

*Афанасьев А.В.¹, Иванов Б.В.¹, Ильин В.А.¹, Кардо-Сысоев А.Ф.²,
Лучинин В.В.¹, Смирнов А.А.¹, Шевченко С.А.¹*

*¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ»*

² Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе РАН

Исследование процесса переключения низковольтного карбидокремниевое дрейфового диода с резким восстановлением

Проведено исследование процесса переключения низковольтного карбидокремниевое дрейфового диода (ДДРВ) методом математического моделирования. Рассмотрены эффекты, определяющие скорость переключения. Показана возможность получения скорости нарастания напряжения 2-3 В/пс при коммутации напряжений 30 -100 В.

Ключевые слова: дрейфовый диод с резким восстановлением, карбид кремния, Synopsys TCAD.

Дрейфовые диоды с резким восстановлением используются для формирования коротких импульсов напряжения с амплитудой от десятков вольт до десятков киловольт. При этом ДДРВ на основе кремния, коммутирующие киловольтовые напряжения, показывают скорость нарастания напряжения на одном переходе около 1 В/пс. Для диодов, коммутирующих напряжения десятки вольт, эта величина уменьшается и составляет 0,5–0,7 В/пс [2]. ДДРВ на основе карбида кремния показывают скорости нарастания напряжения 2–4 В/пс в киловольтовом диапазоне, что подтверждено теоретически и экспериментально [1, 3]. Исследования работы низковольтных карбидокремниевых ДДРВ не проводились.

В данной работе проведено моделирование работы карбидокремниевое ДДРВ, рассчитанного на напряжение 30–100 В. Исследование проводилось методом математического моделирования в среде Synopsys Sentaurus TCAD. В модели были учтены эффекты сильного легирования (сужение зоны в сильнолегированных областях структуры), сильной инжекции (Оже-рекомбинация), рекомбинация Шокли-Рида-Холла, лавинная генерация носителей, а также неполная ионизация легирующей примеси. Была синтезирована двумерная математическая модель диодной структуры со слоями $p^+ - p - n^+ - n^{++}$ [3]. Двумерный расчет проводился с целью учесть растекание тока в подложке.

Слои в структуре имели толщины соответственно: 2 мкм, 1 мкм и 1 мкм на n^+ -подложке толщиной 100 мкм, причем концентрации алюминия (для p -слоев) и азота (для n -слоев и подложки) составили 10^{19} см^{-3} , 10^{16} см^{-3} , $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, 10^{19} см^{-3} соответственно. Профиль легирования структуры с распределениями ионизированной донорной и акцепторной примеси приведен на рис.1. Площадь структуры составила $0,0012 \text{ мм}^2$.

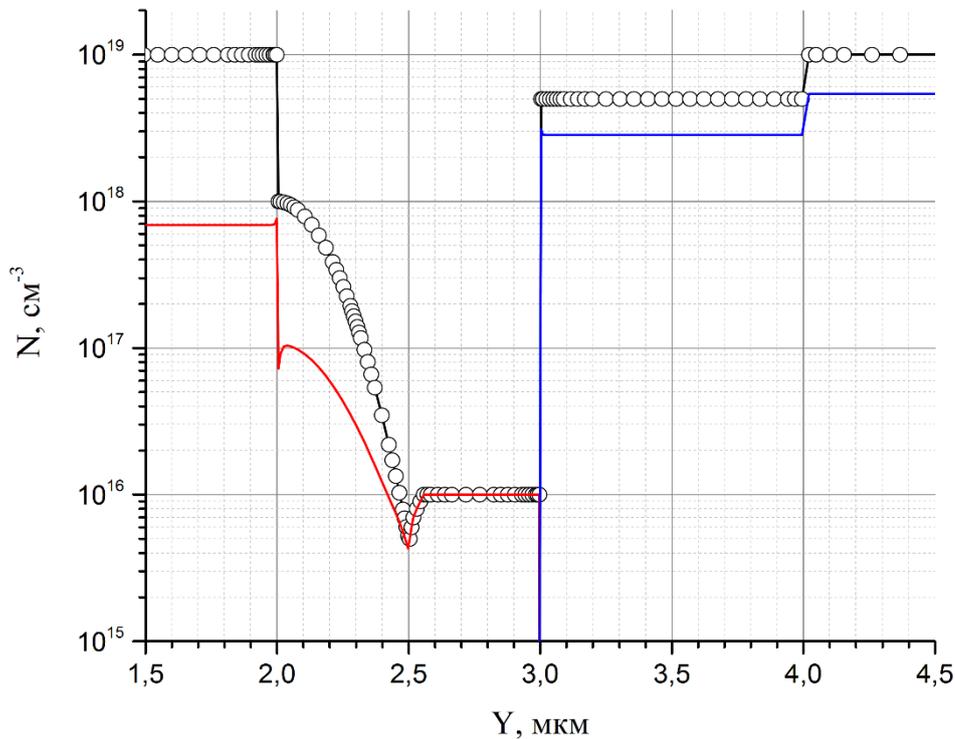


Рис. 1. Профиль легирования структуры диода с гауссовым распределением акцепторов в базе (красная линия – распределение ионизированных акцепторов, синяя – распределение ионизированных доноров, символами обозначена концентрация введенной примеси)

Процесс переключения диода был исследован в схеме, состоящей из последовательно соединенных генератора напряжения, диодной структуры и нагрузки 50 Ом (рис. 2).

В течение 2 нс через диод пропускается линейно нарастающий импульс прямого смещения, в течение которого эмиттерные области диода инжектируют неравновесные носители заряда в базу структуры (стадия накачки). Далее напряжение на генераторе резко меняет свою полярность и остается постоянным, причем сначала происходит вывод из базы инжектированных неравновесных носителей (стадия рассасывания), а по окончании рассасывания – вывод основных носителей с насыщенной скоростью (стадия резкого восстановления обратного сопротивления).

Описанный переходный процесс на диодной структуре с гауссовым распределением акцепторов в базе представлен на рис. 3.

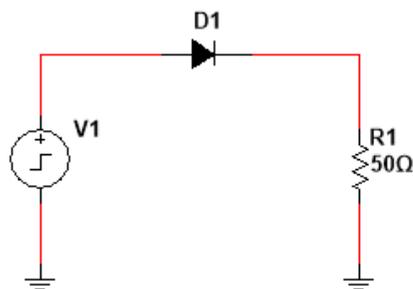


Рис. 2. Тестовая схема с генератором напряжения

Особенностью работы низковольтных ДДРВ является большая потеря заряда в эмиттерах при накачке. Это связано с тем, что диод работает при больших плотностях тока, так как база сильно легирована. Кроме того, из-за эффектов неполной ионизации и сужения зоны снижается потенциальный барьер перехода p^+-p для неосновных носителей (электронов). С одной стороны, это упрощает проникновение электронов в p^+ -эмиттер и приводит к накоплению заряда неосновных носителей в этой области при накачке, но с другой – чем больше электронов проникает в сильнолегированную p^+ -область, тем большее их количество рекомбинирует на омическом контакте к эмиттеру, в результате чего заряд теряется. Таким образом, для уменьшения потерь заряда и уменьшения падения напряжения в процессе вывода неосновных носителей из базы и эмиттеров важной является задача оптимизации профиля легирования в области перехода p^+-p .

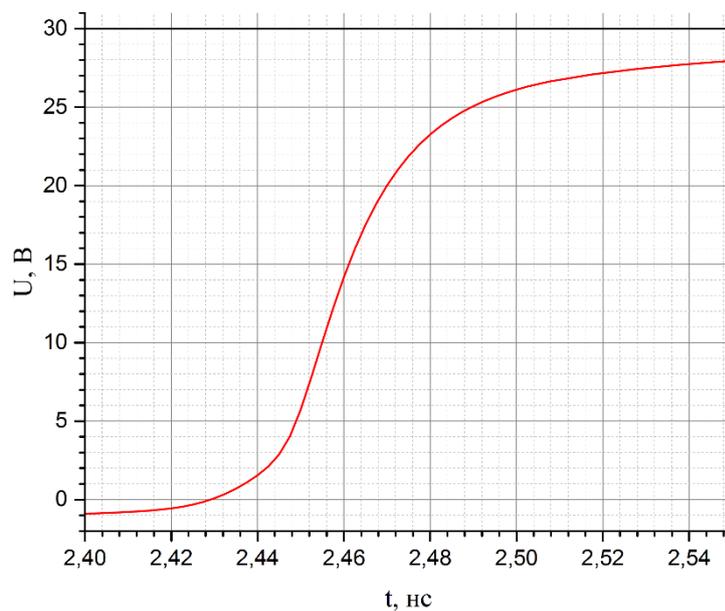


Рис. 3 – Переходный процесс на структуре с гауссовым профилем легирования

После оптимизации профиля легирования было проведено моделирование работы диода в одноконтурной схеме генератора сверхкоротких импульсов напряжения (рис. 4).

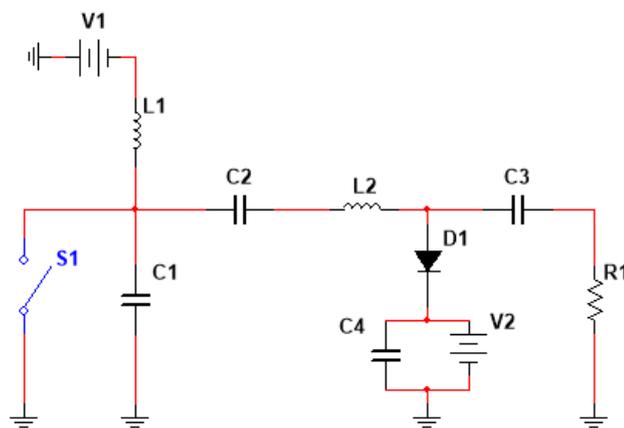


Рис. 4. Одноконтурная схема формирователя СКИ.

Судя по приведенным на рис. 5 и 6 зависимостям, можно заключить, что с помощью карбидкремниевого ДДРВ на нагрузке 50 Ом оказывается возможным формирование импульса напряжения амплитудой 60 В со временем фронта 25 пс при средней скорости нарастания напряжения на фронте 2,4 В/пс.

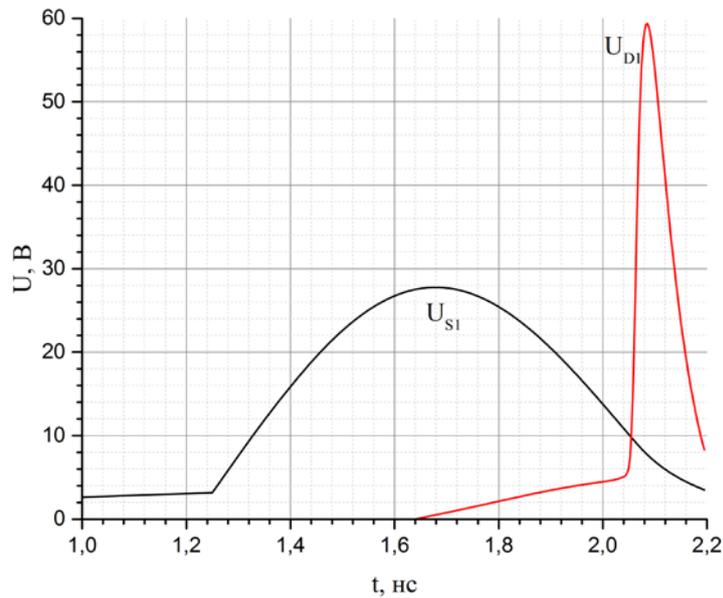


Рис. 5. Зависимость от времени напряжений на ключе S1 (кривая U_{S1}) и на ДДРВ D1 (кривая U_{D1}) в одноконтурной схеме с источником постоянного прямого смещения, приложенного к диоду ($U_1 = 8$ В, $U_2 = 2.5$ В)

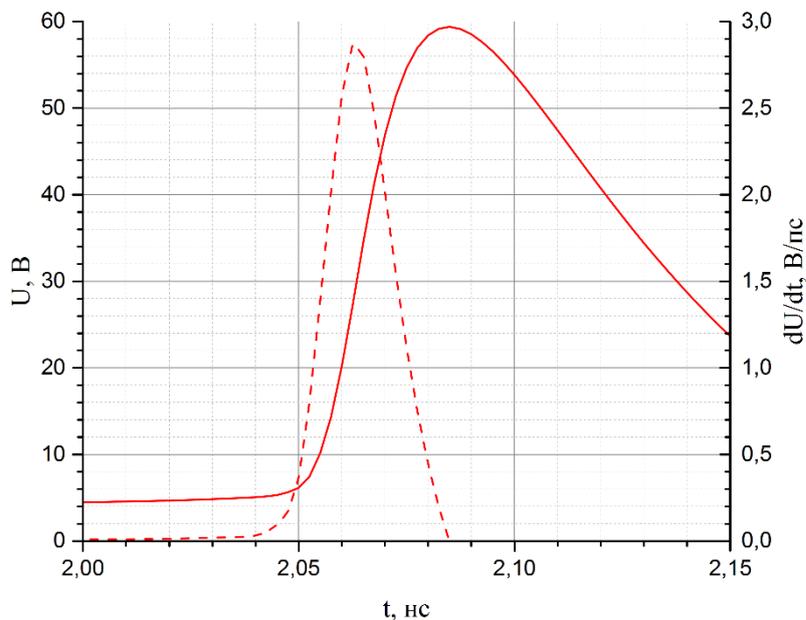


Рис. 6. Импульс на ДДРВ D1, полученный в одноконтурной схеме с источником постоянного прямого смещения, приложенного к диоду ($U_1 = 8$ В, $U_2 = 2.5$ В) (по левой оси – напряжение на структуре, по правой – скорость нарастания напряжения на переднем фронте)

Поточечное дифференцирование переходной характеристики напряжения на диоде показало, что на фронте импульса присутствует участок, где скорость нарастания напряжения максимальна и составляет 3 В/пс.

Приведенная теоретическая оценка скорости нарастания напряжения низковольтных ДДРВ совпадает со значениями скорости нарастания напряжения ДДРВ, предназначенных для коммутации киловольтных напряжений, что подтверждает перспективу применения карбидокремниевых ДДРВ в низковольтных приложениях.

Библиографический список

1. А. С. Кюрегян. Теория дрейфовых диодов с резким восстановлением. ЖТФ. 2004, №74, в. 6, с.57-64.
2. В.В. Волков, В.Н. Вьюгинов, А.А. Зыбин, Б.В.Иванов, А.Ф. Кардо-Сысоев. Дрейфовые диоды с резким восстановлением (ДДРВ) для короткоимпульсной локации. Сборник трудов конференции Электроника и Микроэлектроника СВЧ. Всероссийская конференция. СПб, СПбГЭТУ, июнь 2014, Т.2, С. 193-198
3. А. В. Афанасьев, Б. В. Иванов, В. А. Ильин, А. Ф. Кардо-Сысоев, В. В. Лучинин, А. А. Смирнов. Анализ эффективности 4H-SiC дрейфового диода с резким восстановлением в схеме генератора сверхкоротких импульсов. Сборник трудов Всероссийской конференции «Микроэлектроника СВЧ». СПб, СПбГЭТУ. 2013.