

**А.В. Афанасьев¹, Б.В. Иванов¹, В.А. Ильин¹, А.Ф. Кардо-Сысоев²,
В.В. Лучинин¹, А.А. Смирнов¹, С.А. Шевченко¹**

¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ»

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

Исследование процесса переключения карбидокремниевых дрейфовых диодов с резким восстановлением

Проведено теоретическое и экспериментальное исследование влияния эффектов сильного легирования, сильной инжекции и неполной ионизации примеси на процесс переключения карбидокремниевых дрейфового диода (ДДРВ) с резким восстановлением. Показано, что наибольшее влияние оказывает неполная ионизация легирующей примеси, увеличивая потери заряда, на стадии рассасывания неравновесных носителей.

Ключевые слова: дрейфовый диод с резким восстановлением, карбид кремния

Среди мощных полупроводниковых ключей размыкающего типа ДДРВ являются самыми распространенными из-за своей надежности, простоты изготовления, возможности включения в диодные сборки [1, 2]. При оптимизации структуры ДДРВ с целью обеспечения быстрого переключения необходимо учитывать влияние основных физических эффектов, определяющих потери заряда. Исследование проводилось методом математического моделирования в среде Sentaurus Synopsys TCAD. Была синтезирована одномерная математическая модель изготовленной ранее структуры $p^{++}-p^+-p-n-n^+$ [3]. Слои в структуре имели толщины: 0,5 мкм, 1,5 мкм, 18 мкм, 3 мкм на p^+ подложке толщиной 100 мкм с концентрациями Al (для p-слоев) и N (для n-слоев и подложки): $4 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, $1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, $3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, 10^{19} см^{-3} . Площадь структуры составила 2 мм².

Переходный процесс исследовался в схеме, изображенной на рис. 1. В течение 70 нс через структуру пропускается линейно нарастающий импульс прямого напряжения, заполняющий базу диода неравновесными носителями (стадия накачки). Далее напряжение на генераторе резко меняет свою полярность, после чего сначала следует рассасывание неравновесных носителей в базе, и, по окончании этапа рассасывания, вывод основных носителей из базы с насыщенной скоростью (стадия резкого восстановления обратного сопротивления). По мере вывода основных носителей из базы диода его сопротивление возрастает и к концу процесса все напряжение с генератора приложено к диоду.

В идеальном случае введенный на стадии накачки заряд должен равняться заряду, выведенному на стадии рассасывания. Следовательно, если интеграл от тока на структуре на стадии рассасывания меньше интеграла от тока на структуре на стадии накачки, то в структуре присутствуют потери заряда и это приводит к смещению переходной характеристики. В настоящей работе показано, как именно различные физические эффекты в карбиде кремния влияют на эти потери.

Отправной точкой для исследования послужила идеализированная модель диода, в которой учитывались только насыщение скорости носителей в сильном поле, а также модели подвижности, обусловленные рассеянием носителей на фононах и на ионизированных

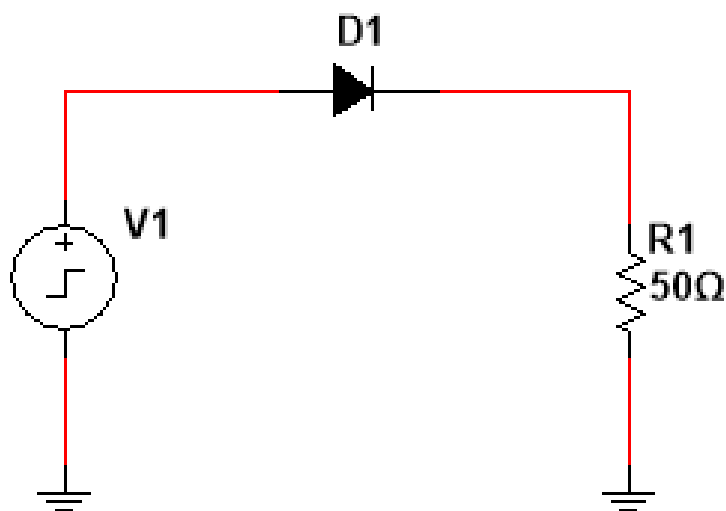


Рисунок 1. Тестовая схема с генератором напряжения

примесях. В этом случае потери заряда отсутствуют (рис. 2, кривая 1). Далее были последовательно подключены модели следующих физических эффектов в карбиде кремния:

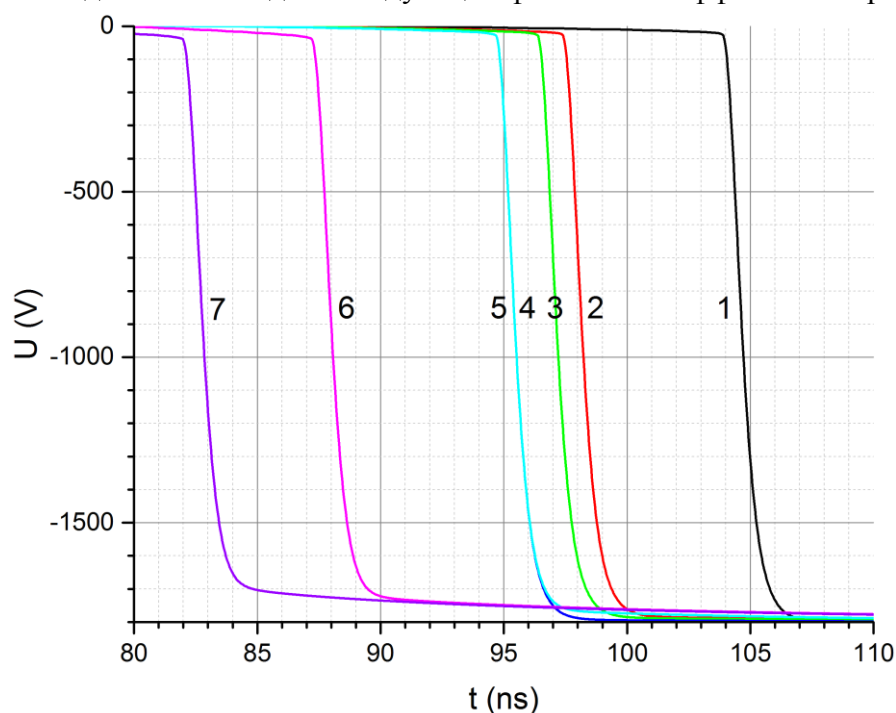


Рисунок 2. Переходные характеристики напряжения на структуре с учетом различных моделей физических эффектов

- сужение зоны при высоких концентрациях примеси (кривая 2);
- рекомбинация Шокли-Рида-Холла (кривая 3);
- Оже-рекомбинация (кривая 4);
- лавинная генерация (кривая 5);
- неполная ионизация легирующей примеси (кривая 6);

– поправка на неполную ионизацию к примесному рассеянию (кривая 7).

По приведенным на рис. 2 переходным характеристикам видно, что скорость переключения во всех случаях остается почти одинаковой, однако по мере подключения моделей потери заряда в структуре растут. Следует обратить внимание на то, что существенный вклад в потери заряда вносит неполная ионизация легирующей примеси (кривая 6).

Отметим, что учет неполной ионизации примеси в модели подвижности, обусловленной примесным рассеянием, также существенным образом сказывается на потерях заряда (кривая 7).

В таблицу 1 сведены характеристики процессов переключения структуры при последовательном подключении моделей. Здесь для каждой из зависимостей рисунка 2 обозначены: $t_{фр}$ - длительность переднего фронта импульса; $t_{зад}$ - задержка переднего фронта относительно начала накачки; dU/dt – скорость нарастания напряжения на фронте импульса; $Q-/Q_+$ - относительные потери заряда.

Таблица 1

| № | $t_{фр}$, нс | $t_{зад}$, нс | dU/dt , В/пс | $Q-/Q_+$ |
|---|---------------|----------------|----------------|----------|
| 1 | 1,22 | 104,475 | 1,2 | 0,99 |
| 2 | 1,27 | 98,0183 | 1,1 | 0,80 |
| 3 | 1,29 | 97,1124 | 1,1 | 0,77 |
| 4 | 1,413 | 95,444 | 1 | 0,73 |
| 5 | 1,4 | 95,444 | 1 | 0,73 |
| 6 | 1,45 | 87,9531 | 1 | 0,51 |
| 7 | 1,54 | 82,7026 | 0,9 | 0,36 |

На рис. 3 рассмотрено влияние на потери заряда неполной ионизации n- области и р- области. Видно, что потери заряда, главным образом, определяет ионизация примеси в p^+ -слое, являющемся эмиттером дырок, что вполне логично, поскольку энергия активации алюминия составляет 0,191 эВ. Так, при комнатной температуре вместо концентрации дырок равной концентрации введенных акцепторов имеем концентрацию дырок на два порядка ниже ожидаемой. Напротив, неполная ионизация в n-слое влияния на потери практически не оказывает.

Результаты экспериментальной проверки, полученных результатов моделирования, показаны на рис. 4 и 5. Работа данной структуры ДДРВ была исследована в схеме формирователя сверхкоротких импульсов (рис. 4). Аналогичная схема была также смоделирована в Synopsys TCAD с учетом всех рассмотренных эффектов. Импульсы на стоке транзистора VT и на нагрузке R1 изображены на рис. 5. Здесь сплошные кривые (1 и 2) – результат моделирования, а символы (1` и 2`) – экспериментальные зависимости.

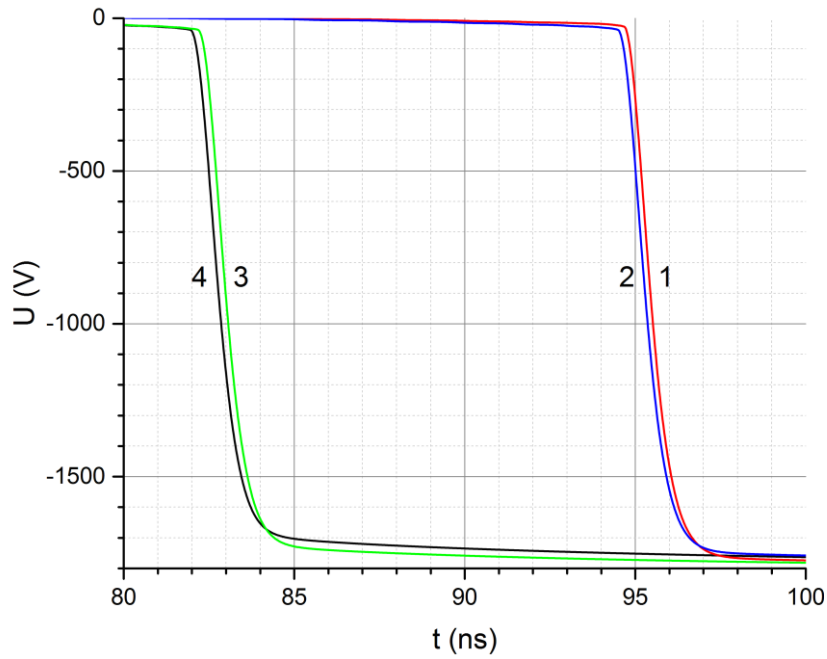


Рисунок 3. Переходные характеристики напряжения на структуре при различных комбинациях ионизации примеси в эмиттерах (кривая 1 – примесь в структуре ионизирована полностью, кривая 2 – неполная ионизация только в n-эмиттере, кривая 3 – неполная ионизация только в p⁺-эмиттере, кривая 4 – вся примесь в структуре ионизирована неполностью)

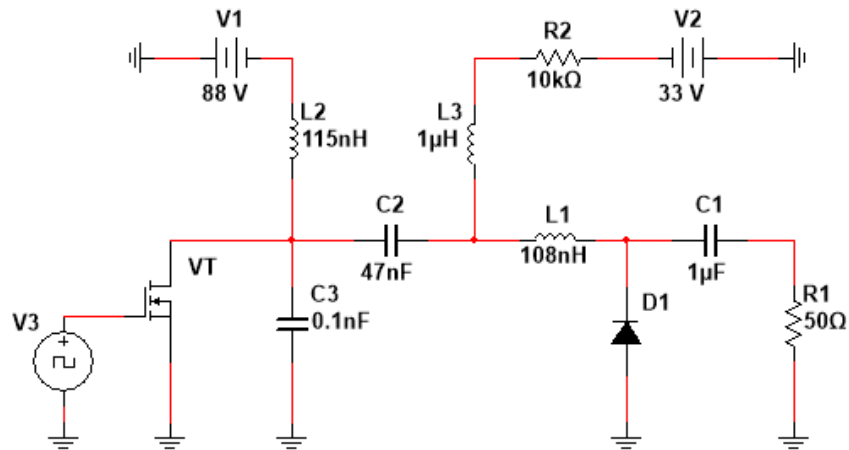


Рисунок 4. Схема формирователя СКИ, использованная в эксперименте.

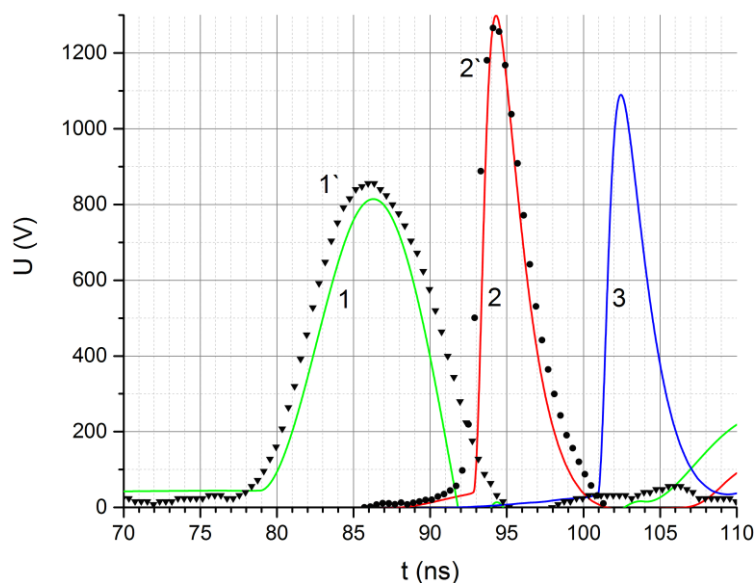


Рисунок 5. Зависимость от времени напряжений на стоке транзистора (кривая 1) и на ДДРВ в случае с учетом всех вышеперечисленных эффектов (кривая 2) и с полной ионизацией примеси (кривая 3). Символами (кривые 1` и 2`) изображены экспериментальные зависимости

Из приведенных на рис. 5 зависимостей 1 и 2 следует, что результат моделирования только при учете всех вышеперечисленных эффектов совпадает с результатами эксперимента. Зависимость 3 на том же рисунке рассчитана в приближении полностью ионизированной примеси. В этом случае импульс напряжения на ДДРВ значительно смещен по отношению к импульсу измеренному экспериментально. Смещение импульса связано со снижением потерь заряда в структуре, как было показано при анализе влияния эффектов на рис. 2. Вместе с этим уменьшилась амплитуда импульса, поскольку сама схема формирователя работает не в оптимальном режиме, то есть после рассасывания основные носители экстрагируются из базы меньшим током.

Проведенный анализ экспериментально и теоретически подтверждает принципиальную важность учета эффектов сильной инжекции, сильного легирования и, прежде всего, неполной ионизации примеси при анализе процессов в приборах на карбиде кремния.

Библиографический список

1. А. С. Кюрегян. Теория дрейфовых диодов с резким восстановлением. ЖТФ. 2004, №74, в. 6, с.57-64.
2. В. И. Брылевский, И. В. Грехов И. В., В. М. Ефанов, А. Ф. Кардо-Сысоев, И. Г. Чашников, Д. И. Шеметило. Эффект быстрого восстановления обратного напряжения на симметричной р⁺р-n-p⁺-структуре. ЖТФ, №58, в. 11, 1988, Ленинград.
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.