

01

Численное моделирование наносекундного переключения p -SOS-диода

© Н.И. Подольская, А.Г. Люблинский, И.В. Грехов

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

(Поступило в Редакцию 26 апреля 2017 г.)

Проведено численное моделирование процесса резкого обрыва обратного тока большой плотности при переключении с прямого смещения на обратное в кремниевой $p^+P_0n^+$ -структуре (p -SOS-диоде). Показано, что в такой структуре обрыв тока происходит вследствие формирования двух динамических доменов сильного электрического поля в областях, где концентрация свободных носителей значительно превышает концентрацию легирующей примеси. Первый домен формируется в n^+ -области у n^+P_0 -перехода, а второй в P_0 -области у границы с p^+ -слоем. Второй домен расширяется существенно быстрее и именно он в основном определяет скорость обрыва тока. Достигнуто хорошее согласие расчета с экспериментом при полном учете реальной электрической цепи, определяющей процессы накачки и выкачки электронно-дырочной плазмы.

DOI: 10.21883/JTF.2017.12.45199.2313

Как было показано в [1], в кремниевом диоде со сверхглубоким, около $150\text{--}220\ \mu\text{m}$, залеганием pn -перехода существует возможность быстрого размыкания тока плотностью в десятки kA/cm^2 при переключении с прямого смещения на обратное. При прямом смещении короткий импульс прямого тока заполняет электронно-дырочной плазмой базовые слои диодной $p^+p'N_0n^+$ -структуры (режим „накачки“), а при обратном смещении быстро нарастающий импульс обратного тока выносит электроны и дырки из базовых слоев (режим „выкачки“ плазмы). Если на каком-нибудь участке базового слоя концентрация выносимых свободных носителей превышает уровень легирования, то там формируется область объемного заряда (ООЗ) — домен сильного поля, сопротивление диодной структуры возрастает и ток из нее переходит в нагрузку, подключенную параллельно. Этот эффект был назван SOS-эффектом (SOS — Semiconductor Opening Switch). Численное моделирование SOS-эффекта в $p^+p'Nn^+$ -структуре на основе кремния n -типа проводимости со сверхглубоким $p'N$ -переходом (SOS-диод) было проведено, например, в [2–4] и др.

В [5] была предложена и исследована экспериментально более простая и эффективная структура SOS-диода, а именно $p^+P_0n^+$ -структура на основе кремния p -типа проводимости (p -SOS-диод). В настоящей работе приводятся первые результаты численного моделирования физических процессов в p -SOS-диоде. Конструкция p -SOS-диода показана на рис. 1. Она выполнена на кремнии p -типа проводимости с $\rho = 40\ \Omega \cdot \text{cm}$, глубины залегания p^+P_0 -перехода и P_0n^+ -перехода составляли около $70\ \mu\text{m}$, а ширина P_0 -области составляла около $60\text{--}80\ \mu\text{m}$. Общая толщина структуры составила примерно $210\ \mu\text{m}$. Таким образом, p -слой состоит из двух частей — высоколегированной p^+ -части, полученной диффузией бора с поверхностной концентрацией

$1 \cdot 10^{20}\ \text{cm}^{-3}$, и слаболегированной P_0 -части, уровень легирования которой определялся исходным кремнием. Переход n^+P_0 был получен диффузией фосфора с поверхностной концентрацией $8.5 \cdot 10^{19}\ \text{cm}^{-3}$. Время жизни неосновных носителей в P_0 -слое составляло $\sim 10\ \mu\text{s}$. Эквивалентная схема генератора импульсов, использованная при численном моделировании работы p -SOS-диода и включающая в себя контуры накачки и выкачки, показана на рис. 2. Накачка плазмы осуществлялась импульсом прямого тока с длительностью $\sim 40\ \text{ns}$ и амплитудой плотности тока $\sim 1.7\ \text{kA}/\text{cm}^2$, а выкачка — быстронарастающим импульсом обратного тока длительностью $\sim 12\ \text{ns}$. В этом режиме при плотности тока выкачки в момент обрыва $\sim 5.3\ \text{kA}/\text{cm}^2$ время обрыва тока составляло $\sim 2.5\ \text{ns}$, а максимальное напряжение на нагрузке $\sim 450\ \text{V}$.

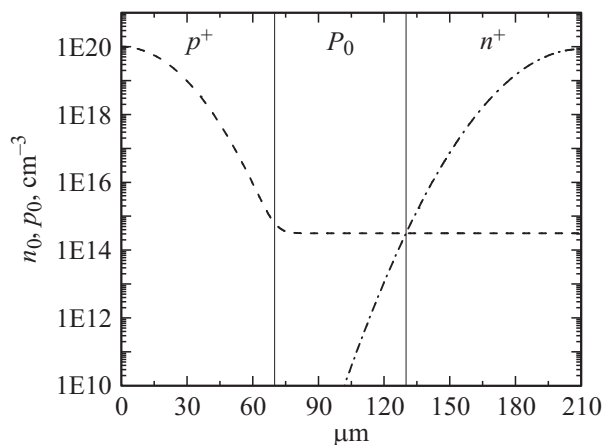


Рис. 1. Профиль легирования p -SOS-диода. Вертикальные линии обозначают границы слоев p^+ , P_0 и n^+ . Штрихпунктирная линия соответствует концентрации электронов, а штриховая — дырок.

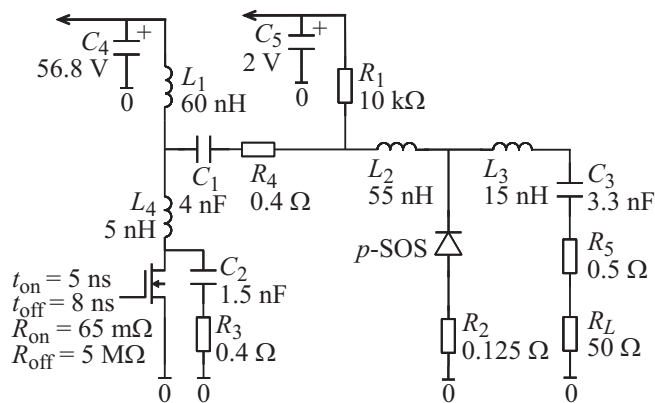


Рис. 2. Эквивалентная схема генератора импульсов с учетом паразитных параметров, использовавшаяся в численном моделировании работы *p*-SOS-диода.

Динамика электронов и дырок в *p*-SOS-структуре моделировалась в одномерном приближении в рамках диффузионно-дрейфовой модели путем совместного решения уравнения Пуассона, уравнений непрерывности и уравнения Кирхгофа для внешней цепи с помощью специализированного программного обеспечения Silvaco [6]. Численное моделирование процессов переключения проводилось в эквивалентной схеме генератора импульсов с учетом паразитных параметров (паразитная индуктивность выводов использующихся MOSFET транзисторов L_4 и эквивалентное последовательное сопротивление конденсаторов R_3 , R_4 и R_5), величины которых были тщательно измерены (приведены на рис. 2). Резистор R_2 соответствует шунту, используемому в эксперименте для регистрации тока, проходящего через *p*-SOS-диод. Учет паразитных параметров в эквивалентной схеме при численном моделировании работы диода оказался необходимым для получения хорошего количественного согласия результатов численного моделирования и эксперимента. Отметим, что наблюдалась сильная чувствительность к малым изменениям не только значений параметров электрической схемы, но и толщин слоев диодной структуры, которые для исследованной в [5] структуре *p*-SOS-диода не измерялись непосредственно. Представленные на рис. 3–5 результаты получены для структуры с толщинами p^+ , P_0 и n^+ -слоев 70, 60 и 80 μm соответственно.

На рис. 3 показаны осциллограммы плотности тока I и напряжения U_R на этапе нарастания и обрыва обратного тока в *p*-SOS-диоде, полученные экспериментально [5]. Также на рис. 3 приведены расчетные кривые плотности тока I и напряжения U_R , полученные в схеме генератора импульсов (рис. 2) с *p*-SOS-диодом. В рамках проведенного одномерного численного моделирования получено приемлемое согласование расчетных и экспериментальных зависимостей плотности тока на диоде от времени и очень хорошее согласование зависимости напряжения на нагрузке от времени. Черными точками

на расчетных кривых плотности тока и напряжения отмечены моменты времени, для которых на рис. 4, 5 показаны распределения концентрации электронов и дырок, а также напряженности электрического поля в *p*-SOS-диоде.

На рис. 4 представлено распределение электронно-дырочной плазмы с высокой плотностью в момент окончания импульса накачки и начала импульса выкачки, а именно в момент времени 48 ns. На рис. 5 продемонстрирована динамика изменения профилей концентраций

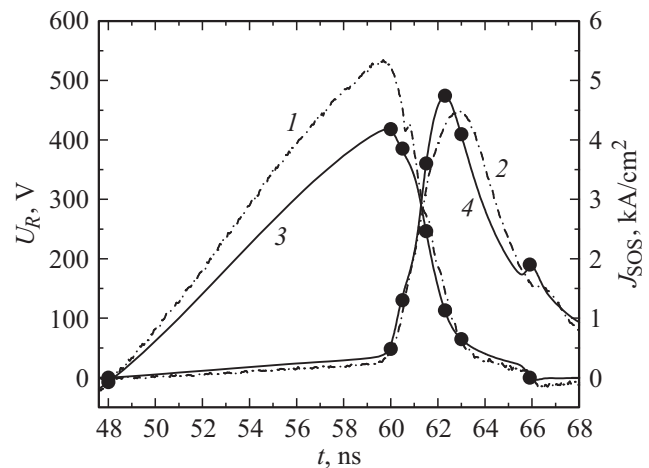


Рис. 3. Осциллограммы, полученные в рамках эксперимента (штрихпунктирные линии) и численного моделирования (сплошные линии). Кривые 1 и 3 соответствуют зависимостям плотности тока в *p*-SOS-диоде от времени, кривые 2 и 4 — напряжения на нагрузке от времени, черные точки обозначают времена, для которых далее приводятся распределения электрического поля и концентраций носителей внутри модельной структуры.

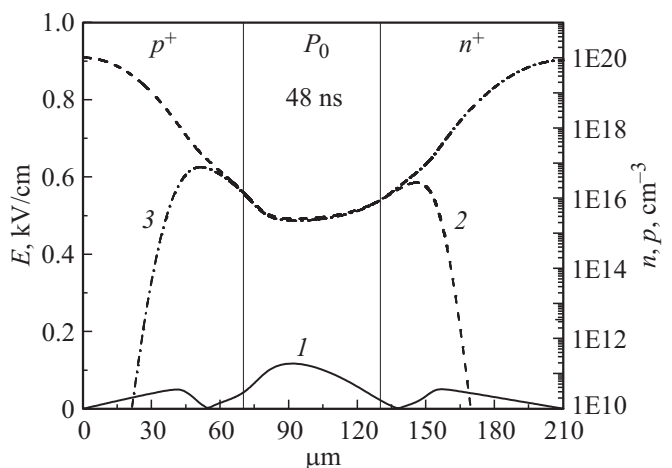


Рис. 4. Распределение электрического поля и концентраций носителей в структуре диода в момент начала процесса выкачки (48 ns). Сплошная черная линия (1) соответствует распределению электрического поля, штриховая линия (2) — распределению концентрации дырок, а штрихпунктирная линия (3) — электронов. Вертикальные линии обозначают границы слоев p^+ , P_0 и n^+ .

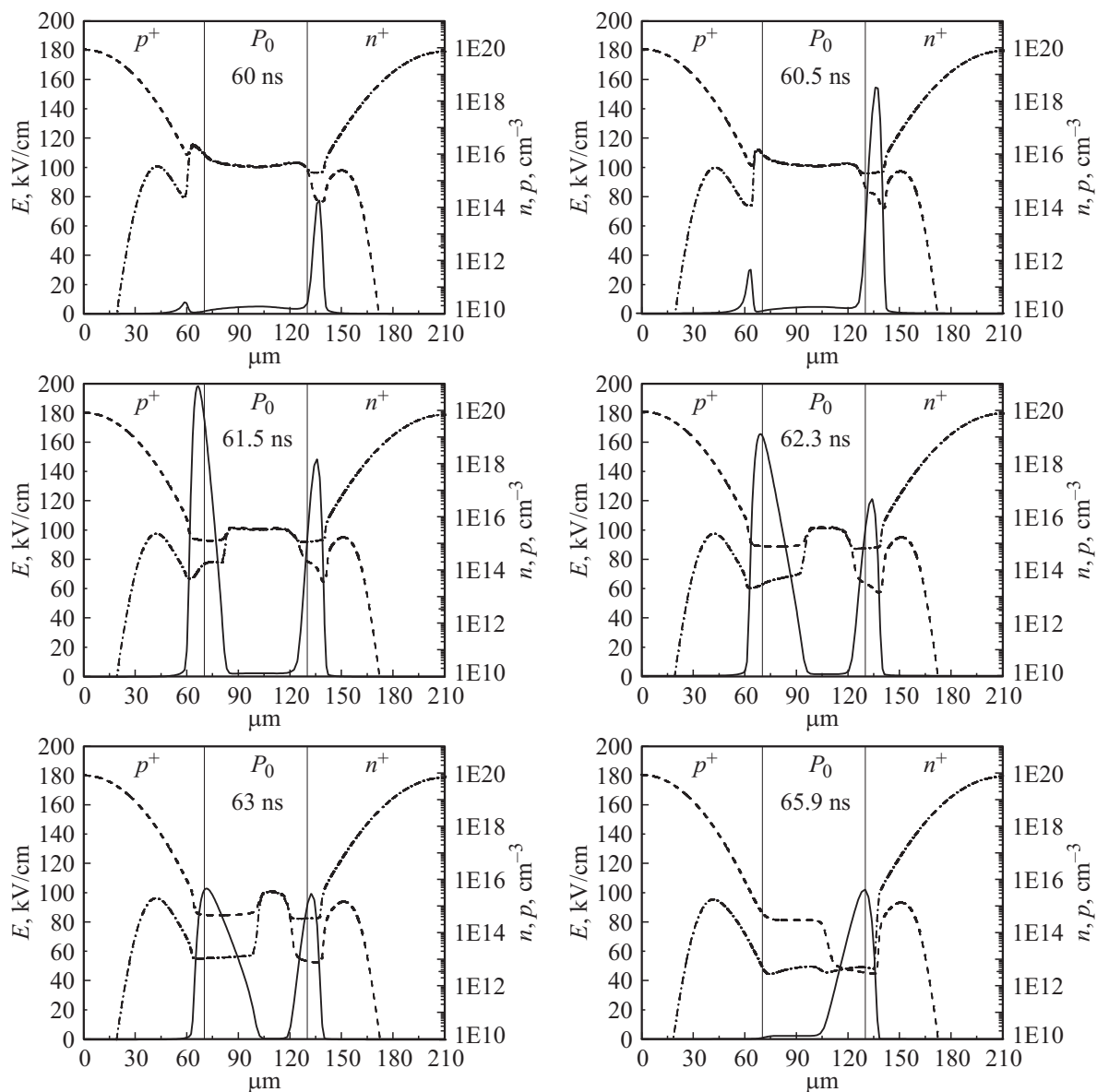


Рис. 5. Распределение электрического поля и концентраций носителей в структуре диода в моменты времени процесса выкачки 60, 60.5, 61.5, 62.3, 63 и 65.9 ns. Сплошная черная линия соответствует распределению электрического поля, штриховая линия — распределению концентрации дырок, а штрихпунктирная линия — электронов. Вертикальные линии обозначают границы слоев p^+ , P_0 и n^+ .

электронов и дырок, а также электрического поля на стадии выкачки в наиболее характерные последовательные моменты времени: 60, 60.5, 61.5, 62.3, 63 и 65.9 ns. Видно, что на момент начала процесса выкачки, т.е. в момент времени 48 ns, в диоде наблюдается довольно слабое электрическое поле. Однако в момент времени 60 ns справа от границы n^+P_0 -перехода в n^+ -области с относительно невысокой концентрацией легирующей примеси начинается формирование ООЗ на свободных электронах, т.е. SOS-эффект. Максимальное электрическое поле в ООЗ ограничено ударной ионизацией и потому не превышает 200 kV/cm. В p^+ -области аналогичный эффект формирования ООЗ на свободных дырках выражен зна-

чительно слабее, однако по мере нарастания плотности тока выкачки (рис. 5 для моментов времени $t = 61.5$ и 62.3 ns) этот эффект становится определяющим и в основном приводит к резкому спаду тока и росту напряжения на приборе. Следует отметить, что n^+P_0 -переход начинает „блокировать“ напряжение в момент времени $t = 65.9$ ns при довольно малой плотности тока. Этот процесс сопровождается небольшим всплеском напряжения и соответственно уменьшением тока, хорошо заметным на рис. 3 в момент времени примерно 66 ns. Поскольку амплитуда и длительность протекания импульса тока через запертый n^+P_0 -переход относительно невелики, этот процесс не приводит к разрушению прибора.

Таким образом, численное моделирование процесса резкого обрыва тока в кремниевой $p^+P_0n^+$ -структуре p -SOS-диода показывает, что обрыв нарастающего импульса обратного тока происходит вследствие формирования динамического домена сильного поля в областях, где концентрация свободных носителей превышает концентрацию легирующих примесей. Сначала один домен формируется в n^+ -области у n^+P_0 -перехода, где концентрация свободных электронов, выносимых из плазмы, превышает концентрацию доноров, а затем в P_0 -области у границы с p^+ -слоем формируется второй домен на свободных дырках. Этот домен расширяется существенно быстрее и именно он в основном определяет скорость обрыва тока. На завершающей стадии процесса при сравнительно малой плотности тока происходит восстановление n^+P -перехода и полный обрыв остаточного тока.

Авторы признательны П.Б. Родину за полезные обсуждения.

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

Список литературы

- [1] Котов Ю.А., Месяц Г.А., Рукин С.Н., Филатов А.А. // ДАН. 1993. Т. 330. Вып. 3. С. 315–317.
- [2] Рукин С.Н., Цыранов С.Н. // ФТП. 2009. Т. 43. Вып. 7. С. 989–995.
- [3] Любутин С.К., Рукин С.Н., Словиковский Б.Г., Цыранов С.Н. // ФТП. 2012. Т. 46. Вып. 4. С. 535–543.
- [4] Engelko A., Bluhm H. // J. Appl. Phys. 2004. Vol. 95. I. 10. P. 5828–5836.
- [5] Грехов И.В., Люблинский А.Г., Белякова Е.И. // ЖТФ. 2016. Т. 86. Вып. 3. С. 106–109.
- [6] SILVACO ATLAS, User guide, <http://www.silvaco.com>