

Работа полупроводникового прерывателя при микросекундном времени накачки и низкой плотности тока

© П.В. Васильев, С.К. Любутин, А.В. Пономарев, С.Н. Рукин[¶],
Б.Г. Словиковский, С.Н. Цыранов, С.О. Чолах

Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук,
620016 Екатеринбург, Россия

(Получена 6 октября 2008 г. Принята к печати 20 ноября 2008 г.)

Исследован механизм работы полупроводникового прерывателя тока (SOS-диола) при микросекундном времени прямой накачки и низкой плотности тока. В эксперименте при времени обратной накачки ~ 200 нс и плотности обрываемого тока около 120 А/см^2 получено время обрыва тока менее 10 нс при напряжении на SOS-диоде до 80 кВ. Приведены результаты численного моделирования процессов динамики электронно-дырочной плазмы в диоде на стадиях накачки и обрыва тока. Показано, что стадия обрыва тока аналогична режиму SOS-эффекта, реализуемого при высокой плотности тока, и также связана с движением концентрационного фронта избыточной плазмы вдоль высоколегированной p -области структуры. Несмотря на низкую плотность тока в процессе его обрыва, процесс коммутации занимает несколько наносекунд. Это связано с тем, что малая величина плотности тока компенсируется малой концентрацией избыточной плазмы на фронте, что сохраняет высокую скорость движения этого фронта на стадии обрыва тока.

PACS: 84.30.Jc, 85.30.-z, 84.70.+p, 72.30.+q, 73.50.Mk

1. Введение

SOS-эффект, представляющий собой наносекундный обрыв сверхплотных токов в полупроводниках, наблюдается в кремниевых $p^+-p-n-n^+$ -структурах при времени накачки порядка сотен наносекунд и плотности тока в единицы и десятки kA/см^2 . Время обрыва тока при этих условиях лежит в диапазоне 1–10 нс [1]. Разработанные на основе этого эффекта полупроводниковые прерыватели тока — SOS-диоды — способны переключать импульсную мощность гигаваттного уровня и работать при напряжении до 1 МВ [2]. Другой тип полупроводниковых прерывателей тока — дрейфовый диод с резким восстановлением (ДДРВ) — широко используется при плотности отключаемого тока в сотни А и напряжении в десятки кВ [3].

Принцип работы обоих типов прерывателей основан на предварительном пропуске через диод короткого импульса прямого тока, длительностью не более 200–400 нс. Это необходимо для создания резко неоднородного профиля концентрации избыточной плазмы, когда основная доля накопленного заряда сосредоточена в высоколегированных областях полупроводниковой структуры. Такое распределение плазмы позволяет вывести из структуры практически весь накопленный заряд на стадии обратной накачки в фазе высокой обратной проводимости до начала образования областей сильного поля. Кроме этого, короткий импульс прямой накачки также способствует снижению рекомбинационных потерь накопленного заряда.

В техническом плане необходимость в коротком импульсе тока прямой накачки приводит к усложнению генератора с прерывателем тока, поскольку требуется

использовать мощные схемы накачки. В генераторах на ДДРВ используются схемы накачки с использованием быстродействующих транзисторных переключателей, имеющих ограниченные возможности по импульсному току и мощности. В генераторах на SOS-диолах с запасаемой энергией в десятки джоулей используется дополнительный магнитный компрессор для предварительного сжатия энергии импульса во времени до требуемого значения около 300–400 нс. Выходная мощность компрессора достигает сотен МВт, а потери энергии в нем не позволяют получить КПД генератора в целом более 40–50%.

В данной работе исследуется возможность работы прерывателя тока на SOS-диоде при микросекундном времени прямой накачки. При этом уменьшением плотности тока накачки снижена концентрация избыточной плазмы и, как следствие, ее потери за счет рекомбинации.

2. Экспериментальная часть

Электрическая схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Первичный накопитель $C1$ имеет суммарную емкость 1.8 мкФ и в резонансном режиме заряжается за время около 8 мкс до напряжения 880–900 В, что соответствует запасаемой в нем энергии около 0.7 Дж. Первичный коммутатор $S1$ состоит из 10 параллельно включенных IGBT-транзисторов типа IRG4PH50UD с допустимым импульсным током 180 А. Импульсный трансформатор $PT1$ собран на ферритовых кольцах и имеет один виток в первичной обмотке и 40 витков во вторичной. Конденсатор накачки $C2$ имеет емкость 1 нФ. Прерыватель тока SOS содержит последовательно соединенные диодные структуры с толщиной кремниевой пластины 320 мкм и глубиной залегания $p-n$ -перехода 180 мкм.

[¶] E-mail: rukin@iep.uran.ru

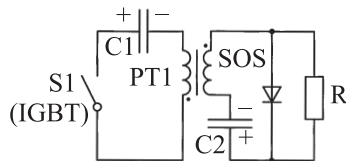


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

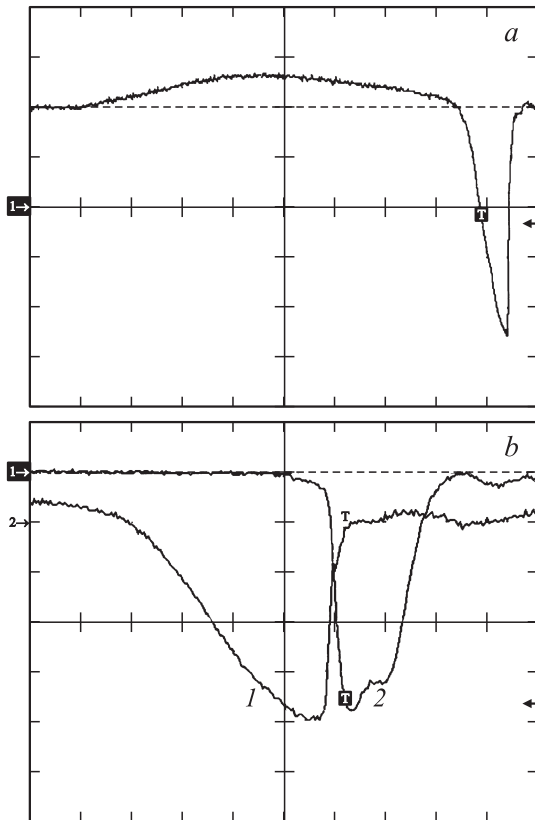


Рис. 2. Экспериментальные осциллограммы: *a* — полный ток через SOS-диод, по оси абсцисс 200 нс/деление, по оси ординат 53 А/деление; *b* — обратный ток через SOS-диод (кривая 1), по оси абсцисс 50 нс/деление, по оси ординат 60 А/деление, а также импульс напряжения на нагрузке $R = 450 \Omega$ (кривая 2), 12.5 кВ/деление.

При включении транзисторов S1 энергия из C1 передается через PT1 в конденсатор накачки C2. При этом ток заряда C2 протекает через SOS-диод в прямом направлении и обеспечивает режим его прямой накачки. Время передачи энергии из C1 в C2 соответствует времени прямой накачки SOS и составляет 1.5 мкс. При насыщении сердечника трансформатора PT1 начинается процесс обратной накачки SOS. Конденсатор C2 разряжается через него в обратном направлении. В момент максимума обратного тока происходит его обрыв, ток переключается в нагрузку R, и на ней формируется импульс высокого напряжения наносекундной длительности.

В экспериментах при фиксированной длительности тока прямой накачки изменялась плотность тока путем изменения площади структур в SOS. Варьировались также время и плотность тока процесса обратной накачки. Критерий оптимизации работы SOS состоял в получении максимальной величины заряда, выведенного обратным током, и достижении минимального времени обрыва тока. На рис. 2 приведены осциллограммы импульсов, полученные в близких к оптимальным условиям. Прерыватель тока SOS имел площадь 2 см^2 . Ток прямой накачки составлял 30–35 А (рис. 2, *a*), что соответствовало плотности прямого тока менее 20 А/см^2 . Величина обратного тока достигала величины 240 А (120 А/см^2) за время около 200 нс (рис. 2, *b*). Время обрыва тока лежало в диапазоне 6–10 нс.

По сравнению с режимом короткой накачки с высокой плотностью тока в эксперименте были достигнуты существенно более высокие значения коэффициента сжатия энергии. Так, отношение времени прямой накачки к времени коммутации (времени обрыва тока) достигало 250, а отношение времени обратной накачки к времени коммутации составляло около 30. При работе SOS-диода в режиме с высокой плотностью тока эти значения, как правило, не превышают 50 и 10 соответственно.

Были исследованы и другие характеристики установки. Максимальная частота следования импульсов в режиме пачки импульсов составляет 100 кГц и определяется временем заряда первичного накопителя (8 мкс) и временем его разряда (1.5 мкс).

В продолжительном режиме работы частота ограничивается системой отвода тепла и установка работает в течение нескольких минут с частотой до 10 кГц. При сопротивлениях нагрузки от 100 до 900 Ом напряжение на выходе лежит в диапазоне от 20 до 80 кВ. Максимальная энергия в импульсе и максимальная пиковая мощность импульса реализуются в диапазоне сопротивлений 270–500 Ом и составляют 0.5 Дж и 8.5 МВт соответственно. Длительность импульса на полувысоте FWHM для этого диапазона нагрузок составляет ~ 70 нс. Отсутствие дополнительного магнитного компрессора для предварительного сжатия энергии импульса повышает полный КПД установки до 70%.

3. Численное моделирование

Для выяснения особенностей работы SOS-диода при низкой плотности тока было проведено численное моделирование. Использовалась физико-математическая модель, описанная в работе [4]. В модели используется фундаментальная система уравнений, состоящая из уравнений непрерывности для электронов и дырок, и уравнения Пуассона для электрического поля, которая решается совместно с уравнениями Кирхгофа для электрической схемы. Модель также учитывает реальный профиль легирования полупроводниковой структуры.

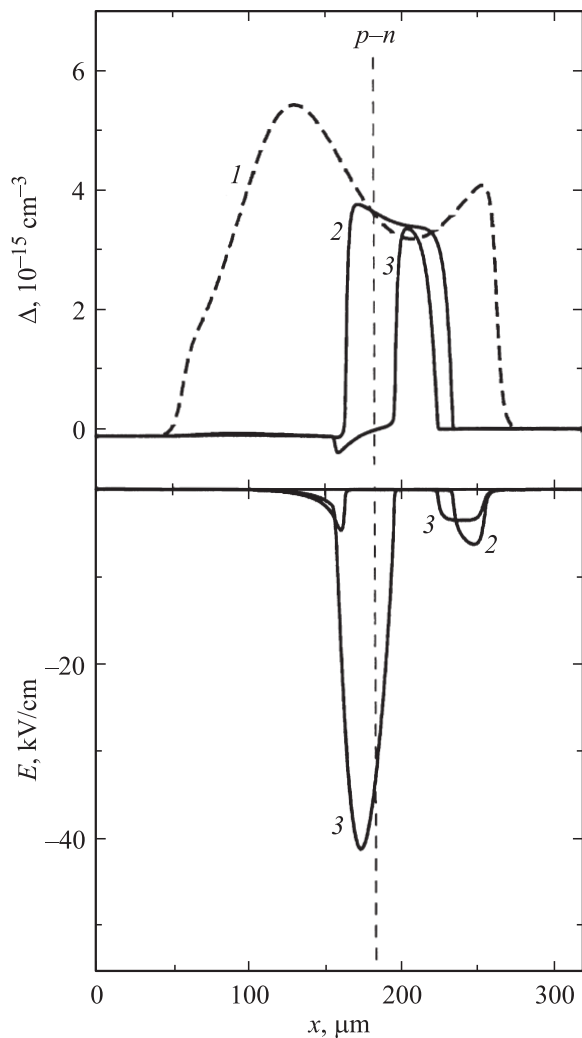


Рис. 3. Распределения концентрации избыточной плазмы (Δ) и электрического поля в структуре E в момент завершения процесса прямой накачки SOS-диода (кривая 1), перед началом процесса обрыва тока (кривые 2) и в момент времени, когда обратный ток уменьшился в 2 раза (кривые 3).

В результате расчетов были выявлены особенности динамики плазмы в структуре при низкой плотности тока на стадии накачки и стадии обрыва тока. В отличие от классического режима SOS-эффекта, реализуемого при плотностях тока в единицы kA/cm^2 [1,3], динамика плазмы при низкой плотности тока характеризуется следующим.

Снижение плотности тока прямой накачки до десятков A/cm^2 и увеличение длительности накачки снижает долю заряда, накопленного в p -области структуры. Это связано с тем, что на стадии прямой накачки по мере проникновения дырок в n -область, а электронов в p -область растет градиент концентрации носителей в районе p - n -перехода, что приводит к росту диффузионного тока носителей до величины порядка единиц A/cm^2 . Эта величина становится сопоставимой с полным током, что вызывает изменение соотношения дырочного и элект-

ронного токов в окрестности p - n -перехода (диффузия увеличивает дырочный ток и снижает электронный). В результате доля накопленного заряда в p -области уменьшается, а в n -области увеличивается. Увеличение длительности накачки приводит также к росту рекомбинационных потерь в p -области, что дополнительно снижает долю накопленного в ней заряда. Кривая 1 на рис. 3 иллюстрирует распределение концентрации избыточной плазмы в структуре с момента завершения процесса прямой накачки. Видно, что резко неоднородного распределения нет, концентрация плазмы в p -области превышает концентрацию плазмы в базе не более чем в ~ 2 раза.

Стадия обрыва тока характеризуется следующим. Перед началом процесса обрыва тока, как и в режиме SOS-эффекта при высокой плотности тока, база и часть p -области заполнены плотной электронно-дырочной плазмой. На рис. 3 приведено распределение концентрации избыточной плазмы в структуре (кривая 2) для осциллограммы тока по данным рис. 2, b в момент достижения обратным током своего максимального значения. Видно, что процесс обрыва тока также начинается в p -области структуры. По мере спада тока происходит главным образом движение левой границы плазмы в сторону p - n -перехода. В структуре возникает область сильного поля, а левая граница пересекает p - n -переход и продолжает двигаться в базу. Распределения концентрации плазмы и поля в структуре на рис. 3 (кривые 3) соответствуют моменту времени, когда обратный ток уменьшился в 2 раза, а на структуре и нагрузке величина выходного напряжения достигла 65% от своего максимального значения.

4. Заключение

Таким образом, стадия обрыва тока полностью аналогична режиму SOS-эффекта, когда обрыв тока связан с движением концентрационного фронта плотной избыточной плазмы вдоль p -области структуры. Отличие состоит в том, что этот фронт в процессе обрыва тока пересекает p - n -переход. Несмотря на низкую плотность тока в процессе его обрыва, составляющую около $120 \text{ A}/\text{cm}^2$, процесс коммутации происходит достаточно быстро и занимает несколько наносекунд. Время обрыва тока, как и в режиме с высокой плотностью тока, определяется скоростью расширения области сильного поля в p -области, которая задается скоростью движения границы плазмы. Поскольку эта скорость определяется отношением плотности тока и концентрации плазмы на фронте, малая плотность тока компенсируется и малой величиной концентрации плазмы, а высокая скорость движения этого фронта на стадии обрыва тока сохраняется.

Другой важной особенностью является незначительное влияние электрического поля в базе на процесс обрыва тока, что связано с высокой плотностью плазмы

в базе. При этом поле, возникающее в базе, примерно на порядок меньше поля в p -области.

Еще одна особенность процесса обрыва тока малой плотности связана с малой величиной электрического поля, возникающего в структуре, поскольку максимум области сильного поля располагается в p -области структуры вблизи p - n -перехода, где концентрация акцепторов минимальна. Максимальное поле имеет величину около 40 кВ/см, а полное напряжение на структуре не превышает 250–300 В.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, гранты № 07-02-12015 и 07-02-96050.

Список литературы

- [1] С.Н. Рукин. ПТЭ, № 4, 5 (1999).
- [2] А.И. Бушляков, С.К. Любутин, А.В. Пономарев и др. ПТЭ, № 4, 72 (2006).
- [3] И.В. Грехов. Г.А. Месяц. УФН, **175** (7), 735 (2005).
- [4] С.Н. Рукин, С.Н. Цыранов. Письма ЖТФ, **30** (1), 43 (2004).

Редактор Т.А. Полянская

Semiconductor opening switch operation at microsecond pumping time and low current density

P.V. Vasiliev, S.K. Lyubutin, A.V. Ponomarev, S.N. Rukin, B.G. Slovikovsky, S.N. Tsyranov, S.O. Cholakh

Institute of Electrophysics,
Ural Branch of Russian Academy of Sciences,
620016 Ekaterinburg, Russia

Abstract Operation of the semiconductor opening switch (SOS diode) at microsecond forward pumping time and low current density has been investigated. In experiment at reverse pumping time of ~ 200 ns and cutoff current density of about 120 A/cm² current cutoff time of less than 10 ns was obtained at peak voltage across SOS diode up to 80 kV. The results of numerical simulation of the electron–hole plasma dynamics in the diode at the stages of pumping and current cutoff are presented. It was shown that the current cutoff stage is analogous to the SOS effect regime having high current density, and also is due to the movement of the concentration front of excess plasma along high doped p -region of the structure. Although the current density is low during the current cutoff process, the switching process takes a few nanoseconds. The reason is that a low current density is compensated by a small concentration of excess plasma on the front. Therefore, the front maintains its high velocity at the stage of the current cutoff.