

Пространственная неоднородность ударно-ионизационного переключения силовых кремниевых тиристорov

© С.К. Любутин, С.Н. Рукин, Б.Г. Словиковский, С.Н. Цыранов

Институт электрофизики Уральского отделения РАН,
620016 Екатеринбург, Россия
e-mail: ganimed323@mail.ru

Поступило в Редакцию 13 декабря 2023 г.
В окончательной редакции 12 марта 2024 г.
Принято к публикации 2 апреля 2024 г.

Проведены исследования процесса переключения силового кремниевого тиристора импульсом напряжения. Установлено, что при увеличении скорости нарастания напряжения dU/dt от 1 до 10 kV/ns напряжение переключения возрастает от 3 до 7 kV, а длительность процесса переключения сокращается до 200 ps. Тиристор с предварительно приложенным напряжением смещения по сравнению с тиристором без смещения имеет меньшую длительность и большее напряжение переключения. При $dU/dt > 4$ kV/ns напряжение переключения тиристора без смещения становится больше, чем тиристора со смещением, что связано с насыщением скорости движения носителей в нейтральной части n -базы. Моделирование показало, что расчетные и экспериментальные осциллограммы напряжения имеют количественное согласие в случае, когда величина активной площади структуры, через которую проходит ток переключения, с увеличением dU/dt растет, приближаясь к полной площади прибора при $dU/dt > 10$ kV/ns и стремится к нулю при $dU/dt < 1$ kV/ns. Показано, что пространственная неоднородность распределения тока возникает на этапе формирования ударно-ионизационного фронта в области, объединенной основными носителями заряда. Величина активной площади пропорциональна максимальной интенсивности процессов ионизации на этом интервале времени.

Ключевые слова: ударная ионизация, скорость нарастания напряжения, активная площадь, время переключения

DOI: 10.61011/JTF.2024.05.57816.308-23

Введение

Обнаружение эффекта субнаносекундного переключения полупроводникового диода [1] под действием импульса напряжения, нарастающего со скоростью $dU/dt > 1$ kV/ns, привело к созданию класса мощных субнаносекундных полупроводниковых переключателей [2–6]. Механизм переключения обсуждался в большом числе работ и обычно связывался с быстрым снижением сопротивления полупроводниковой структуры вследствие ее заполнения плотной плазмой после прохождения ударно-ионизационных TRAPATT-волн [3,7]. Скорость движения таких волн превышает насыщенную скорость движения носителей и ограничена только скоростью света в полупроводнике.

Вопрос о неоднородности процесса переключения поднимался раньше [8–12], а в последнее время интерес к нему заметно возрос [13–20]. Для характеристики степени неоднородности вводится величина активной площади S_a как части площади прибора, которая участвует в процессе переключения. Установлено, что существенное влияние на величину S_a оказывает скорость нарастания напряжения dU/dt на полупроводниковой структуре перед ее переходом в проводящее состояние. Активная площадь наблюдалась визуально в виде свечения при переключении GaAs-диодов [8,9]. В [8]

наблюдались отдельные свягающиеся каналы, число которых увеличивалось с ростом dU/dt . В [9] при dU/dt в десятки kV/ns наблюдалось однородное по всей площади диода свечение.

В приборах, где в качестве материала используется кремний или другие непрямозонные полупроводники, визуальная оценка активной площади невозможна. Применяются методы, позволяющие сделать оценку косвенным образом, например, сравнение результатов расчетов, полученных при разных величинах активной площади, с экспериментальными осциллограммами. Выбирая результат расчета, наименее отличающийся от экспериментального, можно получить оценку активной площади. Этим методом в [19] были получены оценки величины активной площади, участвующей в процессе переключения силовых тиристорov с предварительно приложенным напряжением смещения под действием импульса напряжения, нарастающего со скоростью $dU/dt = 0.8–6$ kV/ns. Использовались тиристоры, изготовленные из n -кремния с разным удельным сопротивлением (80 и 105 $\Omega\cdot\text{cm}$) и диаметром 32 и 40 mm. В [20] метод применялся при исследовании процесса переключения кремниевого диода диаметром 6 mm и удельным сопротивлением 32 $\Omega\cdot\text{cm}$. Напряжение смещения предварительно не прикладывалось, а скорость нарастания напряжения лежала в диапазоне $dU/dt = 1.5–10$ kV/ns.

Во всех случаях было обнаружено, что расчеты хорошо описывают экспериментальные результаты только при определенном виде зависимости величины активной площади от dU/dt . Величина активной площади с увеличением dU/dt растет, монотонно приближаясь к полной площади прибора при $dU/dt > 10 \text{ kV/ns}$. С уменьшением dU/dt величина активной площади снижается, стремясь к нулю при $dU/dt < 1 \text{ kV/ns}$. Это согласуется с установленным в эксперименте исчезновением эффекта быстрого переключения в кремниевых тиристорах при $dU/dt < 0.5 \text{ kV/ns}$ [17] и наблюдением однородного по площади GaAs-диодов пробоя при dU/dt в десятки kV/ns [9].

В практическом плане неоднородность распределения тока по площади прибора влияет на его быстродействие, падение напряжения на нем и на величину потерь энергии в приборе на стадии протекания тока. Недавними исследованиями установлено, что увеличение dU/dt от 0.5 до 6 kV/ns уменьшает время перехода тиристора в проводящее состояние до 200–300 ps [17–22], увеличивает температуру полупроводниковой структуры, при которой реализуется эффект быстрого переключения, до 180°C [21], а за счет роста активной площади снижает потери энергии в тиристоре в 1.5–3 раза при пропускании через него тока разряда емкостного накопителя [18,22].

Большой интерес представляют режимы работы, когда предварительное смещение на приборе отсутствует. Например, в таком режиме работают полупроводниковые диодные и тиристорные обострители фронта импульса, встраиваемые в разрыв внутреннего проводника коаксиальной линии передачи энергии [6,16,23]. При последовательном соединении диодов или тиристоров переключаемая мощность достигает сотен MW при длительности фронта несколько десятков пикосекунд [24].

В настоящей работе экспериментально и теоретически рассмотрен процесс переключения тиристора импульсом напряжения, нарастающим со скоростью dU/dt до 10 kV/ns . Исследования проводились как в режиме с предварительно приложенным напряжением смещения ($U_0 = 2.2 \text{ kV}$), так и без него. Для более полного анализа влияния пространственной неоднородности на процесс переключения в кремниевых приборах в работе использованы данные исследования процесса переключения кремневого диода без напряжения смещения при dU/dt в диапазоне 1– 10 kV/ns [20].

1. Экспериментальная часть

1.1. Схема эксперимента

В настоящей работе исследуется процесс переключения тиристора из блокирующего в проводящее состояние без последующего протекания силового тока от внешней схемы. Схема эксперимента (рис. 1) содержит конденсатор $C1 = 1.3 \mu\text{F}$, заряженный до напряжения смещения $U_0 = 2.2 \text{ kV}$ отрицательной полярности.

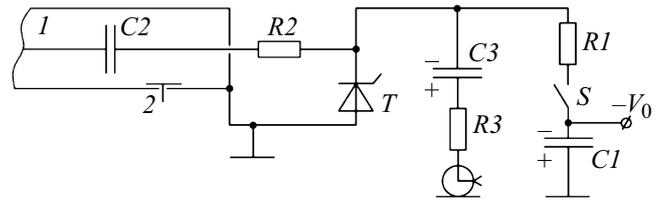


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

Напряжение смещения переключателем S (тиристор или транзистор) через резистор $R1 = 86 \Omega$ подается на исследуемый тиристор T. Полное время установления напряжения смещения на тиристоре T составляет $\sim 10 \mu\text{s}$. Спустя время задержки $50 \mu\text{s}$ на тиристор подается импульс запуска от малогабаритного твердотельного генератора, выходной узел которого представляет собой коаксиальную $50\text{-}\Omega$ маслonaполненную линию (1 на рис. 1). Импульс запуска отрицательной полярности подается на тиристор через разделительный конденсатор $C2 = 4.7 \text{ nF}$, установленный внутри линии 1, и регистрируется с помощью емкостного датчика 2. Амплитуда импульса на выходе линии при ее работе на согласованную нагрузку регулируется в диапазоне от 50 до 100 kV , фронт импульса по уровню 0.1–0.9 от амплитуды — $\sim 1 \text{ ns}$, длительность импульса на полувысоте — $\sim 4 \text{ ns}$. Скорость нарастания воздействующего на тиристор напряжения dU/dt в диапазоне 5– 10 kV/ns изменяется регулировкой амплитуды импульса запуска, а изменение величины dU/dt в диапазоне 0.5– 5 kV/ns достигается установкой дополнительного резистора R2 с различной величиной сопротивления.

В качестве тиристора T в экспериментах использовался полупроводниковый элемент промышленных низкочастотных тиристоров таблеточной конструкции марки T133-320-22. Тиристор имеет следующие паспортные параметры: рабочее DC напряжение — 2.2 kV (класс по напряжению — 22), амплитуда ударного тока — 6 kA , критическая скорость нарастания тока при включении по управляющему электроду — $100 \text{ A}/\mu\text{s}$. Полупроводниковый элемент имеет диаметр 32 mm и высоту 2 mm , из которых 1.4 mm занимает анодный диск-охладитель из молибдена. Полупроводниковый элемент тиристора имеет структуру $p^+ - p - n - p - n^+$ -типа толщиной $520 \mu\text{m}$ и изготовлен по диффузионной технологии из кремния n -типа с удельным сопротивлением $\rho = 80 - 85 \Omega \cdot \text{cm}$.

Процесс переключения тиристора в проводящее состояние регистрировался с помощью резистивного делителя напряжения с элементами $C3$ и $R3$ (рис. 1). Верхним плечом делителя выступает резистор $R3$, а нижнее плечо образовано кабелем регистрации с волновым сопротивлением 50Ω . Конденсатор $C3$ изолирует делитель от постоянного напряжения смещения U_0 . Для снижения собственной индуктивности элементов делителя конденсатор $C3$ выполнен из фольгированной лавсановой пленки толщиной $50 \mu\text{m}$, а резистор $R3$

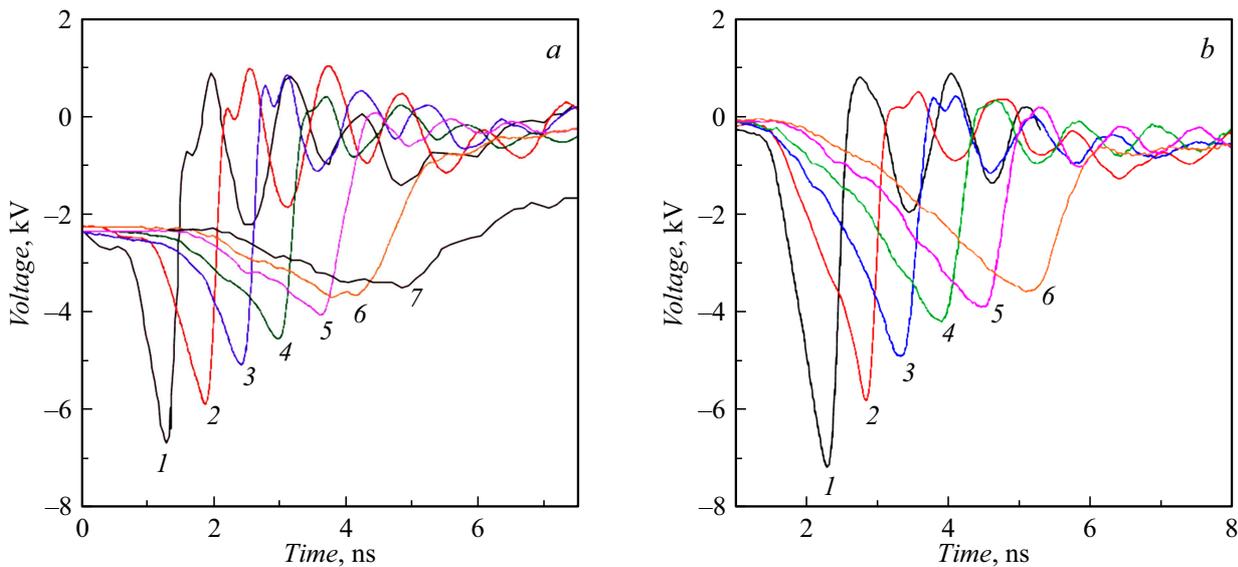


Рис. 2. Экспериментальные зависимости напряжения на тиристоре от времени с напряжением смещения (*a*) и без него (*b*). Величина dU/dt в kV/ns равна: *a* — 7.5 (1), 4.7 (2), 3.3 (3), 1.6 (4), 0.9 (5), 0.7 (6), 0.7 (7); *b* — 9 (1), 4.3 (2), 2.9 (3), 2 (4), 1.6 (5), 1.3 (6). (Цифры в скобках обозначают номер кривой на рисунке.)

частично экранирован оплеткой измерительного кабеля. Делитель напряжения подключался непосредственно к контактам полупроводникового элемента. Собственное время нарастания сигнала на выходе делителя, определенное в процессе калибровки, составило $\sim 180 \text{ ps}$ по уровню 0.1–0.9 от амплитуды. В тракте регистрации использовались ослабители сигнала с полосой пропускания 18 GHz , а в качестве регистратора — осциллограф DPO 70404C с полосой пропускания 4 GHz . Итоговая осциллограмма получалась наложением и усреднением 10 последовательных импульсов.

1.2. Результаты экспериментов

Полученные в эксперименте осциллограммы напряжения на тиристоре при различных величинах скорости нарастания напряжения dU/dt приведены на рис. 2. Часть экспериментальных результатов на рис. 2, *a* при $dU/dt < 4 \text{ kV/ns}$ заимствована из работы [21]. Видно, что при переключении как тиристора с предварительно приложенным напряжением смещения (рис. 2, *a*), так и без него (рис. 2, *b*), с ростом dU/dt амплитуда напряжения переключения увеличивается, а время переключения снижается.

Колебания напряжения на осциллограммах рис. 2 после быстрого (субнаносекундного) перехода тиристора в проводящее состояние, наложенные на уровень остаточного напряжения, не связаны с процессами, происходящими внутри полупроводниковой структуры. Колебания обусловлены возбуждением L–C-контура, образованного индуктивностью подключения делителя

к полупроводниковому элементу ($\sim 6 \text{ nH}$) и емкостью обкладок конденсатора *C3* на землю ($\sim 10 \text{ pF}$).

На рис. 3 показаны результаты обработки экспериментальных осциллограмм в виде зависимостей напряжения переключения и времени переключения (по уровню 0.1–0.9 от амплитуды напряжения). Можно заметить, что увеличение dU/dt от 1 до 10 kV/ns существенно изменяет характеристики переключения тиристора: напряжение переключения возрастает в два раза, а время его перехода в проводящее состояние уменьшается в 4–5 раз, достигая величины 200 ps . Рост амплитуды напряжения соответствует росту напряженности электрического поля в структуре прибора, что приводит к увеличению скорости движения ударно-ионизационных волн и снижает время заполнения структуры плазмой, а значит и время переключения.

Как видно из рис. 3, длительность процесса переключения увеличивается при снижении dU/dt , а в окрестности $dU/dt \sim 1$ и 1.5 kV/ns асимптотически нарастает для тиристора с приложенным смещением и без него соответственно. Данные величины соответствуют минимальным величинам dU/dt , ниже которых эффект быстрого переключения исчезает. Существование границы эффекта было показано ранее [17].

При низких значениях dU/dt переключение тиристора с напряжением смещения происходит быстрее и при большей амплитуде напряжения, чем тиристора без смещения. Однако при $dU/dt > 4 \text{ kV/ns}$ величина напряжения переключения тиристора без смещения становится больше, чем тиристора со смещением (рис. 3). Это связано с изменением геометрии распределения электрического поля в структуре тиристора, более подробно рассмотренное ниже в разд. 2.2.

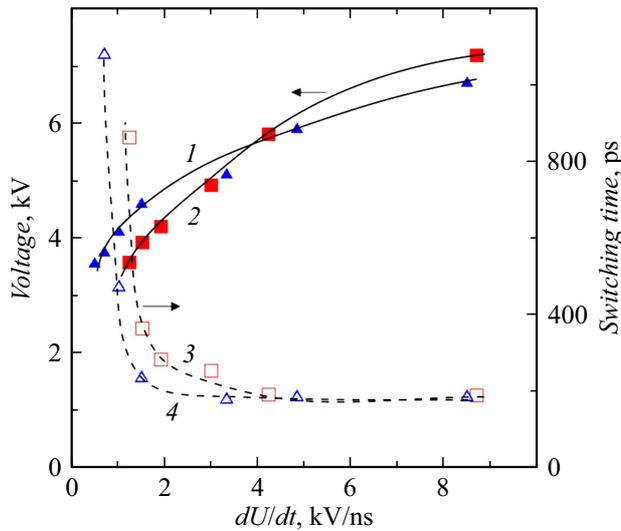


Рис. 3. Зависимость максимального напряжения (темные треугольники и квадраты) и времени переключения (светлые треугольники и квадраты) от скорости роста напряжения на тиристоре с приложенным напряжением смещения (треугольники) и без него (квадраты) соответственно.

2. Расчетная часть

2.1. Описание модели

Для расчетов использовалась модель, заключающаяся в совместном решении уравнений, описывающих работу электрической схемы эксперимента, включающей в себя полупроводниковый прибор, и уравнений, описывающих динамику электронов, дырок, электрического поля и температуры в структуре прибора. Для динамики электронов и дырок использовались уравнения непрерывности, электрического поля — уравнение Пуассона. В расчетах учитывались зависимости скорости носителей от величины электрического поля, температуры, процессов рассеяния на примесях и электрон-дырочного рассеяния. Учитывались процессы лавинного размножения, туннельной генерации носителей, ионизации глубоких примесей [25]. Коэффициенты лавинного размножения были взяты в виде [21], позволяющем учесть их зависимость от электрического поля и температуры. В расчете принималась во внимание зависимость интенсивности процессов ионизации от концентрации носителей вследствие электронно-дырочного рассеяния [25].

В расчетах задавалось реальное распределение примесей в структуре исследуемого тиристора (Т133-320-22). Тиристор имел структуру $p^+-p-n-p-n^+$ -типа толщиной $520 \mu\text{m}$ и был изготовлен из кремния n -типа с удельным сопротивлением $\rho = 80 \Omega \cdot \text{cm}$ ($N_d \sim 0.6 \cdot 10^{14} \text{cm}^{-3}$) и диаметром 32mm . Легирующие примеси распределены следующим образом: p^+ -область образована диффузией бора (10^{18}cm^{-3} , $50 \mu\text{m}$), p -области — диффузией алюминия

($2 \cdot 10^{16} \text{cm}^{-3}$, $85 \mu\text{m}$), n^+ -область — диффузией фосфора (10^{19}cm^{-3} , $20 \mu\text{m}$).

Для более полного анализа влияния пространственной неоднородности тока на процесс переключения в настоящей работе использованы результаты исследования процесса переключения кремневого диода без предварительно приложенного напряжения смещения. Диод имел структуру $p^+-p-n-n^+$ -типа толщиной $350 \mu\text{m}$ диаметром 6mm при удельном сопротивлении n -кремния $\rho = 32 \Omega \cdot \text{cm}$ ($N_d \sim 1.5 \cdot 10^{14} \text{cm}^{-3}$). Примеси распределены в структуре диода следующим образом: p^+ -область образована диффузией бора (10^{19}cm^{-3} , $80 \mu\text{m}$), p -области — диффузией алюминия (10^{17}cm^{-3} , $136 \mu\text{m}$), n^+ -область — диффузией фосфора (10^{19}cm^{-3} , $60 \mu\text{m}$) [20]. Цифры в скобках обозначают граничную концентрацию и глубину залегания примесей в структуре приборов.

Работа экспериментальной электрической схемы в расчете процесса переключения диода задается телеграфными уравнениями [21], тиристора — уравнениями Кирхгофа [19].

В [26] было предложено для предотвращения влияния лавинного размножения нефизически малых концентраций носителей включать процессы размножения после достижения концентрации носителей величины n_0 . Введение такого условия также связано с ограничениями дрейфово-диффузионного приближения, используемого в расчетах. Данный подход широко использовался в [17, 19, 27, 28].

Существенное влияние на процесс переключения в кремневых структурах может оказывать ионизация глубоких уровней M -типа с энергией 0.54eV [28]. Величина концентрации N_{PI} таких уровней остается темой исследований. В [29] было показано, что величина N_{PI} лежит в интервале $10^{11} - 10^{13} \text{cm}^{-3}$. Но в [30] было показано, что в структурах p^+-n-n^+ -типа этих уровней нет, а в структурах $p^+-p-n-n^+$ -типа они есть. В настоящей работе принято $N_{PI} = 10^{12} \text{cm}^{-3}$ и $n_0 = 0.5 \cdot 10^9 \text{cm}^{-3}$, что дало хорошее согласие результатов расчета и экспериментальных данных в [17].

Для учета пространственной неоднородности в расчете принимается, что в процессе переключения участвует не вся площадь прибора. Часть площади, через которую идет ток переключения, называется активной площадью S_a , а оставшаяся — пассивной площадью. В расчетах ниже используется параметр $K = S/S_a$, предложенный в [10]. Полагая, что ток в частях распределен однородно вдоль площади, можно решить одномерные уравнения динамики носителей и поля в активной и пассивной частях прибора. Разделение структуры на активную и пассивную части происходит после достижения величины напряженности поля порога ионизации в любой точке структуры:

$$E > E_b, \quad (1)$$

где $E_b = 1.8 \cdot 10^5 \text{V/cm}$ — величина электрического поля, соответствующая порогу ионизации в кремнии. По-

сле разделения процессы ионизации в модели развиваются только в активной части, а в пассивной части прибора процессы ионизации не идут. Заметим, что изменение величины E_b в интервале от 0 до $2 \cdot 10^5$ не влияет на результаты расчетов.

2.2. Процесс переключения

Проведем сравнение процесса переключения тиристора с напряжением смещения и без него. Для этого выберем результаты расчетов на рис. 6, *a* и *b* с близкими скоростями нарастания импульса напряжения. На рис. 4, 5 показаны выбранные результаты расчета процесса переключения при $4dU/dt \sim 4 \text{ kV/ns}$, соответствующие кривым 2 на рис. 6, *a* и *b* при $K = 4$ и $K = 3.5$. Для удобства напряжение, ток и напряженность электрического поля на рисунках приведены в положительной полярности. На рис. 4 показаны стадии процесса переключения тиристора с приложенным напряжением смещения: стадия роста амплитуды электрического поля и ширины области объемного заряда (ООЗ) вплоть до запуска ударно-ионизационного фронта (0– t_1), стадия заполнения структуры плазмой за счет распространения ударно-ионизационного фронта в ООЗ и однородного пробоя в нейтральной части *n*-базы (t_1 – t_2), стадия переключения до максимума тока через активную часть структуры (t_2 – t_3), и завершающая стадия переключения ($t > t_3$). Такие же стадии выделены и при переключении тиристора без напряжения смещения с соответствующими интервалами (0– t_4), (t_4 – t_5), (t_5 – t_6) и ($t > t_6$). В этом случае импульс напряжения прикладывается к структуре, заполненной равновесными носителями заряда, и на первом этапе (0– t_4) вначале в окрестности *n-p*-перехода образуется ООЗ. При переключении тиристора с напряжением смещения до поступления импульса напряжения в структуре уже существует ООЗ.

Для дальнейшего анализа введем интегральный фактор, учитывающий интенсивность процессов ионизации в полупроводниковой структуре

$$IF = \int_0^W \alpha(E) \cdot dx, \quad (2)$$

где α — коэффициент ионизации, W — размер структуры. Величина IF численно равна количеству электрон-дырочных пар, возникающих за счет лавинного размножения при прохождении единичного носителя через область сильного электрического поля. Интегральный фактор IF является удобным индикатором процессов, происходящих в структуре прибора. Зависимость его величины от времени показаны кривыми 9 и 10 на рис. 4. Максимумы IF_1 , IF_2 , IF_3 соотносятся с процессом формирования ударно-ионизационного фронта в ООЗ, процессами ионизации в *n*-базе и в узких областях за пределами заполненной плазмой *n*-базы соответственно.

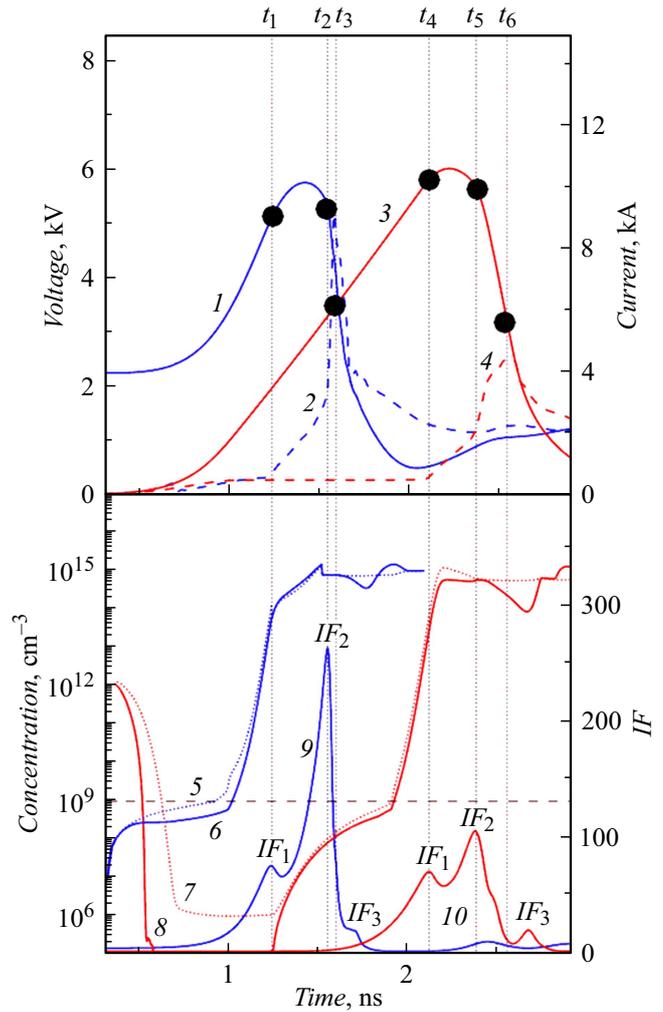


Рис. 4. Расчетные зависимости напряжения (1 и 3), тока через активную часть структуры (2 и 4, штриховые кривые), максимальной концентрации дырок (5 и 7, точечные кривые) и электронов (6 и 8) в ООЗ, интегрального фактора (9 и 10) от времени для тиристора с напряжением смещения и без него соответственно. Расчеты проводились при $K = 4$ для тиристора с напряжением смещения и при $K = 3.5$ без него.

Рассмотрим процессы переключения в структуре тиристора с предварительно приложенным напряжением смещения. В структуре тиристора до поступления импульса напряжения существует область, свободная от основных носителей заряда (ООЗ), напряжение в которой равно напряжению смещения $U_0 = 2.2 \text{ kV}$, а концентрация носителей не превышает 10^6 cm^{-3} . На стадии (0– t_1) при подаче импульса напряжения ширина ООЗ и амплитуда поля начинают увеличиваться. Наблюдаемый рост концентрации дырок и электронов (кривые 5 и 6 на рис. 4) связан с процессами туннельной ионизации глубоких уровней.

После достижения концентрации $n_0 \sim 10^9 \text{ cm}^{-3}$ (показано штриховой прямой на рис. 4) включаются процессы лавинного размножения, и дальнейший более быстрый рост концентрации носителей связан именно с этим.

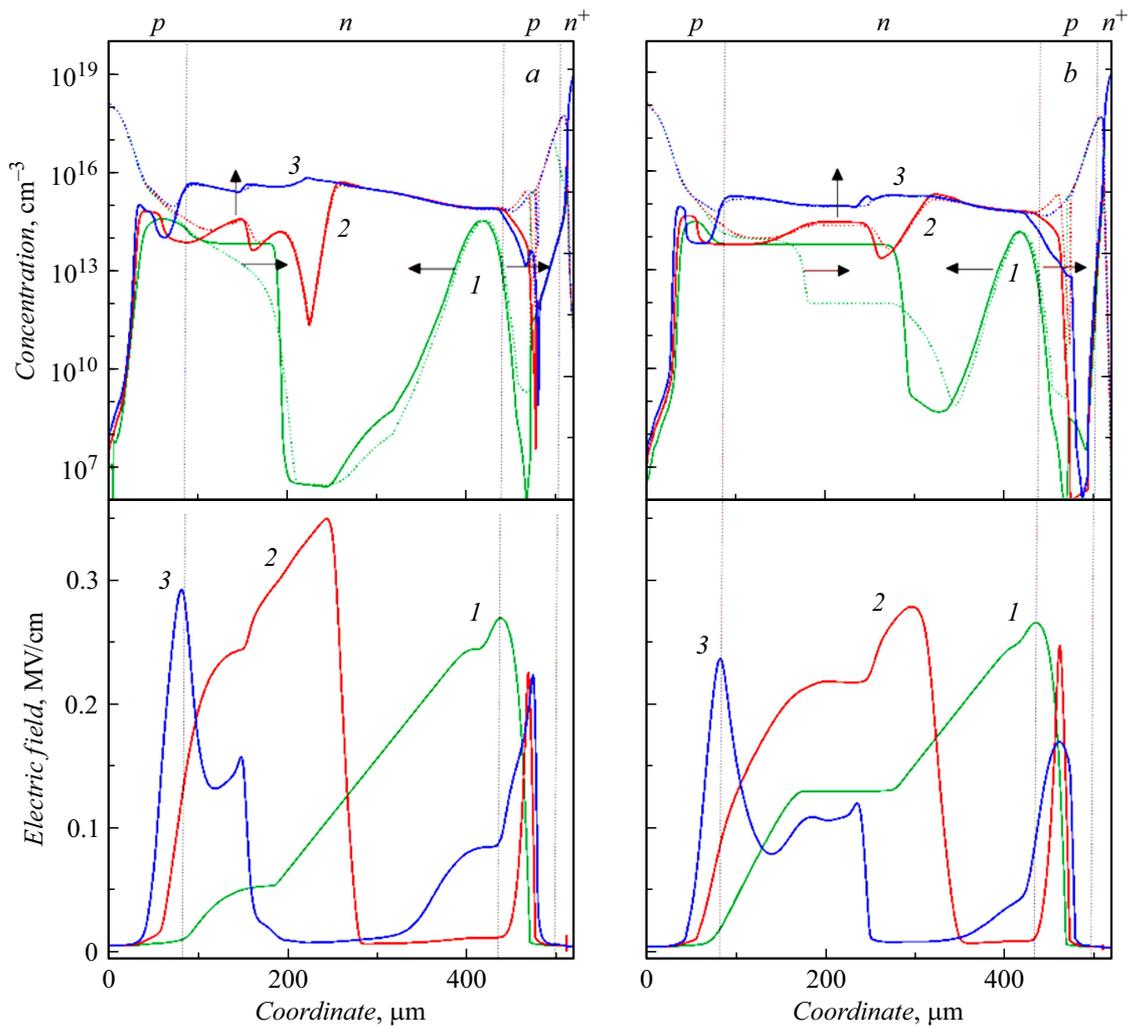


Рис. 5. Распределения концентрации дырок (точечные кривые), электронов (сплошные кривые) и напряженности электрического поля в активной части структуры в процессе переключения тиристора с приложенным напряжением смещения (*a*) и без него (*b*). *a* — 1–3 соответствуют моментам времени t_1 – t_3 , *b* — моментам времени t_4 – t_6 на рис. 4. Стрелки указывают направление движения фронтов ионизации.

На данном этапе амплитуда поля достигает порога ионизации, и структура тиристора в соответствии с модельным условием (1) разбивается на активную и пассивные части. Далее расчеты динамики электронов, дырок и поля в частях идут независимо друг от друга при условии, что процессы ионизации в пассивной части отключены. К моменту времени t_1 интегральный фактор достигает максимума IF_1 (кривая 9 на рис. 4), а концентрация электронов и дырок сравнивается с уровнем легирования базы $N_d \sim 0.6 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ (кривые 4 и 5 на рис. 4) и становится достаточной для компенсации поля, создаваемого зарядом неподвижных ионов доноров и акцепторов. Время, необходимое для этого, соответствует времени релаксации Максвелла:

$$t_M \sim \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0}{n \cdot \mu_n \cdot e}, \quad (2)$$

где n , μ_n , e — концентрация подвижность и заряд электронов; ε — электрическая постоянная; ε_0 — ди-

электрическая постоянная кремния. Полагая $n = N_d$, получим оценку времени $t_M \sim 100 \text{ ps}$, которое практически совпадает с шириной пика IF_1 на высоте ближайшего минимума на кривой интегрального фактора (кривая 9 на рис. 4). Дырки и электроны, образующиеся в процессе ионизации, формируют максимум концентрации в ООЗ (кривые 1 на рис. 5, *a*). Двигаясь в противоположные стороны, дырки и электроны создают заряд, поле которого компенсирует внешнее поле, что приводит к снижению поля в месте расположения максимума концентрации (кривая 1 на рис. 5, *a*). Перестройка распределения поля приводит к уменьшению интенсивности процессов ионизации и образованию минимума на кривой интегрального фактора. Область сильного поля смещается, далее в ее пределах начинаются процессы интенсивной ионизации, и процесс повторяется. Заполнение плазмой ООЗ происходит со скоростью перемещения области сильного поля, которая обязательно пре-

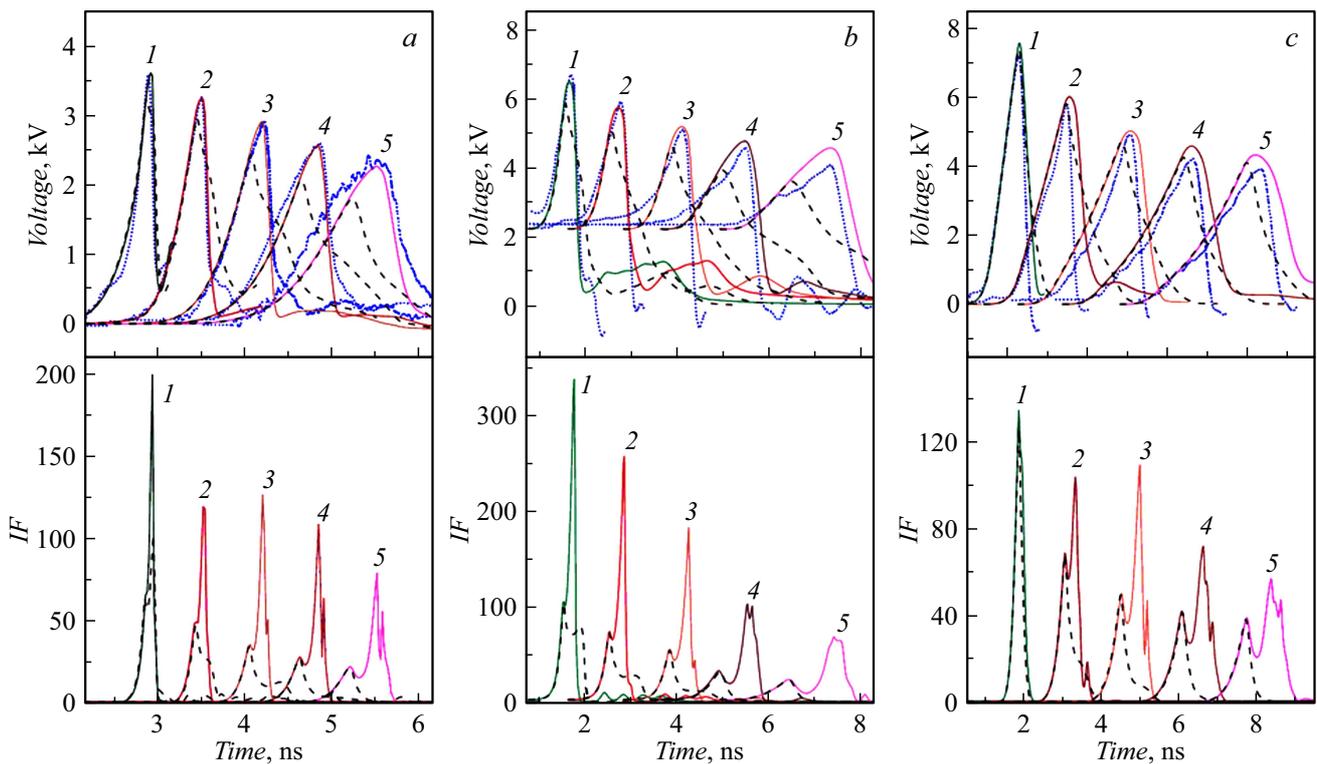


Рис. 6. Сравнение экспериментальных (точечные кривые) и расчетных (сплошные кривые) зависимостей напряжения и интегрального фактора IF от времени в процессе переключения показано на кривых 1–5 для: *a* — кремниевого диода диаметром 6 мм с $\rho = 32 \Omega \cdot \text{см}$ ($N_d \sim 1.5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$) при значениях коэффициента K , равных 2.7, 4, 8, 12 и 30 без напряжения смещения [20]; *b* — кремниевого тиристора диаметром 32 мм с $\rho = 80 \Omega \cdot \text{см}$ ($N_d \sim 0.6 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$) при значениях коэффициента K , равных 2.7, 4, 4.65, 10 и 15 с напряжением смещения; *c* — кремниевого тиристора, как в (*b*) при значениях коэффициента K , равных 1.9, 3.5, 4.8, 7 и 10 без напряжения смещения. Штриховыми кривыми показаны расчетные зависимости при $K = 1.01$.

вышает насыщенную скорость носителей $V_s = 10^7 \text{ см/с}$. Данный механизм близок к известным TRAPATT-волнам в полупроводниках [7]. Скорость движения таких волн ограничена только скоростью света в полупроводнике.

На стадии ($t_1 - t_2$) ударно-ионизационные фронты движутся в обе стороны от плоскости n - p -перехода, заполняя ООЗ плотной электрон-дырочной плазмой. Скорость движения фронтов до пяти раз превышает величину V_s . Одновременно с этим процессы ионизации происходят в каждой точке нейтральной части n -базы (кривые 2 на рис. 5, *a*). Рост плотности плазмы приводит к тому, что наступает момент времени, когда напряжение активной части тиристора начинает уменьшаться. К моменту времени t_2 плазма полностью заполняет ООЗ (кривые 2 на рис. 5).

На стадии ($t_2 - t_3$) продолжается заполнение структуры плазмой, главным образом за счет процессов ионизации в каждой точке n -базы, расположенной за пределами заполненной плазмой ООЗ (кривые 2, 3 на рис. 5, *a*). Уменьшение сопротивления структуры приводит к разряду емкости пассивной части и росту тока через активную часть тиристора (штриховая кривая 2 на рис. 4) Амплитуда плотности тока, протекающего через активную часть прибора ($K = 4$ или $\sim 25\%$ от

полной площади), достигает 5 кА/см^2 . Рост плотности тока увеличивает интенсивность процессов ионизации, что снижает время заполнения плазмой активной части и длительность процесса переключения прибора. Если не учитывать пространственной неоднородности процесса переключения, то плотность тока, текущего через прибор на стадии переключения, значительно упадет, а длительность процесса переключения вырастет в несколько раз и становится больше наносекунды (штриховая кривая 2 на рис. 6, *b*).

В пассивной части прибора вследствие отсутствия процессов ионизации динамика электронов, дырок и поля проста и не показана на рисунках. С увеличением напряжения на приборе ширина ООЗ и амплитуда поля в пассивной части растут, с уменьшением, соответственно, падают. Заметим, что заряд в пассивную часть поступает из активной части прибора, где он возникает в процессах ионизации.

К моменту t_3 n -база оказывается заполненной плазмой с плотностью $\sim 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Поле оказывается вытесненным в узкие области за пределы плазмы (кривые 3 на рис. 5, *a*). Далее в результате развития процессов ионизации эти области поля также заполняются плотной плазмой. На данном этапе интегральный фактор имеет

максимум IF_3 , амплитуда которого невелика (кривая 9 на рис. 4) из-за узости областей сильного поля.

Таким образом, можно выделить три последовательных этапа заполнения структуры плазмой: с помощью ударно-ионизационных волн, распространяющихся в ООЗ, за счет процессов ионизации в каждой точке n -базы, расположенной за пределами заполненной плазмой ООЗ, и волновым образом в узких областях поля, расположенных за пределами заполненной плазмой n -базы. Распространение ударно-ионизационных волн в ООЗ начинается на стадии нарастания импульса напряжения, а заканчивается в начале стадии спада напряжения. Большая часть процесса переключения происходит в результате снижения сопротивления прибора на втором и третьем этапах заполнения структуры плазмой. Разряд пассивной части структуры вызывает быстрый рост тока в активной части, что существенно ускоряет процесс заполнения структуры плазмой и сокращает длительность процесса переключения.

Такой сценарий похож на „двухключевой“ механизм переключения тиристора в [19], где вначале заполняется плазмой n -база, а затем p -база. Последовательно срабатывают два „ключа“, обеспечивая наблюдаемое в эксперименте линейное падение напряжения на стадии переключения. Работа „ключей“ критически зависит от величины активной площади. Если она выше определенного предела, то плотность тока оказывается меньше необходимой для создания области поля с амплитудой выше порога ионизации, и „ключ“ не срабатывает.

Переключение тиристора без приложенного напряжения смещения протекает аналогично вышеизложенному, однако есть ряд особенностей. Результаты расчета напряжения и тока через активную часть показаны на кривых 3 и 4 на рис. 4, распределения концентрации носителей и поля для моментов времени на рис. 4 показаны на рис. 5, *b*. Напряжение прикладывается к структуре, заполненной основными носителями, поэтому сначала в окрестности n - p -перехода образуется ООЗ. Электроны и дырки двигаются в противоположные стороны от n - p -перехода, вследствие чего ширина ООЗ увеличивается, а концентрация носителей снижается, пока не станет меньше 10^6 cm^{-3} (кривые 7 и 8 на рис. 4). Ширина n - и p -баз в структуре тиристора p^+ - p - n - p - n^+ -типа такова, что дырки и электроны из областей p - n - и p - n^+ -переходов соответственно не успевают достичь ООЗ. Поэтому дальнейший рост концентрации дырок и электронов (кривые 7 и 8 на рис. 4) связан исключительно с процессами туннельной ионизации глубоких уровней в области сильного поля в ООЗ. После достижения концентрации $n_0 \sim 10^9 \text{ cm}^{-3}$ (показано штриховой прямой на рис. 4) включаются процессы лавинного размножения, и дальнейший рост концентрации носителей связан именно с этим.

По мере увеличения ширины ООЗ ее доля в общем напряжении растет, а нейтральной части n -базы — падает. К моменту времени, соответствующему максимуму IF_1 на рис. 4, геометрия распределения поля в структуре

тиристора с напряжением смещения и без него заметно отличаются друг от друга (кривые 1 на рис. 5, *a* и *b*). Это связано с тем, что скорость носителей в нейтральной части n -базы насыщается, и на распределении поля появляется постоянный участок. Площадь под кривой распределения поля в случае тиристора без напряжения смещения оказывается больше, чем с ним. Именно с этим обстоятельством связано наблюдаемое в эксперименте при $dU/dt > 4 \text{ kV/ns}$ превышение напряжения включения тиристора без напряжения смещения относительно тиристора со смещением (рис. 3). При $dU/dt < 4 \text{ kV/ns}$ напряжение на структуре уменьшается, насыщения скорости носителей в нейтральной части n -базы не происходит, и картина меняется на обратную.

В тиристоре с напряжением смещения относительно тиристора без него ширина ООЗ больше, соответственно ударно-ионизационный фронт проходит большее расстояние, и амплитуда поля достигает больших величин (рис. 5). Это приводит к более высокой плотности избыточной плазмы и меньшей длительности процесса переключения в тиристоре с напряжением смещения по сравнению с тиристором без него, что находится в согласии с результатами экспериментов (кривые 3 и 4 на рис. 3).

При $dU/dt > 8 \text{ kV/ns}$ в расчетах наблюдается смена источника начальных носителей, запускающих процесс переключения тиристора без напряжения смещения. Неосновные дырки, возникающие при ионизации нейтральной части n -базы, проникают в ООЗ и запускают процесс формирования ударно-ионизационного фронта. Этот механизм совпадает с обнаруженным ранее в [31].

Как показали расчеты, распределения концентрации носителей и поля в месте запуска ударно-ионизационного фронта зависят от скорости нарастания напряжения dU/dt , а не от величины приложенного напряжения смещения. При близких значениях dU/dt , как видно из сравнения кривых 1 на рис. 5, *a* и *b*, они практически совпадают. Это обстоятельство существенно для анализа пространственной неоднородности процесса переключения и подробнее рассмотрено ниже.

2.3. Пространственная неоднородность процесса переключения

На рис. 6 приведены результаты расчетов процессов переключения кремниевых диодов и тиристорov с напряжением смещения и без него. Показаны наиболее близкие к эксперименту расчетные зависимости напряжения и интегрального фактора IF от времени. Для сравнения приведены экспериментальные зависимости (точные кривые) и результаты расчетов практически однородного переключения при $K = 1.01$ (штриховые кривые). Видно, что учет неоднородности переключения позволяет получить хорошее согласие с экспериментом. Также можно заметить, что с увеличением скорости нарастания воздействующего напряжения результаты расчета однородного переключения приближаются к эксперименту,

т.е. степень однородности процесса переключения растет (см. кривые 1-5).

На зависимостях интенсивности процесса ионизации от времени, представленных в виде интегрального фактора IF на рис. 6, присутствуют три характерных максимума (IF_1 , IF_2 и IF_3 в обозначениях на рис. 4), которые соотносятся с процессом формирования ударно-ионизационного фронта в ООЗ, процессом заполнения плазмой n -базы и областей за ее пределами. При увеличении dU/dt первый максимум сдвигается ко второму, пока не сливается с ним. В этом случае моменты запуска ударно-ионизационного фронта и начала процесса переключения совпадают, а сам процесс переключения становится практически однородным.

Как видно из рис. 6, при переходе от кривой 5 к кривой 1 скорость нарастания напряжения увеличивается, соответственно растет величина напряжения и амплитуда поля, достигнутые в структуре прибора за время формирования ударно-ионизационного фронта. Это приводит к росту интенсивности процессов ионизации в структуре и амплитуды первого максимума интегрального фактора IF_1 на кривых 5-1 на рис. 6.

В процессе однородного переключения ($K = 1.01$), представленного в виде штриховых кривых рис. 6, максимум IF всегда только один и совпадает с максимумом IF_1 неоднородного переключения. В процессе неоднородного переключения запуск ударно-ионизационного фронта приводит к перераспределению тока в приборе: ток через активную часть растет, а через пассивную — уменьшается. Соответственно и напряжение, и интенсивность процессов ионизации в активной части растут, пока плотность сгенерированной электрондырочной плазмы не станет достаточной для компенсации поля в структуре прибора и начала спада напряжения. В процессе пространственно-однородного переключения такого перераспределения тока не происходит, и после запуска ударно-ионизационного фронта ток через структуру и напряжение на ней начинают немедленно снижаться. Поскольку полученная при этом зависимость напряжения от времени существенно отличается от экспериментальной, можно предположить, что пространственная неоднородность существует уже к моменту запуска ударно-ионизационного фронта.

По результатам сравнения расчетов и экспериментальных данных, показанных на рис. 6, можно построить зависимости величины $K = S/S_a$ от скорости нарастания напряжения переключения dU/dt .

Зависимости для переключения кремниевых диодов и тиристоров с предварительно приложенным напряжением смещения и без него показаны на рис. 7. Видно, что при уменьшении dU/dt величина K быстро нарастает, что соответствует снижению величины активной площади вплоть до ее исчезновения при $dU/dt < 1 \text{ kV/ns}$. Данный результат хорошо согласуется с экспериментальным фактом отсутствия эффекта быстрого переключения при $dU/dt < 0.5 \text{ kV/ns}$ [17]. При увеличении dU/dt величина K монотонно стремится к единице, что

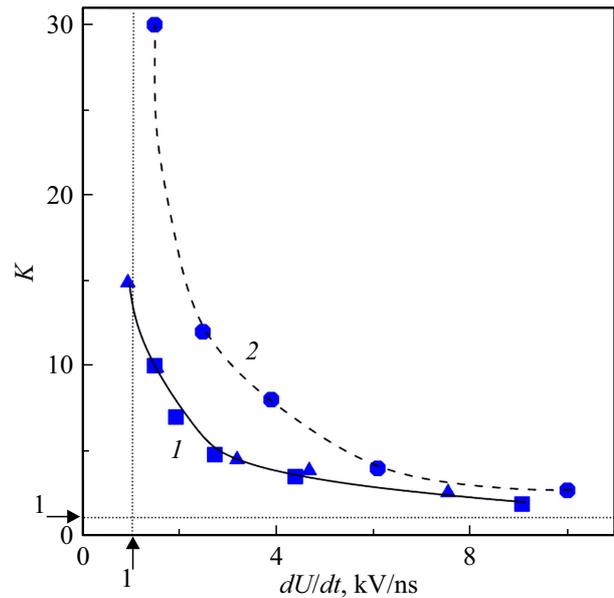


Рис. 7. Зависимость коэффициента $K (S/S_a)$ от скорости роста напряжения переключения для кремниевого диода диаметром 6 мм с $\rho = 32 \Omega\cdot\text{см}$ (круги) [20], кремниевого тиристора диаметром 32 мм с $\rho = 80 \Omega\cdot\text{см}$ с приложенным напряжением смещения (треугольники) и без него (квадраты).

эквивалентно приближению активной площади к полной площади прибора.

Как и ранее в [18], снижение удельного сопротивления материала прибора приводит к росту величины K при фиксированном dU/dt (кривые 1 и 2 на рис. 7). При повышении сопротивления материала полупроводника распределение электрического поля в структуре становится более однородным и объем области занятой процессами лавинного размножения растет. И, хотя амплитуда поля уменьшается, суммарное количество мест, где возникают токовые каналы, составляющих активную площадь, растет.

Как показали расчеты, величина активной площади при переключении тиристора зависит от скорости нарастания напряжения dU/dt , а не от того, было приложено напряжение смещения или нет (треугольники и квадраты на рис. 7). Также не зависит от величины напряжения смещения процесс формирования ударно-ионизационного фронта в ООЗ: интенсивность процессов ионизации и концентрация носителей в момент формирования фронта определяются только величиной dU/dt (кривые 1 на рис. 5). С другой стороны, для согласия с экспериментальными данными необходимо, чтобы неоднородность распределения тока по площади прибора присутствовала в структуре прибора уже на стадии формирования ударно-ионизационного фронта. Эти обстоятельства позволяют предположить, что величина активной площади зависит от интенсивности процессов ионизации в момент формирования ударно-ионизационного фронта, т.е. от величины IF_1 . Используя

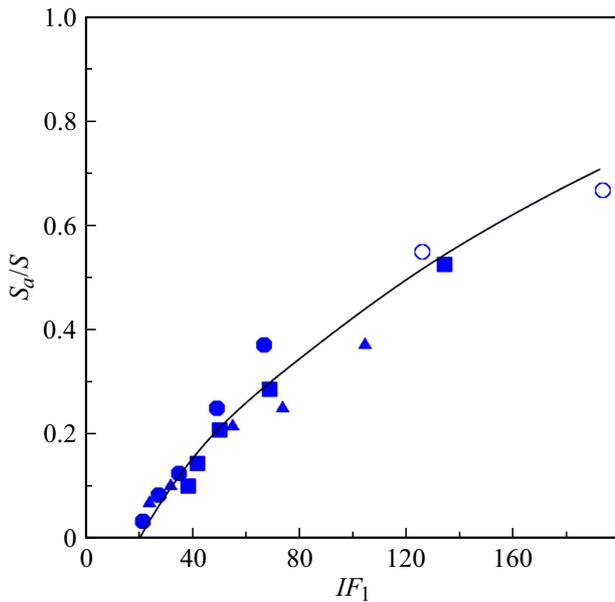


Рис. 8. Зависимость отношения активной и полной площади от амплитуды первого максимума интегрального фактора IF_1 для кремниевго диода диаметром 6 мм с $\rho = 32 \Omega \cdot \text{см}$ без напряжения смещения (круги) [20] и кремниевго тиристора диаметром 32 мм с $\rho = 80 \Omega \cdot \text{см}$ с приложенным напряжением смещения (треугольники) и без него (квадраты). Светлые круги — см. пояснения в тексте.

результаты, приведенные на рис. 6, построим (рис. 8) зависимость отношения активной и полной площади от величины IF_1 для переключения тиристоров и диодов с предварительно приложенным напряжением смещения и без него. Две дополнительные точки (светлые круги на рис. 8) получены с помощью расчетов процесса переключения диода при более высоких, чем в эксперименте, скоростях нарастания напряжения переключения — 25 и 17 кВ/нс, соответствующие им величины активной площади — 0.55 и 0.63 — получены интерполяцией кривой 2 на рис. 7. Как видно из рис. 8, все точки лежат вдоль одной кривой, и при изменении величины IF_1 от 20 до 180 доля активной площади возрастает от 0 до 0.8 от полной площади прибора. Заметим, что пространственная неоднородность существует только в ограниченном диапазоне изменения величины IF_1 . При этом построение зависимости активной площади от величины максимума IF_2 или средней по времени величины IF не позволяет получить единую кривую для всех точек. Таким образом, если использовать в качестве параметра не коэффициент лавинного размножения, а его интеграл, то все точки лежат вдоль одной кривой независимо от структуры прибора (диод или тиристор), удельного сопротивления материала и величины предварительно приложенного напряжения.

Приведенная на рис. 8 зависимость ограничена величиной $IF_1 \sim 20$, ниже которой активная площадь исчезает. Величина $IF_1 \sim 20$ соответствует минимальной

интенсивности процессов ионизации, которая обеспечивает генерацию электронно-дырочной плазмы с концентрацией, равной уровню легирования базы. Это является необходимым условием для компенсации электрического поля, создаваемого ионами легирующей примеси и запуска ударно-ионизационного фронта. При $IF_1 < 20$ ударно-ионизационный фронт не образуется, а процесс переключения происходит значительно более медленно за счет двигающихся с насыщенной скоростью лавин ударной ионизации. Отметим, что условие $IF_1 < 20$ коррелирует с условием $dU/dt < 1$ на рис. 4, при котором активная площадь уменьшается до нуля, и с наблюдаемым в эксперименте исчезновением эффекта быстрого переключения при $dU/dt < 0.5 \text{ кВ/нс}$ [17].

Заключение

В работе экспериментально и теоретически исследован процесс переключения тиристора импульсом напряжения, нарастающим со скоростью dU/dt до 10 кВ/нс. Тиристор имел структуру $p^+-p-n-p-n^+$ -типа толщиной 520 мкм и диаметром 32 мм и был изготовлен из кремния с $\rho = 80\text{--}85 \Omega \cdot \text{см}$. Исследования проводились как в режиме с предварительно приложенным напряжением смещения ($U_0 = 2.2 \text{ кВ}$), так и без него. В расчетах полагалось, что площадь прибора делится на активную часть, в которой происходят процессы ионизации, и пассивную, где их нет. По результатам расчетов находилась величины активной площади S_a , обеспечивающие наилучшее совпадение расчетных и экспериментальных осциллограмм напряжения. Для характеристики интенсивности процессов ионизации в расчетах был введен интегральный фактор IF , равный количеству электронно-дырочных пар, возникающих за счет процессов лавинного размножения при прохождении единичного носителя через область сильного электрического поля. Рассмотрим полученные результаты.

Во-первых, при увеличении dU/dt от 1 до 10 кВ/нс напряжение переключения возрастает от 3 до 7 кВ, а длительность процесса переключения сокращается до 200 пс. При $dU/dt < 4 \text{ кВ/нс}$ тиристор с напряжением смещения по сравнению с тиристором без него имеет меньшую длительность процесса переключения и более высокую амплитуду напряжения переключения. При $dU/dt > 4 \text{ кВ/нс}$ напряжение переключения тиристора без смещения становится больше, чем тиристора со смещением. Как показали расчеты, это связано с увеличением амплитуды поля в структуре и насыщением скорости движения носителей в нейтральной части n -базы, вследствие чего в распределении поля появляется постоянный участок.

Во-вторых, длительность процесса переключения при $dU/dt \sim 1$ и 1.5 кВ/нс начинает асимптотически увеличиваться для тиристора с приложенным смещением и без него соответственно. Данные величины близки к ве-

личине dU/dt , ниже которой эффект быстрого переключения исчезает в ранее проведенных экспериментах [17].

В-третьих, расчеты хорошо описывают экспериментальные результаты только при определенном виде зависимости S_a от dU/dt . Величина S_a с увеличением dU/dt растет, приближаясь к полной площади прибора при $dU/dt > 10 \text{ kV/ns}$. С уменьшением dU/dt величина S_a снижается, стремясь к нулю при $dU/dt < 1 \text{ kV/ns}$. Найдено, что режим переключения тиристора как с напряжением смещения, так и без него, не влияет на зависимость S_a от dU/dt .

В-четвертых, пространственная неоднородность распределения тока вдоль площади возникает на этапе формирования ударно-ионизационного фронта в ООЗ прибора. Размер активной площади пропорционален интенсивности процессов ионизации на этом этапе, характеристикой которой является величина максимума интегрального фактора IF_1 . Все точки на зависимости S_a от IF_1 лежат вдоль одной кривой, и при изменении величины IF_1 от 20 до 180 величина S_a возрастает от 0 до 0.8 от полной площади прибора (рис. 8). Условия исчезновения активной площади $IF_1 < 20$ и $dU/dt < 1 \text{ kV/ns}$ эквивалентны друг другу и близки к экспериментальной границе эффекта переключения. Условие $IF_1 > 180$ соответствует $dU/dt > 10 \text{ kV/ns}$, когда величина S_a практически сравнивается с полной площадью прибора, а запуск ударно-ионизационного фронта происходит одновременно с началом процесса переключения.

В-пятых, для более широкого анализа были привлечены данные по переключению силовых диодов [20]. Получена единая зависимость S_a от IF_1 для диодов и тиристорov, независимо от сопротивления материала полупроводника и величины напряжения смещения.

В работе показано, что существует корреляция между величиной активной площади и интенсивностью процессов ионизации на этапе формирования ударно-ионизационного фронта в ООЗ прибора. Природа активной площади на этом этапе, по-видимому, связана с пространственной неоднородностью распределения поля и дискретным характером возникновения лавин. В момент запуска ударно-ионизационного фронта ток вдоль его площади уже распределен неоднородно. При движении фронта возможен только рост неоднородностей [11]. Места фронта, достигшие границ ООЗ первыми, формируют каналы с высокой проводимостью, за счет чего происходит перераспределение тока в их пользу. Площадь этих каналов является реальной активной площадью, через которую далее идет ток в процессе переключения. Величина S_a , определяемая из сравнения расчета и эксперимента, — это параметр, который является оценкой средней величины реальной активной площади.

Существование пространственной неоднородности распределения тока вдоль площади прибора является достаточно грубым эффектом, поскольку при изменении dU/dt от 1 до 10 kV/ns величина активной площади возрастает от нуля до практически полной площади

прибора. Такое большое изменение активной площади нельзя объяснить неточностью измерений и модельных допущений. При $dU/dt < 10 \text{ kV/ns}$ пространственная неоднородность является неотъемлемым свойством эффекта быстрого (пикосекундного) переключения. Это, в частности, позволяет описать эксперимент, в ходе которого был открыт эффект быстрого переключения [1], как пространственно-неоднородное переключение под действием ударно-ионизационных волн. Без учета неоднородности расчетная длительность процесса переключения оказывается завышенной в несколько раз относительно экспериментальной (см. штриховые кривые на рис. 6, а).

Поскольку зависимость между величиной активной площади и величиной IF_1 получена из достаточно общих соображений, можно ожидать что подобная зависимость будет наблюдаться при некотором изменении температуры и в других полупроводниках, где обнаружен эффект быстрого переключения.

Финансирование работы

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ № 22-29-01257.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] И.В. Грехов, А.Ф. Кардо-Сысоев. Письма в ЖТФ, **5**, 950 (1979).
- [2] A.F. Kardo-Sysoev. *New Power Semiconductor Devices for Generation of Nano and Subnanosecond Pulses, in Ultra-Wideband Radar Technology*, ed. by J.D. Taylor (CRC Press, Boca Raton, 2001)
- [3] M. Levinshtein, J. Kostamovaara, S. Vainshtein. *Breakdown Phenomena in Semiconductors and Semiconductor Devices* (World Scientific, London, 2005)
- [4] I.V. Grekhov, S.V. Korotkov, P.V. Rodin. IEEE Trans. Plasma Sci., **36** (2), 378 (2008).
- [5] I.V. Grekhov. IEEE Trans. Plasma Sci., **38** (5), 1118 (2010).
- [6] V.I. Brylevskiy, I.A. Smirnova, A.V. Rozhkov, P.N. Brunkov, P.V. Rodin, I.V. Grekhov. IEEE Trans. Plasma Sci., **44** (10), 1941 (2016).
- [7] B.C. DeLoach, D.L. Sharfetter. IEEE Trans. Electron Devices, **17** (1), 9 (1970).
- [8] С.Н. Вайнштейн, Ю.В. Жильев, М.Е. Левинштейн. Письма в ЖТФ, **14** (16), 1526 (1988).
- [9] И.В. Грехов, В.М. Ефанов. Письма в ЖТФ, **16** (17), 9 (1990).
- [10] А.Ф. Кардо-Сысоев, М.В. Попова. ФТП, **30** (5), 803 (1996).
- [11] А.М. Минарский, P.V. Rodin. Solid-State Electron., **41** (6), 813 (1997).
- [12] А.С. Кюрегян. Письма в ЖТФ, **31** (24), 11 (2005).
- [13] П.Б. Родин, А.М. Минарский, И.В. Грехов. Письма в ЖТФ, **38** (11), 78 (2012).

- [14] M.S. Ivanov, N.I. Podolska, P.B. Rodin. *J. Phys.: Conf. Ser.*, **816**, 012033 (2017).
- [15] P.B. Rodin, M.S. Ivanov. *J. Appl. Phys.*, **127**, 044504 (2020).
- [16] M.S. Ivanov, V.I. Brylevskiy, I.A. Smirnova, P.B. Rodin. *J. Appl. Phys.*, **131**, 014502 (2022).
- [17] А.И. Гусев, С.К. Любутин, С.Н. Рукин, С.Н. Цыранов. *ФТП*, **50** (3), 398 (2016).
- [18] А.И. Гусев, С.К. Любутин, С.Н. Рукин, Б.Г. Словицкий, С.Н. Цыранов. *ПТЭ*, **4**, 95 (2017).
- [19] А.И. Гусев, С.К. Любутин, С.Н. Рукин, С.Н. Цыранов. *ФТП*, **51** (5), 680 (2017).
- [20] С.К. Любутин, В.Е. Патраков, С.Н. Рукин, Б.Г. Словицкий, С.Н. Цыранов. *ФТП*, **57** (7), 594 (2023). DOI: 10.61011/FTP.2023.07.56836.4871
- [21] A. Gusev, S. Lyubutin, S. Rukin, B. Slovickovsky, S. Tsyranov, O. Perminova. *Semicond. Sci. Technol.*, **33**, 115012 (2018).
- [22] A.I. Gusev, S.K. Lyubutin, V.E. Patrakov, S.N. Rukin, B.G. Slovickovsky, M.J. Barnes, T. Kramer, V. Senaj. *J. Instrument.*, **14** (10), 10006 (2019).
- [23] A.S. Kesar, A. Raizman, G. Atar, S. Zoran, S. Gleizer, Y. Krasik, D. Cohen-Elias. *Appl. Phys. Lett.*, **117**, 013501 (2020).
- [24] А.И. Гусев, С.К. Любутин, С.Н. Рукин, Б.Г. Словицкий, С.Н. Цыранов. *ФТП*, **48** (8), 1095 (2014).
- [25] С.К. Любутин, С.Н. Рукин, Б.Г. Словицкий, С.Н. Цыранов. *ФТП*, **46** (4), 535 (2012).
- [26] P. Rodin, U. Ebert, W. Hundsdorfer, I.V. Grekhov. *J. Appl. Phys.*, **92**, 1971 (2002).
- [27] М.С. Иванов, В.И. Брылевский, П.Б. Родин. *Письма в ЖТФ*, **47** (13), 32 (2021).
- [28] P. Rodin, A. Rodina, I. Grekhov. *J. Appl. Phys.*, **98**, 094506 (2005).
- [29] E.V. Astrova, V.B. Voronkov, V.A. Kozlov, A.A. Lebedev. *Semicond. Sci. Technol.*, **13**, 488 (1998).
- [30] V.I. Brylevskiy, I.A. Smirnova, A.A. Gutkin, P.N. Brunkov, P.B. Rodin, I.V. Grekhov. *J. Appl. Phys.*, **122** (18), 185701 (2017).
- [31] И.В. Грехов, А.Ф. Кардо-Сысоев, Л.С. Костина. *Письма в ЖТФ*, **5**, 961 (1979).