

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

© И.В. Грехов, А.Г. Люблинский, Е.И. Белякова

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

(Поступило в Редакцию 2 июля 2015 г.)

Полупроводниковый диодный наносекундный размыкатель тока с плотностью до десятков kA/cm^2 (SOS-диод) представляет собой кремниевую $p^+p^+Nn^+$ -структуру, создаваемую путем одновременной глубокой ($\sim 200 \mu\text{m}$) диффузией в кремний n -типа проводимости алюминия и бора с одной стороны пластины и фосфора с другой. При работе в SOS-режиме через диод пропускается короткий импульс прямого тока, а затем прикладывается быстронарастающий импульс обратного напряжения, протекающий при этом импульс обратного тока сопровождается выносом инжектированных дырок и образованием движущегося к p^+N -переходу плазменного фронта в p^+ -слое. Когда концентрация дырок в потоке превышает уровень легирования p^+ -слоя, в этом слое возникает область объемного заряда, сопротивление диода резко возрастает и ток переходит во включенную параллельно диоду цепь нагрузки.

Приведены первые результаты исследования альтернативной конструкции SOS-диода, которая создавалась путем короткой одновременной диффузии на глубину $60\text{--}80 \mu\text{m}$ бора и фосфора с противоположных сторон кремниевой пластины p -типа проводимости. В такой p^+pn^+ -структуре после пропускания короткого импульса прямого тока и приложения затем импульса обратного напряжения образующийся в p^+ -области плазменный фронт движется к p^+p -границе по p^+ -области с высоким уровнем легирования, т.е. с малым сопротивлением. После пересечения этой границы фронт переходит в область с низким уровнем легирования, где концентрация дырок в потоке оказывается намного выше этого уровня и сразу формируется область объемного заряда, приводящая к переходу тока в нагрузку. Экспериментально показано, что в примерно равных условиях время обрыва тока в таком p -SOS-диоде примерно вдвое меньше, чем в обычных n -SOS-диодах, и существенно меньше коммутационные потери, а технология изготовления намного проще. Намечены пути оптимизации конструкции полупроводниковой структуры p -SOS-диодов для дальнейшего повышения быстродействия.

Введение

Возможность быстрого размыкания тока с плотностью в десятки kA/cm^2 при переключении с прямого смещения на обратное в кремниевом диоде с глубоким ($150\text{--}200 \mu\text{m}$) pN -переходом была впервые показана в [1]. Этот эффект был назван SOS-эффектом (SOS — Semiconductor Opening Switch); он реализуется в кремниевых $p^+p^+Nn^+$ -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 $7 \cdot 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 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 $\sim 1 \cdot 10^{21} \text{cm}^{-3}$; таким образом, диффузионный p -слой состоит из двух частей: высококонцентрированного p^+ -части, созданной диффу-

зией бора, и низкоконцентрированной p' -части, созданной обгоняющей бор диффузией алюминия. С противоположной стороны пластины диффузионный n^+ -слой, создаваемый одновременной диффузией фосфора, имеет примерно такую же толщину, как и p^+ -слой. Принципиальной особенностью конструкции описанного выше n -SOS-диода является очень большая ($180\text{--}200 \mu\text{m}$) толщина p^+p' -слоя, получаемого путем одновременной длительной термодиффузией бора и алюминия при температуре до 1300°C . При работе в SOS-режиме через $p^+p^+Nn^+$ -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 напряжения; нарастающий при этом импульс обратного тока сопровождается выносом 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

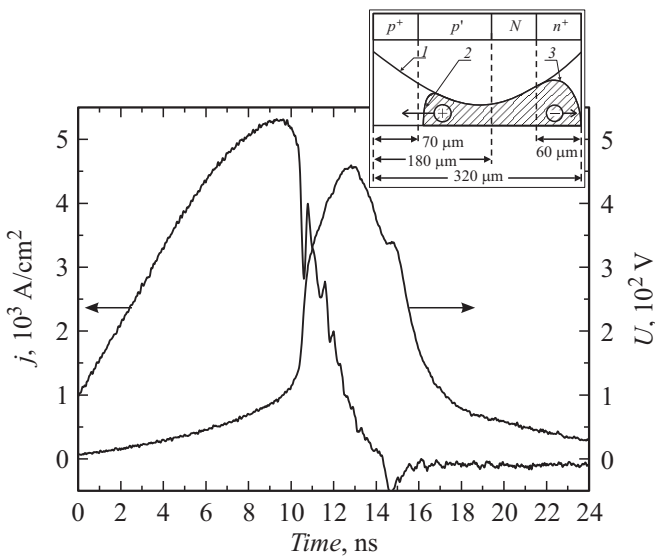


Рис. 1. Осциллограммы обрыва тока и нарастания напряжения в SOS-диоде на основе кремния с *n*-типом проводимости (*n*-SOS) с конструкцией полупроводниковой структуры, показанной на врезке.

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.

Рабочая плотность тока в момент обрыва в SOS-диоде составляет единицы и даже десятки кА/см². 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 в SOS-диоде, конструкция полупроводниковой структуры которого, показана на врезке рис. 1. Структура выполнена на кремнии *N*-типа проводимости с $\rho = 40 \Omega \text{ cm}$, глубина *p*⁺*p'**N*-перехода 180 μm, *p*⁺*p'*-перехода 70 μm, *n*⁺*N*-перехода 70 μm, ширина *N*-области 70 μm, общая толщина структуры 320 μm. „Накачка“ плазмы во всех экспериментах осуществлялась импульсом прямого тока с длительностью 40 ns и амплитудой 1800 А/см², а „выкачка“ — быстронараста-

ющим импульсом обратного тока, длительность которого определялась развитием SOS-процесса обрыва тока. Как видно на рис. 1, в этом режиме при максимальной величине плотности тока выкачки ~ 5200 А/см², время спада тока составляет ~ 4 ns, амплитуда напряжения ~ 450 V и „пьедестал“ напряжения ~ 100 V.

SOS-диод на основе *p*-кремния

Скорость формирования ООЗ, определяющая динамику процесса размыкания тока в SOS-диоде при выключении, зависит от многих факторов — параметров режима „накачки“ и „выкачки“ плазмы, геометрических размеров слоев *p*⁺*p'**Nn*⁺-структуры, уровня их легирования и др. Относительно невысокая скорость формирования ООЗ связана, возможно, с очень малым градиентом концентрации примеси в сверхглубоком (~ 180 μm) диффузионном *p*-слое. Нами был исследован вариант конструкции *p*-слоя с более резким изменением концентрации, которая далее показана на врезке рис. 3. В этой конструкции *p*⁺*p'*-слои создавались совместной диффузией алюминия и бора на глубину ~ 85 μm в кремний *P*-типа проводимости с удельным сопротивлением $\rho = 40 \Omega \text{ cm}$; одновременно с противоположной стороны создавался *n*⁺-слой диффузией фосфора на глубину ~ 50 μm, общая толщина образца была ~ 220 μm. Концентрация легирующих примесей в диффузионных слоях была 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.

Осциллограмма процесса накачки и выкачки с обрывом тока в такой структуре показана на рис. 2 в крупном масштабе. Накачка производится импульсом прямого то-

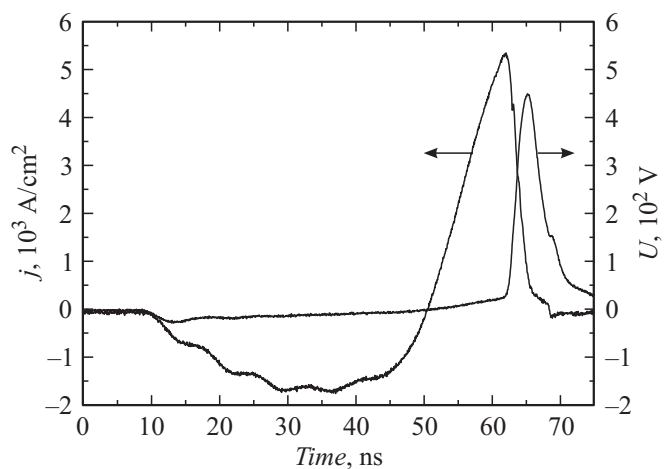


Рис. 2. Осциллограммы (в крупном масштабе) процесса обрыва тока и нарастания напряжения в SOS-диоде на основе кремния с *p*-типом проводимости (*p*-SOS).

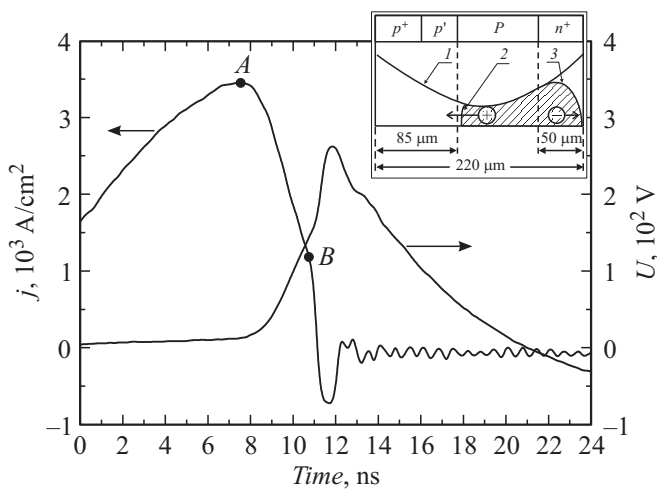


Рис. 3. Осциллограммы процесса обрыва тока и нарастания напряжения в p -SOS-диоде с конструкцией полупроводниковой структуры, показанной на врезке.

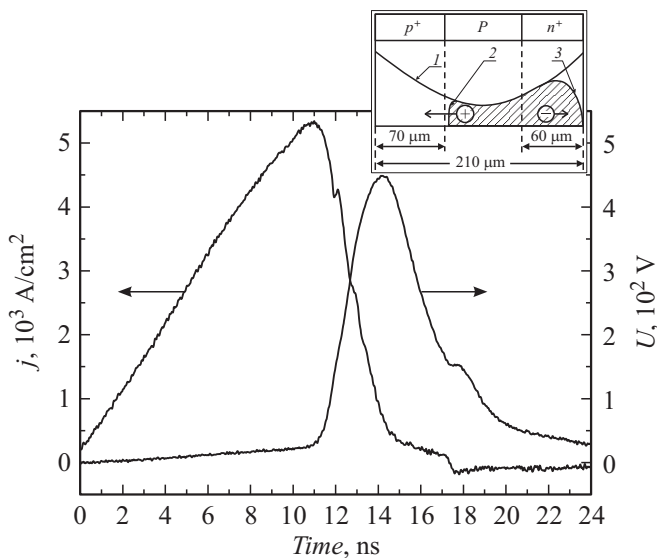


Рис. 4. Осциллограмма процесса обрыва тока и нарастания напряжения в p -SOS-диоде с конструкцией полупроводниковой структуры, показанной на врезке.

ка с длительностью ~ 40 ns и амплитудой ~ 1800 A/cm², затем через диод пропускается импульс обратного тока с большой скоростью нарастания, который примерно через 10 ns резко обрывается. Более детально процесс обрыва тока показан на рис. 3. В начале процесса плазменный фронт 2 перемещается по высоколегированному слою p^+ 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 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 ~ 3500 A/cm² суммарная длительность спада тока составляет ~ 3 ns. Обращает на себя внимание очень быстрый, менее чем за 1 ns, 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. 4. Осциллограмма процесса обрыва тока в структуре, как видно из рис. 4, принципиально отличается от приведенной на рис. 3 отсутствием участка AB, связанного с прохождением плазменным фронтом p' -слоя. Общее время обрыва тока при этом не превышает 2.5 ns при плотности тока выкачки ~ 5200 A/cm², амплитуде напряжения 450 V и „пьедестале“ напряжения ~ 20 V.

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^+P -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. 4, довольно плавный спад тока вследствие обрыва его SOS-процессом заканчивается резким спадом до нуля при плотности тока ~ 200 A/cm² и соответствующим 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.

Заключение

Таким образом, показана возможность создания на основе кремния с дырочным типом проводимости SOS-диода с высоким быстродействием и малыми коммутационными потерями. Полупроводниковая p^+Pn^+ -структура диода создается сравнительно мелкой (60 – 80 μm) диффузией бора и фосфора одновременно с противоположных сторон пластины кремния p -типа проводимости. Увеличение скорости обрыва тока по сравнению с обычным SOS-диодом, в котором плазменный фронт перемещается в диффузионном p' -слое с малым градиентом концентрации легирующей примеси, связано, скорее

всего, с очень резким, почти скачкообразным, изменением концентрации легирующей примеси при переходе от высоколегированного p^+ -слоя к P -слою с малой концентрацией примеси. 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).

Список литературы

- [1] Котов Ю.А., Месяц Г.А., Рукин С.Н., Филатов А.А. // ДАН. Т. 330. № 3. С. 315–317.
- [2] Грехов И.В., Линийчук И.А., Лебедева Л.В., Тучкевич В.П., Челноков В.Е., Шуман В.Б., Якивчик Н.И. // Способ создания источника диффузии алюминия в кремния. Авт. свид. СССР № 176989, 1964.
- [3] Рукин С.Н., Цыранов С.Н. // ЖТФ. Т. 79. Вып. 11. С. 30–35.
- [4] Рукин С.Н., Цыранов С.Н. // ФТП. Т. 43. Вып. 7. С. 989–995.
- [5] Грехов И.В., Люблинский А.Г., Смирнова И.А. // ЖТФ. Т. 85. Вып. 10. С. 104–108.