ЭЛЕКТРОНИКА И РАДИОТЕХНИКА

УДК 62-932.4

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНИСТОРОВ С УДАРНОЙ ИОНИЗАЦИЕЙ

© 2019 г. С. В. Коротков^{а,*}, Ю. В. Аристов^а, В. Б. Воронков^а

^а Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН Россия, 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26 * e-mal: korotkov@mail.ioffe.ru Поступила в редакцию 20.06.2018 г. После доработки 20.06.2018 г.

Принята к публикации 25.06.2018 г.

Приведены результаты пилотных исследований кремниевых динисторов с ударной ионизацией (SID – shock-ionized dynistor), которые относятся к классу полупроводниковых приборов тиристорного типа, способных переключаться в хорошо проводящее состояние за время <1 нс при приложении короткого импульса перенапряжения, инициирующего процесс ударной ионизации. Показаны высокие возможности SID в режиме коммутации мощных импульсов тока наносекундной длительности. Описаны эксперименты, косвенно подтверждающие возможность инициирования процесса субнаносекундного переключения SID дырками, инжектируемыми из p^+ -эмитера.

DOI: 10.1134/S0032816219010130

В настоящее время опубликовано большое количество работ [1–5 и др.] по исследованию кремниевых динисторов различных типов с субнаносекундным временем переключения, которое обеспечивается в результате приложения быстро нарастающего импульса перенапряжения, инициирующего процесс ударной ионизации.

В данной статье приведены результаты исследований динисторов с ударной ионизацией (SID – shock-ionized dynistor), разработанных авторами на основе рассмотренных в [4, 5] базовых четырехслойных динисторных структур.

Конструкция структуры SID приведена на рис. 1. В отличие от базовой, в ней зашунтирован не только катодный n^+ -, но и анодный p^+ -эмиттер (на рисунке шунты заштрихованы). При этом исключается возможность блокирования обратного напряжения, но может быть уменьшена толщина n-слоя по сравнению с базовой динисторной структурой, не обладающей обратной проводимостью.

Опытные образцы SID имели такую же, как и базовые динисторы, конструкцию p^+ -шунтов катодного эмиттера (диаметр шунтов ~300 мкм, расстояние между шунтами ~1 мм). Введенные в анодный эмиттер n^+ -шунты имели диаметр ~250 мкм и располагались на расстоянии ~800 мкм друг от друга. Так как шунты анодного эмиттера существенно не уменьшают рабочую площадь SID, то меньшая толщина слаболегированного *n*-слоя обеспечивает ему меньшие коммутационные потери энергии по сравнению с базовым динистором.

SID переключается так же, как и базовый динистор. При блокировании исходного напряжения в *n*- и *p*-слоях создается свободная от носителей тока область пространственного заряда (*ОПЗ*). В этой области поле достигает максимального значения на *n*-*p*-переходе и не превышает порогового значения для лавинного пробоя. Для исключения возможности смыкания *ОПЗ* и инжекторов толщина *n*- и *p*-слоев задается таким образом, что при блокировании рабочего напряжения вблизи p^+ - и n^+ -эмиттеров образуются буферные зоны.

Процесс переключения SID осуществляется путем приложения импульса высокого напряже-



Рис. 1. Конструкция SID. *ОПЗ* – область пространственного заряда,



Рис. 2. Электрическая схема стенда для исследования SID. *СУ* – схема управления, *СЦ* – силовая цепь; D_y – VMI K100UF; д.д.р.в. – диаметр структур 20 мм, 12 последовательно; Дp - w = 1, сердечник 1000HM, 8 колец 10 × 6 × 2 мм.

ния, нарастающего с очень большой скоростью (>1 кВ/нс). Такая скорость обеспечивается пропусканием через динистор мощного тока управления с плотностью >100 А/см², осуществляющего быструю зарядку емкости структуры SID. В этих условиях напряженность поля в области пространственного заряда резко нарастает и ее границы придвигаются к эмиттерам.

Ток управления инициирует интенсивную инжекцию носителей из p^+ - и n^+ -эмиттеров и образование в буферных зонах n- и p-слоев тонких областей, заполненных дырками и электронами. Равномерно распределенная система шунтов анодного и катодного эмиттеров обеспечивает достаточно высокую однородность процесса инжекции. Инжектированные носители быстро движутся к *ОПЗ* в условиях биполярного дрейфа.

Спустя очень малое время (1–2 нс) напряженность поля в *ОПЗ* становится выше пороговой для статического пробоя, но продолжает нарастать до момента появления в зоне *ОПЗ* с сильным полем "затравочных" носителей, инициирующих процесс ударной ионизации. Ударная ионизация обеспечивает очень быстрое (доли наносекунды) заполнение *ОПЗ* электронно-дырочной плазмой. В результате SID переключается в проводящее состояние.

Начальная проводимость SID определяется плотностью электронно-дырочной плазмы, образованной в процессе ударной ионизации. Дальнейшее быстрое увеличение проводимости динистора происходит в результате дрейфа электронов и дырок, накопленных у эмиттеров при протекании тока управления. Стационарная проводимость SID после переключения определяется сравнительно медленным диффузионным переносом инжектируемых носителей.

Для проведения исследований были изготовлены опытные структуры SID и базовых динисторов. Эксперименты проводились на специальном стенде, рассмотренном в [5]. Его упрощенная электрическая схема приведена на рис. 2.



Рис. 3. Осциллограммы напряжения U_1 , U_2 на SID и на базовом динисторе при коммутации импульсов тока I_1 , I_2 . Масштаб по вертикали: тока 500 А/деление, напряжения 1 кВ/деление; по горизонтали – 10 нс/деление.

В этой схеме переключение исследуемых динисторов D осуществляется с помощью системы управления CY на основе индуктивности L_y и блока дрейфовых диодов с резким восстановлением (д.д.р.в.) [6 и др.]. После включения через динистор протекает ток, формируемый силовой цепью CU.

В исходном состоянии конденсатор C_0 заряжен до напряжения U_0 . Это напряжение приложено к динистору D и к диоду D_y . Резистор R устраняет возможность приложения U_0 к блоку д.д.р.в. При включении генератора Γ через блок д.д.р.в. в прямом направлении протекает принципиально короткий (субмикросекундный) ток, обеспечивающий накопление заряда в структурах диодов. В момент его окончания генератор Γ коммутирует в блок д.д.р.в. импульс обратного тока, нарастающий со скоростью > 1 кА/мкс. В результате осуществляется вынос накопленного заряда и выключение д.д.р.в. за время не более 2–3 нс.

В момент выключения блока д.д.р.в. протекающий через индуктивность L_y ток управления I_y коммутируется в динистор *D*. При этом напряжение на динисторе резко нарастает до пороговой величины и он включается. В процессе запускающего воздействия дроссель Дp имеет большую индуктивность и препятствует ответвлению тока I_y в силовую цепь. После переключения динистора сердечник дросселя насыщается, его индуктивность становится очень малой и практически не влияет на процесс формирования силового тока *I*. Ток управления и силовой ток измеряются коаксиальными шунтами R_1 и R_2 .

На рис. 3 показаны осциллограммы падения напряжения U_1 , U_2 на SID и на базовом динисторе при коммутации мощных наносекундных импульсов тока I_1 , I_2 . Исследуемые динисторы имели примерно одинаковую рабочую площадь (~3 см²) и



Рис. 4. Осциллограммы напряжения $U_1 - U_3$ на SID при токах управления соответственно 150, 200 и 300 А. Масштаб по вертикали 1 кВ/деление, по горизонтали – 2 нс/деление.

предельное напряжение, блокируемое в прямом направлении (~ $3.5 ext{ kB}$). В отличие от SID, базовые динисторы были способны блокировать это напряжение и в обратном направлении, что обусловило большую толщину их структур (соответственно 750 и 600 мкм).

Переключение динисторов осуществлялось током управления 300 А при фиксированном напряжении силовой цепи (2 кВ). Различная амплитуда импульсов тока I_1 , I_2 обусловлена очень малым сопротивлением силовой цепи. При этом на величину коммутируемого тока существенное влияние оказывает проводимость исследуемых динисторов.

Представленные осциллограммы свидетельствуют о меньших коммутационных потерях энергии в разработанных SID.

На рис. 4–6 приведены типичные осциллограммы, полученные при исследовании SID с диаметром структур 24 мм и предельным напряжением в статическом состоянии 3.5 кВ.

Осциллограммы на рис. 4 и 5 иллюстрируют эксперименты, в которых переключение SID осуществлялось при фиксированном напряжении силовой цепи (2 кВ) и различных токах управления. На рис. 4 приведены осциллограммы падения напряжения на SID (U_1-U_3) в процессе его переключения, а на рис. 5 – в процессе коммутации импульсов силового тока (I_1-I_3) при токах управления соответственно 150, 200 и 300 А. Представленные осциллограммы свидетельствуют о том, что при уменьшении I_y уменьшаются напряжение на SID в момент переключения и проводимость SID при коммутации силового тока.

На рис. 6 показаны осциллограммы падения напряжения на SID (U_1 , U_2), полученные при напряжении силовой цепи 1 и 3 кВ и фиксированном токе управления (300 A). Они свидетельствуют о том, что величина напряжения на SID в мо-



Рис. 5. Осциллограммы силового тока I_1-I_3 и напряжения U_1-U_3 на SID при токах управления соответственно 150, 200 и 300 А. Масштаб по вертикали: тока 500 А/деление, напряжения 500 В/деление; по горизонтали – 25 нс/деление.

мент переключения практически не зависит от величины напряжения, блокируемого в исходном состоянии.

Из осциллограмм на рис. 4 и 6 видно, что запускающие импульсы высокого напряжения имеют пьедестал. Затем напряжение резко нарастает и за ~2 нс достигает порогового значения, при котором происходит быстрое (<1 нс) включение динистора. Величина порогового напряжения более чем в 2 раза превышает величину предельно допустимого напряжения SID в статическом состоянии. Наблюдаемые осцилляции напряжения после включения SID формирует измерительная цепь, состоящая из конденсатора и делителя с полосой ~200 пс. Делитель имеет высоковольтное плечо в виде объемного резистора 500 Ом и низковольтное плечо в виде коаксиального кабеля 50 Ом.

Представленные на рис. 4 осциллограммы показывают, что при изменении тока управления SID



Рис. 6. Осциллограммы напряжения U_1 , U_2 на SID при силовом напряжении 1 и 3 кВ. Масштаб по вертикали 1 кВ/деление, по горизонтали – 2 нс/деление.

переключается спустя практически одинаковое время после приложения запускающего напряжения, но при разной величине этого напряжения.

Полученный результат свидетельствует о том, что момент возникновения процесса ударной ионизации определяется не только величиной напряженности поля в $O\Pi 3$, но и некоторым временным интервалом, который можно связать с временем перемещения "затравочных" носителей в зону $O\Pi 3$ с сильным полем.

При протекании через структуру SID мощного тока управления происходит интенсивная инжекция электронов и дырок из n^+ -и p^+ -эмиттеров. Они быстро дрейфуют к области коллекторного n-p-перехода с максимальной напряженностью поля и могут инициировать процесс ударной ионизации.

Так как *n*-слой легирован менее сильно, чем p-слой, то дырки долетают до приколлекторной области раньше, чем электроны. Если принять скорость движения дырок близкой к насыщенной (~100 мкм/нс), то за время нарастания запускающего напряжения они успевают достигнуть зоны $O\Pi 3$ с сильным полем и могут инициировать процесс ударной ионизации. При этом плотность образованной в результате ударной ионизации электронно-дырочной плазмы будет определяться количеством "затравочных" дырок.

При уменьшении тока управления снижается скорость нарастания напряжения на SID (она определяется процессом зарядки емкости структуры динистора), а время пролета дырок (Δt) из области инжектора в зону *ОПЗ* с сильным полем практически не меняется (оно определяется предельной скоростью дрейфа). В результате при меньшем токе управления за время Δt напряжение на динисторе успевает нарасти до меньшего значения. Но быстрое включение SID все равно происходит, так как процесс ударной ионизации инициируют дырки, попавшие в зону с сильным полем.

Аналогичным образом можно объяснить осциллограммы на рис. 6. Они показывают, что при фиксированном токе управления задержка момента включения SID относительно момента приложения запускающего напряжения уменьшается при увеличении напряжения U_0 , блокируемого динистором в исходном состоянии, а напряжение на SID в момент переключения практически не зависит от U_0 .

Если допустить, что процесс переключения SID инициируют дырки, инжектируемые из p^+ -эмиттера и долетевшие до *ОПЗ* с сильным полем, то уменьшение задержки момента включения SID при увеличении U_0 можно объяснить тем, что при этом граница *ОПЗ* смещается к p^+ -эмиттеру. В результате уменьшается время, необходимое для пролета дырок в *ОПЗ*.

Так как интенсивность процесса инжекции дырок из p^+ -эмиттера определяется током управления и фактически не зависит от U_0 , то при фиксированном I_y количество дырок, влетевших в зону *ОПЗ* с сильным полем, остается практически постоянным. При этом включение SID происходит при одинаковой величине запускающего напряжения в момент достижения пороговой напряженности поля в *ОПЗ*.

В этой связи показанное на осциллограммах рис. 5 увеличение падения напряжения на SID при уменьшении тока управления можно объяснить тем, что при уменьшении I_y снижается плотность "затравочных" дырок в зоне *ОПЗ* с сильным полем и уменьшается напряжение на динисторе в момент переключения. В результате снижается интенсивность процесса ударной ионизации, что определяет уменьшение проводимости SID после переключения.

Для исследования коммутационных возможностей SID был изготовлен более мощный испытательный стенд, позволяющий увеличить амплитуду силового тока. На этом стенде при силовом напряжении 3 кВ SID с диаметром структур 24 мм успешно коммутировали наносекундные импульсы тока с амплитудой ~ 6 кА и скоростью нарастания ~50 кА/мкс. В этом режиме было проведено 10³ коммутаций без изменения характеристик исследуемых динисторов.

Таким образом, в результате проведенных исследований показаны высокие коммутационные возможности разработанных SID и получены экспериментальные данные, косвенно подтверждающие возможность инициирования процесса их субнаносекундного переключения дырками, инжектируемыми из p^+ -эмиттера.

Авторы выражают благодарность А.В. Горбатюку и А.Ф. Кардо-Сысоеву за консультации при обсуждении результатов экспериментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Тучкевич В.М., Грехов И.В.* // Вестник АН СССР. 1987. № 4. С. 18.
- Efanov V., Kardo-Sysoev F., Tchashnicov I., Yarin P. // Proc. 22nd Int. Power Modulator Symp. Boca Raton. Fl. 1996. P. 247.
- 3. *Grekhov I.V., Korotkov S.V., Rodin P.B.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2008. V. 36. № 2. Part 1. P. 378.
- Коротков С.В., Аристов Ю.В., Воронков В.Б., Жмодиков А.Л., Коротков Д.А., Люблинский А.Г. // ПТЭ. 2009. № 5. С. 90.
- Коротков С.В., Аристов Ю.В., Воронков В.Б., Коротков Д.А. // ПТЭ. 2014. № 4. С. 67. doi 10.7868/ S0032816214040065
- Grekhov I.V., Efanov V.M., Kardo-Sysoev A.F., Shenderey S.V. // Solid State Electronics.1985. V. 28. № 4. P. 597.