_2$  на SID с предельно допустимым напряжением соответственно 4 и 2.3 кВ при коммутации импульсов силового тока  $I_1$ ,  $I_2$ . Масштаб по вертикали: тока 500 А/деление, напряжения 500 В/деление; по горизонтали — 10 нс/деление.

различие по толщине структур и удельному сопротивлению исходного кремния. Полученный результат может быть объяснен следующим образом.

Так как имеющий большую толщину SID<sub>1</sub> переключается по сравнению с более тонким SID<sub>2</sub> при большем напряжении, то можно допустить, что в момент их включения в базовых слоях SID<sub>1</sub>, SID<sub>2</sub> достигается примерно одинаковая максимальная напряженность поля. При этом обеспечивается близкая интенсивность процессов ударной ионизации и структуры динисторов заполняются электронно-дырочной плазмой с примерно одинаковой плотностью. В результате проводимость SID<sub>1</sub>, SID<sub>2</sub> после переключения отличается незначительно.

При коммутации силового тока модуляция проводимости базовых слоев SID<sub>1</sub>, SID<sub>2</sub> осуществляется в результате диффузии электронов и дырок, инжектированных из эмиттеров. Так как скорость диффузии мала, то при наносекундной длительности процесса коммутации проводимость динисторов возрастает незначительно по сравнению с начальной проводимостью после переключения. В результате при протекании силового тока более высоковольтный SID<sub>1</sub> имеет примерно такое же падение напряжения, что и SID<sub>2</sub> с существенно меньшим предельно допустимым статическим напряжением. При этом SID<sub>1</sub> имеет определенное преимущество, обусловленное возможностью его использования в цепях с большим силовым напряжением.

На рис. 4 и 5 приведены типичные осциллограммы, полученные при сравнении опытных структур SID, отличающихся профилем фаски. Исследовались динисторы с прямой и обратной



**Рис. 4.** Осциллограммы напряжения  $U_1$ ,  $U_2$  на SID с прямой и обратной фаской при их переключении. Масштаб по вертикали 1 кВ/деление, по горизонтали – 2 нс/деление.

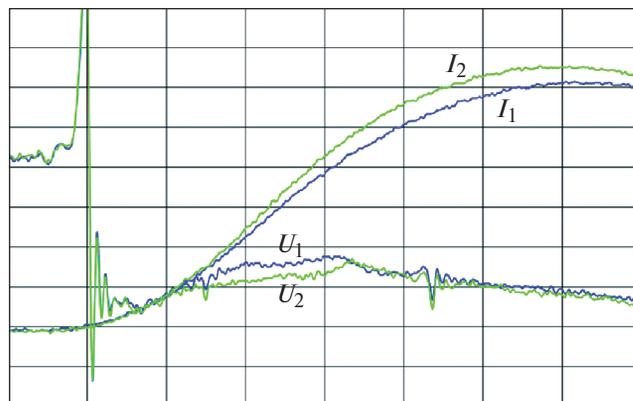
фаской ( $SID^{пр}$  и  $SID^{обр}$ ), конструкция которых показана соответственно на рис. 6а и 6б.

$SID^{пр}$  и  $SID^{обр}$  имели одинаковое предельно допустимое статическое напряжение ( $\sim 3$  кВ) и были изготовлены из кремниевых пластин с удельным сопротивлением  $100 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ , имеющих диаметр 20 мм и толщину 500 мкм. Шунты  $n^+$ ,  $p^+$  анодного и катодного эмиттеров имели диаметр  $\sim 300$  мкм и располагались на расстоянии  $\sim 1$  мм друг от друга. С боковой поверхности динисторных структур были сняты фаски 1, 2, которые исключали возможность поверхностного пробоя. Фаски снимались под углом  $75^\circ$  и  $2.2^\circ$ , при этом диаметр верхней части структур уменьшался до 16 мм. Снаружи фаски герметизировались компаундом 3.

На рис. 4 показаны осциллограммы падения напряжения  $U_1$ ,  $U_2$  на  $SID^{пр}$ ,  $SID^{обр}$  при их переключении, а на рис. 5 – при коммутации импульсов тока  $I_1$ ,  $I_2$ . Эксперименты проводились при силовом напряжении 2 кВ и токе управления 300 А. Так как используемая силовая цепь имела очень малое сопротивление, то амплитуда коммутируемого тока изменялась при изменении падения напряжения на динисторах.

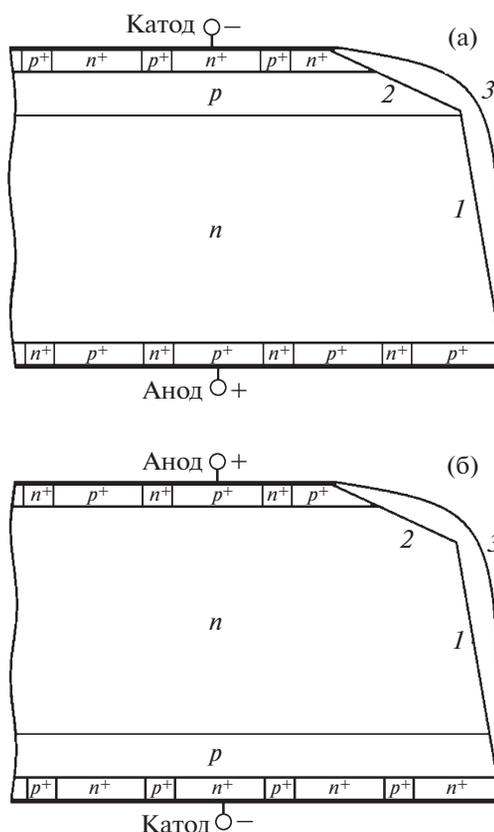
Как видно из этих осциллограмм, переключение  $SID^{пр}$  и  $SID^{обр}$  происходит при практически одинаковом напряжении, но при коммутации силового тока  $SID^{пр}$  по сравнению с  $SID^{обр}$  имеют немного большее падение напряжения. Это можно объяснить тем, что прямая фаска уменьшает площадь области с сильным полем вблизи  $n$ - $p$ -перехода больше, чем обратная. Так как ударная ионизация происходит именно в этой области, то переключаемая площадь  $SID^{пр}$  становится меньше, чем у  $SID^{обр}$ .

Подтверждение этого предположения было получено при исследовании динисторов с увеличенным диаметром полупроводниковых структур.

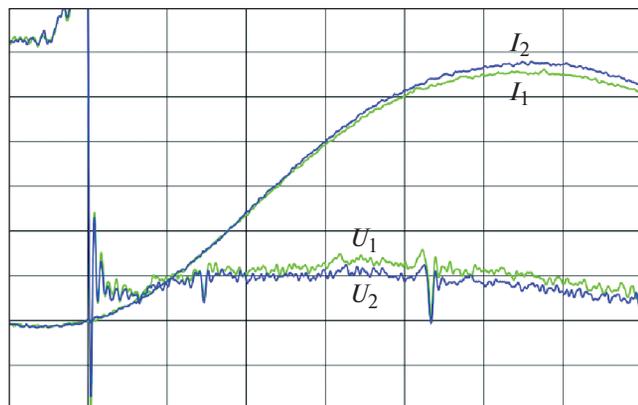


**Рис. 5.** Осциллограммы коммутируемых импульсов тока  $I_1$ ,  $I_2$  и напряжения  $U_1$ ,  $U_2$  на SID с диаметром структур 20 мм, имеющих прямую и обратную фаску. Масштаб по вертикали: тока 250 А/деление, напряжения 500 В/деление; по горизонтали – 10 нс/деление.

На рис. 7 приведены осциллограммы коммутируемого тока и падения напряжения на  $SID^{пр}$  (кривые  $I_1$ ,  $U_1$ ) и на  $SID^{обр}$  (кривые  $I_2$ ,  $U_2$ ), имеющих диаметр структур 24 мм, которые по сравнению с осциллограммами на рис. 5 свидетельству-



**Рис. 6.** Конструкция SID с прямой фаской (а) и с обратной фаской (б). 1, 2 – фаски; 3 – компаунд.



**Рис. 7.** Осциллограммы коммутируемых импульсов тока  $I_1$ ,  $I_2$  и напряжения  $U_1$ ,  $U_2$  на SID с диаметром структур 24 мм, имеющих прямую и обратную фаску. Масштаб по вертикали: тока 500 А/деление, напряжения 500 В/деление; по горизонтали — 10 нс/деление.

ют о меньшем различии падений напряжения. Так как в исследуемых структурах углы снятия фасок не изменялись, то полученный результат можно объяснить меньшим различием площади  $n$ - $p$ -перехода в динисторах с большим диаметром полупроводниковых структур.

В экспериментах, иллюстрируемых осциллограммами на рис. 5 и рис. 7, задавалась примерно одинаковая плотность тока, пропускаемого через динисторы. Полученные при этом близкие по величине падения напряжения на SID с разным диаметром структур свидетельствуют о достаточно равномерном распределении коммутируемого тока по их рабочей площади.

При исследовании динисторов на небольшой частоте, не приводящей к существенному нагреву, было обнаружено, что у многих  $SID^{обр}$  после окончания цикла коммутаций силового тока значительно (в сотни раз) увеличивался ток, протекающий через их структуры при приложении рабочего напряжения. Так как величина этого тока существенно превышала величину тока насыщения  $p$ - $n$ -перехода, то он являлся током поверхностной утечки.

После окончания цикла испытаний ток утечки медленно уменьшался. Характерное время спада до исходного значения (несколько микроампер) составляло от нескольких секунд до нескольких минут в зависимости от типа компаунда, используемого для защиты поверхности фаски. При увеличении амплитуды импульсов силового тока скорость нарастания тока утечки увеличивалась, что при определенных условиях приводило к разрушению  $SID^{обр}$ .

В  $SID^{пр}$  токи утечки практически не увеличивались.

Обнаруженный недостаток  $SID^{обр}$  можно объяснить исходя из их конструкции.

При переключении динисторов импульсом перенапряжения область с сильным полем распространяется практически на всю пологую фаску, что вызывает поляризацию компаунда над этой областью. В результате на границе увеличивается плотность поверхностных состояний. Протекание силового тока приводит к заполнению этих состояний носителями из электронно-дырочной плазмы, плотность которой увеличивается при увеличении амплитуды коммутируемого тока. В результате плотность поверхностного заряда на границе пологой фаски возрастает, что при определенных условиях может привести к образованию в прилегающей к фаске базовой области канала с инверсным типом проводимости, по которому замыкается ток утечки. После окончания силового тока время релаксации поверхностного заряда определяется типом компаунда. Если оно существенно превышает интервал между импульсами силового тока, то инверсный канал развивается от импульса к импульсу и ток утечки монотонно нарастает.

В  $SID^{обр}$  пологая фаска расположена над  $n$ -слоем с низким уровнем легирования. Малая концентрация собственных носителей позволяет образоваться инверсному каналу  $p$ -типа вблизи поверхности фасок. Протекающий по этому каналу ток существенно увеличивает ток утечки  $SID^{обр}$ .

В  $SID^{пр}$  под пологой фаской располагается  $p$ -слой с высоким уровнем легирования. Большая концентрация собственных носителей не позволяет образоваться инверсному каналу  $n$ -типа вблизи поверхности фасок. В результате возрастания тока утечки не происходит.

Таким образом, проведенные исследования показывают высокие перспективы использования SID в генераторах мощных импульсов наносекундной длительности.

Полученное небольшое различие коммутационных характеристик динисторов с прямой и обратной фаской позволяет сделать следующие выводы.

Несколько меньшие удельные потери энергии в  $SID^{обр}$  дают им определенное преимущество, по сравнению с  $SID^{пр}$ , в режимах коммутации сверхмощных импульсов тока. Однако возможность неконтролируемого увеличения токов утечки в  $SID^{обр}$  снижает потенциальную надежность их работы. В связи с этим большой интерес представляет рассмотренный в [8] способ стабилизации токов утечки в динисторных структурах путем жесткого облучения электронами узких периферийных областей. При этом в этих областях резко уменьшается время жизни носителей тока, что практически исключает протекание силового то-

ка вблизи фасок. В результате устраняется возможность образования инверсного проводящего канала, обуславливающего увеличение тока утечки при блокировании статического напряжения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Коротков С.В., Аристов Ю.В., Воронков В.Б.* // ПТЭ. 2019. Этот номер. С. 24. doi 10.1134/S0032816219010142
2. *Тучкевич В.М., Грехов И.В.* // Вестник АН СССР. 1987. № 4. С. 18.
3. *Efanov V., Kardo-Sysoev F., Tchashnicov I., Yarin P.* // Proc. 22nd Int. Power Modulator Symp. Boca Raton. Fl. 1996. P. 247.
4. *Grekhov I.V., Korotkov S.V., Rodin P.B.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2008. V. 36. № 2. Part 1. P. 378.
5. *Коротков С.В., Аристов Ю.В., Воронков В.Б., Коротков Д.А.* // ПТЭ. 2014. № 4. С. 67. doi 10.7868/S0032816214040065
6. *Блихер А.* Физика тиристорov. Л.: Энергоиздат, 1981.
7. *Grekhov I.V., Efanov V.M., Kardo-Sysoev A.F., Shenderey S.V.* // Solid State Electronics. 1985. V. 28. № 4. P. 597.
8. *Аристов Ю.В., Воронков В.Б., Грехов И.В., Коротков Д.А., Коротков С.В., Матлашов П.Е.* // ПТЭ. 2017. № 2. С. 57. doi 10.7868/S003281621701030X