

Влияние внешних параметров на процесс переключения при задержанной ионизации в кремниевой $p^+ - n - n^+$ -структуре

© А.Ф. Кардо-Сысоев¹, М.Н. Черенёв^{1,2}, А.Г. Люблинский¹, И.А. Смирнова¹,
Ш.А. Юсупова¹, Е.И. Белякова¹, М.И. Векслер¹

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“ им. В.И. Ульянова (Ленина),
197022 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: mncherenev@mail.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 24 июля 2024 г.

В окончательной редакции 14 августа 2024 г.

Принята к публикации 14 августа 2024 г.

Разработана новая методика измерения быстропротекающих процессов в полупроводниковых диодах, переключающихся в проводящее состояние путем подачи высоковольтного быстронарастающего импульса, при высоких значениях приложенного постоянного напряжения. Исследованы процессы задержанной ударной ионизации в структурах $p^+ - n - n^+$ -типа с толщинами базовых n -областей порядка 100 и 410 мкм. Экспериментально показано улучшение характеристик переключения при увеличении как постоянной составляющей обратного смещения, так и скорости нарастания приложенного импульса напряжения для структур с толстой базой. Достигнута скорость переключения одиночной структуры 42.7 кВ/нс.

Ключевые слова: диодный лавинный обостритель (ДЛО), задержанная ударная ионизация, субнаносекундные импульсы напряжения, силовые диоды.

DOI: 10.61011/FTP.2024.06.58947.6925

1. Введение

Для ряда областей науки и техники, таких как сверхширокополосные (СШП) системы радиолокации и связи [1,2], плазмохимические технологии с использованием холодной плазмы, например реформинг [3–5], исследования в области биологии [6–8], плазменного воспламенения и горения [9–12], требуются генераторы импульсов высокого напряжения (от единиц киловольт) наносекундной и субнаносекундной длительности, способные работать на частотах повторения от сотен герц до мегагерц, обладающие высоким КПД, большим сроком службы, компактным исполнением, а также низким джиттером для СШП систем. Одновременно все эти требования могут быть выполнены исключительно при использовании полупроводниковой элементной базы.

Двухэлектродные полупроводниковые приборы на основе кремния, использующие явление задержанной ударной ионизации, являются одними из наиболее быстродействующих ключей замыкающего типа [13–15]. Они могут находиться в двух состояниях: блокирующем (закрытом, с высоким сопротивлением) и проводящем (открытом, с низким сопротивлением). Время перехода между этими состояниями лежит в субнаносекундном диапазоне. В закрытом состоянии приборы блокируют высокое напряжение — киловольт и выше, а в открытом — должны пропускать импульсные токи в десятки и сотни ампер. Изучению диодных структур $p^+ - n - n^+$ -типа — с аббревиатурой ДЛО (диодный лавинный обостритель), или англ.: SAS (silicon avalanche shaper) — посвящено много работ как экспериментального, так

и теоретического характера [16–19], однако детального представления о физическом механизме задержанной ударной ионизации до сих пор не выработано. Дополнительную неопределенность при анализе работы приборов этого класса вносит возможность развития пространственных и временных неустойчивостей различного вида. В экспериментальных работах [20–25] изучался ограниченный диапазон изменения внешних параметров, что не позволяло получить полную картину и построить достоверную физическую модель исследуемого механизма. Также ограничения связаны с техническими трудностями точного измерения высоких импульсных напряжений и токов в требуемом временном диапазоне при высоком постоянном напряжении смещения. В данной работе предложена новая методика измерения быстропротекающих процессов переключения, позволяющая преодолеть эти ограничения.

2. Новая методика измерения быстропротекающих процессов переключения

Для проведения экспериментов по исследованию быстропротекающих процессов в полупроводниках, таких как резкий обрыв тока в дрейфовых диодах с резким восстановлением (ДДРВ) в результате накопления и рассасывания электронно-дырочной плазмы при больших плотностях тока или ударно-ионизационные явления, обычно используется испытательный стенд, описанный в работах [1,2,21–25]. В ходе проведения этих эксперимен-

тов необходимо: 1) сформировать импульс напряжения нужной формы U_g ; 2) подать сформированный импульс на образец; 3) измерить импульсы напряжения на образце и тока через него.

Сформированный импульс напряжения подается на образец, подключенный последовательно с нагрузкой, в роли которой выступает набор высоковольтных коаксиальных аттенуаторов с входным импедансом 50 Ом. Таким образом, ток через образец равен $I = U_{load}/50 \text{ Ом}$. Входной импульс U_g , формируемый генератором, регистрируется частотнокомпенсированным резистивным делителем, а напряжение на образце равно $U = U_g - U_{load}$.

Однако практический диапазон применения данной схемы при больших токах (сотни ампер) и напряжениях (киловольты), а также при требуемых малых временных разрешениях (десятки пикосекунд) существенно ограничен. Большие токи, напряжения и мощности требуют увеличения размеров элементов стенда, в том числе увеличения размеров резистивного делителя для измерения формы сигнала напряжения, подаваемого на образец, что приводит к увеличению паразитных параметров и ухудшению временного разрешения. Кроме того, для проведения всесторонних исследований к образцу необходимо прикладывать высокое постоянное напряжение смещения, что невозможно без добавления в схему дополнительных элементов, которые также обладают паразитными параметрами.

Исходя из сказанного выше, было решено отказаться от данного способа проведения экспериментов и разработать новую методику. Далее представлены основные факторы, которые учитывались при построении нового широкополосного испытательного стенда, свободного от вышеперечисленных недостатков:

1) корректные измерения могут быть выполнены только если обеспечить в испытательном тракте ТЕМ волну (ТЕМ — Transverse Electro Magnetic) с поперечной конфигурацией электромагнитного поля. ТЕМ волна не имеет дисперсии и обеспечивает наименьшее искажение формы импульса. Для ослабления высших (не ТЕМ) типов волн необходимо выбирать волноводы соответствующих конфигураций;

2) дополнительную погрешность могут внести паразитные моды, которые возникают на неоднородностях (резких изменениях геометрии) волновода. Их влияние может быть представлено в виде эквивалентных паразитных емкостей и индуктивностей. Для уменьшения их влияния все элементы измерительной цепи должны быть согласованы с волноводом и обеспечивать наименьшее искажение формы основной ТЕМ конфигурации электрического поля;

3) необходимо стремиться к уменьшению размеров элементов измерительной цепи, однако их минимальные размеры ограничиваются необходимостью обеспечить достаточный уровень электрической прочности для проведения испытаний при высоких постоянных и импульсных напряжениях;

4) оптимальными с точки зрения принятого для измерительной аппаратуры стандарта, высокочастотных потерь и уровня передаваемой мощности являются линии передачи с волновым сопротивлением $\rho = 50 \text{ Ом}$. Поэтому все остальные элементы высокочастотной цепи конструируются исходя из условия согласования с такими линиями передачи.

На рис. 1 представлена эквивалентная схема испытательного стенда для исследования процесса переключения при задержанной ударной ионизации в высоковольтных структурах. Стенд позволяет измерять ток и напряжение на структуре без использования шунта и резистивных делителей, что дает возможность подавать на структуру высокое напряжение, как импульсное, так и постоянное (несколько киловольт), и при этом минимизировать возникновение высших мод. Измерительный стенд состоит из генератора импульсов высокого напряжения, двух коаксиальных кабелей T_1 и T_3 с волновым сопротивлением $\rho = 50 \text{ Ом}$ и микрополосковой линии T_2 с волновым сопротивлением $\rho = 50 \text{ Ом}$. В качестве нагрузки используется набор высоковольтных аттенуаторов фирмы Barth Electronics, Inc. с полосой пропускания 18 ГГц. Генератор импульсов высокого напряжения построен на дрейфовых диодах с резким восстановлением (ДДРВ) и позволяет формировать импульсы напряжения амплитудой 1–4 кВ, шириной на полувысоте 1.6 нс и фронтом 600 пс. Коаксиальный кабель T_1 имеет длину 150 см, что соответствует времени пробега волны в одном направлении $\sim 7.5 \text{ нс}$. Кабель T_3 длиной 20 см соединяется с кабелем T_1 через согласованную полосковую линию T_2 длиной 7 см, в разрыв которой устанавливается исследуемый образец. Достаточно длинный коаксиальный кабель T_1 позволяет разнести во времени первоначальный поступающий на образец импульс от генератора и последующий отраженный импульс, который сначала отражается от образца, проходит по кабелю T_1 в обратном направлении к генератору, еще раз отражается от генератора и вновь прикладывается к образцу спустя 15 нс.

В течение этих 15 нс реальная схема подачи импульса от генератора через коаксиальный кабель может быть заменена эквивалентной схемой, состоящей из идеального генератора удвоенной амплитуды с внутренним сопротивлением, равным нулю, подключаемого к образцу через сопротивление 50 Ом (рис. 1, *b* и *d*).

Методика измерения состоит из двух этапов. На первом этапе записывается калибровочный импульс: исследуемая структура отсутствует, полосковая линия замкнута, от генератора подается импульс напряжения (схема на рис. 1, *a*), который регистрируется на нагрузке и запоминается. В этом случае в течение интервала времени $2T_1/c$ испытательный стенд можно представить в виде эквивалентной схемы на рис. 1, *b*. На втором этапе в разрыв полосковой линии устанавливается исследуемый образец (схема на рис. 1, *c* и соответствующая эквивалентная схема на рис. 1, *d*). В первоначальный момент времени диод находится в блокирующем высокоомном

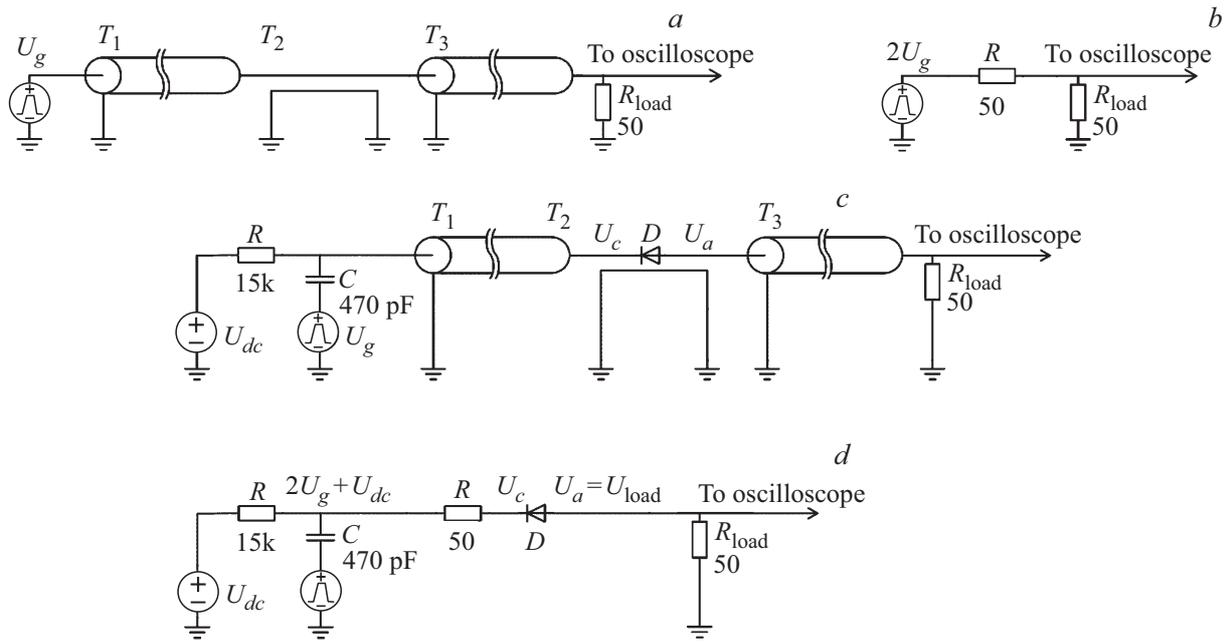


Рис. 1. Испытательный стенд для исследования характеристик переключения при задержанной ударной ионизации в высоковольтных структурах: реальная (а) и эквивалентная (b) схемы для записи калибровочного импульса; реальная (c) и эквивалентная (d) схемы для измерения импульса напряжения на нагрузке, сформированного диодом D.

состоянии, а обратный смещенный *p-n*-переход эквивалентен емкости, небольшой по величине и зависящей от приложенного напряжения. Амплитуда приложенного к диоду импульса может достигать удвоенной амплитуды исходного импульса генератора. Далее, в результате задержанной ударной ионизации, диод переходит в проводящее состояние, в цепи начинает протекать ток, напряжение U_c на катоде диода падает и, в соответствии с рис. 1, d, будет равно разнице удвоенного напряжения генератора U_g и падения напряжения на эквивалентном сопротивлении кабеля T_1 : $U_c = 2U_g - IR_{T1}$ (рис. 1, d). Так как импедансы кабеля T_1 и нагрузки равны, как равны и протекающие через них токи, падение напряжения на импедансе кабеля T_1 будет равно падению напряжения на нагрузке $IR_{T1} = IR_{load} = U_{load}$, следовательно, $U_c = 2U_g - U_{load}$. Напряжение на аноде будет равно напряжению на нагрузке $U_a = U_{load}$, тогда падение напряжения на образце будет равно $U_c - U_a = 2U_g - U_{load} - U_{load} = 2(U_g - U_{load})$. Для обеспечения возможности подачи на образец постоянного смещения в измерительную цепь добавляются высоковольтный блокирующий конденсатор C и источник постоянного напряжения U_{dc} с высокоомным ограничительным резистором R (рис. 1, c). Емкость конденсатора C равна 470 пФ, что при импедансе нагрузки 50 Ом дает постоянную времени $\tau = RC = 50 \cdot 470 \cdot 10^{-12} \approx 23 \cdot 10^{-9}$ (с) = 23 нс, что намного больше длительности импульса генератора. Таким образом, импульс генератора подается на структуру без существенных искажений. Так как конденсатор C находится на противоположном от исследуемого об-

разца конце коаксиального кабеля T_1 , его наличие не приводит к возбуждению паразитных высших мод в измерительной цепи вблизи образца. Таким образом, напряжение на структуре при наличии постоянного обратного смещения будет равно

$$U_{SAS} = 2(U_g - U_{load}) + U_{dc}. \tag{1}$$

Экспериментальное исследование параметров переключения при задержанной ударной ионизации производилось в двух режимах: 1) на образец подавался импульс напряжения с фиксированной амплитудой от генератора высоковольтных импульсов U_g , а постоянное смещение от источника напряжения U_{dc} изменялось в диапазоне 0–2500 В; 2) на образец подавалось постоянное смещение от источника напряжения U_{dc} и проводилась серия экспериментов с различными по амплитуде импульсами напряжения от генератора высоковольтных импульсов U_g .

Далее, по уже снятым калибровочным осциллограммам и осциллограммам импульсов напряжения на нагрузке при установленном в разрыв линии образце вычислялась осциллограмма напряжения на исследуемой структуре. Ток, прошедший через структуру, равен напряжению U_{load} на нагрузке, деленному на сопротивление нагрузки 50 Ом. Таким образом, имея осциллограммы тока и напряжения, можно определить длительность процесса переключения, максимальную скорость нарастания напряжения dU/dt , переключаемый ток I, максимальный перепад напряжения на структуре в момент переключения ΔU , величину остаточно-

го напряжения U_m , потери в структуре и общую эффективность процесса переключения. Проанализировав эти данные, можно определить оптимальные режимы работы диодной структуры для наиболее эффективного формирования импульсов напряжения на нагрузке. Также полученная детальная информация об особенностях процесса переключения при задержанной ударной ионизации открывает возможности дальнейшей оптимизации полупроводниковой структуры для улучшения параметров переключения либо создания новых приборов под конкретные технические задачи.

3. Обсуждение результатов

Новая методика измерений была отработана на диодных структурах, конструкция и технология изготовления которых известны, и которые ранее широко использовались при изучении процессов задержанной ионизации [13,22,25]. Эти структуры имеют толщину базовой области n -типа порядка $W_B = 100$ мкм при концентрации доноров $N_D \approx 1.7 \cdot 10^{14}$ см⁻³. Площадь структуры составляет $S \approx 1$ мм². Примененный в этих работах метод измерения напряжения на структуре с помощью частотно-компенсированного резистивного делителя не позволял проводить измерения при варьировании в широком диапазоне постоянного приложенного напряжения смещения. Постоянное смещение может оказывать очень сильное влияние на процесс переключения, и поэтому в наших экспериментах этому было уделено особое внимание. На рис. 2 представлены осциллограммы импульсов напряжения на структуре U_{SAS} , импульсов напряжения, подаваемых на структуру, $2U_g + U_{dc}$ и тока через структуру I_{Rload} при фиксированной амплитуде импульса напряжения U_g и различных напряжениях постоянного смещения $U_{dc} = 50$ и 980 В.

На рис. 3 представлены измеренные значения максимальной скорости переключения структуры dU/dt , максимального перепада напряжения на структуре ΔU при переключении и величины остаточного напряжения на структуре U_m при амплитуде импульса $U_g = 930$ В и различных напряжениях постоянного смещения $U_{dc} = 0-980$ В.

Из данных на рис. 3 следует, что наилучшие параметры переключения структуры в результате задержанной ударной ионизации достигаются при прикладываемом постоянном смещении 50–100 В, а именно достигаются наибольшая скорость переключения $dU/dt \approx 7$ кВ/нс, наибольший перепад напряжения на структуре $\Delta U \approx 1400$ В и наименьшее остаточное напряжение $U_m \approx 300$ В. Уменьшение напряжения смещения ниже этого оптимального диапазона значений, а также его увеличение ведут к ухудшению указанных параметров. Следует отметить, что если улучшение параметров переключения с первоначальным увеличением напряжения смещения 0–50 В представляется логичным, то ухудшение параметров переключения при дальнейшем

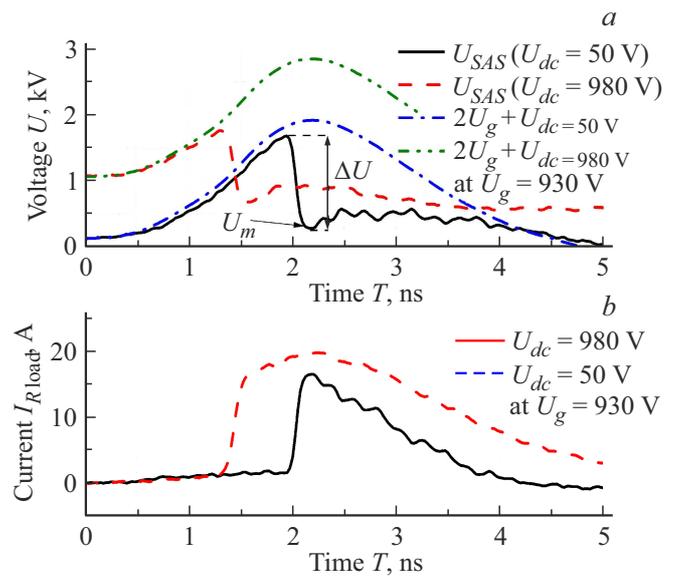


Рис. 2. Осциллограммы импульсов напряжения на структуре U_{SAS} , подаваемых импульсов напряжения $2U_g + U_{dc}$ при фиксированной амплитуде импульса $U_g = 930$ В и двух различных напряжениях смещения $U_{dc} = 50$ и 980 В, а также тока через структуру I_{Rload} .

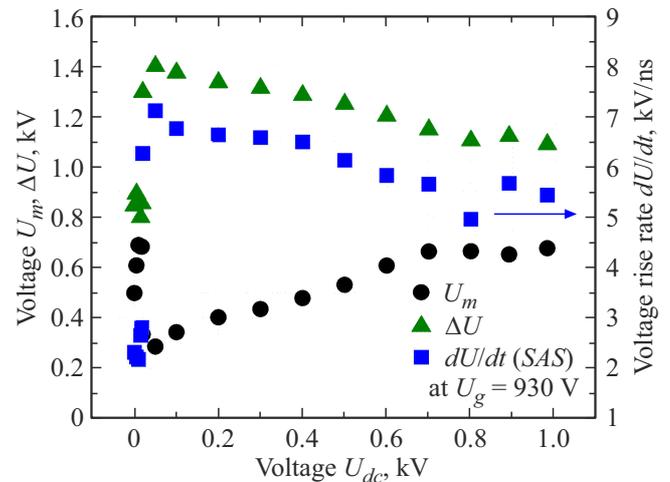


Рис. 3. Зависимости скорости переключения dU/dt , перепада напряжения ΔU и величины остаточного напряжения U_m при различных значениях напряжения смещения U_{dc} и фиксированной амплитуде импульса напряжения U_g , подаваемого от генератора.

увеличению смещения > 100 В не может быть объяснено существующими моделями процесса переключения при задержанной ударной ионизации и нуждается в отдельном исследовании.

Так как напряжение смещения $U_{dc} = 50$ В является оптимальным, было решено снять зависимости параметров переключения от амплитуды прикладываемого импульса напряжения U_g именно при этом постоянном смещении. На рис. 4 изображены осциллограммы

импульсов напряжения на структуре U_{SAS} , импульсов напряжения, подаваемых на структуру, $2U_g + U_{dc}$ и тока через структуру I_{Rload} при фиксированном постоянном смещении $U_{dc} = 50$ В и различных амплитудах импульса напряжения U_g , которые достаточно хорошо согласуются с ранее опубликованными экспериментами, выполненными в измерительной схеме с резистивным делителем [25].

На рис. 5 представлены зависимости скорости переключения структуры dU/dt , падения напряжения на структуре ΔU и величины остаточного напряжения на структуре U_m от амплитуды прикладываемого импульса напряжения при постоянном смещении $U_{dc} = 50$ В. Амплитуда импульса U_g менялась в диапазоне 930–1900 В. Как видно из рис. 5, остаточное напряжение U_m на структуре изменялось незначительно, а скорость переключения dU/dt и перепад напряжения ΔU на структуре увеличивались с ростом амплитуды импульса, подаваемого от высоковольтного генератора, что является ожидаемым и в целом соответствует представлениям о процессе переключения при задержанной ударной ионизации.

Далее рассмотрим серию экспериментов с более высоковольтными SAS структурами. Диодные структуры $p^+ - n - n^+$ создавались путем диффузии бора и фосфора на глубину порядка 70–80 и 10–15 мкм соответственно в пластину кремния n -типа проводимости толщиной $W = 500$ мкм с концентрацией доноров $N_D \approx 1.7 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Поверхностная концентрация примесей составила $N_B = 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ для бора и $N_P = 2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ для фосфора. Для защиты краевого контура применялась обратная фаска. Диаметр образца по стороне p^+ -слоя составлял 5 мм, а на стороне n^+ -слоя — 3 мм. Близкие по параметрам структуры описаны в работе [23] и использовались в генераторах с амплитудой выходного импульса в десятки киловольт. Однако авторы этой работы ограничились только демонстрацией принципиальной возможности переключения таких структур и их использования в генераторах без детального их исследования.

По аналогии с экспериментами на предыдущих структурах нами первоначально были изучены зависимости параметров переключения от приложенного постоянного смещения при подаваемом от высоковольтного генератора импульсе напряжения U_g амплитудой 3700 В. Полученные результаты представлены на рис. 6.

Исходя из характера полученных зависимостей скорости переключения dU/dt , перепада напряжения на структуре ΔU и величины остаточного напряжения на структуре U_m , можно сделать вывод, что увеличение постоянного смещения приводит к улучшению всех параметров переключения. В исследованном диапазоне напряжений смещения рост dU/dt и ΔU близок к линейному и не выходит на насыщение.

Достигнута величина скорости переключения $dU/dt = 42.7 \text{ кВ/нс}$, а максимальный перепад напряжения составил $\Delta U = 5.8 \text{ кВ}$. Полученные результаты по-

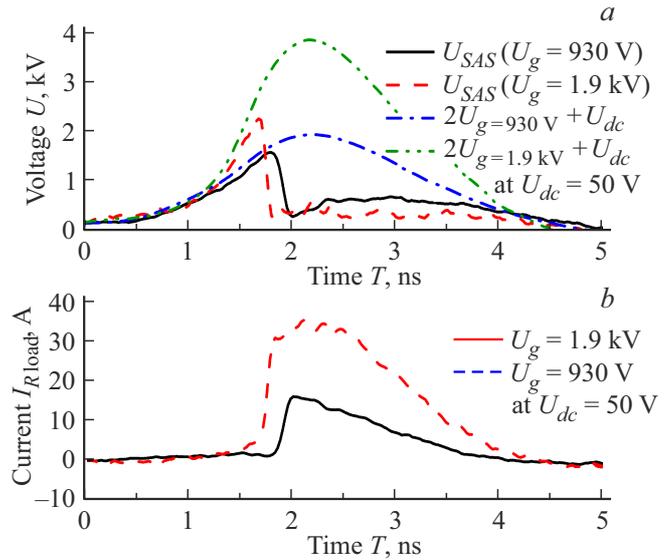


Рис. 4. Осциллограммы импульсов напряжения на структуре U_{SAS} (a), подаваемых импульсов напряжения $2U_g + U_{dc}$ при фиксированном постоянном смещении $U_{dc} = 50$ В и двух амплитудах импульса $U_g = 930$ и 1900 В, а также тока через структуру I_{Rload} (b).

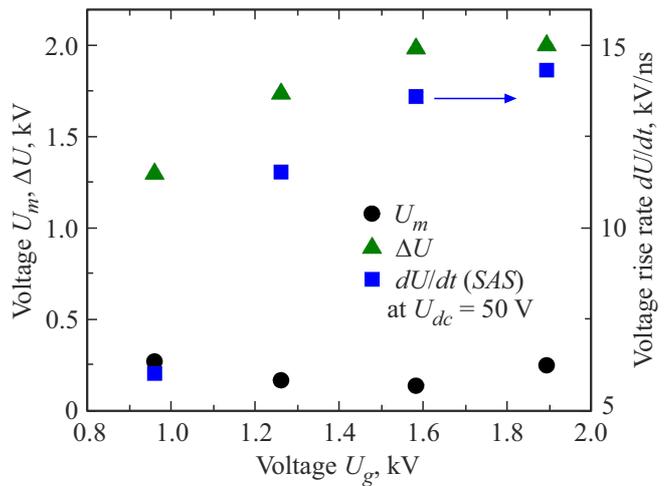


Рис. 5. Зависимости скорости переключения dU/dt , перепада напряжения ΔU и величины остаточного напряжения U_m при различных амплитудах импульса напряжения U_g , подаваемого на образец, и фиксированном напряжении смещения $U_{dc} = 50$ В.

казывают возможность значительного увеличения мощности, коммутируемой одиночной диодной структурой.

Следующая серия экспериментов была проведена при постоянном обратном смещении $U_{dc} = 2500$ В и изменении амплитуды импульса высоковольтного генератора $U_g = 2700$ –3700 В. При заданном напряжении смещения и прикладываемом импульсе напряжения < 2700 В структура не переключалась. Характеристики переключения представлены на рис. 7.

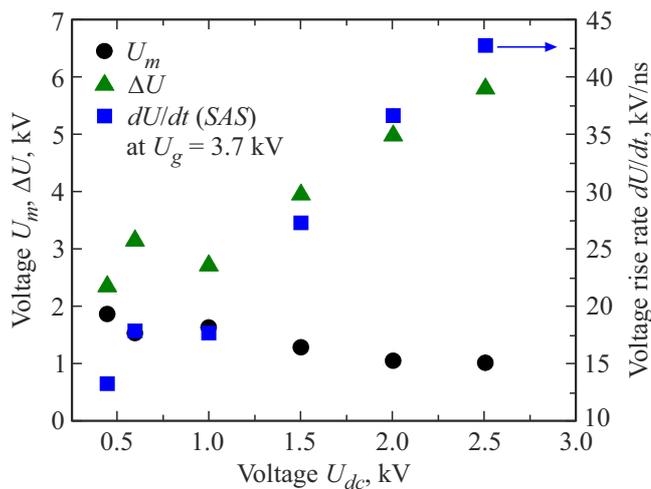


Рис. 6. Зависимости скорости переключения dU/dt , перепада напряжения ΔU и величины остаточного напряжения U_m при различных значениях напряжения смещения U_{dc} и фиксированной амплитуде импульса напряжения U_g , подаваемого на образец с толщиной базовой области $W_B \approx 410$ мкм.

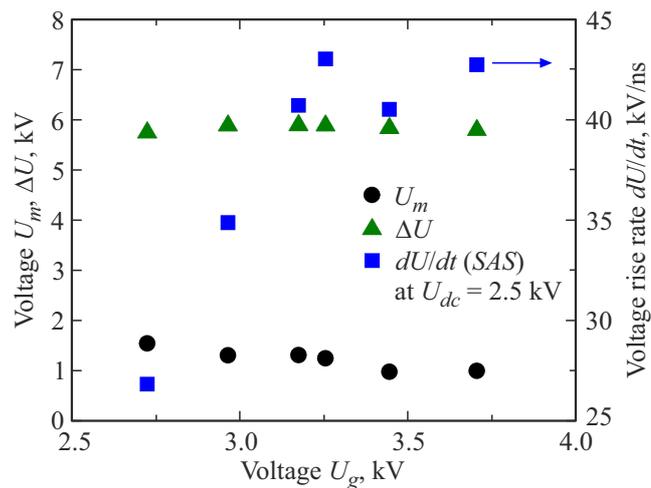


Рис. 7. Зависимости скорости переключения dU/dt , перепада напряжения ΔU и остаточного напряжения U_m от амплитуды импульса напряжения, прикладываемого от высоковольтного генератора, при постоянном напряжении смещения $U_c = 2500$ В для структуры с толщиной базовой области $W_B \approx 410$ мкм.

Из рис. 7 видно, что значения остаточного напряжения U_m и перепада напряжения на структуре ΔU при увеличении амплитуды запускающего высоковольтного импульса изменяются незначительно, а скорость переключения dU/dt сначала нарастает почти линейно, а при значениях > 3.2 кВ стремится к насыщению.

Следует также отметить, что образец был разрушен в предельном режиме при минимальной амплитуде импульса, подаваемого от генератора, и максимальном постоянном смещении $U_{dc} = 2.5$ кВ. Вероятная причина

разрушения — шнурование. Регистрация осциллограмм велась в однократном режиме (режим реального времени). Длительность паузы между переключениями составляла не менее десяти секунд; таким образом, нагрев образца и повышение его средней температуры были исключены. Разрушение произошло после нескольких переключений в данном режиме. Постепенной деградации параметров от импульса к импульсу, вплоть до последнего импульса, закончившегося разрушением образца, замечено не было.

4. Заключение

Разработана и опробована новая методика измерения быстропротекающих процессов в полупроводниковых высоковольтных переключателях, позволяющая подавать на структуры в процессе экспериментов высокое постоянное и импульсное напряжения, а также регистрировать осциллограммы напряжения на структурах и тока через них с высокой точностью и временной разрешающей способностью без использования шунтов и резистивных делителей. Предложенный испытательный стенд обеспечил возможность исследования образцов при высоком постоянном и импульсном напряжениях (до нескольких киловольт), при пропуске больших токов (до сотен ампер) и при временном разрешении лучше 100 пс.

В данной работе были исследованы характеристики переключения при задержанной ударной ионизации кремниевых $p^+ - n - n^+$ -структур с толщинами базовых областей порядка $W_B \sim 100$ мкм и ~ 410 мкм в более широких диапазонах изменения прикладываемых постоянного и импульсного напряжений, чем в ранее опубликованных работах. Было показано, что в перекрывающихся диапазонах параметров полученные нами данные соответствовали известным и опубликованным ранее результатам, однако в результате исследования процесса задержанной ударной ионизации в значительно более широком диапазоне параметров были получены новые данные, неожиданные с точки зрения текущих представлений о задержанной ударной ионизации. Так, для структур с шириной n -базы 100 мкм увеличение постоянного напряжения до значений > 100 В ухудшало их параметры переключения dU/dt , ΔU и U_m . В то же время для структур с n -базой толщиной 410 мкм увеличение постоянного смещения приводило к почти пропорциональному увеличению скорости переключения dU/dt и почти двукратному снижению остаточного напряжения U_m . Также принципиально отличаются зависимости параметров переключения dU/dt и ΔU от амплитуды прикладываемого импульса напряжения для этих двух типов диодных структур.

На структурах с толщиной n -базы 410 мкм была достигнута величина скорости переключения $dU/dt \sim 42.7$ кВ/нс при напряжении постоянного смещения 2500 В.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] A.F. Kardo-Sysoev. In: *Ultra-Wideband Radar Technology*, ed. by J.D. Taylor (CRC Press, Boca Raton–London–N.Y.–Washington, 2001) p. 214.
- [2] A.S. Kesar. IEEE Trans. Antennas Propag., **59**, 149 (2011). DOI: 10.1109/tap.2010.2090486
- [3] M. Scapinello, L.M. Martini, G. Dilecce, P. Tosi. J. Phys. D: Appl. Phys., **49** (7), 75602 (2016). DOI: 10.1088/0022-3727/49/7/075602
- [4] E. Delikonstantis, M. Scapinello, G.D. Stefanidis. Fuel Process. Technol., **176**, 33 (2018). DOI: 10.1016/j.fuproc.2018.03.011
- [5] E. Delikonstantis, M. Scapinello, O. Van Geenhoven, G.D. Stefanidis. Chem. Eng. J., **380**, 122477 (2020). DOI: 10.1016/j.cej.2019.122477
- [6] M. Breton, L.M. Mir. Bioelectromagnetics, **33** (2), 106 (2012). DOI: 10.1002/bem.20692
- [7] M. Islam, C.L. Min, N.J. Shoumy, M.S. Ali, S. Khatun, M.S.A. Karim, B.S. Bari. J. Phys.: Conf. Ser., **1529** (5), 052066 (2020). DOI: 10.1088/1742-6596/1529/5/052066
- [8] S.M. Bardet, L. Carr, M. Soueid, D. Arnaud-Cormos, P. Leveque, R.P. O'Connor. Sci. Rep., **6** (7252), 34443 (2016). DOI: 10.1038/srep34443
- [9] M. Balmelli, R. Farber, L. Merotto, P. Soltic, D. Bleiner, C.M. Franck, J. Biela. IEEE Access, **9**, 100050 (2021). DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3095664
- [10] S. Stepanyan, J. Hayashi, A. Salmon, G.D. Stancu, C.O. Laux. Plasma Sources Sci. Technol., **26** (4), 04LT01 (2017). DOI: 10.1088/1361-6595/aa5a2b
- [11] X. Li, J. Chu, P. Jia, Y. Li, B. Wang, L. Dong. IEEE Trans. Plasma Sci., **46** (3), 583 (2018). DOI: 10.1109/TPS.2018.2797954
- [12] M.G. De Giorgi, A. Sciolti, S. Campilongo, E. Pescini, A. Ficarella, L.M. Martini, P. Tosi, G. Dilecce. Energy Procedia, **82** (2015), 410 (2015). DOI: 10.1016/j.egypro.2015.11.825
- [13] I.V. Grekhov, A.F. Kardo-Sysoev. Sov. Tech. Phys. Lett., **5** (8), 395 (1979).
- [14] I.V. Grekhov, A.F. Kardo-Sysoev, L.S. Kostina, S.V. Shenderei. Electron. Lett., **17** (12), 422 (1981). DOI: 10.1049/el:19810293
- [15] D. Benzel, M. Pocha. Rev. Sci. Instrum., **56**, 1456 (1985). DOI: 10.1063/1.1138504
- [16] А.Ф. Кардо-Сысоев, М.В. Попова. ФТП, **30** (5), 803 (1996).
- [17] M. Levinshtein, J. Kostamovaara, S. Vainshtein. *Breakdown Phenomena in Semiconductors and Semiconductor Devices* (Word Sci., 2005). ISBN: 981-256-395-4
- [18] P. Rodin, A. Rodina, I. Grekhov. J. Appl. Phys., **98**, 094506 (2005). DOI: 10.1063/1.2125118
- [19] A.S. Kyuregyan. Techn. Phys. Lett., **31** (12), 1043 (2005). DOI: 10.1134/1.2150893
- [20] P. Rodin, U. Ebert, A. Minarsky, I. Grekhov. J. Appl. Phys., **102** (3), 034508 (2007). DOI: 10.1063/1.2767378
- [21] L.M. Merensky, A.F. Kardo-Sysoev, D. Shmilovitz, A.M. Kesar. IEEE Trans. Plasma Sci., **42** (12), 4015 (2014). DOI: 10.1109/tps.2014.2366551
- [22] V.I. Brylevskiy, I.A. Smirnova, A.V. Rozhkov, P.N. Brunkov, P.B. Rodin, I.V. Grekhov. IEEE Trans. Plasma Sci., **44**(10), 1941 (2016). DOI: 10.1109/TPS.2016.2561404
- [23] A.S. Kesar, A. Raizman, G. Atar, Sh. Zoran, S. Gleizer, Y. Krasik, D. Cohen-Elias. Appl. Phys. Lett., **117**, 013501 (2020). DOI: 10.1063/5.0016228
- [24] V.I. Brylevskiy, I.A. Smirnova, N.I. Podolska, Yu.A. Zharova, P.B. Rodin, I.V. Grekhov. IEEE Trans. Plasma Sci., **47** (1), 994 (2018). DOI: 10.1109/TPS.2018.2875423
- [25] M. Ivanov, V. Brylevskiy, I. Smirnova, P. Rodin. J. Appl. Phys., **131**, 014502 (2022). DOI: 10.1063/5.0077092

Редактор А.Н. Смирнов

The influence of external parameters on the switching process by delayed ionization in a silicon $p^+ - n - n^+$ -structure

A.F. Kardo-Sysoev¹, M.N. Cherennev^{1,2},
A.G. Lyublinsky¹, I.A. Smirnova¹, S.A. Yusupova¹,
E.I. Belyakova¹, M.I. Vexler¹

¹ Ioffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

² St. Petersburg electrotechnical university „LETI“,
197022 St. Petersburg, Russia

Abstract The new developed technique allows measuring fast-switching processes in semiconductor diodes, which are switched into a conducting state by applying a high-voltage fast-rising pulse together with a high DC voltage. Using this technique, delayed impact ionization was studied in $p^+ - n - n^+$ -structures with base thicknesses of about $100\ \mu\text{m}$ and $410\ \mu\text{m}$. It has been experimentally demonstrated that for structures with a thick base, the switching characteristics improve with an increase in both the DC reverse bias and the rise rate of the applied voltage pulse. A voltage rise rate of $42.7\ \text{kV/ns}$ has been achieved for a single structure.