

*И.В. Грехов, А.Г. Люблинский, Е.И. Белякова
Физико-Технический институт им. А.Ф. Иоффе*

Мощный диодный наносекундный размыкатель тока на основе р-кремния (р-SOS).

В работе приведены первые результаты исследования альтернативной конструкции SOS диода, которая создавалась путем короткой одновременной диффузии на глубину 60-80 мкм бора и фосфора с противоположных сторон кремниевой пластины р-типа проводимости. Экспериментально показано, что в равных рабочих условиях время обрыва тока в таком р-SOS диоде примерно в полтора раза меньше, чем в обычных n-SOS диодах, существенно меньше коммутационные потери, а технология изготовления намного проще. Намечены пути оптимизации конструкции полупроводниковой структуры р-SOS диодов для дальнейшего повышения быстродействия.

Ключевые слова: Высоковольтная импульсная техника, Мощные полупроводниковые ключи.

Возможность быстрого размыкания тока с плотностью в десятки кА/см² при переключении с прямого смещения на обратное в кремниевом диоде с глубоким (150-200 мкм) рN-переходом была впервые показана в [1]. Этот эффект был назван SOS эффектом (SOS – Semiconductor Opening Switch); он реализуется в кремниевых р⁺р⁺Nn⁺-структурах, создаваемых путем длительной совместной диффузии в кремниевую пластину N-типа проводимости алюминия и бора с одной стороны пластины и фосфора с другой. Поперечное сечение типичного SOS диода показано на врезке рис.1. Диффузия примесей проводится из растворов их соединений, наносимых на нарушенную шлифовкой поверхность кремния, что дает возможность проводить диффузию алюминия даже в окисляющей атмосфере [2]. Поверхностная концентрация алюминия в таком процессе составляет около $7 \cdot 10^{16} \text{см}^{-3}$ и слабо зависит от концентрации раствора, а поверхностная концентрация бора и фосфора может регулироваться в широких пределах в зависимости от концентрации растворов их соединений. Обычно эта концентрация находится на уровне $\sim 10^{21} \text{см}^{-3}$; таким образом, диффузионный р-слой состоит из двух частей: высококонцентрированной р⁺-части, созданной диффузией бора, и низкоконцентрированной р⁻-части, созданной обгоняющей бор диффузией алюминия.

С противоположной стороны пластины диффузионный n⁺-слой, создаваемый одновременной диффузией фосфора, имеет примерно такую же толщину, как и р⁺-слой. Принципиальной особенностью конструкции описанного выше n-SOS диода является очень большая (180-200 мкм) толщина р⁺р⁻-слоя, получаемого путем одновременной длительной термодиффузией бора и алюминия при температуре до 1300°C.

При работе в SOS режиме через р⁺р⁺Nn⁺-структуру пропускается импульс прямого тока, создающий в ней электронно-дырочную плазму высокой плотности. (Врезка на рис. 1, кривая 1). Затем прикладывается быстро нарастающий импульс обратного тока, который обеспечивает вынос из плазмы электронов и дырок с образованием плазменных фронтов 2 и 3, движущихся навстречу друг другу. Пока левый плазменный фронт

перемещается по p^+ -слою с высоким уровнем легирования, увеличение толщины свободной от плазмы части p^+ -слоя приводит лишь к небольшому увеличению омического сопротивления в цепи обратного тока. Однако, при переходе фронта в p^- -слой и дальнейшем перемещении наступает ситуация, когда нарастающая из-за роста тока плотность потока дырок из плазмы в месте расположения фронта 2 превышает концентрацию легирующей примеси в p^- -слое. С этого момента нескомпенсированный заряд свободных дырок, перемещающихся с насыщенной скоростью, создает локальную область объемного заряда (ООЗ) с большой напряженностью электрического поля, сопротивление диода возрастает и ток переходит в цепь нагрузки, включенной параллельно диоду. На противоположной границе структуры у n^+N -перехода процесс образования ООЗ протекает значительно медленнее, так как плотность потока электронов примерно втрое меньше из-за примерно втрое большей подвижности. Обычно к моменту резкого спада тока p^-N -переход еще остается «залитым» электронно-дырочной плазмой.

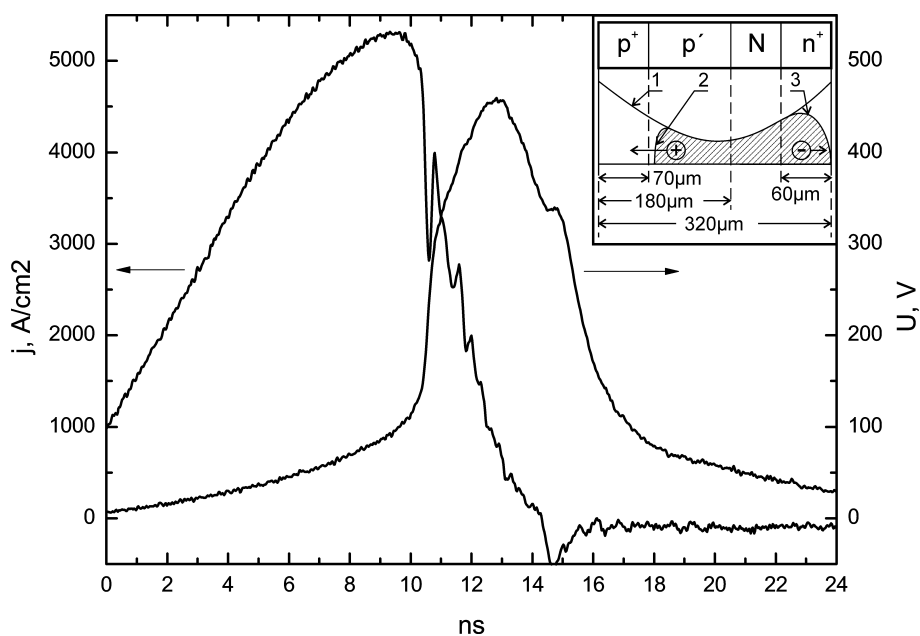


Рис.1. Осциллограммы обрыва тока и нарастания напряжения в SOS-диоде на основе кремния с n-типом проводимости (n-SOS) с конструкцией полупроводниковой структуры, показанной на врезке.

Рабочая плотность тока в момент обрыва в SOS диодах составляет единицы и даже десятки kA/cm^2 . Результаты численного моделирования SOS-процесса приведены, например, в [3], [4]. В [5] нами представлены результаты экспериментального исследования SOS процесса на специально сконструированной установке, позволяющей исследовать одиночные образцы SOS диодов малой площади при коротких временах «накачки» и «выкачки» и достаточно высокой плотности тока. На рис.1 приведена измеренная на этой установке осциллограмма обрыва тока и нарастания напряжения на SOS диоде, конструкция полупроводниковой структуры которого, показана на врезке рис.1. Структура выполнена на кремнии N-типа проводимости с $\rho=40 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, глубина

p^+p^-/N -перехода 180 мкм, p^+p^- -перехода 70 мкм, p^+N -перехода 60 мкм, ширина N -области 80 мкм, общая толщина структуры 320 мкм. «Накачка» плазмы осуществлялась импульсом прямого тока с длительностью 40 нс и амплитудой 1,8 кА/см², а «выкачка» – быстронарастающим импульсом обратного тока, длительностью не более 15 нс. Как видно на рис.1, в этом режиме при максимальной величине плотности тока выкачки ~5,2кА/см², время спада тока составляет ~3,5 нс, амплитуда напряжения ~450 В и «пьедестал» напряжения ~100 В.

Скорость формирования ООЗ, определяющая динамику процесса размыкания тока в SOS диоде при выключении, зависит от многих факторов, а именно: параметров режима «накачки» и «выкачки» плазмы, геометрических размеров слоев p^+p^-/Np^+ -структуры, уровня их легирования и др. Относительно невысокая скорость формирования ООЗ связана, возможно, с очень малым градиентом концентрации примеси в сверхглубоком (~180 мкм) диффузионном p -слое.

Нами был исследован вариант конструкции p -слоя с более резким изменением концентрации, которая показана на врезке рис.2. В этой конструкции p^+p^- -слои создавались совместной диффузией алюминия и бора на глубину ~85 мкм в кремний P -типа проводимости с удельным сопротивлением $\rho=40$ Ом·см; одновременно с противоположной стороны создавался n^+ -слой диффузией фосфора на глубину ~50 мкм, общая толщина образца была ~220 мкм. Концентрация легирующих примесей в диффузионных слоях была примерно такой же, как и в структуре на врезке рис.1. Таким образом, p -слой состоит из трех частей – высоколегированная p^+ -часть, полученная диффузией бора, p^- -часть со значительно меньшим уровнем легирования, полученная диффузией алюминия, и слаболегированная P -часть, уровень легирования которой определяется исходным кремнием.

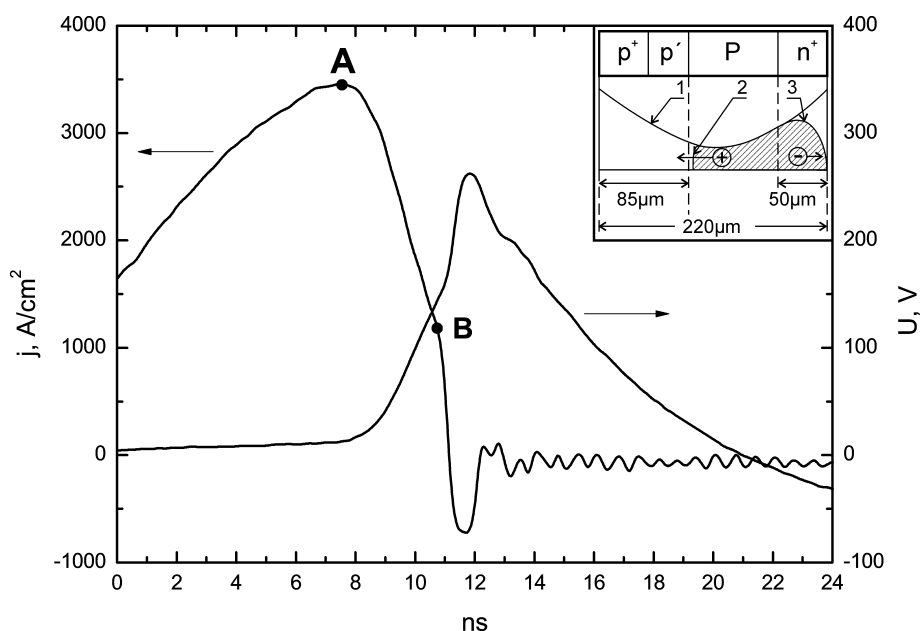


Рис.2. Осциллограммы процесса обрыва тока и нарастания напряжения в p^+p^-/Pn^+ SOS диоде. Конструкция структуры показана на врезке.

Накачка структуры производилась импульсом прямого тока с длительностью ~40 нс, затем через диод пропускается импульс обратного тока с большой скоростью

нарастания, который примерно через 15 нс резко обрывается диодом. Осциллограмма процесса обрыва тока показана на рис.2. В начале процесса плазменный фронт 2 перемещается по высоколегированному p^+ -слою вправо и падение напряжения на нем медленно нарастает. В точке A , вероятно, фронт перемещается в p' -слой, в котором формируется локальная область объемного заряда (SOS эффект) и падение напряжения возрастает с обычной для SOS эффекта скоростью роста, формируя первый участок роста на осциллограмме напряжения (участок спада тока AB). В точке B скорость спада тока резко (скачком) возрастает; по-видимому, в этот момент фронт перемещается в область P .

Резкое ускорение спада тока, естественно, приводит к ускорению роста напряжения на диоде и включенной параллельно ему нагрузке. В этом режиме при плотности тока выкачки в максимуме $\sim 3,5 \text{ кА/см}^2$, суммарная длительность спада тока составляет ~ 3 нс. Обращает на себя внимание очень быстрый, менее чем за 1 нс, спад тока до нуля от точки B и соответствующий ему всплеск напряжения.

Поскольку оказалось, что при прохождении плазменным фронтом p' -части p -слоя скорость спада тока в условиях SOS эффекта существенно меньше, чем при прохождении P -слоя, были исследованы диоды, p -слой в которых состоял только из p^+ и P -частей. Конструкция таких структур показана на врезке рис.3.

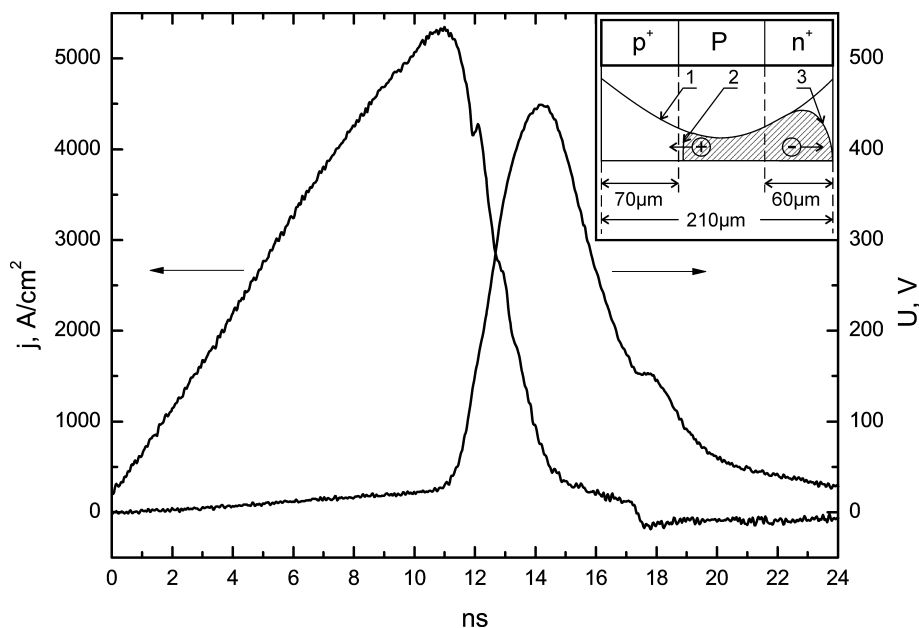


Рис.3. Осциллограмма процесса обрыва тока и нарастания напряжения в p^+Pn^+ SOS диоде. Конструкция структуры показана на врезке.

Осциллограмма процесса обрыва тока в такой структуре, как видно из рис.3, принципиально отличается от приведенной на рис.2 отсутствием участка AB связанного с прохождением плазменным фронтом p' -слоя. Общее время обрыва тока при этом не превышает 2,5 нс при плотности тока выкачки $\sim 5,2 \text{ кА/см}^2$, амплитуде напряжения 450 В и «пьедестале» напряжения ~ 20 В. Значительно меньший по сравнению с n -SOS «пьедестал» обеспечивает существенно меньшие коммутационные потери при использовании p -SOS диодов.

Принципиальный интерес представляет характер процессов, проходящих у n^+p -перехода, поскольку восстановление его запирающих свойств в условиях большой плотности обратного тока может привести к разрушению структуры. Процесс спада концентрации у n^+p -перехода происходит значительно медленнее, чем у p^+n -перехода из-за почти втрое большей подвижности электронов, чем дырок и поэтому можно ожидать, что запираение n^+p -перехода будет происходить значительно позже развития SOS процесса в p -слое и спада тока через диод.

Как видно из осциллограммы на рис.3, довольно плавный спад тока вследствие обрыва его SOS процессом заканчивается резким спадом до нуля при плотности тока ~ 200 А/см² и соответствующей ему задержкой спада напряжения. Очевидно, это связано с восстановлением запирающих свойств n^+p -перехода. Этот процесс протекает быстро и при очень малой плотности тока, поэтому он не может привести к разрушению диода.

В дальнейшем предполагается провести оптимизацию геометрических параметров слоев p^+Pn^+ -структур и уровня их легирования, оценить перспективность использования эпитаксиальных методов изготовления таких структур, а также исследовать физические механизмы, ограничивающие возможность повышения допустимой плотности обрываемого тока и пикового напряжения на диоде.

Работа выполнена за счет поддержки гранта Российского Научного Фонда (проект № 14-29-00094).

Библиографический список

1. Котов Ю.А., Месяц Г.А., Рукин С.Н., Филатов А.А. «Твердотельный прерыватель тока для генерирования мощных наносекундных импульсов», Доклады Академии Наук, т.330, №3, с.315-317, 1993г.
2. «Способ создания источника диффузии алюминия в кремний», авт. свид. СССР № 176989, приоритет от 6 июля 1964г, авторы И.В. Грехов, И.А. Линийчук, Л.В. Лебедева, В.П. Тучкевич, В.Е. Челноков, В.Б.Шуман, Н.И. Якивчик.
3. С.Н. Рукин, С.Н. Цыранов «Влияние объемного заряда на процесс субнаносекундного обрыва тока в мощных полупроводниковых диодах», ЖТФ, т.79, вып.11, с.30-35, 2009г.
4. С.Н. Рукин, С.Н. Цыранов «Численное моделирование процесса субнаносекундного обрыва тока в мощных полупроводниковых диодах», ФТП, т.43, вып.7, с.989-995, 2009г.
5. И.В. Грехов, А. Г. Люблинский, И.А. Смирнова «Исследование процесса наносекундного обрыва тока с высокой плотностью в SOS-диодах», ЖТФ, т.85, вып.10.