

07

Исследование процесса наносекундного обрыва тока с высокой плотностью в SOS-диодах

© И.В. Грехов, А.Г. Люблинский, И.А. Смирнова

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: grekhov@mail.ioffe.ru

(Поступило в Редакцию 26 февраля 2015 г.)

Эффект резкого (наносекундного) обрыва обратного тока с плотностью порядка 10^3 – 10^4 А/см² в кремниевом диоде при переключении с прямого на обратное смещение (так называемый SOS-эффект) широко используется в наносекундной технике гигаваттных мощностей. Для детального исследования SOS-эффекта была создана специальная установка с малыми паразитными индуктивностями, позволяющая исследовать одиночные SOS-диоды с рабочей площадью 1–2 мм² в широком диапазоне плотностей тока. Проведенные исследования показали, в частности, что разработанная в Институте электрофизики УРО РАН численная модель SOS-эффекта хорошо описывает экспериментальные результаты. Показано также, что величина заряда, выводимого из диодной структуры обратным током, превышает заряд, введенный импульсом прямого тока, не более чем на 10%, что свидетельствует об относительно малой роли ионизационных процессов. Возможность проводить эксперименты на единичных образцах малой площади позволяет детально исследовать SOS-эффект и значительно облегчает работы по усовершенствованию конструкции SOS-диодов.

Введение

Возможность сверхбыстрого (нано- и субнаносекундного) размыкания больших токов при переключении из прямого смещения на обратное высоковольтных кремниевых $p^+p'Nn^+$ -диодов впервые была показана в [1]. Принципиальной особенностью конструкции этих диодов был глубокий (100 мкм и более) $p'N$ -переход с малым градиентом концентрации примеси в p' -слое, а принципиальное ограничение плотности размыкаемого тока J_r определялось соотношением $J_r < qn_0v_s$, где n_0 — концентрация свободных электронов в N -области, а $v_s \approx 10^7$ см/с — их предельно возможная (насыщенная) скорость в сильном поле. Диод, работающий в таком режиме размыкания, был назван дрейфовым диодом с резким восстановлением, ДДРВ (DSRD в англоязычной литературе); эти диоды являются элементной базой для генераторов нано- и субнаносекундных импульсов с мощностью до десятков мегаватт.

Существенным ограничением коммутируемой мощности единичным прибором является сравнительно малая предельная плотность размыкаемого тока, превышение которой приводит к затяжке процесса обрыва тока. В работе [2] впервые было показано, что в диодах с глубоким $p'N$ -переходом резкое (на 1.5–2 порядка) превышение предельной для ДДРВ плотности обратного тока снова значительно ускоряет процесс обрыва. Этот эффект был назван SOS-эффектом (SOS-Silicon Opening Switch); в настоящее время SOS-диоды являются элементной базой для генераторов наносекундных импульсов гигаваттной мощности [3].

Физические процессы в кремниевой $p^+p'Nn^+$ -структуре при работе в ДДРВ и SOS-режимах

Принципиальной особенностью конструкции исследуемых структур является большая толщина p' -слоя с относительно малой концентрацией акцепторов и плавно уменьшающимся ее градиентом по направлению к $p'N$ -переходу.

Поэтому при протекании через диод импульса прямого тока с большой амплитудой p' -область оказывается полностью „залитой“ электронно-дырочной плазмой. При переключении прямого смещения на обратное и протекании через p^+p' -переход быстронарастающего импульса обратного дырочного тока большой амплитуды происходит удаление свободных дырок из плазмы и быстрое уменьшение ее концентрации у p^+p' -перехода. Образующийся при этом плазменный фронт начинает перемещаться по p' -слою в сторону $p'N$ -перехода. Одновременно аналогичный процесс, но уже с участием свободных электронов, выносимых из плазмы, происходит у n^+N -перехода. На этой стадии в ДДРВ- и SOS-режимах процессы в общем аналогичны, но в SOS-режиме уменьшение концентрации плазмы у переходов происходит значительно быстрее из-за очень большой плотности обратного тока. На следующих этапах процессы резко отличаются.

В ДДРВ-режиме плазменный фронт перемещается по p' -слою в сторону $p'N$ -перехода, а навстречу ему движется плазменный фронт в N -области. Начальное распределение концентрации плазмы в p' - и N -областях после окончания импульса прямого тока и скорости ее выведения импульсом обратного тока должны быть

выбраны так, чтобы оба фронта встретились в плоскости $p'n$ -перехода, после чего протекание обратного тока и формирование области объемного заряда (ООЗ) у $p'n$ -перехода будет происходить только за счет перемещения основных носителей в противоположных от $p'n$ -перехода направлениях с насыщенной скоростью. В этих условиях процесс формирования ООЗ и обрыв обратного тока происходят очень быстро — за время порядка времени пролета носителей через ООЗ.

Поскольку в кремнии подвижность дырок примерно втрое меньше, чем электронов, то для „симметризации“ процесса восстановления длительность импульса прямого тока должна быть достаточно малой для того, чтобы общее количество плазмы в p' -слое было примерно втрое больше, чем в N -слое. Амплитуда импульса обратного тока должна быть порядка $J_s \approx qn_0v_s$, поскольку при существенно большей плотности нарушается электронейтральность в N -слое за фронтом плазмы, что приводит к большому падению напряжения на этом слое до обрыва тока. Обычно в импульсных системах $J_r \approx 0.8J_s$, а предельно малое время обрыва тока $t_{off} \approx w_{scr}/v_s$, где w_{scr} — ширина ООЗ при рабочем напряжении U_B на приборе. Например, для $p^+p'Nn^+$ -структуры с концентрацией доноров в N -слое $n_0 = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $U_B = 1.7 \text{ kV}$, $w_{scr} \approx 150 \mu\text{m}$, $t_{off} \geq 2.0 \text{ ns}$ и $j_r \approx 130 \text{ A/cm}^2$.

В SOS-режиме $J_r \gg J_s$, и поэтому в процессе перемещения плазменного фронта по p' -слою с понижающейся концентрацией доноров к $p'N$ -переходу наступает ситуация, когда нарастающая из-за роста тока плотность потока дырок из плазмы превышает концентрацию легирующей примеси в p' -слое, и нескомпенсированный заряд свободных дырок, перемещающихся с насыщенной скоростью, создает локальную область с большим электрическим полем; например, для $J_r \approx 1.6 \cdot 10^3 \text{ A/cm}^2$ это происходит в сечении p' -слоя с концентрацией акцепторов $\sim 1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$. Появление области сильного поля и, следовательно, возрастание напряжения на диоде приводят к уменьшению тока через диод и вытеснению тока в параллельно включенную с ним нагрузку. При значительном повышении плотности потока дырок напряженность создаваемого ими поля может превысить порог ударной ионизации, и образующиеся электронно-дырочные пары, разделяемые полем, вносят вклад в полный ток. Появление дополнительного источника дырок при контролируемом внешней цепью токе снижает плотность потока дырок из плазмы и тем самым уменьшает скорость движения плазменного фронта. Соответственно уменьшаются скорость нарастания напряжения на структуре и скорость спада тока. Поток электронов из области ионизации снижает также скорость нарастания напряжения из-за частичной компенсации заряда свободных дырок, движущихся им навстречу. На противоположной границе структуры у n^+N -перехода процесс образования и перемещения плазменного фронта протекает медленнее, а плотность свободных электронов в потоке примерно втрое меньше, чем дырок на противоположной границе, из-за втрое

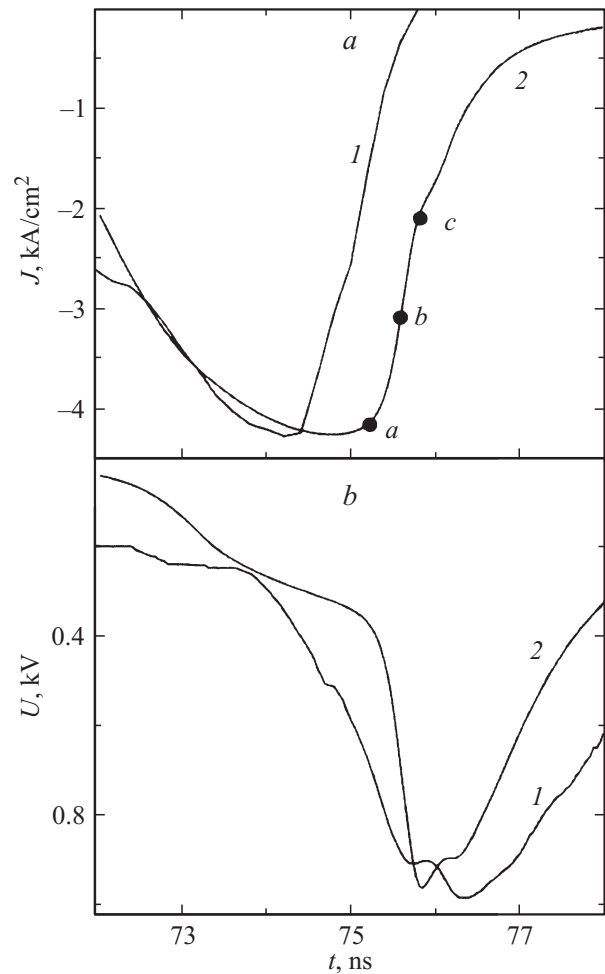


Рис. 1. Зависимости плотности тока через диод (а) и напряжения на нем (б) от времени на стадии обрыва тока, полученные в эксперименте (1) и в расчете по полной модели (2) в работе [5].

большой подвижности электронов. Обычно к моменту начала резкого спада тока $p'N$ -переход остается „залитым“ плазмой, а появление запирающего смещения на нем, т. е. полный обрыв тока, протекает уже по обычному ДДРВ-механизму при малой плотности обратного тока.

В работах [4,5] результаты численного моделирования SOS-процесса сравнивались с экспериментом, проводимым на SOS-диоде, содержащем 80 последовательно соединенных элементов с рабочей площадью 0.24 cm^2 . На рис. 1, взятом из [5], приведены результаты этого сравнения.

Как отмечают сами авторы, амплитуда тока и напряжения в импульсе довольно хорошо совпадает с расчетом, но крутизна фронтов существенно отличается из-за влияния паразитных емкостей и индуктивностей; неразличимы также и характерные точки на расчетной кривой спада тока, соответствующие различным стадиям SOS-процесса: точка a — образование узкой ООЗ у n^+N -перехода и начало резкого спада тока, точка b —

образование быстро расширяющейся ООЗ в p' -слое, точка c — максимальная суммарная ширина ООЗ, т.е. максимальное напряжение на структуре.

Целью настоящей работы является проведение достаточно точных измерений параметров SOS-процесса в одиночном SOS-диоде малой площади и сравнение их с результатами численного моделирования, выполненного в работах [4,5]. Такие измерения проводятся, насколько нам известно, впервые.

Экспериментальное исследование SOS-режима переключения

Диодные структуры диаметром 1.2 mm для работы в SOS-режиме вырезались из $p^+p'Nn^+$ -структуры большой площади, изготовленной путем совместной диффузии в пластину n -типа проводимости алюминия и бора с одной стороны пластины и фосфора — с противоположной стороны; диффузия этих элементов проводилась из их оксидов в нарушенную поверхность кремния по обычной для силовой электроники в России технологии [6]. Поверхностная концентрация Al в этом процессе всегда составляет $(5-7) \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, а концентрация бора может регулироваться в широких пределах. В исследуемых диодах она была $\sim 1 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$; глубина $p'N$ -перехода при этом составляла $\sim 180 \mu\text{m}$, а p^+p' -перехода $\sim 70 \mu\text{m}$.

Одновременно с противоположной стороны диффузией фосфора создавался n^+ -слой с поверхностной концентрацией $\sim 1 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ и глубиной $\sim 70 \mu\text{m}$. При общей толщине пластины $320 \mu\text{m}$ ширина N -области составляла $\sim 70 \mu\text{m}$.

Электрическая схема установки для исследования SOS-процесса приведена на рис. 2. В исходном состоянии высоковольтный мощный полевой транзистор T_1 разомкнут, а конденсатор накачки C_2 заряжен до напряжения, равного разности напряжений двух регулируемых источников $U = U_1 - U_2$. При подаче импульса запуска на вход „Triggering“ транзистор T_1 замыкается и производится накачка исследуемого диода D по цепи $T_1-L_2-C_2-D-R_{SH}$. Одновременно с этим процессом протекает ток по цепи L_1-T_1 и в индуктивности L_1 запасается энергия. По окончании импульса запуска транзистор T_1 размыкается и через диод D проходит импульс тока выкачки по цепи $L_1-L_2-C_2-D-R_{SH}$, затем этот ток обрывается диодом D и перебрасывается в нагрузку R_L . Импульс запуска положительной полярности подается от внешнего генератора по коаксиальному кабелю, при этом на входе „Triggering“ установлен резистор $R_1 = 50 \Omega$ для согласования импеданса. Конденсатор C_3 используется для блокирования протекания постоянного тока от источника U_2 через нагрузку R_L . Использование двух независимых источников питания U_1 и U_2 позволяет гибко регулировать соотношение энергии накачки и выкачки в широких пределах.

Предельные возможности установки определяются в основном предельными параметрами транзистора T_1 . Мы

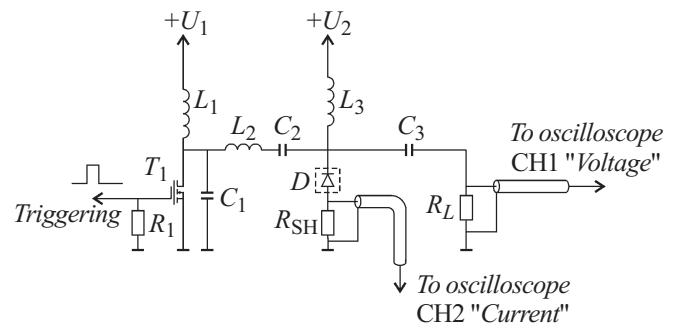


Рис. 2. Электрическая схема установки для исследования SOS-процесса.

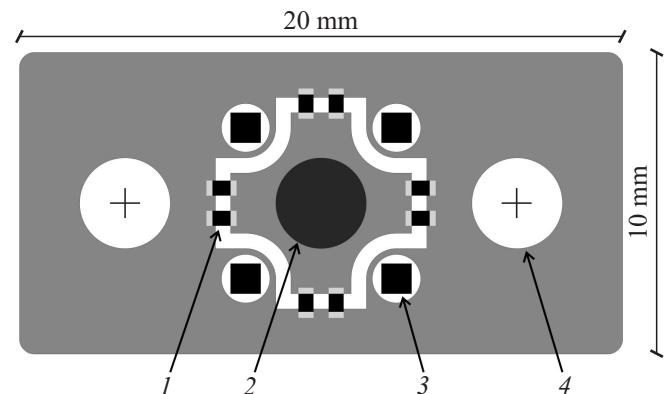


Рис. 3. Эскиз печатной платы малоиндуктивного токоизмерительного шунта. Цифрами обозначены: 1 — резисторы 1Ω , 8 штук, типоразмер 0402; 2 — контактная площадка для SOS-образца, 3 — общие контакты коаксиального SMA-разъема, 4 — крепежные отверстия.

использовали два транзистора DE475-501N44A, включенных параллельно для увеличения нагрузочной способности по току. Максимальное рабочее напряжение транзисторов составляет 500 V, а время выключения — 8 ns. Максимальный импульсный ток, полученный на данной установке, составил 80 A, что позволило при площади образца 1.1 mm^2 получить плотность разрываемого тока порядка 7 kA/cm^2 . Достаточно высокая достигнутая плотность разрываемого тока позволяет говорить о том, что исследуемый диод D работает в SOS-режиме. Измерение импульсного напряжения на диоде D и параллельно подключенной с ним нагрузке R_L производилось с помощью коаксиальных аттенуаторов с полосой пропускания 18 GHz. Для того чтобы ограничить импульсное напряжение на диоде D ниже уровня пробоя, сопротивление нагрузки R_L было выбрано равным 41Ω . Суммарный импеданс сопротивления нагрузки R_L и коаксиального кабеля, идущего к осциллографу, составил 22.5Ω .

Измерение импульсного тока через диод D производилось с помощью малоиндуктивного шунта R_{SH} . Следует отметить, что измерение импульсов тока наносекундной длительности является достаточно сложной задачей. Для

того чтобы шунт не оказывал существенного влияния на измеряемую цепь, его сопротивление должно быть небольшим, в нашем случае не больше долей Ома, а паразитная индуктивность не должна превышать долей наногенри, так как временное разрешение шунта определяется постоянной времени L_{SH}/R_{SH} . Конструкция такого шунта приведена на рис. 3. Шунт выполнен в виде печатной платы, серым цветом на рис. 3 обозначены металлизированные площадки. На одной стороне печатной платы в центре расположен держатель образца 2, а вокруг него размещены восемь сопротивлений по 1Ω типоразмера 0402 I. На обратной стороне платы размещен коаксиальный разъем SMA-типа для подключения к измерительному входу осциллографа. Четыре контакта корпуса SMA-разъема соединены с общим проводом, центральный контакт разъема соединен с держателем образца. Паразитная индуктивность такой конструкции, по нашим оценкам, не превышает 0.1 nH , что позволило выполнить измерения импульсов тока через SOS-диод с погрешностью не более нескольких процентов.

На рис. 4 приведена типичная форма импульсов токов накачки и выкачки при исследовании образцов с диаметром 1.2 mm . Длительность и форма импульсов, а также плотность токов примерно соответствуют экспериментам, выполненным в работах [4,5].

Интересно отметить, что во всех наших экспериментах заряд, прошедший через цепь накачки, всегда примерно на 10% меньше заряда, выведенного из диода импульсом обратного тока.

Скорее всего, это связано с малыми потерями заряда при накачке диода коротким импульсом, так как уходящие через неидеальный барьер pn -переходов носители не успевают рекомбинировать в высоколегированных слоях и возвращаются в базовую область при изменении полярности внешнего смещения, а увеличение выведенного заряда при выкачке происходит как из-за

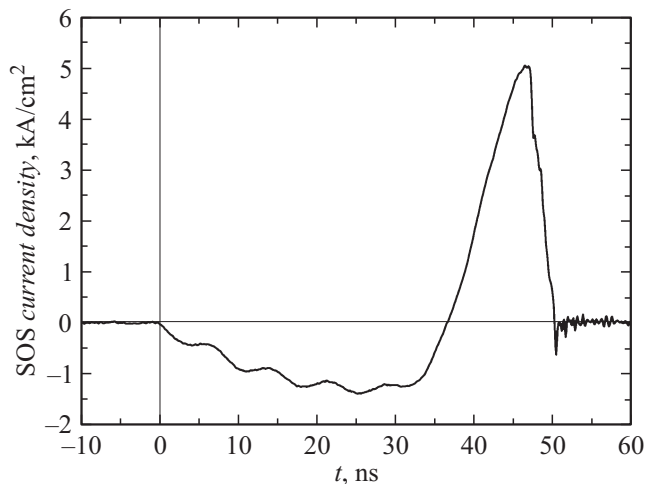


Рис. 4. Типичная форма импульсов токов накачки и выкачки при исследовании SOS-диодов.

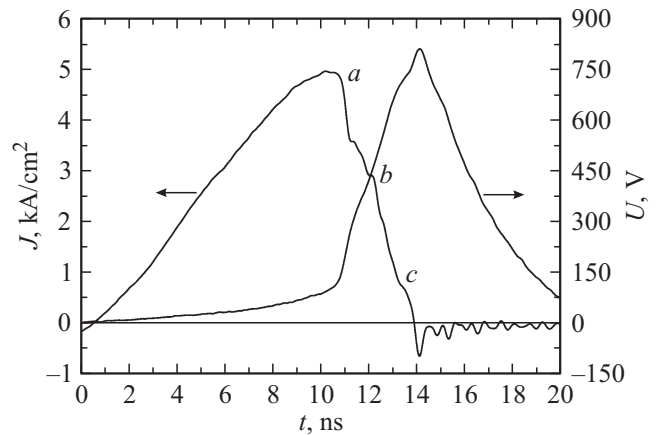


Рис. 5. Осциллограммы плотности тока выкачки через SOS-диод J и напряжения на нем U . Максимальная плотность тока выкачки 5 kA/cm^2 .

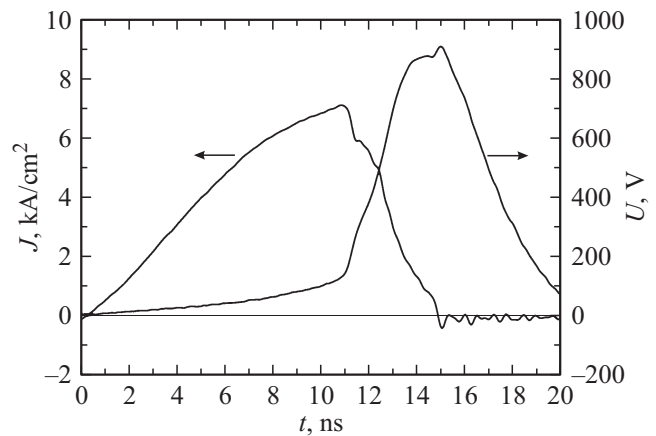


Рис. 6. Осциллограммы плотности тока через SOS-диод J и напряжения на нем U . Максимальная плотность тока выкачки 7.2 kA/cm^2 .

ударной ионизации в сильном поле, так и из-за выведения основных носителей при запирающей блокирующей p^+N -перехода в самом конце процесса образования ООЗ. Точность наших экспериментов, к сожалению, недостаточна для более детального исследования этого вопроса.

На рис. 5 приведены типичные осциллограммы процесса выкачки в режиме, примерно соответствующем рис. 2 работы [5]: длительность тока накачки 36 ns , амплитуда 1.2 kA/cm^2 , время нарастания тока выкачки 10 ns , амплитуда 5.0 kA/cm^2 . Прежде всего видно достаточно хорошее совпадение нашего эксперимента с результатами расчета. Совпадают не только скорости спада тока и роста напряжения, но четко прослеживаются также критические точки a, b, c на осциллограммах спада тока; небольшой отрицательный всплеск тока и соответствующий ему положительный всплеск напряжения связаны, скорее всего, с индуктивностью шунта.

На рис. 6 приведены предельные для нашей установки осциллограммы процесса выкачки: длительность тока

накачки 40 ns, амплитуда 2.2 kA/cm^2 , время нарастания тока выкачки 11 ns, амплитуда 7.2 kA/cm^2 . Характер процесса в общем не изменился, но несколько возрос „пьедестал“ импульса напряжения и увеличилось суммарное время спада тока.

Заключение

Таким образом, впервые показана возможность детального исследования SOS-процесса на единичных образованиях диодов. Исследования, приведенные на специально сконструированной установке с очень малыми паразитными емкостями и индуктивностями, показали, что разработанная в [4,5] модель для численного моделирования SOS-процесса обеспечивает достаточно хорошее согласие с экспериментом.

Авторы благодарят С.Н. Рукина за предоставленные структуры SOS-диодов.

Исследование выполнено за счет поддержки гранта Российского научного фонда (проект № 14-29-00094).

Список литературы

- [1] Грехов И.В., Ефанов В.М., Кардо-Сысоев А.Ф., Шендерей С.В. // Письма в ЖТФ. 1983. Т. 9. Вып. 7. С. 435–439.
- [2] Котов Ю.А., Месяц Г.А., Рукин С.Н., Филатов А.А. // ДАН. 1993. Т. 330. № 3. С. 315–317.
- [3] Грехов И.В., Месяц Г.А. // УФН. 2005. Т. 175. № 7. С. 735–744.
- [4] Рукин С.Н., Цыранов С.Н. // ЖТФ. 2009. Т. 79. Вып. 11. С. 30–35.
- [5] Рукин С.Н., Цыранов С.Н. // ФТП. 2009. Т. 43. Вып. 7. С. 989–995.
- [6] Грехов И.В., Линийчук И.А., Лебедева Л.В., Тучкевич В.М., Челноков В.Е., Шуман В.Б., Якивчик Н.И. Способ создания источника диффузии алюминия в кремний. Авт. свид. СССР № 176989, 1964.