

## Исследование динамики включения низковольтных InP-гомотристоров

© С.О. Слипченко, О.С. Соболева, А.А. Подоскин, Ю.К. Кириченко, Т.А. Багаев, И.В. Яроцкая, Н.А. Пихтин

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: SergHPL@mail.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 13 апреля 2023 г.

В окончательной редакции 18 мая 2023 г.

Принята к публикации 18 мая 2023 г.

С использованием методов численного моделирования проведены исследования серии конструкций гетероструктур низковольтных гомотристоров InP. В качестве базовой рассматривалась конструкция со слоем объемного заряда, сформированным в области  $p$ -базы  $n-p-n$ -транзисторной части. Исследованы динамические характеристики и процессы, определяющие скорость перехода во включенное состояние. Показано, что при увеличении толщины  $p$ -базы с 1 до 2.6 мкм достигаемые максимальные токи в открытом состоянии увеличиваются с 70 до 90 А, при этом минимальное время перехода во включенное состояние достигает 11 нс при максимальном блокируемом напряжении 55 В. Продемонстрировано, что эффективность работы во включенном состоянии определяется остаточным напряжением, величина которого снижается при уменьшении толщины  $p$ -базы.

**Ключевые слова:** тристор, ударная ионизация, дрейф-диффузионная модель.

DOI: 10.21883/FTP.2023.04.55901.4851

### 1. Введение

Задача разработки твердотельных ключей, способных переключать высокие токи, является актуальной для создания мощных импульсных источников излучения на основе полупроводниковых лазеров [1–5]. Поскольку полупроводниковые лазеры обладают низким омическим сопротивлением, значение которого может составлять десятки мОм, то падение напряжения на низкоомной нагрузке не превышает единиц В даже в условиях, когда требуемые амплитуды формируемых импульсов достигают значений десятков и сотен А. В этом случае отсутствует необходимость использования высоковольтных ключей. Другим важным критерием твердотельных ключей для рассматриваемого круга задач является скорость переходных процессов, которая определяет возможность формирования импульсов требуемой длительности. В настоящее время наибольший интерес представляют решения, позволяющие формировать импульсы тока длительностью в единицы и десятки нс, так как основное приложение импульсных лазеров связано с дальнометрией. В этом случае паразитные индуктивности контура тока могут заметно снижать скорость переходных процессов. По этой причине конструкции ключей должны реализовывать условия для компактного размещения в контуре с полупроводниковыми лазерами. В общем случае можно выделить два подхода: (1) основан на ключах, замыкающих токовую цепь с источником запасенной энергии в виде конденсатора (токовые ключи транзисторного или тиристорного типа) [1–5], (2) основан на устройствах, размыкающих токовую цепь с источником запасенной энергии в виде индуктивного элемента [6]. В настоящее время наибольшее распространение получили полевые

транзисторы. В первую очередь это связано с доступностью, обусловленной широкой распространенностью для решения задач в области силовой и СВЧ радиоэлектроники. Они позволяют создавать условия для накачки полупроводниковых лазеров импульсами тока амплитудой до сотен А и длительностью до 10 нс [5], для эффективной работы таких систем требуются дополнительные специализированные быстродействующие драйверы, которые обеспечивают условия быстрого включения и выключения силовых полевых транзисторов. Несмотря на это, возможна компактная реализация подобных схем общей площадью несколько см<sup>2</sup>. В работах [3,7] предложен подход, основанный на гибридной интеграции низковольтного ключа на основе GaAs-гомотристора, где продемонстрированы возможности генерации длительностей импульсов в диапазоне 3–60 нс и амплитуд токов до 100 А. Преимуществом данного подхода является возможность гибридной интеграции кристаллов полупроводниковых лазеров и тиристорного ключа, что обеспечивает минимально возможные габариты. Отсутствие высоких требований к импульсам управления низковольтными тиристорами позволяет упростить и снизить габариты внешней схемы управления.

В настоящей работе в рамках методов численного моделирования исследована возможность создания низковольтных гомотристоров на основе InP. Данный материал не уступает GaAs по основным характеристикам: подвижность носителей заряда, пробивное напряжение. При этом конструкция гомотристора является наиболее технологичной, так как не требует использования сложных многокомпонентных твердых растворов. Важно отметить, что исследования низковольтных быстродействующих гомотристоров на основе полупроводников

$A^{III}B^V$  ранее не проводились. Кроме этого, разрабатываемые решения в дальнейшем могут быть развиты в направлении создания интегральных ключей лазертиристоров на основе гетероструктур InGaAsP/InP, позволяющих получать излучение в спектральном диапазоне 1300–1900 нм.

## 2. Модель гомотиристора на основе InP

Проведенные ранее исследования гетеростристоров AlGaAs/GaAs показали, что скорость перехода во включенное состояние оказывает существенное влияние на динамику генерируемых импульсов тока [8,9]. По этой причине в рамках данной работы для низковольтных InP-гомотиристоров исследована динамика включения и не исследуются вопросы перехода в выключенное состояние, а также проведен анализ влияния параметров конструкции гомотиристора на скорость переходных процессов. Общая структура InP-гомотиристора включала сильно легированный  $n$ -InP эмиттер ( $N_d = 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ) толщиной 1 мкм, в общем случае составную  $p$ -базу на основе сильно легированного тонкого  $p^+$  InP слоя ( $N_a = 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ) толщиной 0.05 мкм и слабо легированной части  $p_0$  InP ( $N_a = 1.7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ), сильно легированного коллектора  $n$ -InP ( $N_d = 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ) толщиной 1.25 мкм, для  $n$ - $p$ - $n$ -транзистора. Уровень концентрации в слабо легированной части  $p$ -базы был выбран на основании требований достижимости и контролируемости для процесса осаждения металлоорганических соединений (МОС)-гидридной эпитаксии. Конструкция  $p$ -базы  $n$ - $p$ - $n$ -транзистора, а именно толщина  $p_0$ -слоя и наличие или отсутствие  $p^+$ -слоя являлись параметрами для оптимизации при исследовании скорости включения. В свою очередь именно конструкция  $p$ -базы определяет блокируемое напряжение гомотиристора, при этом, так как разрабатываемый прибор должен работать на низкоомную нагрузку, максимальные блокируемые напряжения, а следовательно, и верхняя граница диапазона толщин  $p$ -базы были ограничены величинами 60 В и 2.6 мкм соответственно. Для  $p$ - $n$ - $p$ -транзистора  $p$ -эмиттер был сформирован слоем  $p$ -InP ( $N_a = 3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ) толщиной 0.25 мкм.

Расчет динамики включения проводился в рамках стандартной дрейф-диффузионной модели с ударной ионизацией и отрицательной дифференциальной подвижностью в слое  $p_0$  InP базы, где формировался домен поля обратносмещенного  $p$ - $n$ -перехода [8]. Включение осуществлялось подачей электрического импульса управления через  $n$ -коллектор  $n$ - $p$ - $n$ -транзистора, обеспечивающего ток амплитудой 15 мА. Динамика включения рассчитывалась с внешним  $R$ - $L$  контуром, который включал эквивалентное сопротивление 0.5 Ом и индуктивность 1 нГн, площадь рассчитываемых структур составляла  $200 \times 500 \text{ мкм}^2$ , что близко к значениям, ис-

пользуемым в низковольтных токовых ключах на основе гетеротиристоров AlGaAs/GaAs [7].

Ударная ионизация описывалась в рамках модели Зельберхерра, которая хорошо зарекомендовала себя при описании низковольтных AlGaAs/GaAs лазертиристоров [8] и использовала следующую связь коэффициентов ударной ионизации с напряженностью электрического поля [10]:

$$\alpha_{n,p}(E) = A_{n,p} \exp(-(B_{n,p}/E)^\beta), \quad (1)$$

где параметры модели  $A_n = 2.93 \cdot 10^6$ ,  $B_n = 2.64 \cdot 10^6$ ,  $A_p = 1.62 \cdot 10^6$ ,  $B_p = 2.11 \cdot 10^6$ ,  $\beta = 1.0$ . Здесь важно отметить, что ряд экспериментальных результатов продемонстрировал меньшую скорость ударной ионизации в InP по сравнению с GaAs [11]. Авторы связывают это с большим значением плотности состояний в InP и, как следствие, более высокой скоростью рассеяния электрон-фононного рассеяния.

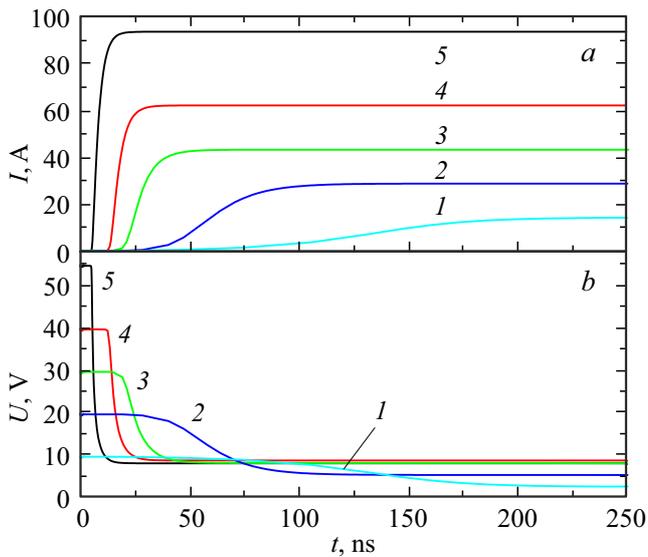
Для ряда прямозонных полупроводников, таких как GaAs и InP, при движении электронов в сильных электрических полях, напряженностью более  $E_{pk}$ , имеет место перераспределение из  $\Gamma$ -долины, характеризующейся меньшей эффективной массой, в  $L$ -долину, характеризующуюся большей эффективной массой. Такой переход приводит к снижению средней дрейфовой скорости, что в свою очередь выражается в отрицательной дифференциальной подвижности. Так как в исследуемых приборах достигаемые напряженности электрического поля могут превышать  $E_{pk}$ , для корректного описания эффектов транспорта в таких условиях использовалось аналитическое выражение для зависимости подвижности электронов от напряженности электрического поля. Аналитическое выражение было предложено в [12] и получено при аппроксимации экспериментальных значений дрейфовой скорости электронов для структур на основе InP:

$$\mu_n = \frac{\mu_{n0} + \frac{v_{ns}}{E} \left(\frac{E}{E_t}\right)^\gamma}{1 + \left(\frac{E}{E_t}\right)^\gamma}, \quad (2)$$

где  $E$  — напряженность электрического поля,  $E_t$  — напряженность электрического поля, соответствующая порогу отрицательной дифференциальной подвижности (полю при максимальной дрейфовой скорости),  $\mu_{n0}$  — подвижности в слабых электрических полях,  $v_{ns}$  — насыщенная скорость дрейфа электронов ( $v_{ns} = 10^7 \text{ см/с}$ ),  $\gamma$  — параметр модели ( $\gamma = 2.3$ ). Параметры модели взяты из [12]. Подвижность дырок задавалась обычным образом:

$$\mu_p = \frac{\mu_{p0}}{\left(1 + (E\mu_{p0}/v_{ps})^{\beta_p}\right)^{1/\beta_p}}, \quad (3)$$

где  $\mu_{p0}$  — подвижности в слабых электрических полях,  $v_{ps}$  — насыщенная скорость дрейфа электронов ( $v_{ps} = 9 \cdot 10^6 \text{ см/с}$ ).



**Рис. 1.** Зависимость динамики тока (а) и блокируемого напряжения (б) при включении гомотиристора InP с конструкцией  $p$ -базы на основе слабо легированного слоя толщиной 2.6 мкм и легированием  $p = 1.7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  при различных напряжениях, В: 1 — 10, 2 — 20, 3 — 30, 4 — 40, 5 — 55.

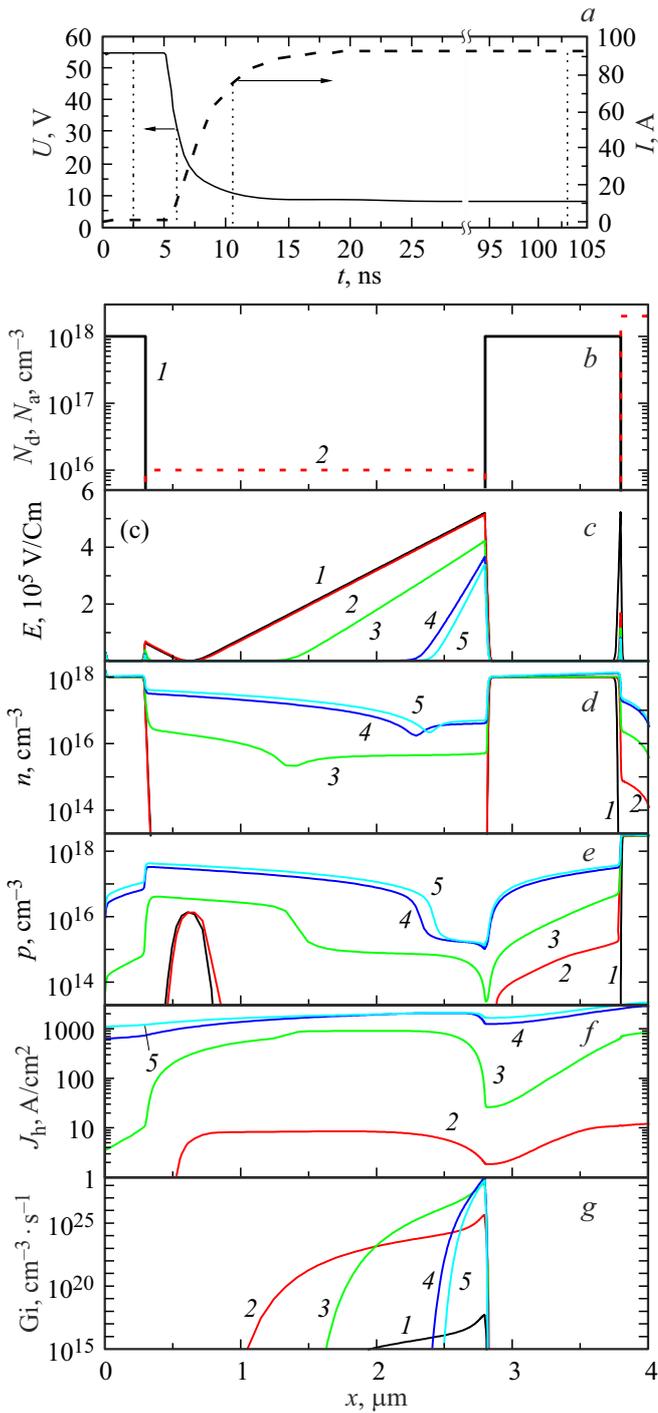
### 3. Результаты моделирования и их анализ

Численное моделирование динамики включения проводилось для серии структур гомотиристоров InP, которые отличались конструкцией  $p$ -базы  $n-p-n$ -транзистора. Было рассмотрено 5 конструкций  $p$ -базы: 1 — включала только слой  $p_0$  InP толщиной 2.6 мкм, 2 — включала слои  $p^+$  и  $p_0$  InP толщинами 0.05 и 2 мкм соответственно, 3 — включала слои  $p^+$  и  $p_0$  InP толщинами 0.05 и 1.5 мкм соответственно, 4 — включала слои  $p^+$  и  $p_0$  InP толщинами 0.05 и 1 мкм соответственно. Использование  $p^+$ -слоя, размещенного со стороны  $n$ -эмиттера, позволяет избежать смыкания областей объемных зарядов коллекторного и эмиттерного  $p-n$ -переходов и таким образом повысить рабочий диапазон блокируемых напряжений. Далее указанные типы конструкции баз будут обозначаться как включающие только слой  $p_0$  и комбинацию слоев  $p^+/p_0$ . Характер получаемых в ходе расчетов динамических зависимостей для всех типов структур близок, поэтому рассмотрим типичные зависимости на примере структуры 1-го типа. Динамика тока и напряжения для структуры 1-го типа показана на рис. 1. Видно, что полученные зависимости могут быть охарактеризованы током (максимальным током) во включенном состоянии, который определяется напряжением блокировки (максимальным блокируемым напряжением) и остаточным напряжением во включенном состоянии, а также скоростью перехода во включенное состояние, которая определяется как время, за которое снижается блокируемое напряжение

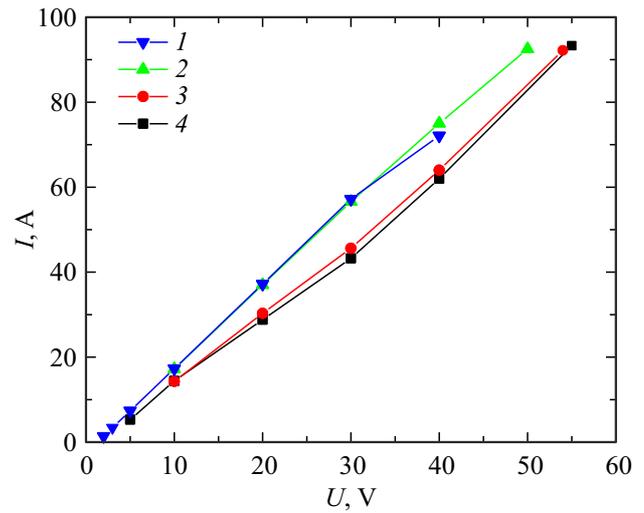
с уровня 90% до уровня 10% в открытом состоянии. Видно, что блокируемое напряжение оказывает влияние на динамику включения и амплитуду тока. Рассмотрим распределения модуля электрического поля, носителей заряда, тока дырок и скорости ударной ионизации для максимального блокируемого напряжения в различные моменты времени (рис. 2). Для этого выбрано пять характерных времен (рис. 2, а): 0 — соответствует стационарному состоянию при заданном блокируемом напряжении, 2.5 нс — соответствует состоянию, когда подан импульс тока управления, но тиристор еще находится в закрытом состоянии, 5.9 нс — момент времени, который соответствует началу включения тиристора, 10.3 нс — момент времени, который соответствует завершению переходного процесса на фронте включения тиристора и 103 нс — время, когда тиристор открыт.

Если рассматривать эмиттерный  $p-n$ -переход  $n-p-n$ -транзисторной части, то поле для области  $\sim 0.25-0.5$  мкм соответствует слою  $p$ -базы. Так как эмиттерный  $p-n$ -переход сформирован сильно легированным  $n$ -слоем ( $N_d = 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ) и слабо легированным  $p$ -слоем ( $N_a = 1.7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ), область объемного заряда расположена в основном в слое  $p$ -базы и сформирована отрицательно заряженными акцепторами. В момент времени 0, когда приложено только блокирующее напряжение, распределение поля в эмиттерном  $p-n$ -переходе близко к стационарному без приложения внешнего напряжения, так как токи утечки через структуру пренебрежимо малы. Для момента времени 2.5 нс плотность тока через данный  $p-n$ -переход также незначительна ( $< 10 \text{ А/см}^2$ ), поэтому распределение поля для равновесного состояния ( $t = 0$ ) и через 2.5 нс после подачи импульса управления отличаются слабо. Существенное перераспределение поля в эмиттерном  $p-n$ -переходе начинается при открытии тиристора, когда ток через прибор заметно возрастает.

Из рис. 2, с видно, что переход во включенное состояние сопровождается перераспределением поля в области коллекторного  $p-n$ -перехода, которое выражается в сужении домена поля и снижении его амплитуды. Однако важно отметить, что даже в открытом состоянии в области коллекторного  $p-n$ -перехода сохраняется узкий домен поля с достаточно высокой амплитудой, достигающей  $3.3 \cdot 10^5 \text{ В/см}$ . Также наблюдаются существенные изменения в распределениях избыточных носителей заряда: переход во включенное состояние сопровождается увеличением концентрации как избыточных электронов, так и дырок в области  $p$ -базы, при этом значение концентрации носителей обоих типов в открытом состоянии превышает  $10^{17} \text{ см}^{-3}$  (рис. 2, d, e). Рассмотрим основные механизмы, определяющие накопление избыточных дырок в  $p$ -базе. На рис. 2, f показан ток дырок для выбранных моментов времени. Видно, что компонента тока дырок, связанная с инжекцией из анодного контакта заметно падает в области легированной  $n$ -базы на начальном этапе включения, что связано с безызлучательной рекомбинацией в легированном  $n$ -слое.



**Рис. 2.** *a* — динамика напряжения и тока в процессе перехода гомотристора во включенное состояние при блокируемом напряжении 55 В. Пунктирными линиями показаны моменты времени, для которых приведены распределения в слоях гетероструктуры концентраций носителей заряда, плотности тока дырок, электрического поля и скорости ударной ионизации. *b* — распределение легирующих примесей в слоях моделируемой структуры гомотристора: 1 — донорная, 2 — акцепторная. Распределения в слоях структуры гомотристора модуля электрического поля (*c*), электронов (*d*), дырок (*e*), плотности ток дырок (*f*), скорости ударной ионизации (*g*) для различных моментов времени, нс: 1 — 0, 2 — 2.5, 3 — 5.9, 4 — 10.3, 5 — 103.

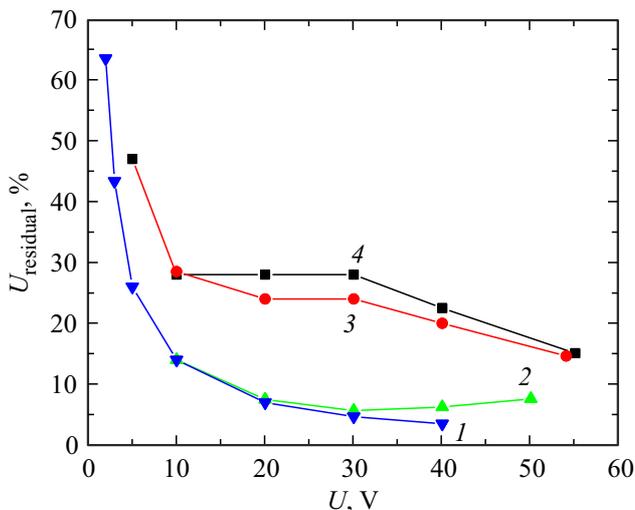


**Рис. 3.** Зависимости тока в открытом состоянии от напряжения для конструкций InP-гомотристоров с различной толщиной *p*-базы, мкм: 1 — 1, 2 — 1.5, 3 — 2, 4 — 2.6.

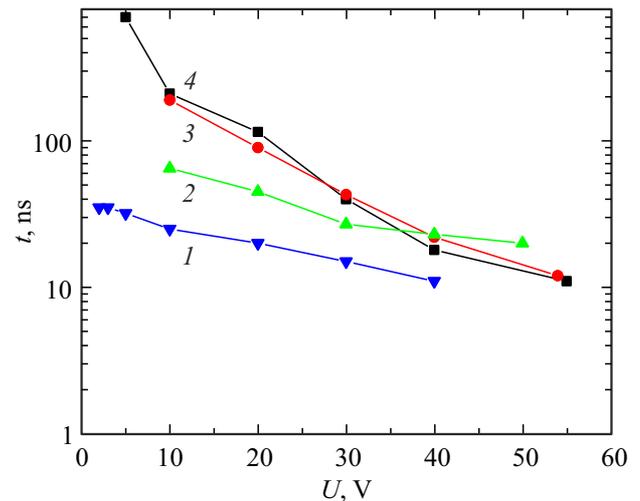
В результате основным источником является ударная генерация в области обратнсмещенного коллекторного *p-n*-перехода *n-p-n*-транзисторной части. На рис. 2, *g* показано распределение скорости ударной ионизации в различные моменты времени. Видно, что, несмотря на максимальную напряженность поля в период времени 0–2.5 нс, скорость ударной ионизации невелика, так как ее существенно ограничивает невысокий ток через *p-n*-переход. Начало включения сопровождается существенным возрастанием скорости ударной ионизации, как видно из зависимости для момента времени 5.9 нс (рис. 2, *g*), несмотря на сужение домена электрического поля и падение его амплитуды (рис. 2, *c*). Таким образом для низковольтных гомотристоров скорость перехода во включенное состояние при напряжениях, близких к максимальному блокируемому, определяется скоростью ударной ионизации в области домена поля.

На рис. 3 показаны зависимости тока в открытом состоянии от блокируемого напряжения, полученные для исследованных типов конструкций гомотристоров InP. Видно, что максимальный ток в открытом состоянии достигает 90 А и ограничен максимальным блокируемым напряжением, достигающим 55 В для структур с толщиной базы 2 мкм (конструкция базы  $p^+/p_0$ ) и 2.6 мкм (конструкция базы  $p_0$ ). Видно, что использование конструкции базы  $p^+/p_0$  позволяет снизить ее толщину, при этом сохранить высокое блокируемое напряжение. Превышение максимального блокируемого напряжения сопровождается неуправляемым переходом гомотристора в открытое состояние. Для конструкции 4 типа с минимальной толщиной базы 1 мкм максимальное блокируемое напряжение не превышает 40 В, как следствие, достигаемое значение максимального тока в открытом состоянии имеет минимальное значение из всех исследованных структур 70 А. Несмотря на то что структуры 1

и 2 типов с толщиной базы 2.6 и 2 мкм соответственно демонстрируют большее максимальное значение блокируемого напряжения, они уступают по эффективности, т. е. данные структуры демонстрируют меньшее значение тока в открытом состоянии при выбранном значении блокируемого напряжения. Для наглядной демонстрации эффективности работы в открытом состоянии исследованных типов конструкций гомотиристоров InP рассмотрим зависимости доли остаточного напряжения в открытом состоянии, выраженной в процентах от блокируемого напряжения (рис. 4). Видно, что именно структуры 1 и 2 типа с толстой  $p$ -базой демонстрируют большее остаточное напряжение. Большая величина остаточного напряжения в первую очередь связана с необходимостью поддерживать требуемое поле в области домена поля, который сохраняется и во включенном состоянии (рис. 2, *c*), чтобы обеспечить требуемый дрейфовый ток. В результате для структур 1 и 2 типа при увеличении блокируемого напряжения с 10 до 55 В доля остаточного напряжения снижается с 27 до 15%. Причина повышения эффективности переключения гомотиристора при повышении блокируемого напряжения связана с увеличением скорости ударной ионизации в домене электрического поля, сформированного на границе  $p$ -база/ $n$ -коллектор, что обеспечивает более эффективную поставку избыточных дырок в  $p$ -базу. Важно отметить, что именно избыточные дырки для  $p$ -базы обеспечивают требуемый коэффициент передачи по току  $n$ - $p$ - $n$ -транзистора. Наглядно важная роль ударной ионизации заметна при переходе в область низких блокируемых напряжений. Так, в структуре 1 типа при рабочем напряжении 5 В, когда ударная ионизация практически не работает, доля остаточного повышается до 47%. Снижение толщины  $p$ -базы позволяет также повысить эффективность работы



**Рис. 4.** Зависимости доли остаточного напряжения в открытом состоянии, выраженной в процентах от блокируемого напряжения, для конструкций InP-гомотиристоров с различной толщиной  $p$ -базы, мкм: 1 — 1, 2 — 1.5, 3 — 2, 4 — 2.6.



**Рис. 5.** Зависимости времени перехода в открытое состояние от напряжения для конструкций InP-гомотиристоров с различной толщиной  $p$ -базы, мкм: 1 — 1, 2 — 1.5, 3 — 2, 4 — 2.6.

во включенном состоянии. Видно, что для конструкций типа 3 и 4 при увеличении блокируемого напряжения с 10 до 50 В доля остаточного напряжения снижается с 13 до 7.5%. При этом по-прежнему наблюдается резкий рост доли остаточного напряжения в области меньших значений блокируемых напряжений (< 10 В). В результате остаточное напряжение может составлять до 45% от блокируемого.

Для решения задачи генерации коротких импульсов тока накачки одним из важных параметров является скорость включения. Зависимости времени включения от блокируемого напряжения для рассматриваемых типов структур показаны на рис. 5. Видно, что время перехода во включенное состояние снижается при увеличении блокируемого напряжения, при этом значение минимального времени включения достигает 11 нс для максимальных блокируемых напряжений. Снижение блокируемого напряжения до 10 В приводит к росту времени перехода во включенное состояние до 194 нс для структур 1 и 2 типов. Снижение толщины базы позволяет существенно сократить время включения для равных значений рабочих напряжений. В результате для структуры с минимальной толщиной базы 1 мкм при блокируемом напряжении 10 В время включения составляет 25 нс.

#### 4. Заключение

Проведенные исследования показали, что конструкции области  $p$ -базы  $n$ - $p$ - $n$ -транзисторной части структуры низковольтного гомотиристора оказывают существенное влияние на рабочие характеристики. В общем случае можно говорить об улучшении таких характеристик, как скорость перехода во включенное состояние и эффективность работы во включенном состоянии, для структур

с минимальной толщиной слоя  $p_0$  базы, при работе на одинаковых блокируемых напряжениях. Однако снижение толщины слоя  $p_0$  базы ведет также к снижению максимального блокируемого напряжения и, как следствие, максимального тока в открытом состоянии. Это значит, что выбор конструкции должен основываться на конкретных требованиях к решаемым задачам. Если для решения поставленных задач необходимы высокие амплитуды тока накачки, то оптимизация конструкций должна быть направлена на поиск решений, связанных с повышением максимального блокируемого напряжения, при этом следует ожидать, что максимальное быстродействие будет реализовано именно в области максимальных напряжений. Если эффективность работы и высокая скорость включения важны для максимально широкого диапазона рабочих напряжений, то следует рабочую структуру выбирать с минимальной толщиной слоя  $p_0$  базы. При этом важно отметить, что все предложенные решения, связанные со снижением толщины  $p_0$  базы, эффективно работают при использовании  $p^+$  „подпирающего слоя“.

### Финансирование работы

Авторы благодарят Российский научный фонд за финансовую поддержку при проведении исследований (проект № 22-79-10159).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов

### Список литературы

- [1] A. Klehr, A. Liero, H. Christopher, H. Wenzel, A. Maaßdorf, P. Della Casa, J. Fricke, A. Ginolas, A. Knigge. *Semicond. Sci. Techn.*, **35** (6), 065016 (2020).
- [2] A. Klehr, H.J. Wünsche, A. Liero, T. Prziwarka, G. Erbert, H. Wenzel, A. Knigge. *Semicond. Sci. Techn.*, **32** (4), 045016 (2017).
- [3] 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. Padalista, A.A. Marmalyuk, V.A. Simakov. *IEEE Trans. Electron Dev.*, **68** (6), 2855 (2021).
- [4] S.O. Slipchenko, A.A. Podoskin, V.S. Golovin, M.G. Rastegayeva, N.V. Voronkova, N.A. Pikhtin, V.A. Simakov. *IEEE Phot. Techn. Lett.*, **33** (1), 11 (2020).
- [5] 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, A.A. Podoskin, N.A. Pikhtin, A.E. Kazakova, D.N. Romanovich, V.A. Kryuchkov. *Quant. Electron.*, **51** (10), 912 (2021).
- [6] A.A. Podoskin, I.V. Shushkanov, V.V. Shamakhov, A. Rizaev, M. Kondratov, A.A. Klimov, S.V. Zazoulin, S.O. Slipchenko, N.A. Pikhtin. *Quant. Electron.*, **53** (1), 1 (2023).
- [7] 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).
- [8] V.S. Yuferev, A.A. Podoskin, O.S. Soboleva, N.A. Pikhtin, I.S. Tarasov, S.O. Slipchenko. *IEEE Trans. Electron Dev.*, **62** (12), 4091 (2015).
- [9] O.S. Soboleva, V.S. Golovin, V.S. Yuferev, P.S. Gavrina, N.A. Pikhtin, S.O. Slipchenko, A.A. Podoskin. *Semiconductors*, **54**, 575 (2020).
- [10] S. Selberherr. *Analysis and Simulation of Semiconductor Devices* (Wien-N. Y., Springer).
- [11] K. Brennan, K. Hess. *Solid-State Electron.*, **27** (4), 347 (1984).
- [12] G. Wedel, T. Nardmann, M. Schröter. 2018 IEEE BiCMOS and Compound Semiconductor Integrated Circuits and Technology Symp. (BCICTS), **1** (October 15–17, 2018, San Diego, California, USA).

Редактор Г.А. Оганесян

### Switching (turn-on) dynamics of low-voltage InP homothyristors

S.O. Slipchenko, O.S. Soboleva, A.A. Podoskin, Y.K. Kirichenko, T.A. Bagaev, I.V. Yarotskaya, N.A. Pikhtin

loffe Institute,  
194021 St. Petersburg, Russia

**Abstract** A series of heterostructure designs of low-voltage InP homothyristors have been investigated using numerical simulation methods. The design with a space charge layer formed in the p-base region of the  $n-p-n$  transistor part was considered as the base one. The dynamic characteristics and processes that determine the rate of transition to the on state are investigated. It is shown that as the p-base thickness increases from 1 to 2.6  $\mu\text{m}$ , the maximum on-state currents increase from 70 to 90 A, while the minimum turn-on transition time is 11 ns at a maximum blocking voltage of 55 V. It is shown that the operation efficiency in the on state is determined by the residual voltage. Residual voltage decreases with a decrease in the thickness of the p-base.