

Сверхмощная пикосекундная коммутация тока кремниевым обострителем с механизмом последовательного переключения структур

© С.К. Любутин, С.Н. Рукин[¶], Б.Г. Словицкий, С.Н. Цыранов

Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук,
620016 Екатеринбург, Россия

(Получена 26 ноября 2009 г. Принята к печати 12 декабря 2009 г.)

Экспериментально реализован и теоретически исследован процесс сверхбыстрой коммутации тока кремниевым обострителем с механизмом последовательного переключения структур. На прибор, расположенный в 50-омной передающей линии и содержащий 44 последовательно соединенные диодные структуры, подавался импульс напряжения амплитудой до 180 кВ и временем нарастания 400 пс. После переключения прибора в передающей линии получены импульсы амплитудой 150 кВ с временем нарастания 100 пс. Численное моделирование показало, что при скорости нарастания входного напряжения на одну структуру более $4 \cdot 10^{13}$ В/с, реализованной в эксперименте, электрическое поле у p - n -перехода достигает порога зинеровского пробоя ($\sim 10^6$ В/см) даже в том случае, когда структура диода содержит технологические примеси с глубокими уровнями ионизации с концентрацией 10^{11} см⁻³.

1. Введение

Открытие эффекта формирования быстрого ударно-ионизационного фронта в кремниевых диодах при воздействии короткого импульса обратного напряжения [1] привело к созданию нового класса сверхмощных пикосекундных переключателей, способных коммутировать пиковую мощность 10^5 – 10^6 Вт на один p - n -переход за время 100–200 пс [2,3]. В настоящее время продолжаются исследования, направленные на выяснение механизма появления инициирующих носителей, обеспечивающих детерминированный запуск ионизационного фронта. В конечном счете именно процесс генерации инициирующих носителей по тому или иному механизму ограничивает максимально достижимую величину электрического поля E_m в структуре перед процессом коммутации, которая в свою очередь определяет наиболее важные характеристики переключателя — время пробы фронта ударной ионизации вдоль структуры (время коммутации) и концентрацию электронно-дырочной плазмы в структуре после переключения (плотность тока и остаточное напряжение).

Количественные оценки, выполненные в работе [4], показали, что термогенерация и ударная ионизация электронами в квазинейтральной области n -базы не могут обеспечить запуск ионизационного фронта при типичных значениях напряжения смещения $U_0 = 500$ – 1000 В и скорости роста обратного напряжения dU/dt около 1 кВ/нс. В работах [5–7] исследован процесс запуска ударно-ионизационного фронта в кремниевой структуре, обусловленный термотуннельной ионизацией глубоких уровней, представляющих собой технологические дефекты, концентрация которых находится в диапазоне $N_{PI} = 10^{11}$ – 10^{13} см⁻³. Расчеты такого механизма инициирования носителей, выполненные для $N_{PI} = 10^{12}$ см⁻³ и $dU/dt = 1$ кВ/нс, показали, что электрическое по-

ле в структуре перед пробоем достигает значения $E_m \approx 3 \cdot 10^5$ В/см. При этом концентрация носителей достигает начальной величины $n_0 \approx 10^9$ см⁻³, достаточной для запуска фронта ударной ионизации, за время задержки $t_d = 1$ нс, которое хорошо согласуется с экспериментальными данными.

В экспериментах (см. [3]) исследован процесс переключения при более высоких значениях dU/dt , достигающих 9 кВ/нс. При $dU/dt > 5$ кВ/нс максимальное значение электрического поля в структуре E_m выходило на участок насыщения и ограничивалось величиной $4.4 \cdot 10^5$ В/см. Ограничение E_m связывалось также с началом туннельной ионизации через неконтролируемые глубокие уровни.

С другой стороны, численные расчеты, выполненные в работе [8], показали, что существует принципиальная возможность увеличения E_m и возбуждения значительно более быстрого фронта ионизации, если база структуры свободна от примесей с глубокими уровнями. В этом случае при $dU/dt \approx 10^{13}$ В/с поле у p - n -перехода через время $t_d \approx 1$ нс достигает порога зинеровского пробоя $E_m \approx 1$ МВ/см и инициирующие носители рождаются за счет прямой туннельной ионизации кремния. Сформированный при этих условиях туннельно-ударный ионизационный фронт обеспечивает уникальные характеристики переключателя — база структуры толщиной $W = 100$ мкм заполняется плазмой с концентрацией более 10^{17} см⁻³ за время около 30 пс, а скорость роста напряжения на нагрузке 50 Ом достигает величины 500 кВ/нс.

В работе [9] порог зинеровского пробоя для высоковольтных кремниевых структур был достигнут экспериментально. Прибор, содержащий 20 последовательно соединенных структур, выдерживал перед пробоем напряжение ~ 200 кВ, нарастающее за ~ 1 нс. Выходной импульс имел амплитуду 150 кВ с фронтом 200–250 пс, плотность коммутируемого тока достигала 12 кА/см². Однако численное моделирование, проведенное в рамках

[¶] E-mail: rukin@iep.uran.ru

той же работы, показало, что в условиях данного эксперимента время заполнения полупроводниковой структуры плотной электронно-дырочной плазмой при прохождении туннельно-ударного фронта ионизации (время коммутации t_s) не превышало 60 пс. Большое время нарастания импульса, полученное в эксперименте, объяснялось конечной геометрической длиной коммутатора и его индуктивностью. Учет этих факторов по аналогии с газоразрядными промежутками, встроенными в коаксиальную линию [10], показал, что даже при $t_s = 0$ фронт выходного импульса не может быть менее 190 пс, что находится в согласии с полученным экспериментальным результатом.

Цель данной работы характеризуется двумя основными аспектами. Экспериментальная часть направлена на снижение влияния геометрической длины прибора и его индуктивности на время нарастания выходного напряжения за счет реализации механизма последовательного во времени переключения полупроводниковых структур [11]. При этом по мере коммутации структур пространство линии, где расположен прибор, заполняется электромагнитным полем бегущей волны, а время нарастания выходного напряжения определяется временем переключения и индуктивностью только нескольких последних структур прибора. В расчетной части работы процесс коммутации исследуется методами численного моделирования. Одна из задач состоит в оценке возможности и условий достижения величиной E_m порога зинеровского пробоя в структуре, содержащей технологические дефекты с глубокими уровнями.

2. Экспериментальная часть

Схема экспериментальной установки подобна используемой в работе [9] и приведена на рис. 1. Для создания перенапряжения на исследуемом коммутаторе S3 использовались два каскада предварительного обострения импульса, включающие линии FL1 и FL2 и коммутаторы S1 и S2. Линия FL1 заряжалась от твердотельного SOS-драйвера за ~ 3 нс до напряжения ~ 300 кВ, после чего срабатывал коммутатор S1 и линия FL2 заряжалась до ~ 220 кВ за время около 1 нс. При включении коммутатора S2 линия FL3 заряжалась до ~ 180 кВ за время около 400 пс. Этот импульс воздействовал на исследуемый коммутатор S3, при включении которого линия FL3 разряжалась на передающую линию FL4 и далее на согласованную нагрузку 4.

Зарядная линия FL3 и передающая FL4 имеют расчетное значение волнового сопротивления 48.6 Ом при

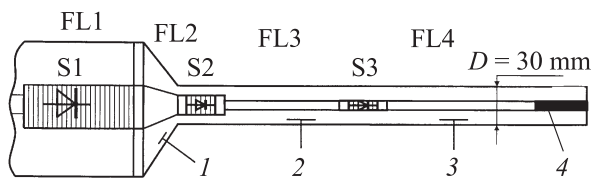


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

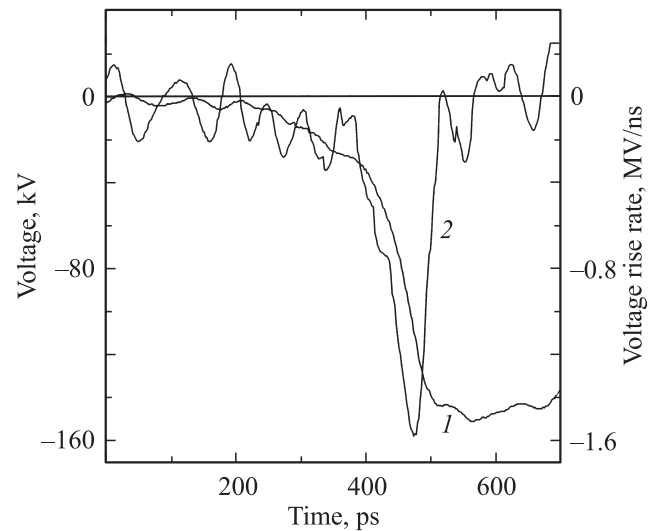


Рис. 2. Оциллограмма импульса напряжения в передающей линии FL4 (кривая 1), амплитуда 153 кВ, пиковая мощность 480 МВт; и производная импульса по времени (кривая 2), амплитуда 1.58 МВ/нс.

наружном диаметре 30 мм. Все линии заполнены трансформаторным маслом. Исследуемый коммутатор S3 был установлен на расстоянии 60 мм от коммутатора S2 и представлял собой сборку из последовательно соединенных кремниевых диодных структур $p^+ - p - n - n^+$ -типа толщиной 340 мкм. Наилучший результат, соответствующий минимальной длительности фронта импульса в линии FL4, был получен при использовании 44 последовательно соединенных структур площадью 0.25 см^2 и глубиной залегания $p - n$ -перехода 180 мкм. Конструктивно прибор состоял из 11 диодов, каждый из которых содержал по 4 структуры, питаемые на медную пластину-охладитель. Общая межэлектродная длина коммутатора, включая толщину охладителей, составляла 28 мм.

Для регистрации импульсов напряжения в линиях FL3 и FL4 использовались емкостные делители напряжения 2 и 3 с емкостью низковольтного плеча около 100 пФ, конструктивно совмещенные с разъемами типа SMA. Тракты регистрации включали микроволновые кабели Times Microwave SFT-304 длиной 2 м с частотой отсечки более 20 ГГц и высоковольтные аттенюаторы фирмы „Barth Electronics“ с полосой пропускания более 30 ГГц. В качестве регистратора использовался цифровой осциллограф реального времени Tektronix TDS-6154C (15 ГГц, дискретизация 25 пс). Суммарное временное разрешение системы регистрации составляло не более 50 пс.

Рис. 2 демонстрирует фронт импульса напряжения с емкостного делителя 3 (кривая 1), установленного в передающей линии FL4. Амплитуда импульса напряжения — 153 кВ, пиковая мощность — 480 МВт, плотность тока в коммутаторе S3 — около 12.5 кА/см^2 . При зарядке линии FL3 через коммутатор S3 протекает ток смещения, создавая в линии FL4 предимпульс, амплитуда

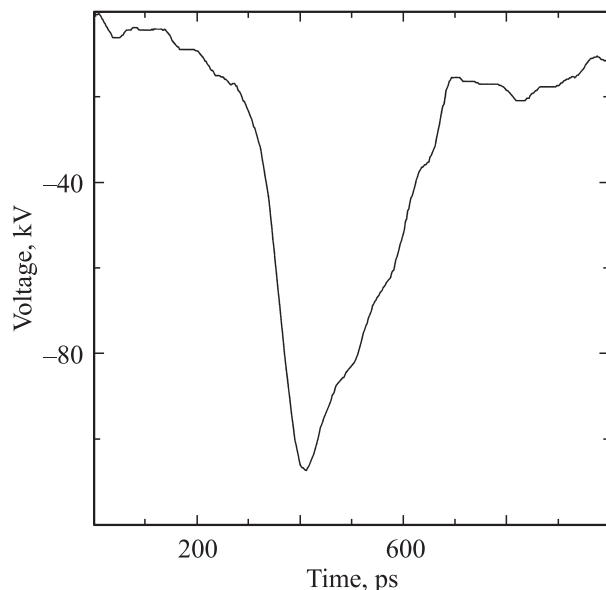


Рис. 3. Осциллограмма импульса напряжения в закороченной передающей линии FL4: амплитуда 107 кВ, пиковая мощность 228 МВт, фронт 80 пс (уровень 0.2–0.9), длительность на полувысоте 235 пс.

которого составляет $\sim 20\%$ от амплитуды основного импульса. Поэтому время коммутации тока оценивалось из осциллограмм по уровню 0.2–0.9 от амплитудного значения. При этих условиях измеренное время коммутации составило 100 пс. Кривая 2 представляет собой производную импульса напряжения по времени. Максимум кривой соответствует значению $1.58 \cdot 10^{15}$ В/с.

Для укорочения длительности импульса использовалась шунтировка внутреннего и внешнего проводников линии FL4 проволочкой диаметром 1 мм, установленной под прямым углом к поверхности электродов в пространстве между коммутатором S3 и датчиком 3. Благодаря короткому фронту импульса индуктивность проволочки была достаточна для прохождения сформированного импульса вдоль линии FL4 к нагрузке 4. Однако при этом происходило снижение амплитуды импульса до ~ 107 кВ, а фронт импульса сокращался до ~ 80 пс (рис. 3).

Эксперименты проводились при частоте следования импульсов от одиночных до 1 кГц в режиме коротких пачек импульсов длительностью несколько секунд. Общее число включений установки при проведении экспериментов составило более 10^5 импульсов. Разброс длительности фронта и амплитуды импульса, наблюдаемый в режиме наложения импульсов друг на друга, был обусловлен конечной величиной дискретизации осциллографа (25 пс между точками). Это приводило к разбросу длительности фронта от импульса к импульсу в пределах ± 5 пс, а амплитуда импульса изменялась в пределах ± 6 кВ. За время проведения экспериментов случаев выхода из строя или изменения характеристик коммутатора S3 не наблюдалось.

3. Численное моделирование

При фронте воздействующего импульса ~ 400 пс и времени пробега электромагнитной волны в масле вдоль коммутатора S3 около 150 пс (длина прибора 28 мм) реализуется резко неоднородное распределение входного напряжения по последовательно соединенным структурам прибора. В связи с этим возникает необходимость моделирования как процесса распространения электромагнитной волны вдоль прибора при последовательном во времени пробое его структур, так и процессов динамики электрического поля и электронно-дырочной плазмы в каждой из 44 структур, составляющих прибор.

3.1. Описание модели

Для моделирования процесса распространения электромагнитной волны вдоль коммутатора использовалась система телеграфных уравнений, описывающая распространение волн напряжения и тока в линиях FL3, FL4 и в участке линии, где расположен коммутатор S3. Погонные значения индуктивности и емкости этого участка определялись исходя из геометрических размеров коммутатора S3 при диаметре внешнего проводника линии, равном 30 мм. Коммутатор содержал 44 структуры, распределенные на участке длиной 28 мм в соответствии с реальным расположением структур в приборе. Напряжение пробоя каждой структуры и время ее коммутации определялись расчетом процессов динамики электрического поля и плазмы в структуре.

Использование телеграфных уравнений существенно упрощает задачу расчета, но требует ряда оговорок, поскольку полупроводниковые структуры, расположенные вдоль центрального проводника линии, представляют собой области продольной неоднородности, где нарушается структура TEM (transverse electromagnetic) волны. Для применимости телеграфных уравнений в линии с продольными неоднородностями необходимо, чтобы размер неоднородности был много меньше длины волны. В нашем случае такой продольной неоднородностью выступает область сильного поля в структуре, ширина которой составляет ~ 150 мкм. Рассматриваемые в задаче длительности фронта падающей волны (~ 400 пс) и выходной волны (~ 100 пс) имеют геометрическую длину в трансформаторном масле: 8 и 2 см соответственно, что намного больше размера продольной неоднородности.

Максимальное продольное напряжение на структуре, как будет показано далее, не превышает ~ 12 кВ, что также существенно меньше амплитуды падающей волны, достигающей ~ 180 кВ. Таким образом, можно полагать, что в условиях настоящей задачи возможно использование телеграфных уравнений, поскольку структура TEM волны в целом нарушается слабо.

Модель использует одномерное приближение, не учитывающее процессы возможной поперечной неустойчивости ионизационного фронта. Однако высокая стабильность формы выходных импульсов, получаемых в

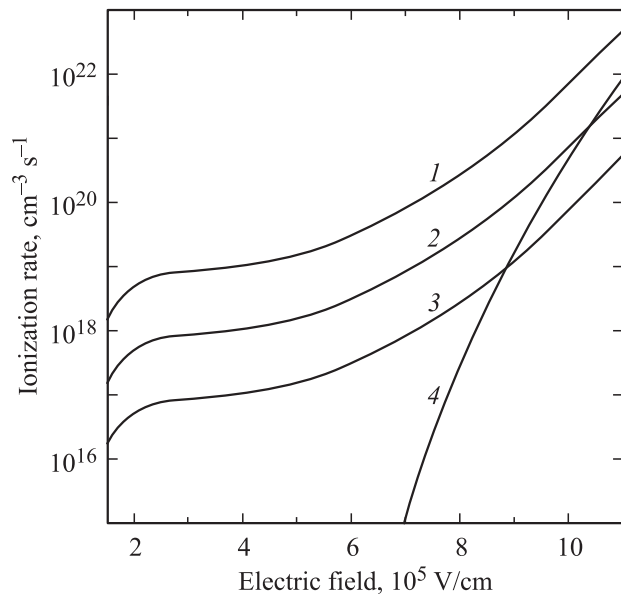


Рис. 4. Зависимости объемной скорости генерации носителей при комнатной температуре от электрического поля при ионизации M уровней (0.54 эВ) для $N_{PI} = 10^{11}, 10^{12}$ и 10^{13} см^{-3} (кривые 3, 2 и 1 соответственно) и скорости туннельной ионизации зона-зона (кривая 4).

эксперименте, и отсутствие случаев выхода прибора из строя косвенно свидетельствуют о том, что процесс переключения тока происходит по определенной и значительной части площади структур.

Для расчета процессов динамики электронов и дырок в каждой структуре использовалась фундаментальная система уравнений, состоящая из уравнений непрерывности для электронов и дырок и уравнения Пуассона для электрического поля. Учитывалась объемная скорость лавинной и туннельной генерации электронно-дырочных пар. Кинетические коэффициенты и подробное описание модели динамики носителей приведены в [9]. Модель учитывает также процессы генерации носителей при ионизации глубоких уровней, что рассматривается далее более подробно. В расчете учитывался реальный профиль распределения легирующих примесей в структуре. Зависимость входного напряжения от времени в линии FL3 бралась из эксперимента.

Используемая в расчетах модель на основе уравнений непрерывности приводит в области низких концентраций носителей к артефакту, когда запуск ионизационного фронта происходит за счет лавинного размножения нефизически малых концентраций свободных носителей [3]. Для устранения данного недостатка непрерывной модели в [3–5] было предложено вводить отсечку по начальной концентрации носителей: $n_0 \approx 10^9 \text{ см}^{-3}$. При этом среднее расстояние между носителями составляет $\sim 10 \text{ мкм}$, что соответствует ширине фронта ионизации, и является необходимым условием как для запуска фронта, так и для его распространения в структуре [5]. Данный прием был использован и в нашей модели,

процессы ударной ионизации включались в момент времени, когда концентрация носителей в какой-либо точке структуры достигала значения $n_0 \approx 10^9 \text{ см}^{-3}$.

Для расчета процессов генерации электронно-дырочных пар за счет термотуннельной ионизации глубоких уровней была использована аналитическая зависимость частоты ионизации уровня от электрического поля, приведенная в [4]. Поскольку эксперимент проводился при комнатной температуре, в модели учитывалась ионизация только M уровня (0.54 эВ). Как показано в работе [12], концентрация глубоких уровней данного типа в кремнии лежит в диапазоне $N_{PI} = 10^{11} - 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Соответственно объемная скорость генерации носителей рассчитывалась для трех фиксированных значений $N_{PI} = 10^{11}, 10^{12}$ и 10^{13} см^{-3} при электрическом поле, достигающем порога зинеровского пробоя. Результаты расчетов показывают (рис. 4), что зинеровский пробой может быть достигнут при $E_m > 9 \cdot 10^5 \text{ В/см}$ при величине N_{PI} порядка 10^{11} см^{-3} . При более высоких значениях N_{PI} запуск ионизационного фронта будет происходить вследствие ионизации глубоких уровней.

В общем случае процесс увеличения концентрации носителей во времени, обусловленный ионизацией глубоких уровней и зинеровским пробоем, можно записать следующим образом:

$$n(t) = N_{PI} \int_0^t e_{PI}(E(t)) dt + \int_0^t e_Z(E(t)) dt, \quad (1)$$

где $e_{PI}(E)$ — частота ионизации глубоких уровней (с^{-1}), $e_Z(E)$ — объемная скорость генерации носителей при зинеровском пробое ($\text{см}^{-3}\text{с}^{-1}$). Очевидно, что при фиксированных величинах n_0 и N_{PI} увеличение E_m до значений, близких к порогу зинеровского пробоя, когда наработка начальной концентрации носителей будет определяться в основном вторым членом в (1), может быть достигнуто только за счет увеличения dE/dt путем сокращения времени нарастания входного напряжения и увеличения его амплитуды.

3.2. Результаты численного моделирования

Основные результаты представлены на рис. 5, 6 и в таблице, в которой приняты следующие обозначения: U_m , $(dU/dt)_m$, E_m — максимальные значения напряжения, скорости роста напряжения и электрического поля соответственно в структуре к моменту запуска ионизационного фронта; n_{0Z} , n_{0PI} — вклад в начальную концентрацию $n_0 = n_{0Z} + n_{0PI} = 10^9 \text{ см}^{-3}$ за счет зинеровского пробоя и ионизации глубоких уровней соответственно; n_m — максимальная концентрация избыточной плазмы в структуре после прохождения фронта ионизации; t_s — время спада напряжения на структуре по уровню 0.1–0.9 от U_m .

Наилучшее совпадение экспериментальных и расчетных осциллограмм выходного импульса получено при N_{PI} от 0 до 10^{11} см^{-3} (кривые 3 и 4 на рис. 5).

Параметры процесса коммутации структур при различных значениях N_{PI} (числитель — первая структура прибора, знаменатель — последняя, 44 структура)

$N_{PI}, \text{см}^{-3}$	$U_m, \text{кВ}$	$(dU/dt)_m, \text{кВ/нс}$	$E_m, \text{кВ/см}$	$n_{0Z}/(n_{0Z} + n_{0PI})$	$n_m, 10^{16} \text{см}^{-3}$	$t_s, \text{пс}$	Номер кривой на рис. 5
0	11.9/12.5	43/81	960/1000	1/1	11/12	38/17	3
10^{11}	11.6/12.2	42/80	940/980	$\sim 0.5/\sim 0.7$	9/11	38/17	4
10^{12}	9.0/9.8	36/60	760/830	$\sim 2 \cdot 10^{-4}/\sim 0.01$	6/9	60/28	5
10^{13}	2.5/4.3	2.4/25	270/420	0/0	0.2/2	$\sim 300/87$	6

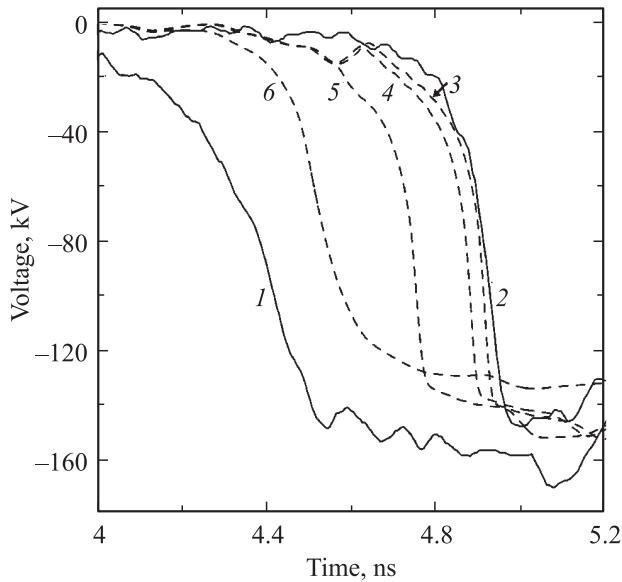


Рис. 5. Экспериментальные зависимости напряжения от времени на линиях FL3 (кривая 1) и FL4 (кривая 2), а также расчетные зависимости напряжения на линии FL4, полученные при $N_{PI} = 0, 10^{11}, 10^{12}$ и 10^{13}см^{-3} (кривые 3, 4, 5 и 6 соответственно).

При дальнейшем увеличении N_{PI} происходит снижение напряжения срабатывания структур, поле E_m и концентрация плазмы в структурах n_m уменьшаются. В результате уменьшается время задержки включения коммутатора и снижается амплитуда выходного импульса. При $N_{PI} = 10^{13} \text{см}^{-3}$ (кривая 6 на рис. 5) обострение фронта импульса практически отсутствует.

Рассмотрим более подробно процесс последовательного переключения структур в коммутаторе при $N_{PI} = 10^{11} \text{см}^{-3}$ (рис. 6, а). Благодаря короткому фронту воздействующего импульса распределение напряжения по диодам прибора имеет резко неоднородный характер. Когда напряжение на структурах первого диода достигает величины $U_m = 11.6 \text{кВ}$, при котором происходит запуск ионизационного фронта, напряжение на структурах последнего диода не превышает 2.5 кВ. Далее структуры, составляющие прибор, последовательно включаются, образуя волну переключения, скорость которой непрерывно растет, достигая в конце процесса коммутации величины около 70% от скорости света в масле. Скорость нарастания напряжения на структурах

$(dU/dt)_m$ возрастает от $4 \cdot 10^{13} \text{В/с}$ в начале прибора до $8 \cdot 10^{13} \text{В/с}$ в его конце. При этом время включения структур сокращается от 38 пс в начале прибора до 17 пс в конце. Концентрация плазмы n_m составля-

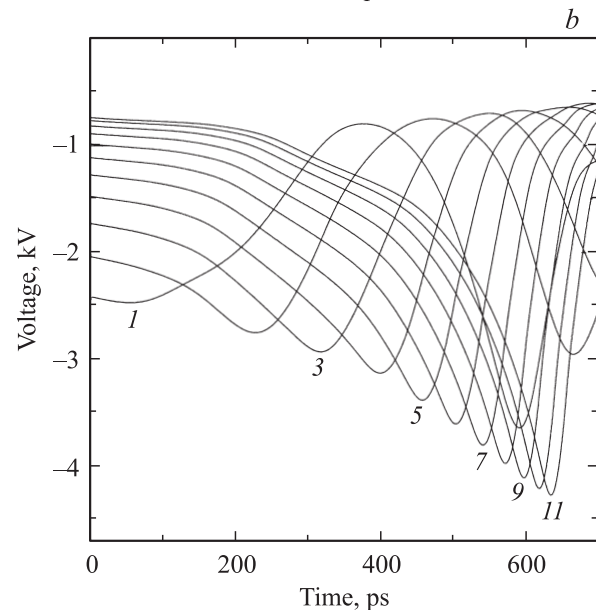
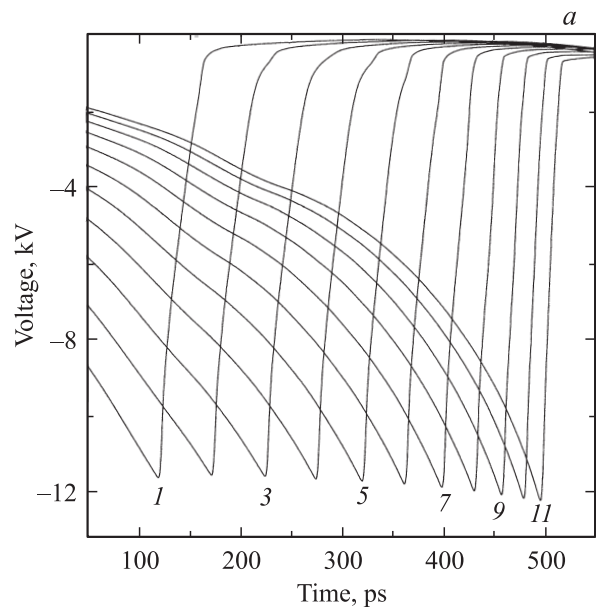


Рис. 6. Расчетные зависимости напряжения от времени на первой структуре каждого диода (кривые 1-11) в процессе коммутации для $N_{PI} = 10^{11}$ (а) и 10^{13}см^{-3} (б).

ет $\sim 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Во всех структурах поле E_m превышает 940 кВ/см, а в последних структурах, процесс включения которых и определяет фронт выходного импульса, E_m достигает 980 кВ/см. При этом основной вклад в начальную концентрацию носителей $n_0 = 10^9 \text{ см}^{-3}$ происходит за счет туннельной ионизации зона-зона (второй член в формуле (1)).

При $N_{\text{PI}} = 0$ реализуется классический вариант развития туннельно-ударного ионизационного фронта [8]. Однако характеристики процесса переключения прибора практически совпадают с вариантом $N_{\text{PI}} = 10^{11} \text{ см}^{-3}$. Напряжение включения структур и поле E_m увеличиваются на единицы процентов, что не приводит к уменьшению времени переключения структур.

При $N_{\text{PI}} = 10^{12} \text{ см}^{-3}$ вклад зинеровского пробоя в начальную концентрацию носителей пренебрежимо мал и запуск ионизационного фронта инициируется накоплением носителей за счет ионизации глубоких уровней. Тем не менее, поскольку поле E_m в последних структурах прибора еще достаточно велико (830 кВ/см), процесс переключения ухудшается незначительно: концентрация плазмы n_m снижается на $\sim 20\%$, а время коммутации структур увеличивается на $\sim 40\%$ по сравнению с вариантом $N_{\text{PI}} = 10^{11} \text{ см}^{-3}$.

В варианте $N_{\text{PI}} = 10^{13} \text{ см}^{-3}$ процесс переключения изменяется кардинально (рис. 6, *b* и кривая *b* на рис. 5). Величина $n_0 = 10^9 \text{ см}^{-3}$ за счет большой концентрации N_{PI} набирается уже на стадии воздействия на прибор предимпульса входного напряжения. Первые структуры прибора включаются при E_m менее 300 кВ/см за время в сотни пс, а концентрация плазмы n_m составляет $\sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Такая концентрация плазмы не позволяет пропустить падающую волну тока с плотностью около 12 кА/см^2 , и к моменту прихода на прибор быстрого участка нарастания входного импульса напряжение на первых структурах прибора начинает снова увеличиваться и наступает их повторный пробой. В конце прибора структуры включаются при E_m около 400 кВ/см за время 80–90 пс, но обострение фронта входного импульса практически не происходит, а низкая концентрация плазмы приводит к снижению амплитуды выходного импульса за счет большого остаточного напряжения (кривая *b* на рис. 5).

На рис. 7 показаны распределения концентрации плазмы и электрического поля в последней структуре прибора в начале процесса переключения и при его окончании для варианта $N_{\text{PI}} = 10^{11} \text{ см}^{-3}$. Начальная концентрация носителей обеспечивается в основном зинеровским пробоем, и к моменту, когда $n_0 = 10^9 \text{ см}^{-3}$, величина U_m достигает 12.2 кВ, а поле в районе $p-n$ -перехода составляет $E_m = 0.98 \text{ МВ/см}$. При включении механизма ударной ионизации происходит запуск туннельно-ударного фронта. Волна ионизации распространяется в обе стороны от $p-n$ -перехода, заполняя низколегированные p - и n -области плазмой с концентрацией $\sim 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Разница во времени между распределениями составляет 17 пс, что соответствует суммарной скорости запол-

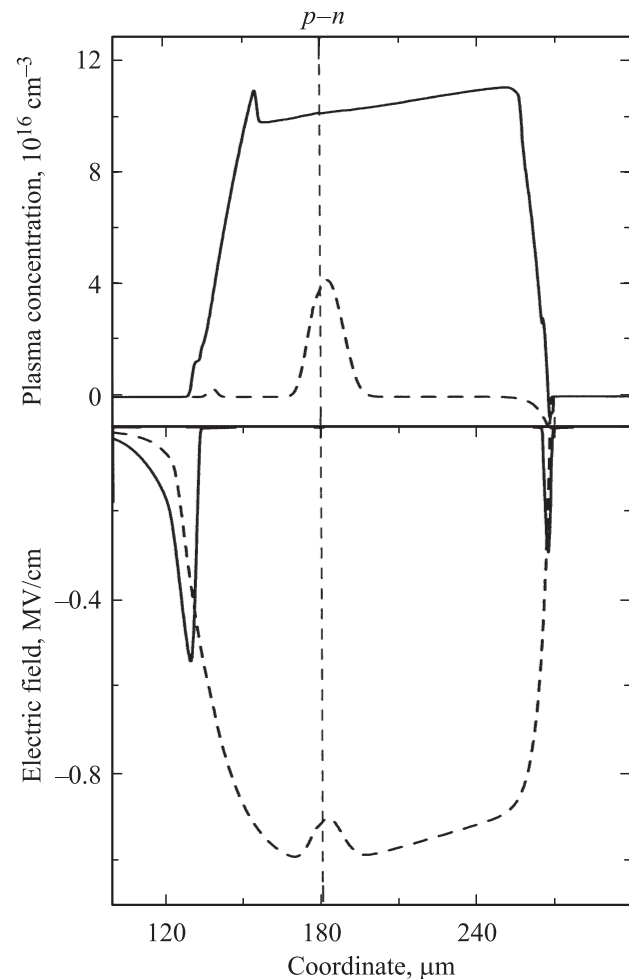


Рис. 7. Профили распределения концентрации избыточной плазмы и напряженности электрического поля в последней структуре прибора при $N_{\text{PI}} = 10^{11} \text{ см}^{-3}$ в моменты времени, соответствующие началу (штриховые кривые) и концу (сплошные кривые) процесса коммутации. Промежуток времени между распределениями — 17 пс.

нения структуры плазмой, превышающей насыщенную скорость носителей в ~ 70 раз.

4. Длительность фронта выходного импульса

Длительность фронта импульса напряжения t_r за прибором в линии FL4 при последовательном во времени переключении структур определяется временем включения последних структур и их индуктивностью, аналогично тому, как это происходит в искровых разрядниках, встроенных в коаксиальную формирующую линию [10]. Как экспериментальные, так и расчетные данные дают близкие значения t_r в диапазоне 100–120 пс, несмотря на то что расчетное значение времени коммутации индивидуальных структур t_s в конце прибора составляет 17 пс при $N_{\text{PI}} \lesssim 10^{11} \text{ см}^{-3}$.

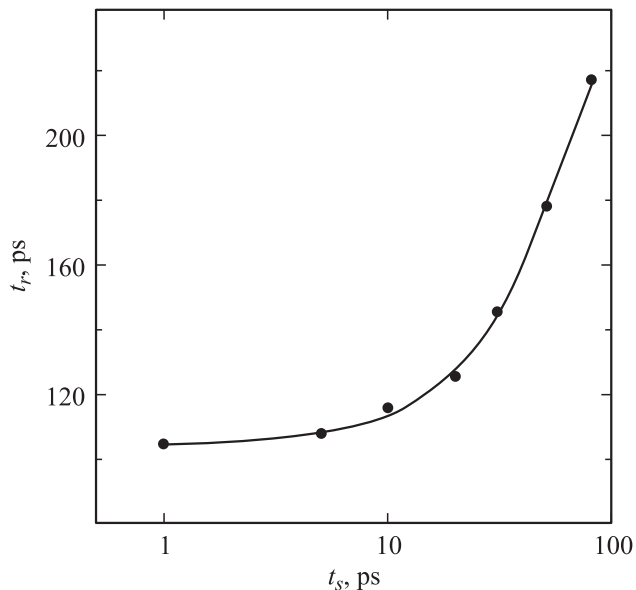


Рис. 8. Зависимость длительности фронта выходного импульса t_r от времени коммутации идеальных ключей t_s .

Для оценки влияния времени переключения структур на длительность фронта формируемого импульса были проведены модельные расчеты, в которых „полупроводниковая“ составляющая была исключена. В расчетах полупроводниковые структуры замещались идеальными ключами в количестве 44 штук по числу полупроводниковых структур в приборе. Длина участка коммутации в каждом ключе составляла 150 мкм и соответствовала ширине области сильного поля в структуре перед запуском фронта ионизации (рис. 7). Напряжение срабатывания всех ключей фиксировалось и составляло 12 кВ (наиболее близкое значение для вариантов $N_{PI} = 0$ и 10^{11} см^{-3}). Время коммутации t_s было одинаково для всех ключей и изменялось в пределах от 1 до 80 пс.

Результаты моделирования приведены на рис. 8. Видно, что при $t_s = 1\text{--}20$ пс длительность фронта t_r выходного импульса определяется индуктивностью прибора и находится на участке насыщения в пределах 105–125 пс. При дальнейшем увеличении t_s начинает возрастать и его вклад в длительность фронта. Полагая, что минимальная величина фронта импульса, полученная в эксперименте, определяется только индуктивной составляющей участка переключения, можно оценить индуктивность этого участка и количество структур в нем. Для падающей волны тока в линии с волновым сопротивлением 48.6 Ом для получения $t_r \approx 100$ пс индуктивность переключающего участка должна быть не более ~ 2 нГн. При расчетной погонной индуктивности прибора 3.9 нГн/см геометрическая длина участка переключения составит ~ 5 мм, на длину которого приходится 2 последних диода (8 структур). Условно весь прибор может быть разделен на 2 части: первая часть из 9 диодов срабатывает на участке нарастания входного напряжения и обеспечивает задержку включения прибора, а 2

последних диода выполняют функцию непосредственно переключателя, формируя фронт выходного импульса.

5. Заключение

В экспериментальной части работы реализован процесс пикосекундной коммутации тока кремниевым обострителем с механизмом последовательного переключения структур. Механизм обусловлен резко неоднородным распределением входного импульса напряжения по структурам прибора, встроенного в коаксиальную линию. По мере коммутации структур на стадии задержки пространство линии, где расположен прибор, заполняется электромагнитным полем бегущей волны, при этом время нарастания выходного напряжения сокращается и определяется временем переключения и индуктивностью только нескольких последних структур прибора. При падающей волне входного напряжения амплитудой до 180 кВ с фронтом ~ 400 пс после переключения прибора, содержащего 44 последовательно соединенные диодные структуры, в передающей 50-омной линии получены импульсы амплитудой 150 кВ с фронтом 100 пс. Плотность тока в структурах прибора достигает 12.5 кА/см^2 .

В расчетной части процесс коммутации исследован методами численного моделирования с учетом процессов ионизации технологических примесей с глубокими уровнями. Моделирование показало, что при скорости нарастания входного напряжения на одну структуру более $4 \cdot 10^{13} \text{ В/с}$, реализованной в эксперименте, электрическое поле E_m у p - n -перехода достигает порога зинеровского пробоя ($\sim 10^6 \text{ В/см}$) даже в том случае, когда структура диода содержит технологические примеси с глубокими уровнями ионизации с концентрацией $N_{PI} = 10^{11} \text{ см}^{-3}$. В расчетах наилучшее совпадение с экспериментальными осциллограммами выходного импульса получено при значениях N_{PI} в диапазоне от нуля до 10^{11} см^{-3} .

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 09-08-00101.

Список литературы

- [1] И.В. Грехов, А.Ф. Кардо-Сысоев. Письма ЖТФ, **5**, 950 (1979).
- [2] В.М. Тучкевич, И.В. Грехов. *Новые принципы коммутации больших мощностей полупроводниковыми приборами* (Л., Наука, 1988).
- [3] A.F. Kardo-Sysoev. In: *Ultra-wideband radar technology*, ed. by J.D. Taylor (CRC Press, Boca Raton, London–N.Y.–Washington, 2001) p. 205.
- [4] P. Rodin, U. Ebert, W. Hundsdorfer, I. Grekhov. *J. Appl. Phys.*, **92** (4), 1971 (2002).
- [5] P. Rodin, I. Grekhov. *Appl. Phys. Lett.*, **86**, 243 504 (2005).
- [6] P. Rodin, A. Rodina, I. Grekhov. *J. Appl. Phys.*, **98**, 094 506 (2005).

- [7] I.V. Grekhov, S.V. Korotkov, P.B. Rodin. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **PS-36** (2), 378 (2008).
- [8] P. Rodin, U. Ebert, W. Hundsdorfer, I. Grekhov. *J. Appl. Phys.*, **92** (2), 958 (2002).
- [9] С.К. Любутин, С.Н. Рукин, Б.Г. Словиковский, С.Н. Цыранов. *Письма ЖТФ*, **31** (5), 36 (2005).
- [10] J.M. Lehr, C.E. Baum, W.D. Prather, F.J. Agee. *Proc. XI Pulsed Power Conf.* (Baltimore, USA, 1997) p. 1033.
- [11] C.A. Frost, T.H. Martin, R.J. Ficia, J.S.H. Schoenberg. *Proc. XII Pulsed Power Conf.* (Monterey, USA, 1999) p. 291.
- [12] E.V. Astrova, V.B. Voronkov, V.A. Kozlov, A.A. Lebedev. *Semicond. Sci. Technol.*, **13**, 488 (1998).

Редактор Т.А. Полянская

High-power picosecond current switching by Si sharpener based on successive break-down of structures

S.K. Lyubutin, S.N. Rukin, B.G. Slovikovsky,
S.N. Tsyranov

Institute of Electrophysics, Ural Branch
of Russian Academy of Sciences,
620016 Ekaterinburg, Russia

Abstract Ultrafast current switching by Si sharpener based on successive breakdown of the structures has been experimentally implemented and theoretically studied. A voltage pulse with amplitude of 180 kV and a rise time of 400 ps was applied to a semiconductor device containing 44 series connected diode structures located in a 50- Ω transmission line. After switching the device the pulses having 150-kV amplitude and 100-ps rise time were obtained. Numerical simulations show that under the experimental conditions at the reverse voltage rise rate across one structure over $4 \cdot 10^{13}$ V/s the electric field in the vicinity of $p-n$ junction attains the threshold of the Zener breakdown ($\sim 10^6$ V/cm) even in the case the diode structure contains the process-induced deep-level centers with the concentration of 10^{11} cm $^{-3}$.