

**Афанасьев А.В., Иванов Б.В., Ильин В.А.,  
Кардо-Сысоев А.Ф., Лучинин В.В., Смирнов А.А.,  
Шевченко С.А.**

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет «ЛЭТИ»

<sup>2</sup>Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН

## **Исследование процесса восстановления диодных лавинных обострителей на основе 4H-SiC при работе в периодическом режиме**

*Проведено исследование процесса восстановления диодных лавинных обострителей на основе 4H-SiC. Показано, что для получения высоких частот следования импульсов в периодическом режиме работы требуется оптимизация профиля легирования в базе.*

**Ключевые слова:** диодный лавинный обостритель, карбид кремния, Synopsys Sentaurus TCAD.

Исследования ударной ионизации в обратносмещенных кремниевых структурах вида  $p^+ - n - n^+$  привели к обнаружению эффекта их сверхбыстрого высокостабильного переключения [1], возникающего при скоростях нарастания напряжения на структурах  $dU/dt \geq 10^{12}$  В/с. При этом напряжение на структуре может до двух раз превышать напряжение стационарного пробоя, после чего резко (за времена менее 100 пс) спадать. В работе [2] показано, что такое сверхбыстрое переключение из непроводящего состояния в проводящее обеспечивается за счет формирования и распространения сверхбыстрой волны ударной ионизации. На основе этого эффекта был разработан новый тип приборов – диодные лавинные обострители, предназначенные для формирования импульсов напряжения мощностью до сотен киловатт с временами переднего фронта 70...100 пс [2].

Несомненный практический представляет собой изучение сверхбыстрого высокостабильного переключения диодных структур и создание коммутатора замыкающего типа на основе новых перспективных материалов, одним из которых является 4H-SiC.

Целью настоящей работы является исследование процесса восстановления диодного лавинного обострителя на основе 4H-SiC, а также оптимизация его профиля легирования с целью снизить время его восстановления и, при этом, оценить предельные параметры прибора при работе в периодическом режиме.

Исследование проводилось методом математического моделирования в среде Synopsys Sentaurus TCAD в диффузионно-дрейфовом приближении с учетом эффектов сужения зоны в сильнолегированных областях, лавинной генерации носителей в сильных полях, неполной ионизации примеси, а также рекомбинации по механизмам Оже и Шокли-Рида. В качестве начального приближения за основу была взята структура из статьи [5], концентрационный профиль легирования которой приведен на рисунке 1 (а). Площадь структуры составила 0,01 мм<sup>2</sup>, напряжение стационарного лавинного пробоя – 1424 В, емкость структуры при полном обеднении базы – 0,87 пФ.

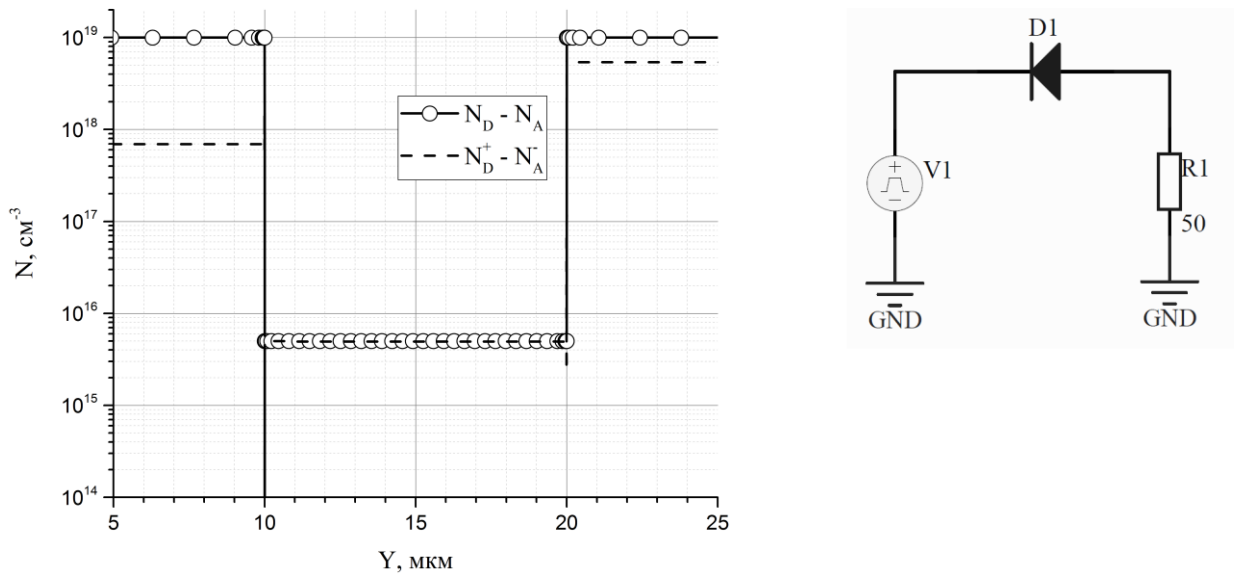


Рис. 1. (а) Концентрационный профиль легирования исходной структуры диодного лавинного обострителя (маркированной кривой обозначено распределение введенной примеси, штриховой кривой – распределение электрически активной примеси); (б) Схема, в которую были включены испытуемые приборы при расчете

Расчет проводился в схеме, состоящей из источника напряжения, испытуемой диодной структуры и нагрузки 50 Ом, соединенных последовательно (рис. 1, б). Временная зависимость напряжения на источнике аппроксимирует форму импульсов, получаемых в генераторах СКИ на основе высоковольтных дрейфовых диодов с резким восстановлением [3, 4]. Так, напряжение на генераторе медленно нарастает от 0 до 200 В за 1 нс, после чего скорость нарастания напряжения на генераторе резко увеличивается, а само напряжение возрастает от 200 В до 4000 В за 200 пс при скорости нарастания 19 В/пс. После достижения своего максимального значения напряжение на генераторе поэтапно спадает сначала до 200 В за 200 пс, а затем до 0 В за 1 нс. Описанный процесс повторяется с периодом  $T = 22,4$  нс.

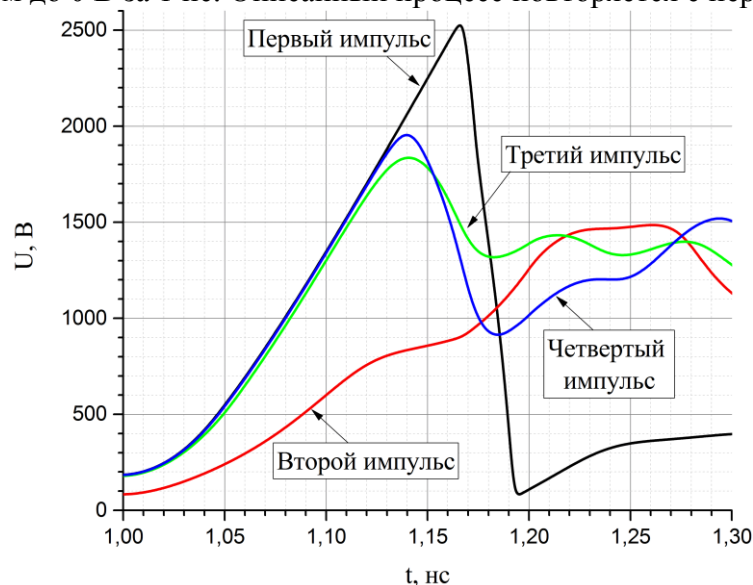


Рис. 3. Процессы переключения структуры с  $n$ -базой для первых четырех импульсов в пакке

На рисунке 3 приведены процессы переключения структуры с  $n$ -базой для первых четырех импульсов. К моменту времени  $t = 1,165$  нс (первый импульс) напряжение на обострителе D1 составляет  $U_{D1 \text{ макс}} = 2516$  В, что превышает напряжение статического пробоя в

1,75 раза. По достижении своего пикового значения напряжение на приборе резко падает до  $U_{DI \text{ мин}} = 84 \text{ В}$  за  $\Delta t = 29$  пикосекунд, что и соответствует процессу его перехода в проводящее состояние при средней скорости изменения напряжения на приборе  $dU/dt = 84 \text{ В/пс}$ .

Процессы восстановления ДЛЮ из проводящего состояния в непроводящее (исходное), а также вывода сгенерированной неравновесной электронно-дырочной плазмы (ЭДП) приведены на рис. 4 и 5. Судя по характеру процесса вывода ЭДП можно заключить, что он происходит по амбиполярному механизму, аналогично выводу ЭДП, инжектированной в базовые области дрейфовых диодов с резким восстановлением на этапе накачки диода [4].

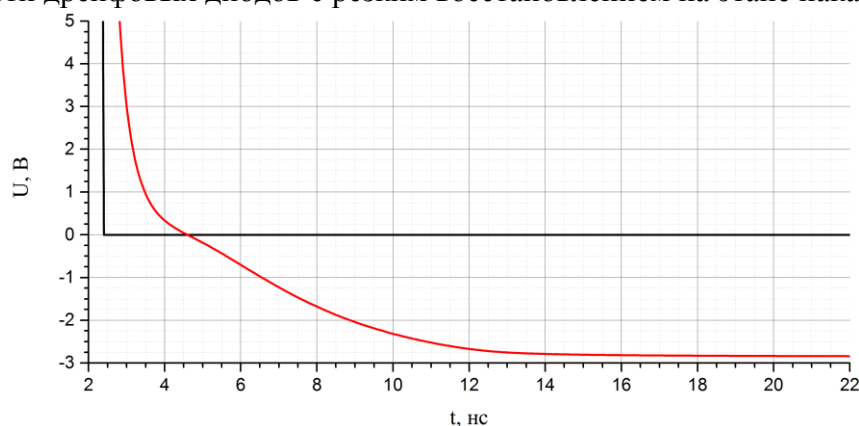


Рис. 4. Процесс восстановления ДЛЮ с *n*-базой после переключения

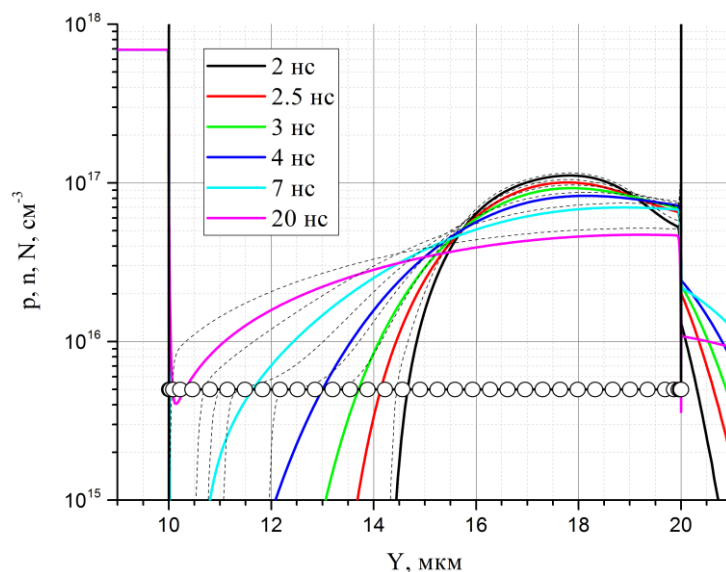


Рис. 5. Распределения дырок (сплошные цветные кривые), электронов (штриховые кривые) и концентрационный профиль легирования (маркированная кривая) в ДЛЮ с *n*-базой в процессе вывода неравновесных носителей

По виду распределений носителей в базе (рис. 5) можно заключить, что к моменту  $t = 20 \text{ нс}$  вся база прибора оказывается заполнена неравновесными носителями. В силу присутствия носителей в базе к началу следующего импульса на источнике  $U_{V1}$ , в базовой области не будет наблюдаться необходимых для формирования и распространения волны ударной ионизации условий, и, следовательно, переключения прибора не произойдет, что подтверждается видом второго импульса (рис. 3).

С учетом того, что механизмы вывода плазмы в ДЛЮ и в ДДРВ аналогичны, требуется оптимизация профиля легирования ДЛЮ с целью расположить *p-n* переход в месте смыкания концентрационных волн истощения, которые формируются в начале процесса экстракции неравновесных носителей на краях базовой области и двигаются по направлению к *p-n*

переходу по мере их вывода. Описанная модификация структуры возможна за счет добавления слаболегированной базы  $p$ -типа толщиной  $W_p = 8$  мкм в конструкцию обострителя при сохранении общей толщины базы диодной структуры  $W = 10$  мкм.

Рисунки 6 и 7(а) демонстрируют, как сдвиг  $p$ - $n$  перехода к сильнолегированной  $n^+$ -подложке позволил ускорить процесс восстановления прибора. Так, время его восстановления составило 5 нс и к моменту  $t = 20$  нс структура готова к следующему циклу работы.

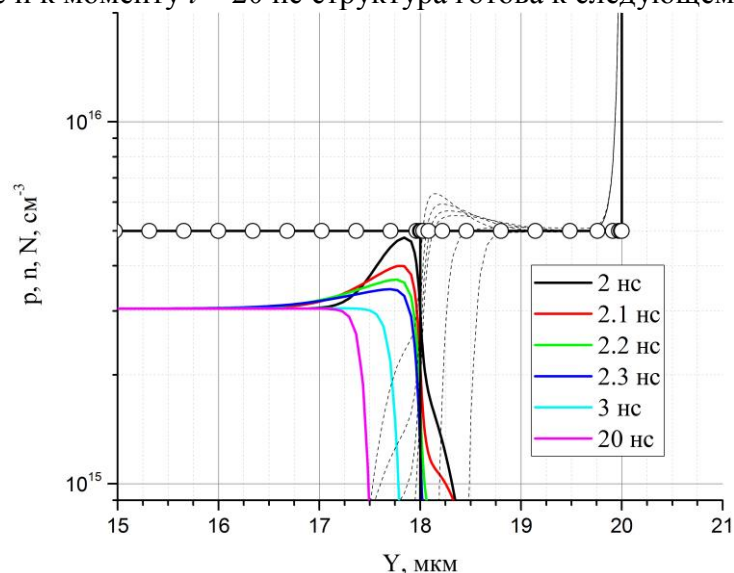


Рис. 6. Распределения дырок (сплошные цветные кривые), электронов (штриховые кривые) и концентрационный профиль легирования (маркированная кривая) в базе ДЛЮ со смещенным  $p$ - $n$  переходом в процессе вывода неравновесных носителей

Для ускорения процесса восстановления прибора с целью повысить частоты следования обостряемых импульсов также представляется возможным приложение к прибору небольшого обратного смещения (до 50 В). Переходные процессы восстановления обострителя с толщинами базовых областей  $W_p = 8$  мкм и  $W_n = 2$  мкм при наличии обратного смещения  $U_{обр} = 50$  В и в его отсутствие приведены на рис. 7 (а, б).

По данным рисунка 7(б) можно заключить, что при приложении обратного смещения  $U_{обр} = 50$  В время восстановления ДЛЮ составило 0.5 нс, что, в свою очередь, позволило уменьшить период следования импульсов до 3,4 нс.

Зависимость напряжения на обострителе  $U_{D1}$  от времени в периодическом режиме работы при периоде следования  $T = 3,4$  нс показана на рис. 8. Из приведенных данных можно заключить, что в периодическом режиме работы переключение прибора высокостабильно: напряжение перед переключением составляет 2384 В, а времена переключения составляют 30 пикосекунд для всех случаев. Остаточное напряжение после переключения прибора оценивается в 60 В, а средние скорости изменения напряжения при этом составили 78 В/пс.

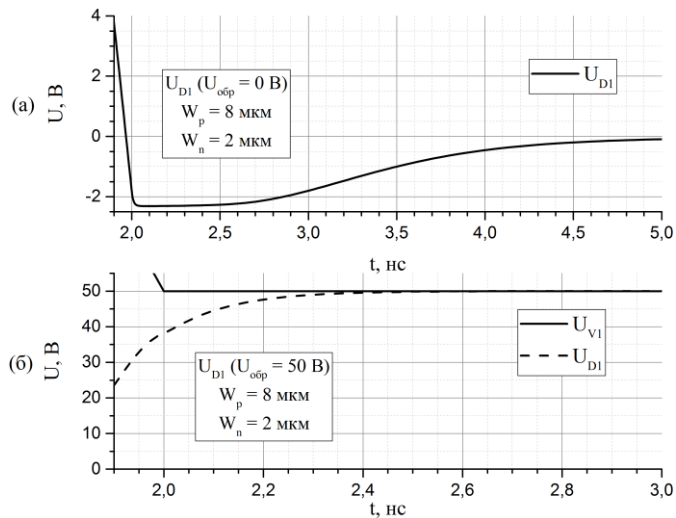


Рис. 7. Процессы восстановления ДЛЮ со смещенным р-п переходом в отсутствие обратного смещения (а) и при наличии обратного смещения  $U_{обр} = 50$  В (б)

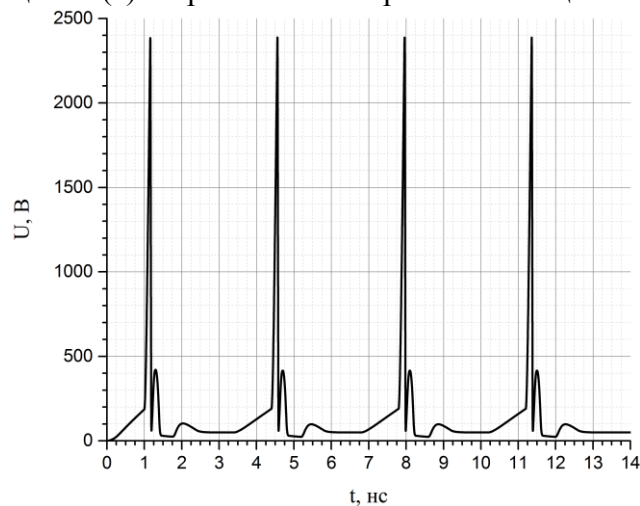


Рис. 8. Зависимость от времени напряжения на ДЛЮ при работе в периодическом режиме при наличии обратного смещения  $U_{обр} = 50$  В и периоде  $T = 3,4$  нс

Показано, что экстракция неравновесной электронно-дырочной плазмы из базы диодных лавинных обострителей происходит по амбиполярному механизму, поэтому в базовых областях ДЛЮ целесообразным является формирование профилей легирования аналогичных профилям в ДДРВ, что позволяет значительно ускорить процесс восстановления прибора с времени более 20 нс (для структуры с  $n$ -базой) до 0.5 нс для структуры со сдвинутым к  $n^+$ -подложке  $p$ - $n$  переходом и при наличии обратного смещения 50 В. Проведенный анализ показывает, что время восстановления обострителей не налагает физических ограничений на частоты следования импульсов. Следует также подчеркнуть, что в реальных генераторах СКИ частоты следования будут определяться исключительно конструкцией теплоотвода.

#### Библиографический список

1. И. В. Грехов, А. Ф. Кардо-Сысоев – Письма в ЖТФ. – 1979. – т. 5, № 15. – С. 950 – 953
2. И. В. Грехов, А. Ф. Кардо-Сысоев, С. В. Шендерей – ПТЭ. – 1981. – В. 4 – С. 135 – 136
3. High Voltage Subnanosecond Silicon Carbide Opening Switch / A. V. Afanasyev, B. V. Ivanov, V. A. Ilyin, et. al. // Proc. 57<sup>th</sup> International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering RTUCON 2016 – 2016.
4. A Study of a Low-Voltage Drift Step Recovery Diode // A. V. Afanasyev, B. V. Ivanov, V. A. Ilyin, et. al. // Proceedings of the 2017 IEEE North West Russia Section ElConRus 2017 – 2017.
5. SiC-Based  $p^+nn^+$  Diode for Picosecond Semiconductor Closing Switch / Zhang F, Li C. // Chin. Phys. Lett., 2004 – Vol. 21, No. 11. – pp. 2305 – 2307