

# Исследование динамики включения сильноточных высоковольтных токовых ключей на основе GaAs/AlGaAs-гетеротиристоров

© С.О. Слипченко, И.В. Орешко, А.А. Подоскин, И.В. Шушканов, Н.А. Пихтин

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

E-mail: SergHPL@mail.ioffe.ru; ioreshko@mail.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 4 декабря 2025 г.

В окончательной редакции 27 февраля 2026 г.

Принята к публикации 30 марта 2026 г.

Методами численного моделирования, в рамках квазиодномерной дрейф-диффузионной модели, исследованы максимальные блокирующие напряжения и динамические процессы включения токовых ключей на основе GaAs/AlGaAs-гетеротиристоров с увеличенной до 8 мкм толщиной слаболегированной области. Определено влияние конструкции слаболегированной области коллекторного перехода  $n-p-n$  транзисторной части при сохранении общей толщины 8 мкм. Показано, что максимальное блокируемое напряжение достигает  $\sim 180$  В для конструкции составной  $p$ -базы, включающей сильнолегированный слой ( $p = 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ) толщиной 0.1 мкм и слаболегированный слой ( $p = 6 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ) толщиной 8 мкм. Показано, что независимо от конструкции достигаются близкие значения максимального тока включения  $\sim 70$  А и ширины фронтов включения  $\sim 1.5-1.6$  нс. Однако лучшие значения остаточного напряжения и времени задержки включения достигаются в конструкции с утонченным до 0.2 мкм  $n$ -коллектором  $n-p-n$  транзисторной части и составляют  $\sim 1.86$  В и 5.5 нс соответственно.

**Ключевые слова:** тиристор, токовый ключ, дрейф-диффузионная модель, динамика, фронт включения, остаточное напряжение, время задержки включения.

DOI: 10.61011/FTP.2026.02.63461.8851

## 1. Введение

В настоящее время представляют существенный практический интерес быстродействующие токовые ключи, работающие в цепях с низкоомной нагрузкой. В первую очередь это обусловлено актуальностью создания мощных импульсных источников когерентного оптического излучения инфракрасного диапазона для дальнометрии, а также ЛИДАРных систем, используемых в том числе в беспилотных транспортных средствах. Одной из важных особенностей таких систем является требование к формированию оптических импульсов заданной длительности и амплитуды. В настоящее время наибольший интерес представляют источники когерентного излучения с короткими импульсами, т.е. импульсами с суммарной длительностью  $\sim 1-10$  нс. Данные требования однозначно диктуют необходимость использования токов накачки с длительностью, не превышающей заданные величины.

Одним из возможных способов формирования коротких импульсов является применение твердотельных тиристорных ключей на основе соединений  $A^{III}B^V$ , которые позволяют генерировать токи с амплитудой до сотен ампер и длительностью до 10 нс [1]. Это позволяет реализовать компактную схему тиристорный токовый ключ/лазер. Данные сборки демонстрируют возможности генерации импульсов с длительностями в диапазоне 3–60 нс и амплитудами токов до 100 А [2,3], а также не требуют никаких специализированных согласующих драйверов между ключом и лазером.

В настоящее время исследован достаточно широкий спектр конструкций низковольтных тиристорных ключей. Оценки динамики включения токовых ключей на основе InP-гомотиристоров с толщиной  $p^0$ -базы, варьируемой в диапазоне 1–2.6 мкм [4], показывают, что средняя скорость включения лежит в диапазоне от 11 до 194 нс при максимальном значении блокирующего напряжения всего в 55 В, что, несмотря на величину амплитудного тока  $\sim 90$  А, видится явно недостаточным для генерации сверхкоротких импульсов тока накачки. Исследования низковольтных тиристорных токовых ключей на основе гетероструктур AlInGaAsP/InP [5,6] демонстрируют, что максимальное блокирующее напряжение для таких структур составляет  $\sim 15-18$  В, а ток всего лишь  $\sim 6-8$  А с импульсами длительностью  $< 3$  нс, хотя в гибридных сборках может достигать значений до 80 А в импульсе, с длительностями  $< 100$  нс. Таким образом, имеет место несогласие между величинами амплитуды и длительности токового импульса. Экспериментальные исследования тиристоров на основе GaAs, проведенные в работах [7–10], показывают, что максимальное блокирующее напряжение при различных топологиях мезы и способах химической обработки структур составляет  $\sim 28-35$  В, хотя потенциально возможно увеличение напряжения до 200 В, при изготовлении структуры оптодиристора со сверхтолстой базой ( $\sim 200$  мкм). Однако подобные структуры обнаруживают крайне длинный фронт включения, на уровне  $\sim 120$  нс, а также время задержки включения порядка нескольких сотен наносекунд при напряжении питания 200 В [7,8] и амплитуде тока всего

лишь  $\sim 25$  А, что категорически не удовлетворяет требованиям быстродействующих источников импульсной токовой накачки. Сильноточные тиристорные токовые ключи на основе гетероструктур GaAs/AlGaAs [11–13] демонстрируют величину максимального блокирующего напряжения в диапазоне 55–65 В и величину амплитудного тока  $\sim 17$ –24 А при длительностях токовых импульсов на уровне 2.3–3.5 нс.

На скорость включения и амплитуду тока оказывают влияние паразитные индуктивности контура, а также контактные сопротивления, которые невозможно устранить даже при использовании компактных схем. В этом случае увеличение блокирующего напряжения тиристорного токового ключа позволит повысить как пиковый ток, так и скорость переходного процесса в цепи сборки тиристорный ключ/лазерный диод, при условии сохранения высокого быстродействия самого тиристорного ключа, что важно для повышения пиковой мощности и сокращения длительности лазерных импульсов. Возможным способом увеличения блокирующего напряжения тиристора при сохранении больших ( $> 30$  А) амплитуд тока, а также коротких (на уровне единиц нс) длительностей импульса является использование высоковольтных сильноточных тиристорных ключей с увеличенной толщиной слаболегированной области коллекторного  $p$ – $n$ -перехода  $n$ – $p$ – $n$ -транзисторной части. Для большинства рассмотренных экспериментальных работ типичная максимальная толщина  $p^0$ -базы тиристора составляет  $\sim 3$ –4 мкм [5,6,11–13]. В данной работе с помощью численного моделирования в рамках дрейф-диффузионной модели исследуется влияние увеличения толщины  $p^0$ -базы до 8 мкм на статические и динамические характеристики сильноточных высоковольтных токовых ключей на основе GaAs/AlGaAs-гетеротиристора, в особенности его максимальное блокирующее напряжение, амплитуды токов, скорость включения и остаточные напряжения. Полученные и развитые в данной работе решения в дальнейшем могут быть использованы для создания интегрированных сборок высоковольтный тиристорный токовый ключ/лазерный диод для генерации коротких и сверхкоротких оптических импульсов.

## 2. Параметры модели

Объектом исследования являлся GaAs/AlGaAs-гетеротиристор. Исходный дизайн структуры включал: сильнолегированный  $p$ -GaAs эмиттер ( $N_A = 10^{18}$  см $^{-3}$ ), сильнолегированный  $n$ -GaAs коллектор ( $N_D = 10^{18}$  см $^{-3}$ ) толщиной 1 мкм, слаболегированную  $p^0$ -GaAs базу ( $N_A = 6 \cdot 10^{14}$  см $^{-3}$ ) толщиной 8 мкм, сильнолегированную  $p^+$ -базу ( $N_A = 10^{18}$  см $^{-3}$ ) толщиной 100 нм, сильнолегированный широкозонный эмиттер из  $n$ -AlGaAs ( $N_D = 10^{18}$  см $^{-3}$ ) толщиной 100 нм и с долей Al  $\sim 10\%$ , а также сильнолегированный  $n$ -GaAs эмиттер ( $N_D = 10^{18}$  см $^{-3}$ ). Изображение описываемой структуры

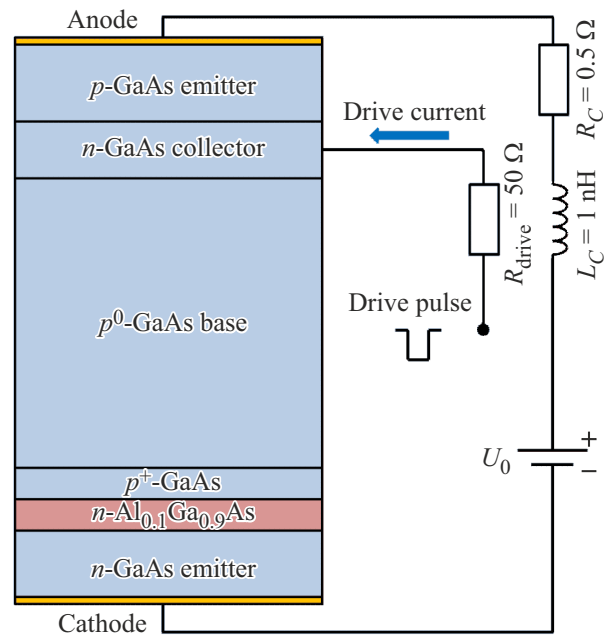


Рис. 1. Изображение исходного дизайна структуры GaAs/AlGaAs-гетеротиристора и схемы включения.

гетеротиристора и схемы включения, используемой при моделировании, приведено на рис. 1.

Расчет динамики включения структуры проводился в рамках квазиодномерной дрейф-диффузионной модели с учетом насыщения скорости дрейфа и ударной ионизации. Описание эффекта полевой зависимости подвижности носителей заряда и насыщения скорости дрейфа производилось с помощью соотношений [14]

$$\mu_n = \mu_{n0} \cdot \left[ 1 + (\mu_{n0} E / v_{\text{sat},n})^{\beta_n} \right]^{-1/\beta_n}, \quad (1a)$$

$$\mu_p = \mu_{p0} \cdot \left[ 1 + (\mu_{p0} E / v_{\text{sat},p})^{\beta_p} \right]^{-1/\beta_p}, \quad (1б)$$

где  $\mu_{n0}$  и  $\mu_{p0}$  — статические подвижности электронов и дырок,  $v_{\text{sat},n}$  и  $v_{\text{sat},p}$  — скорости насыщения электронов и дырок (для GaAs  $v_{\text{sat},n} \approx v_{\text{sat},p} = 10^7$  см/с),  $\beta_n$  и  $\beta_p$  — подгоночные параметры, зависящие от материала.

Учет ударной ионизации осуществлялся с помощью локальной модели Зельбехерра [15], являющейся вариацией классической модели ударной ионизации, разработанной Чиноветтом [16]. Расчет коэффициентов ударной ионизации для носителей заряда обоих типов выполнялся по формуле

$$\alpha_{n,p} = A_{n,p} \cdot \exp[-(B_{n,p}/E)^{\gamma_{n,p}}], \quad (2)$$

где для GaAs  $A_n = 1.889 \cdot 10^5$  см $^{-1}$ ,  $A_p = 2.215 \cdot 10^5$  см $^{-1}$ ,  $B_n = 5.75 \cdot 10^5$  В/см,  $B_p = 6.57 \cdot 10^5$  В/см,  $\gamma_n = 1.82$ ,  $\gamma_p = 1.75$ .

Сама скорость генерации неравновесных носителей заряда посредством ударной ионизации вычислялась

Электрофизические параметры моделируемой структуры GaAs/AlGaAs-гетеротиристора

Слой	$p$ -эмиттер	$n$ -коллектор	$p^0$ -база	$p^+$ -база	$n$ -барьер	$n$ -эмиттер
Материал	GaAs	GaAs	GaAs	GaAs	AlGaAs	GaAs
Доля Al, %	0	0	0	0	10	0
$E_g$ , эВ	1.424	1.424	1.424	1.424	1.549	1.424
$\mu_{n0}$ , $\text{cm}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	8000	8000	8000	8000	6000	8000
$\mu_{p0}$ , $\text{cm}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	400	400	400	400	300	400
$v_{\text{sat},n}$ , $\text{cm}/\text{с}$	$10^7$	$10^7$	$10^7$	$10^7$	$7.7 \cdot 10^6$	$10^7$
$v_{\text{sat},p}$ , $\text{cm}/\text{с}$	$10^7$	$10^7$	$10^7$	$10^7$	$7.7 \cdot 10^6$	$10^7$
$C_{\text{рад}}$ , $\text{cm}^3 \cdot \text{с}^{-1}$	$2 \cdot 10^{-10}$	$2 \cdot 10^{-10}$	$2 \cdot 10^{-10}$	$2 \cdot 10^{-10}$	$1.6 \cdot 10^{-10}$	$2 \cdot 10^{-10}$

через выражение

$$G_{\text{imp}} = \alpha_n \cdot |\bar{J}_n| + \alpha_p \cdot |\bar{J}_p|, \quad (3)$$

где  $\bar{J}_n$ ,  $\bar{J}_p$  — плотности электронного и дырочного токов соответственно.

Для расчета электронного транспорта в рамках дрейф-диффузионной модели также необходимо корректно задавать скорости рекомбинации носителей заряда в слоях гетероструктуры. Анализ широкого круга статей [17–20] показывает, что для сильнолегированных слоев GaAs/AlGaAs время жизни носителей заряда, рекомбинирующих безызлучательно по механизму Шокли–Рида–Холла, с достаточной долей точности можно положить равным 1 нс. Для наглядности все значимые электрофизические параметры рассчитываемой структуры GaAs/AlGaAs-гетеротиристора приведены в таблице.

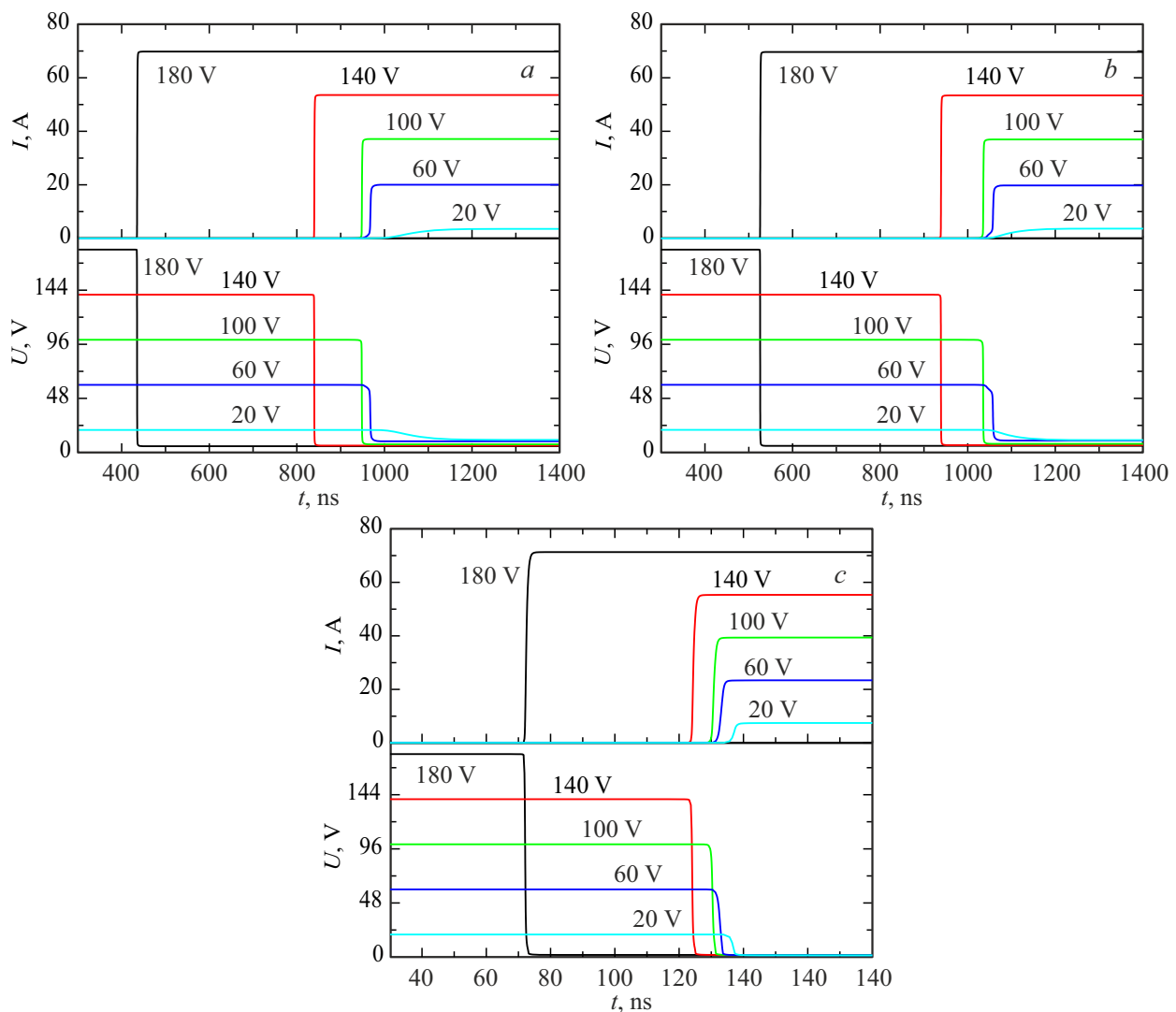
Включение тиристора осуществлялось за счет подачи электрического импульса управления через  $n$ -коллектор эквивалентного  $n-p-n$ -транзистора с амплитудой  $\sim 6$  В, временем установления 1 нс и суммарной длительностью 2 мкс. Вычисления проводились с учетом эффективного внешнего  $R-L$  контура, в котором учитывались сопротивление  $\sim 0.5$  Ом и индуктивность  $\sim 1$  нГн, а также ограничительное сопротивление на управляющем электроде, которое было положено равным  $\sim 50$  Ом (см. рис. 1). В рамках квазиодномерного приближения эквивалентная площадь рассчитываемого тиристора принималась равной  $200 \times 200$  мкм<sup>2</sup>, что близко к размерам реальных структур GaAs/AlGaAs-токовых ключей [3,4].

### 3. Результаты и обсуждение

Численное моделирование проводилось для серии тиристорных структур с различным дизайном  $p$ -базы и  $n$ -коллектора. Рассматривались структуры: St-1 — исходный дизайн (см описание в разд. 2), St-2 — дизайн структуры с коллекторным  $p-n$ -переходом  $n^0/p^0$ , образованным слоями с уровнем легирования  $6 \cdot 10^{14}$  см<sup>-3</sup> и толщиной 4/4 мкм, St-3 — дизайн структуры с концентрацией легирующей примеси в  $p^+$ -базе, сниженной до  $10^{17}$  см<sup>-3</sup>, St-4 — дизайн структуры с отсутствующим слоем  $p^+$ -базы, St-5 — дизайн структуры с утонченной до 0.2 мкм сильнолегированной частью  $n$ -коллектора.

В соответствии с целями работы относительно анализа динамики включения высоковольтных тиристорных токовых ключей было решено в первой части статьи дать оценку максимального блокирующего напряжения для всех структур, чтобы определить конструкции, не подходящие для работы при высоких напряжениях. Статическое моделирование тиристора с исходным дизайном гетероструктуры (St-1) показывает, что максимальное блокирующее напряжение для него составляет  $\sim 180$  В. Для St-2 и St-5 значение максимального блокирующего напряжения в целом остается на том же уровне  $\sim 180$  В. Радикально иная ситуация наблюдается для структур со сниженным уровнем легирования  $p^+$ -базы (St-3) и отсутствующей  $p^+$ -базой как таковой (St-4). В случае структуры St-3 максимальное блокирующее напряжение составляет  $\sim 65$  В вместо исходных 180 В у St-1. При этом для структуры St-4 все еще хуже и максимальное напряжение блокировки едва достигает 22 В. Численные значения блокирующих напряжений St-3 и St-4 хорошо иллюстрируют существенное влияние легирования и самого факта наличия слоя  $p^+$ -базы на ограничение диапазона рабочих напряжений тиристорного ключа. Обусловлено это влияние „защитным“ действием  $p^+-n$ -перехода, формирующегося между  $p^0$ -базой и  $n\text{-Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ -широкозонным эмиттером (см. рис. 1). Дело в том, что наличие данного промежуточного слоя не позволяет создать „прямой контакт“ между слаболегированной  $p^0$ -базой и сильнолегированным  $n\text{-Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ -эмиттером, возникновение которого приводит к значительному проникновению встроенного поля коллекторного  $p-n$ -перехода вглубь слаболегированной базы, что в свою очередь способно привести к смыканию  $n-p^0$  коллекторного и  $p^0-n$  базово-эмиттерного переходов даже при относительно низких значениях напряжения питания. Данные результаты позволяют сделать вывод о неэффективности структур St-3 и St-4 с точки зрения использования в качестве высоковольтных быстродействующих тиристорных токовых ключей.

Анализ динамики в GaAs/AlGaAs-тиристорных структурах проводился по двум базовым величинам — току и напряжению в зависимости от времени. В рамках данной работы анализ ограничен рассмотрением процесса включения тиристора, что, как показывает практика,



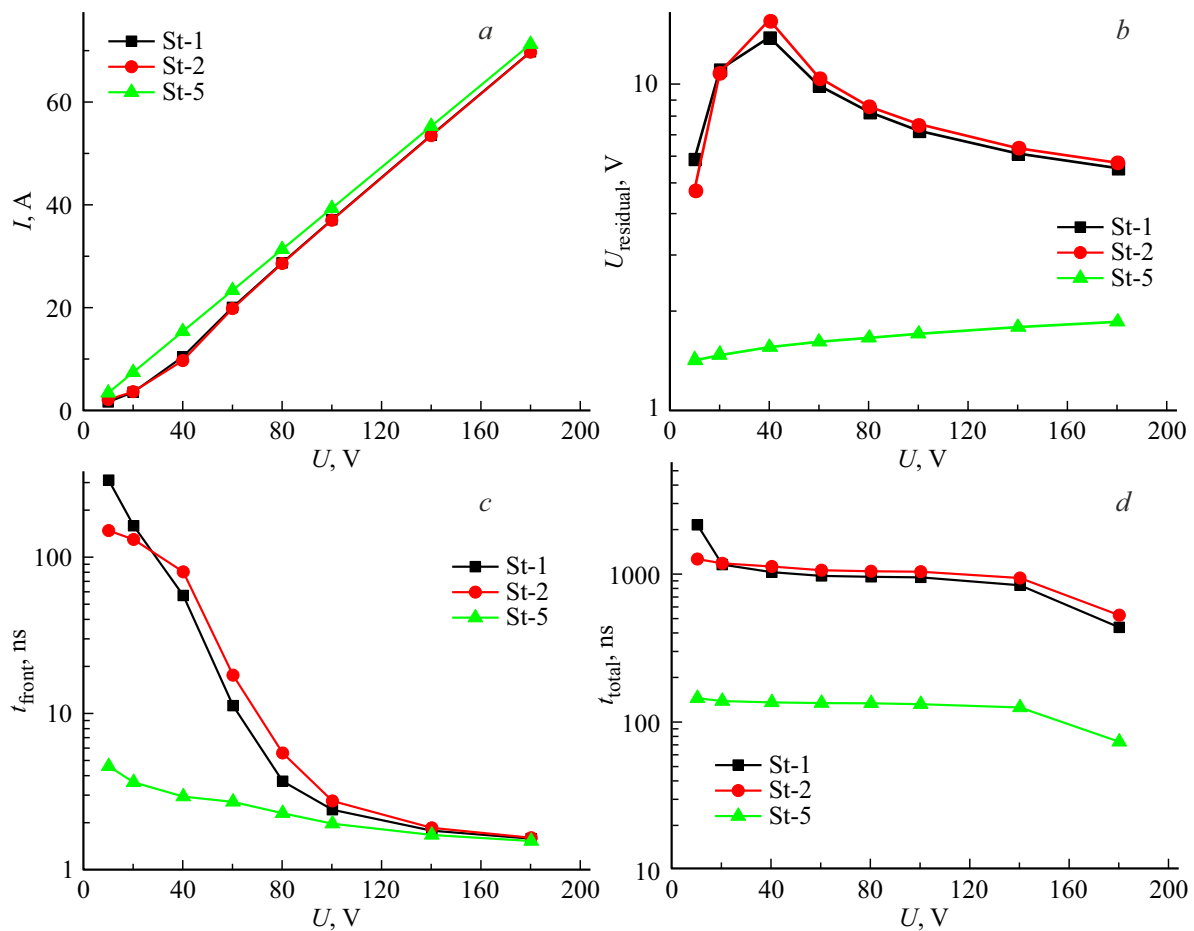
**Рис. 2.** Динамика включения по току и напряжению для структур St-1 (a), St-2 (b) и St-5 (c).

достаточно для оценки его быстродействия как токового ключа. Наибольшее рабочее напряжение принималось равным максимальному блокирующему, полученному в статических расчетах, т.е.  $\sim 180$  В. Исходя из данных экспериментов наименьшее напряжение питания, при котором наблюдается процесс включения тиристора для структур подобного дизайна, составляет  $\sim 10$  В. Характерные зависимости динамики включения в терминах тока/напряжения от напряжения питания для „высоковольтных“ структур St-1, St-2 и St-5 приведены на рис. 2.

Анализируя динамику тока/напряжения на рис. 2, а, нетрудно заметить, что величина напряжения питания существенным образом влияет на характеристики включения GaAs/AlGaAs-тиристорного токового ключа. Для предметной численной оценки динамических свойств тиристора будем рассматривать следующие базовые характеристики: величину амплитудного тока, т.е. тока во включенном состоянии; величину остаточного напряжения, т.е. напряжения, которое остается на тиристоре

во включенном состоянии; фронт включения, т.е. разность между моментами времени, в которые ток через структуру набирает, соответственно, 95 и 5% от своего амплитудного значения; а также величину суммарного времени включения, представляющую собой сумму фронта включения и времени задержки включения, т.е. разности между моментами времени, когда ток через тиристор набирает 5% от амплитудного значения и когда на электрод управления был подан управляющий сигнал. Из рис. 2 видно, что уменьшение напряжения питания приводит к увеличению времени задержки включения и уширению фронта включения.

На рис. 3 приведены зависимости всех базовых динамических характеристик от рабочего напряжения для всех, смоделированных высоковольтных структур. Анализируя зависимости амплитуды тока от напряжения питания (см. рис. 3, а), можно заметить, что величина тока через тиристор во включенном состоянии растет по квазилинейному закону с ростом рабочего напряже-



**Рис. 3.** Зависимости от рабочего напряжения для смоделированных структур: *a* — амплитуды тока, *b* — остаточного напряжения, *c* — ширины фронта включения, *d* — суммарного времени включения.

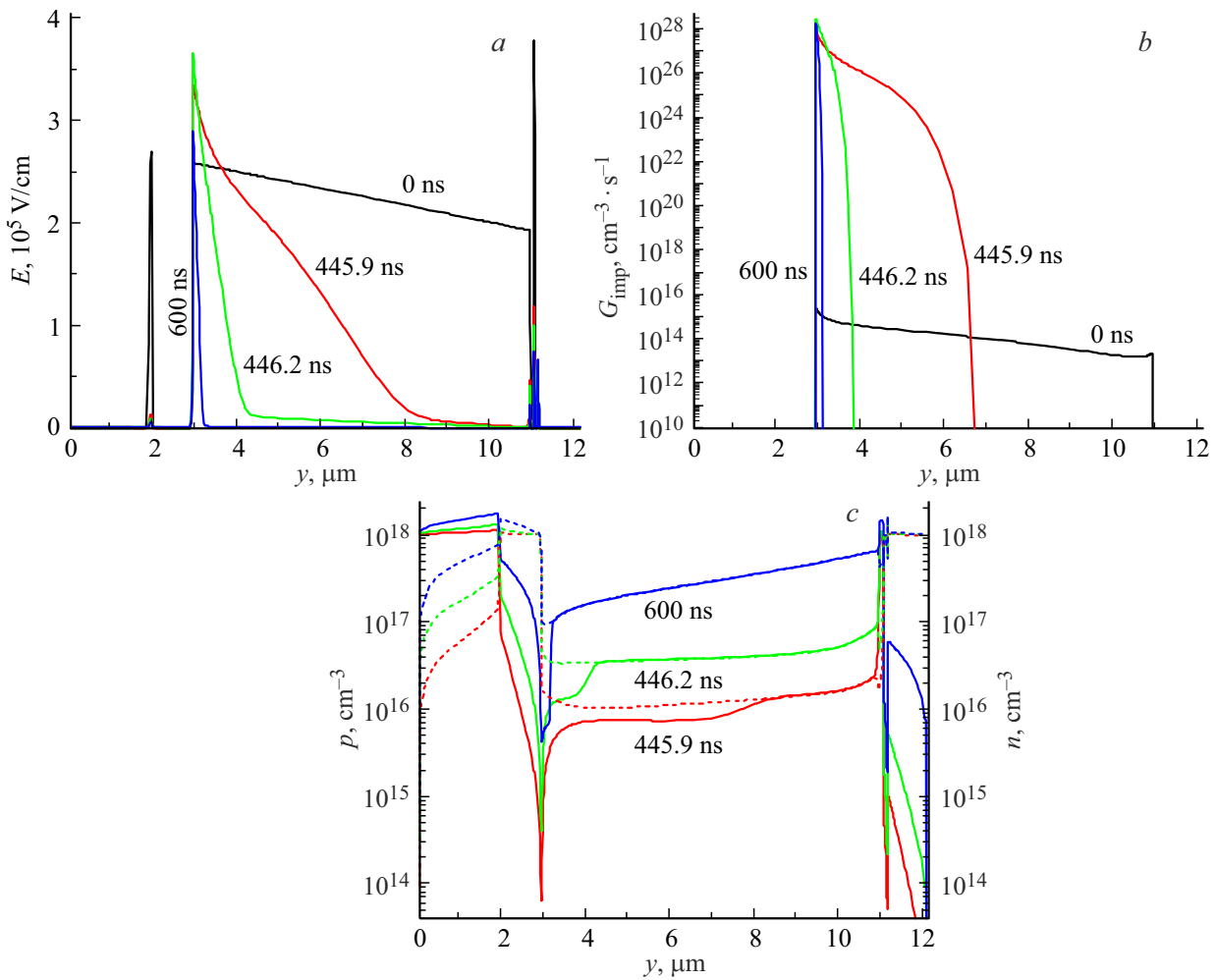
ния. Также видно, что для всех трех смоделированных высоковольтных структур достигаемая амплитуда тока примерно одинакова во всем диапазоне напряжений питания. При этом структура с утонченным до 0.2 мкм  $n$ -коллектором показывает чуть более высокие значения тока при одинаковых величинах напряжения питания. В целом при рабочем напряжении в 180 В, равном максимальному блокирующему, амплитуда тока достигает  $\sim 70$  А.

Зависимости остаточного напряжения от величины рабочего напряжения показывают, что с уменьшением напряжения питания структуры St-1 и St-2 ведут себя схожим образом — на максимальном рабочем напряжении (180 В) величина остаточного составляет  $\approx 5.6$ – $5.8$  В, что соответствует 3–3.2% от питающего, далее величина остаточного напряжения нелинейно растет и на 40 В достигает максимума  $\sim 14$ – $16$  В (см. рис. 3, *b*), что соответствует  $\approx 35$ – $40$ % от напряжения питания, после чего начинает резко уменьшаться и на минимальном напряжении питания  $\sim 10$  В достигает значений  $\sim 5$ – $6$  В, т. е. 50–60% от питания.

Тем не менее, несмотря на нелинейное изменение величины остаточного напряжения от напряжения пи-

тания, если рассматривать его в процентном соотношении, становится понятно, что структуры St-1 и St-2 характеризуются повышенным остаточным напряжением, которое увеличивается с уменьшением напряжения питания. Достигаемые значения остаточных напряжений говорят о наличии в структуре локальных областей с высокой напряженностью электрического поля. Для визуализации этих областей были построены пространственные зависимости: напряженности электрического поля, концентраций носителей заряда, а также темпов ударной ионизации в разные моменты времени на примере структуры St-1. В качестве двух опорных точек на временной шкале были взяты 0 нс (тиристор выключен) и 600 нс (тиристор полностью включен), а также две промежуточные точки — 445.9 и 446.2 нс, характеризующие моменты времени, в которые и происходит включение тиристора. Все построения сделаны для напряжения питания 180 В (рис. 4).

В начальный момент времени (0 нс) домен сильного поля занимает почти всю  $p^0$ -базу (см. рис. 4, *a*). В процессе включения, вследствие экстракции из  $p$ -эмиттера и ударной ионизации на границе коллектор-база, в  $p^0$ -базе образуется большое количество неравновесных



**Рис. 4.** Пространственные зависимости для структуры St-1 при напряжении питания 180 В в различные моменты времени: *a* — модуль напряженности электрического поля, *b* — темп ударной ионизации, *c* — концентрации носителей заряда (сплошные линии — дырки, пунктирные линии — электроны).

дырок. Данные дырки под действием электрического поля дрейфуют в сторону границы  $p^0$ -база/ $p^+$ -база. Однако высоколегированный запирающий  $p^+$ -слой из GaAs и барьер, образованный гетерограницей  $p^+$ -GaAs/ $n$ -AlGaAs, препятствуют их активной утечке из базы. Таким образом, в  $p^0$ -базе возникает избыточный положительный заряд. Данный заряд индуцирует встроенное электрическое поле, противоположное по полярности полю база-коллекторного  $p^0$ - $n$ -перехода, что понижает образованный им потенциальный барьер, а значит, сквозной ток через структуру возрастает. На построенных зависимостях данный эффект отображается как постепенное пространственное „ужимание“ домена сильного поля на временах 445.9 и 446.2 нс (см. рис. 4, *a*). Распределения скорости ударной ионизации по мере включения тиристора качественно повторяют ход кривых напряженности (см. рис. 4, *b*), также постепенно „поджимаясь“ к границе база-коллектор, что напрямую связано с тем, что сокращается область базы, в которой

величина напряженности поля достаточна для генерации носителей посредством ударной ионизации, при этом ее пространственная амплитуда на границе база-коллектор, как и для напряженности поля, растет.

Одним из характерных следствий „схлопывания“ домена сильного поля является возникновение в  $p^0$ -базе во включенном состоянии квазинейтральной электронно-дырочной плазмы (см. рис. 4, *c*), образованной неравновесными дырками и инжектированными из  $n$ -эмиттера электронами. Видно, что в начальные моменты времени (445.9 нс) дырок в базе несколько меньше, чем электронов, так как процесс инжекции через прямо-смещенный  $p^+$ - $n$ -переход идет более интенсивно, чем экстракция через обратно-смещенный  $p^0$ - $n$ -переход. Однако по мере возрастания скорости ударной ионизации (см. рис. 4, *b*) на границе база-коллектор генерация неравновесных дырок, а также все увеличивающийся по мере включения сквозной ток уравнивают инжекцию из  $n$ -эмиттера. В итоге в полностью включенном

состоянии (600 нс) электронная и дырочная концентрации практически равны на большей части объема базы, за исключением узкого ( $\sim 300$  нм) слоя у самой границы база–коллектор (см. рис. 4, *с*). Толщина слоя, в котором наблюдается нарушение квазинейтральности, хорошо совпадает с областью остаточного домена сильного поля (см. рис. 4, *а*) и соответствующей ей областью остаточной ударной ионизации (см. рис. 4, *б*). Именно наличие во включенном состоянии высокой напряженности электрического поля на границе база–коллектор обуславливает достигаемое значение остаточного напряжения для структур St-1 и St-2.

Локальный пик остаточного напряжения при  $U \sim 40$  В для St-1 и St-2 (см. рис. 3, *б*) также связан с размерами области объемного заряда вблизи  $n$ - $p^0$ -коллекторного перехода во включенном состоянии (остаточного домена), при различном уровне питающего напряжения. Установлено, что при снижении рабочего напряжения с 180 до 40 В включительно амплитуда напряженности электрического поля на коллекторном переходе во включенном состоянии уменьшается слабо по сравнению с расширением области объемного заряда. С учетом того что остаточное напряжение на структуре — это по сути интеграл от пространственного распределения напряженности электрического поля, то расширение области объемного заряда вкупе с относительно небольшим снижением пространственной амплитуды напряженности увеличивает значение данного интеграла и, соответственно, абсолютную величину  $U_{\text{residual}}$ , что и наблюдается на рис. 3, *б* при  $180 \geq U \geq 40$  В. При дальнейшем снижении напряжения питания с 40 до 10 В ширина области объемного заряда в окрестности коллекторного перехода во включенном состоянии практически перестает изменяться, в то же время амплитуда напряженности поля снижается существенно ( $\sim 4$  раза для St-1). Данный эффект порождает уменьшение интеграла пространственного распределения напряженности, а значит, и снижение остаточного напряжения на структуре, что наглядно проявляется на рис. 3, *б* как падение величины остаточного напряжения при  $U < 40$  В для St-1 и St-2.

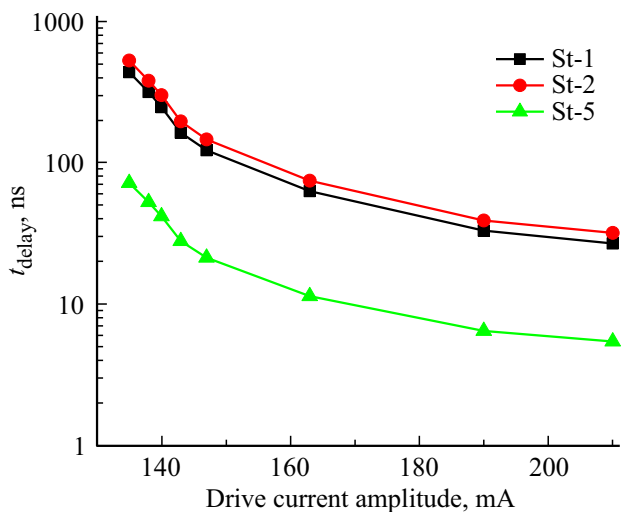
Если же рассматривать структуру с утонченным  $n$ -коллектором (St-5), то заметно, что она ведет себя совершенно иначе, чем структуры St-1 и St-2: ее остаточное напряжение с уменьшением напряжения питания не растет, а напротив, уменьшается по слабому квазистепенному закону (см. рис. 3, *б*), при этом разница между конечным и начальным значениями составляет всего лишь 0.44 В, а максимальная абсолютная величина остаточного напряжения достигается, соответственно, при максимальном рабочем напряжении 180 В и равняется  $\sim 1.86$  В, что составляет  $\sim 1\%$  от напряжения питания. Наибольшая относительная величина остаточного напряжения наблюдается при рабочем напряжении 10 В и составляет 1.42 В, т.е.  $\sim 14\%$  от рабочего. На основании данных оценок можно заключить, что по величине остаточного напряжения структура с 0.2 мкм

$n$ -коллектором показывает лучший результат, а значит, GaAs/AlGaAs-тиристорный ключ, основанный на структуре St-5, теоретически, должен испытывать меньший перегрев при работе на тех же напряжениях питания, нежели структуры St-1 и St-2.

Анализ ширины фронта включения демонстрирует, что при работе на высоких блокирующих напряжениях, в диапазоне  $\sim 180$ –140 В, фронты включения всех трех рабочих структур примерно одинаковы (см. рис. 3, *с*) и лежат в диапазоне 1.5–1.7 нс. Однако с уменьшением напряжения питания скорость включения начинает уменьшаться, соответственно фронт включения уширяется, при этом для структуры St-5 при напряжении 10 В данное уширение является наименьшим из всех и составляет всего лишь  $\sim 4.6$  нс против почти 148 и 311 нс для St-2 и St-1 при тех же 10 В питания. Наиболее короткий фронт включения в структуре St-5 ожидается при наибольшем рабочем напряжении 180 В и составляет всего 1.5 нс. Для структур St-1 и St-2 фронты включения на 180 В питания оказываются несколько больше по ширине и равны 1.58 и 1.6 нс соответственно.

Рассмотрение суммарного времени включения показывает, что и по данному параметру структура с утонченным  $n$ -коллектором показывает себя лучше, чем структура с исходным дизайном или же структура с составной  $n^0/p^0$ -базой. Так, для структуры St-5 время включения во всем диапазоне рабочих напряжений не превышает 150 нс, в то время как для структур St-1 и St-2 в низковольтном режиме доходит до тысяч наносекунд. Показанные на рис. 3, *д* времена включения получены для амплитуды импульса управления 135 мА. При необходимости время задержки включения может быть существенно снижено за счет повышения амплитуды импульса тока управления. В этой связи были проведены расчеты времен задержки включения для трех рассматриваемых структур (St-1, St-2, St-5) на максимальном напряжении питания (180 В) в зависимости от амплитуды импульса управления, которая варьировалась от 135 до 210 мА (рис. 5).

С увеличением амплитуды управляющего сигнала время задержки включения тиристора уменьшается для всех рассматриваемых дизайнов гетероструктуры. Сравнивая между собой смоделированные тиристоры, нетрудно заметить, что ситуация по временам задержки включения во многом аналогичная динамическим характеристикам на рис. 3 — величины задержек для St-1 и St-2 ведут себя одинаково с ростом амплитуды тока управления и довольно близки по абсолютным величинам, которые находятся на уровне десятков–сотен наносекунд (см. рис. 5). Для St-5 же наблюдаются существенные отличия — во всем диапазоне амплитуд управляющего сигнала время задержки включения существенно меньше, чем для St-1 и St-2, и не превышает 100 нс. Наибольшее значение,  $\sim 72$  нс, время задержки включения структуры St-5 приобретает при минимальной амплитуде импульса управления (135 мА), в то время как для St-1 и St-2



**Рис. 5.** Время задержки включения в зависимости от амплитуды импульса управления на максимальном рабочем напряжении 180 В.

на том же токе управления наблюдаются времена задержки  $\sim 435$  и  $526$  нс соответственно. При увеличении амплитуды тока управления до 210 мА время задержки включения St-5 становится равным  $\sim 5.5$  нс, против 26.9 и 31.9 нс для St-1 и St-2. Таким образом, подбирая амплитуду управляющего сигнала для структуры St-5 с утонченным до 0.2 мкм коллектором, можно добиться крайне малоинерционного включения тиристора с шириной фронта включения на уровне  $\sim 1.5$  нс и временем задержки включения  $\sim 5.5$  нс, т.е. суммарное время включения тиристора будет составлять  $\sim 7$  нс.

#### 4. Заключение

На основании проведенных расчетов различных конструкций GaAs/AlGaAs высоковольтного тиристорного токового ключа с 8 мкм  $p^0$ -базой в рамках квазиодномерной модели можно сделать вывод о существенном влиянии параметров слоев, непосредственно прилегающих к  $p^0$ -базе, на диапазон рабочих напряжений тиристора, в особенности наличия/отсутствия сильнолегированной  $p^+$ -вставки и толщины  $n$ -коллекторного слоя. Статические расчеты максимального блокирующего напряжения тиристора показывают, что наиболее выгодно создавать структуру с  $p^+$ -вставкой между  $p^0$ -базой и  $n$ -AlGaAs-эмиттером, причем уровень легирования данного слоя целесообразно повышать до  $\sim 10^{18}$  см $^{-3}$ . В противном случае не удастся достичь на тиристоре высоковольтного (с напряжениями  $> 60$  В) режима работы.

Проведенный анализ динамики включения различных конструкций тиристорных позволяет заключить, что из всех смоделированных структур GaAs/AlGaAs высоковольтных тиристорных токовых ключей структура с утонченным до 0.2 мкм  $n$ -коллектором обладает наибольшей скоростью включения — шири-

на ее фронта включения в низковольтной области ( $U_{\text{supp}} \approx 10$  В) составляет  $\sim 4.6$  нс, а в высоковольтной ( $U_{\text{supp}} \approx 180$  В) доходит до  $\sim 1.5$  нс. Расчеты времен задержки включения для структуры с 0.2-микрометровым коллектором показывают, что их величина может быть снижена до 5.5 нс за счет увеличения амплитуды импульса управления до 210 мА. Таким образом, суммарное время включения тиристора составит всего лишь  $\sim 7$  нс, в то время как остальные рассмотренные структуры потребуют десятки наносекунд, даже при сверхмощных импульсах управления. Одновременно с этим структура с утонченным до 0.2 мкм коллектором демонстрирует наименьший уровень остаточного напряжения в рабочем диапазоне напряжений питания (от 10 до 180 В), которое в самом худшем случае (при  $U_{\text{supp}} \approx 10$  В) не превышает 14% от величины напряжения питания. При этом наименьшее относительное остаточное напряжение, равное 1.86 В, т.е.  $\sim 1\%$  от напряжения питания, достигается в режиме максимального рабочего напряжения  $U_{\text{supp}} = 180$  В. Характерно также и то, что для всех исследованных дизайнов достигаются близкие значения амплитуды тока во включенном состоянии. Например, для напряжения питания 180 В амплитуда тока структуры St-5 составляет  $\approx 71.3$  А, в то время как для структур St-1 и St-2 —  $\sim 69.7$ – $69.8$  А.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### Список литературы

- [1] T.A. Bagaev, N.V. Gul'tikov, M.A. Ladugin, A.A. Marmalyuk, Yu.V. Kurnyavko, V.V. Krichevskii, A.A. Morozyuk, V.P. Konyayev, V.A. Simakov, S.O. Slipchenko. *Quant. Electron.*, **51** (10), 912 (2021). DOI: 10.1070/QEL17634
- [2] S.O. Slipchenko, A.A. Podoskin, O.S. Soboleva, V.S. Golovin, D.N. Romanovich, V.A. Kapitonov, A.S. Kazakova, K.V. Bakhvalov, N.A. Pikhtin, T.A. Bagaev, M.A. Ladugin, A.A. Padalitsa, A.A. Marmalyuk, V.A. Simakov. *IEEE Trans. Electron Dev.*, **68** (6), 2855 (2021). DOI: 10.1109/TED.2021.3072606
- [3] S.O. Slipchenko, A.A. Podoskin, V.S. Golovin, D.N. Romanovich, V.V. Shamakhov, D.N. Nikolaev, I.S. Shashkin, N.A. Pikhtin, T.A. Bagaev, M.A. Ladugin, A.A. Marmalyuk, V.A. Simakov. *Opt. Express*, **27** (22), 31446 (2019). DOI: 10.1364/oe.27.031446
- [4] С.О. Слипченко, О.С. Соболева, А.А. Подоскин, Ю.К. Кириченко, Т.А. Багаев, И.В. Яроцкая, Н.А. Пихтин. *ФТП*, **57** (4), 295 (2023). DOI: 10.21883/FTP.2023.04.55901.4851
- [5] А.А. Подоскин, И.В. Шушканов, С.О. Слипченко, Н.А. Пихтин, Т.А. Багаев, В.Н. Светогоров, И.В. Яроцкая, М.А. Ладугин, А.А. Мармалюк, В.А. Симаков. *ФТП*, **58** (3), 161 (2024). DOI: 10.61011/FTP.2024.03.58408.6404
- [6] А.А. Подоскин, И.В. Шушканов, С.О. Слипченко, Н.А. Пихтин, Т.А. Багаев, В.Н. Светогоров, Ю.Л. Рябоштан, М.А. Ладугин, А.А. Мармалюк, В.А. Симаков. *ФТП*, **58** (3), 165 (2024). DOI: 10.61011/FTP.2024.03.58409.6405

- [7] Б.Н. Звонков, Н.В. Байдусь, С.М. Некоркин, О.В. Вихрова, А.В. Здравейцев, А.В. Кудрин, В.Е. Котомина. *ФТП*, **51** (11), 1443 (2017). DOI: 10.21883/FTR.2017.11.45087.01
- [8] B.N. Zvonkov, N.V. Baidus, S.M. Nekorkin, O.V. Vikhrova, A.V. Zdoroveyshev, A.V. Kudrin, V.E. Kotomina. *Semiconductors*, **51** (11), 1391 (2017). DOI: 10.1134/S1063782617110306
- [9] А.Б. Чигинева, Н.В. Байдусь, С.М. Некоркин, К.С. Жидяев, В.Е. Котомина, И.В. Самарцев. *ФТП*, **56** (1), 134 (2022). DOI: 10.21883/FTR.2022.01.51824.9732
- [10] К.С. Жидяев, А.Б. Чигинева, Н.В. Байдусь, И.В. Самарцев, А.В. Кудрин. *ФТП*, **58** (3), 156 (2024). DOI: 10.61011/FTR.2024.03.58407.6148
- [11] С.О. Слипченко, А.А. Подоскин, И.В. Шушканов, В.А. Крючков, А.Э. Ризаев, М.И. Кондратов, А.Е. Гришин, Н.А. Пихтин, Т.А. Багаев, В.Н. Светогоров, М.А. Ладугин, А.А. Мармалок, В.А. Симаков. *ФТП*, **57** (8), 678 (2023). DOI: 10.61011/FTR.2023.08.56967.5670
- [12] С.О. Слипченко, А.А. Подоскин, И.В. Шушканов, В.А. Крючков, А.Э. Ризаев, М.И. Кондратов, А.Е. Гришин, Н.А. Пихтин, Т.А. Багаев, В.Н. Светогоров, М.А. Ладугин, А.А. Мармалок, В.А. Симаков. *Письма ЖТФ*, **50** (4), 43 (2024). DOI: 10.61011/PJTF.2024.04.57101.19771
- [13] С.О. Слипченко, А.А. Подоскин, И.В. Шушканов, А.Э. Ризаев, М.И. Кондратов, Н.А. Рудова, В.А. Стрелец, Н.В. Шувалова, А.Е. Гришин, Т.А. Багаев, М.А. Ладугин, А.А. Мармалок, В.А. Симаков, Н.А. Пихтин. *Письма ЖТФ*, **51** (11), 7 (2025). DOI: 10.61011/PJTF.2025.11.60479.20235
- [14] O.S. Soboleva, V.V. Zolotarev, V.S. Golovin, S.O. Slipchenko, N.A. Pikhtin. *IEEE Trans. Electron Dev.*, **67** (11), 4977 (2020). DOI: 10.1109/TED.2020.3024353
- [15] S. Selberherr. *Analysis and Simulation of Semiconductor Devices* (Vienna, Springer, 1984). DOI: 10.1007/978-3-7091-8752-4
- [16] A.G. Chynoweth. *Phys. Rev.*, **109** (5), 1537 (1958). DOI: 10.1103/PhysRev.109.1537
- [17] A. Maaßdorf, S. Gramlich, E. Richter, F. Brunner, M. Weyers, G. Tränkle, J.W. Tomm, Y.I. Mazur, D. Nickel, V. Malyarchuk, T. Günther, Ch. Lienau, A. Bärwolff, T. Elsaesser. *J. Appl. Phys.*, **91** (8), 5072 (2002). DOI: 10.1063/1.1456244
- [18] H. Ito, T. Furuta, T. Ishibashi. *Appl. Phys. Lett.*, **58** (25), 2936 (1991). DOI: 10.1063/1.104727
- [19] S. Tiwari, S.L. Wright. *Appl. Phys. Lett.*, **56** (6), 563 (1990). DOI: 10.1063/1.102745
- [20] M. Niemeyer, J. Ohlmann, A.W. Walker, P. Kleinschmidt, R. Lang, T. Hannappel, F. Dimroth, D. Lackner. *J. Appl. Phys.*, **122** (11), 115702 (2017). DOI: 10.1063/1.5002630

Редактор А.Н. Смирнов

## Switching (turn-on) dynamics of high-current high-voltage current switches based on GaAs/AlGaAs heterostructures

S.O. Slipchenko, I.V. Oreshko, A.A. Podoskin, I.V. Shushkanov, N.A. Pikhtin

loffe Institute,  
194021 St. Petersburg, Russia

**Abstract** Maximum blocking voltages and dynamic turn-on processes of current switches based on GaAs/AlGaAs heterostructures with the thickness of weakly doped region increased to  $8\ \mu\text{m}$  were investigated using numerical simulation methods within the framework of the quasi-one-dimensional drift-diffusion model. The influence of the design of the weakly doped region of the collector junction of the  $n-p-n$  transistor part while maintaining the total thickness of  $8\ \mu\text{m}$  was determined. It was shown that the maximum blocking voltage reaches  $\sim 180\ \text{V}$  for the design of a composite  $p$ -base including a heavily doped layer ( $p = 10^{18}\ \text{cm}^{-3}$ ) with a thickness of  $0.1\ \mu\text{m}$  and a weakly doped layer ( $p = 6 \cdot 10^{14}\ \text{cm}^{-3}$ ) with a thickness of  $8\ \mu\text{m}$ . It was shown that, regardless of the design, close values of the maximum turn-on current of  $\sim 70\ \text{A}$  and the width of the turn-on fronts of  $\sim 1.5-1.6\ \text{ns}$  are achieved. However, the best values of residual voltage and turn-on delay are achieved in the design with an  $n$ -collector of the  $n-p-n$  transistor part thinned to  $0.2\ \mu\text{m}$  and are  $\sim 1.86\ \text{V}$  and  $5.5\ \text{ns}$ , respectively.