Быстродействующие токовые ключи на основе AlGaAs/GaAs-гетероструктур тиристоров с толстой p-базой (8 мкм)

© С.О. Слипченко[1], А.А. Подоскин[1], И.В. Шушканов[1], М.И. Кондратов[1], А.Е. Гришин[1], А.Э. Ризаев[1], В.В. Шамахов[1], И.С. Шашкин[1], Д.Н. Николаев[1], Н.А. Пихтин[1], А.С. Башкатов[2], Т.А. Багаев[3], М.А. Ладугин[3], А.А. Мармалюк[3], В.А. Симаков[3]

[1] Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия
[2] Всероссийский научно-исследовательский институт радиоэлектроники,
141002 Московская область, Мытищи, Россия
[3] Научно-исследовательский институт „Полюс“ им. М.Ф. Стельмаха,
117342 Москва, Россия

E-mail: serghpl@mail.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 12 декабря 2025 г.
В окончательной редакции 22 декабря 2025 г.
Принята к публикации 26 декабря 2025 г.

Разработаны AlGaAs/GaAs-гетероструктуры тиристоров с толстой p-базой (8 мкм) и созданы токовые ключи на их основе. В статическом режиме продемонстрировано максимальное блокируемое напряжение 120 В. Минимальные задержки включения достигали 7 нс при токе управления 220 мА. Продемонстрирована возможность генерации последовательности импульсов с частотой 20 кГц при рабочем напряжении 110 В и частотой 120 кГц при рабочем напряжении 30 В. Оценка динамических характеристик показывает возможность генерации импульсов тока с амплитудой 68 А и длительностью 2.9 нс.

Ключевые слова: гетероструктура, тиристор, быстродействующий токовый ключ, полупроводниковый лазер, короткий импульс.

DOI: 10.61011/FTP.2025.10.62344.8880

1. Введение

В последние годы наблюдается повышенный интерес к быстродействующим твердотельным ключам, которые характеризуются наносекундными временами переходных процессов. Это связано с возможностью использования таких ключей в схемах импульсного питания полупроводниковых лазерных диодов. Поиск оптимальной компонентной базы таких схем связан с необходимостью разработки решений, которые бы обеспечивали увеличение амплитуды и частоты повторения при сохранении минимальной длительности импульсов тока, что обусловлено требованием повышения пиковой мощности и средней энергии лазерных импульсов. Традиционные решения основаны на использовании кремниевых транзисторов, например, IAUZ40N08S5N100, выпускаемых Infineon Technologies [1]. Однако данные транзисторы имеют достаточно большой форм-фактор и, как следствие, высокое значение подзатворной емкости и индуктивности. Использование GaN-полевых транзисторов позволяет заметно снизить форм-фактор за счет высокой температурной стабильности. В результате современные образцы демонстрируют возможность генерации импульсов тока длительностью в единицы нс и амплитудой в десятки Ампер, как, например, модель EPC2252 компании Efficient Power Conversion Corporation [2]. Несмотря на имеющиеся решения, использующие полевые транзисторы, разрабатываются также и другие подходы. В частности, на основе лавинных S-диодов [3], лавинных биполярных транзисторов [4]. Отдельно можно выделить токовые ключи на основе тиристорных гетероструктур. За последнее время был опубликован ряд исследований, демонстрирующих возможности использования таких приборов в схемах накачки полупроводниковых лазеров [5–7]. Исследования [8] показали возможность генерации лазерных импульсов длительностью 2.25 нс и пиковой мощностью 45 Вт, что позволяет говорить о возможности генерации такими приборами импульсов тока длительностью ~ 3 нс и амплитудой, близкой к 50 А при рабочем напряжении 50 В. Преимуществом тиристорных токовых ключей является возможность вертикальной интеграции с кристаллами полупроводниковых лазеров. Это позволяет снизить длину контура тока, что важно для уменьшения индуктивности. Кроме этого, тиристорные ключи обладают низким требованием к импульсам тока управления в отличие от полевых транзисторов, для которых скорость импульса управления определяет скорость перехода в открытое состояние. Результаты исследований, продемонстрированные в последних работах, показали, что одним из ограничений для дальнейшего увеличения амплитуды тока тиристорных ключей при сохранении длительности импульсов в наносекундном диапазоне является паразитная индуктивность контура. Для решения данной проблемы в рамках данной ра-

боты были разработаны тиристорные гетероструктуры, в которых реализовано увеличение более чем в 2 раза рабочего напряжения по сравнению с известными аналогами, а также проведены исследования их основных динамических характеристик.

2. Изготовление экспериментальных образцов

Общая конструкция гетероструктуры тиристорного ключа может быть описана с помощью двух транзисторов $n-p-n$ и $p-n-p$, включенных параллельно. В большинстве работ, посвященных исследованиям низковольтных ключей на основе тиристорных гетероструктур, максимальное напряжение блокировки составляло от 40 до 60 В и обеспечивалось слабо легированной p-базой, толщина которой составляла 2–4 мкм [9,10]. Дальнейшее повышение блокируемого напряжения возможно за счет расширения слабо легированной области коллекторного p-n-перехода $n-p-n$-транзисторной части. Проведенное моделирование показало, что для эффективного повышения блокируемого напряжения важную роль играет составная конструкция p-базы $n-p-n$-транзистора на основе тонкого сильно легированного и толстого слабо легированного слоев. В этом случае эффект смыкания $p-n$-переходом может быть подавлен и повышение блокируемого напряжения может быть реализовано в структурах меньшей толщины, что важно с технологической точки зрения, так как требует меньших затрат при изготовлении гетероструктуры. Слабо легированная область коллекторного $p-n$-перехода $n-p-n$-транзисторной части, обеспечивающая увеличение блокируемого напряжения, может быть реализована как за счет расширения только слабо легированной части p-базы, так и за счет добавки слабо легированного слоя n-коллектора. Моделирование показало, что при сохранении общей суммарной толщины слабо легированных слоев динамические характеристики структур отличаются несущественно. Однако с технологической точки зрения более простое решение основано на использовании слабо легированного слоя только одного типа проводимости. Другим важным параметром конструкции гетеротиристорной структуры является толщина n-коллектора $n-p-n$-транзисторной части. Значение данного параметра оказывает влияние на задержку включения, что связано с рекомбинационными потерями дырок при инжекции в $p-n-p$-транзисторную часть. Снижение толщины данного слоя приводит к снижению данной компоненты рекомбинационных потерь и, как следствие, уменьшению токов управления. Однако разработанная конструкция тиристорного ключа подразумевает использование электрода управления, который формируется именно к n-коллектору $n-p-n$-транзисторной части за счет травления мезаканав, открывающих доступ к данному слою. По этой причине выбор толщины данного слоя также должен учитывать технологичность изготовления. В результате для реализации была предложена конструкция гетеротиристорной структуры, включающая следующие основные слои: n-$Al_{0.1}Ga_{0.9}As$ ($n = 10^{18}$ см$^{-3}$), толщиной 0.1 мкм; p-GaAs ($p = 10^{18}$ см$^{-3}$), толщиной 0.1 мкм; p^0-GaAs ($p = 10^{15}$ см$^{-3}$), толщиной 8 мкм; n-GaAs ($n = 10^{18}$ см$^{-3}$), толщиной 1 мкм; p-GaAs ($p = 10^{18}$ см$^{-3}$), толщиной 1 мкм. Толщина μ коллектора $n-p-n$-транзисторной части была выбрана исходя из технологических требований удобства формирования управляющего электрода. Разработанная гетероструктура выращивалась методом МОС-гидридной эпитаксии на подложке n-GaAs. Далее со стороны эпитаксиальных слоев формировались анодный контакт круглой формы, диаметром 200 мкм и электрод управления. Со стороны подложки формировался сплошной катодный контакт. Для экспериментальных исследований изготавливались отдельные кристаллы тиристорных ключей, которые напаивались на медные основания подложкой вниз. Схематическое изображение исследуемых кристаллов тиристорных ключей показано на рис. 1, *a*.

3. Методика эксперимента

Для исследований динамических характеристик были собраны: контур, включающий накопительный конденсатор емкостью 1 нФ, внешний источник питания, обеспечивающий зарядку конденсатора, генератор импульсов управления. Исследования динамики включения проводились с использование высокочастотного щупа и осциллографа с полосой частот 6 ГГц. Собранный контур позволяет как обеспечить управляемое включение тиристорного ключа, так и исследовать его динамические характеристики. Управляемое включение обеспечивается за счет использования генератора импульсов управления, параметры которых, как будет показано далее, существенным образом влияют на задержку включения. Важная особенность собранного контура — возможность работы тиристорного ключа в режиме генерации управляемой последовательности импульсов. В этом случае режим работы будет включать следующие этапы. Тиристор находится в закрытом состоянии до включения управляющего сигнала, при этом накопленная емкостью энергия определяется ее номиналом и рабочим напряжением. Импульс управления переводит тиристор в открытое состояние с низким сопротивлением, что позволяет накопленной емкостью энергии разрядиться, в результате чего формируется импульс тока в цепи тиристорный ключ-емкостной накопитель. Как только емкость разрядится и не позволит поддерживать ток в цепи тиристора больше чем ток удержания, тиристор произвольно перейдет в закрытое состояние с высоким сопротивлением. Высокое сопротивление тиристора позволяет емкости заряжаться от внешнего источника питания. Из этого видно, что номинал накопительной емкости будет определять длительность и амплитуду генерируемых импульсов тока. В данной работе выбор

номинала емкости накопительного конденсатора был основан на серии предыдущих исследований низковольтных тиристорных ключей, обеспечивающих длительности импульсов ~ 2 нс [10].

4. Результаты и анализ экспериментальных исследований

Первая часть экспериментальных исследований включала измерения вольт-амперных характеристик в квазистатическом режиме, для чего использовался характериограф ТЕКО-Л2-100. Типичная форма ВАХ показана на рис. 1, *b*. Важно отметить, что при измерении ВАХ не использовались импульсы управления, т.е. включение тиристорного ключа происходило произвольно и, по нашему мнению, связано с увеличением интенсивности тока ударной ионизации, генерируемого в области смещенного в обратном направлении коллекторного $p-n$-перехода. Видно, что максимальное блокируемое напряжение достигает 120 В. Важно отметить, что остаточное напряжение во включенном состоянии составляет ~ 1.5 В, что свидетельствует о высокой эффективности разработанной конструкции, обеспечивающей работу во включенном состоянии без широких доменов электрического поля и дополнительных потенциальных барьеров.

Вторая часть работы была направлена на исследования динамических характеристик тиристорного ключа. На рис. 2, *a* показаны зависимости напряжения на накопительном конденсаторе от времени, характеризующие скорость его разряда. Видно, что гетеротиристор включается при низких рабочих напряжениях, что подтверждает высокую эффективность обратной связи разработанной структуры.

Однако скорости включения в диапазоне напряжений 10–40 В достаточно низкие, что вызвано низкой скоростью накопления избыточных зарядов в p-базе. С увеличением напряжения на процесс включения начинает влиять ударная ионизация в коллекторном $p-n$-переходе, что существенно повышает скорость накопления избыточных носителей заряда в p-базе и, как следствие, повышает скорость переходного процесса. Для оценки формы импульса тока, генерируемого в цепи тиристорный ключ–накопительный конденсатор, был проведен расчет на основе полученных экспериментальных данных динамики разряда накопительного конденсатора с использованием следующего соотношения:

$$I(t) = C \cdot dU(t)/dt, \qquad (1)$$

где C — емкость накопительного конденсатора, $U(t)$ — зависимость от времени напряжения на накопительном конденсаторе, t — время. Для демонстрации возможности разработанного ключа рассчитывалась амплитуда и форма импульса при максимальном рабочем напряжении 120 В (экспериментальная зависимость напряжения на накопительном конденсаторе от времени представлена на рис. 2, *a*). Сделанные оценки показывают, что для

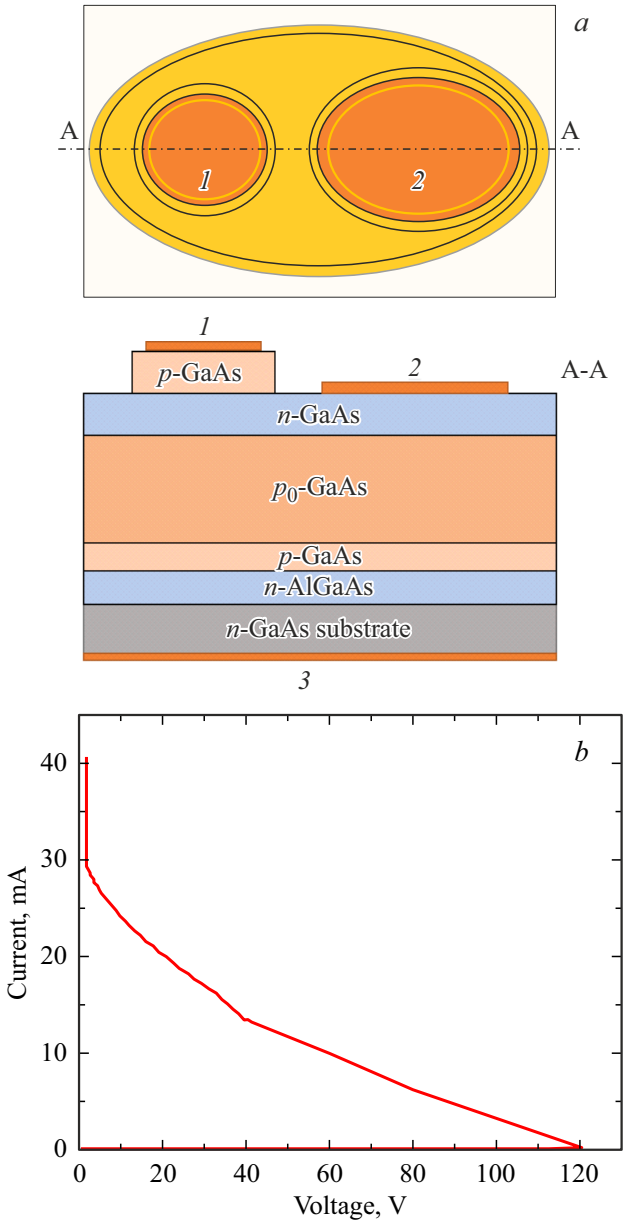

Рис. 1. *a* — схематическое изображение тиристорного ключа (А-А сечение структуры со слоями, *1* — анод, *2* — электрод управления, *3* — катод). *b* — вольт-амперная характеристика тиристорного ключа в квазистатическом режиме.

рабочего напряжения 120 В максимальная амплитуда импульса тока в контуре тиристорный ключ–накопительный конденсатор может достигать 68 А, длительность 2.9 нс на полувысоте (см. вставку на рис. 2, *a*), что можно считать существенным прогрессом в разрабатываемых быстродействующих сильноточных тиристорных ключах по сравнению с известными результатами [8].

Важной частью динамических характеристик является задержка включения тиристорного ключа, которая характеризуется разницей между началом импульса управления и началом перехода во включенное состояние. На

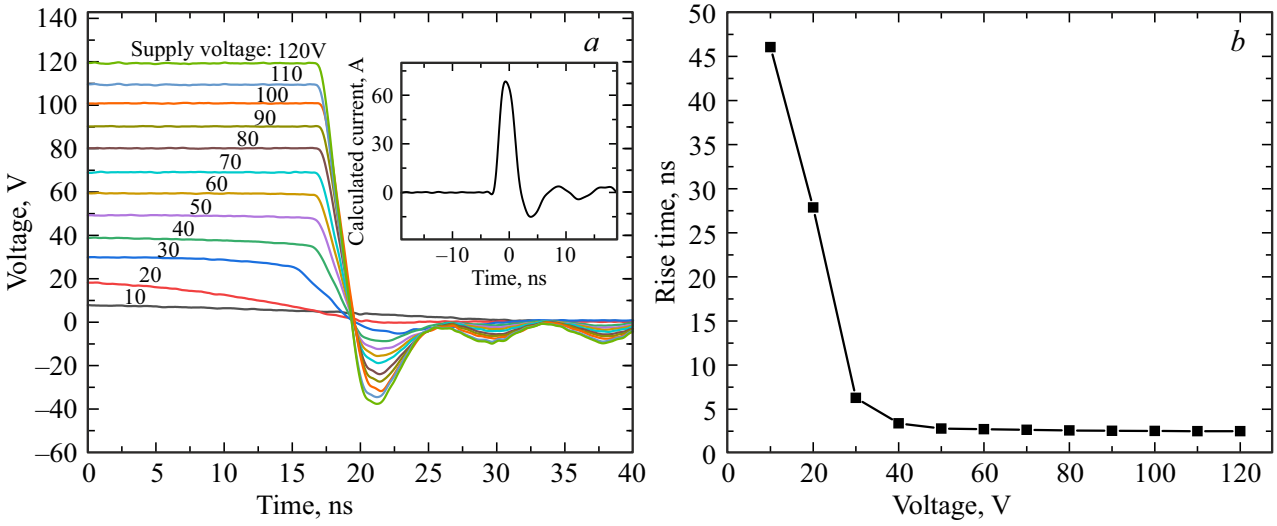

Рис. 2. *a* — экспериментальные треки напряжения, характеризующие разрядку накопительного конденсатора, полученные для рабочих напряжений от 10 до 120 В. На вставке представлен расчетный импульс тока в контуре тиристорный ключ–конденсатор при рабочем напряжении 120 В, *b* — зависимость времени снижения напряжения на накопительном конденсаторе по уровню 10–90 от напряжения питания. Емкость накопительного конденсатора — 1 нФ, амплитуда импульса тока управления — 100 мА.

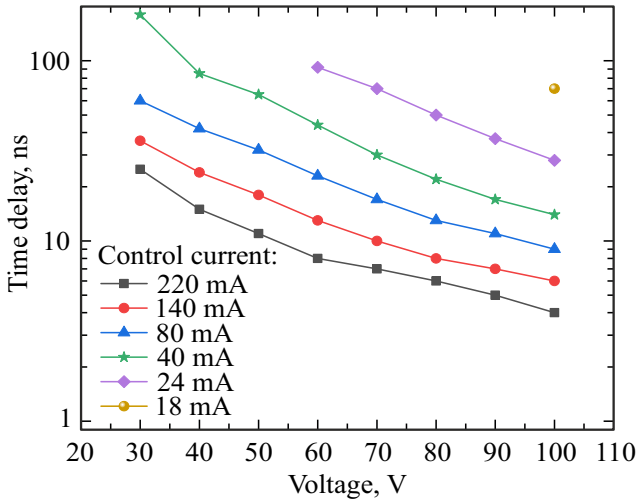

Рис. 3. Зависимость времени задержки включения тиристорного ключа от амплитуды тока, управления и рабочего напряжения. Емкость накопительного конденсатора — 1 нФ.

рис. 3 показаны зависимости времени задержки включения от амплитуды тока управления и блокируемого напряжения.

Видно, что задержка включения снижается при увеличении амплитуды импульса тока управления и блокируемого напряжения, а минимальное значение в 7 нс достигается для тока 220 мА и напряжения 100 В. При этом существуют такие минимальные амплитуды тока управления и блокируемых напряжений, ниже которых включения гетеротиристора не происходит. Например, для тока управления 24 мА и блокируемого напряжения < 60 В включение тиристора не наблюдается. Это связано с тем, что рекомбинационные потери не могут быть скомпенсированы используемым током управления, т. е. эффективности обратной связи недостаточно для перевода тиристора во включенное состояние. Несмотря на существенное увеличение толщины *p*-базы разработанных тиристорных ключей, достигаемые времена задержки включения сравнимы с временами, которые были продемонстрированы ранее в структурах более тонкой базой [9].

На рис. 4 показана зависимость максимальной частоты повторения импульсов от блокируемого напряжения.

Видно, что увеличение блокируемого напряжения приводит к снижению максимальной частоты. В результате максимальные частоты для блокируемых напряжений 30 и 110 В составляют 120 и 20 кГц соответственно. Наблюдаемая зависимость может быть обусловлена двумя механизмами: эффект dU/dt, который генерирует ток барьерной емкости, а также ток заряда накопительного конденсатора, который может быть сопоставим с током удержания, что не позволит ключу перейти в закрытое состояние. Для оценки второго фактора были проведены измерения токов зарядки конденсатора. Измерения показали, что токи зарядки находятся в диапазоне от 3 до 13 мА, и также снижаются с ростом блокируемого напряжения, что позволяет утверждать о минимальном вкладе данного фактора. Оценка эффекта dU/dt при барьерной емкости 200 пФ дает эквивалентный ток 2 мА. Несмотря на то что полученное значение заметно меньше требуемых токов управления, его может быть достаточно для запуска процесса включения тиристорного ключа. Это связано с тем, что ток зарядки барьерной емкости обеспечивает накопление дырок непосредственно в *p*-базе, тогда как поток дырок из анодного кон-

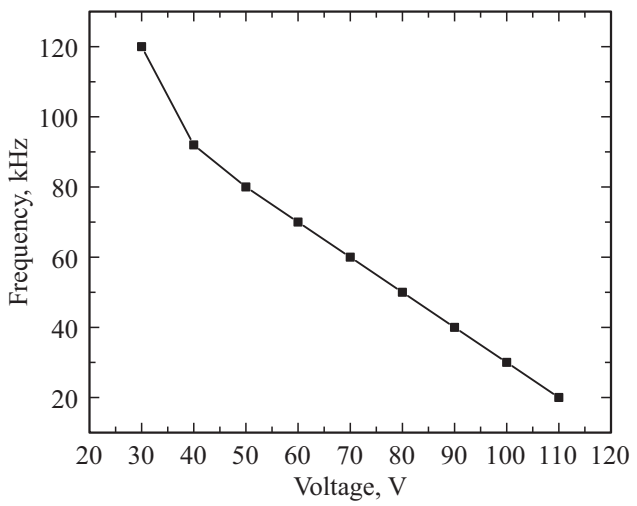

Рис. 4. Зависимость максимальной частоты повторения импульсов тока в цепи тиристорный ключ-накопительный конденсатор от рабочего напряжения. Емкость накопительного конденсатора — 1 нФ, амплитуда импульса тока управления — 100 мА.

такта в сторону *p*-базы, запускаемый током управления, испытывает потери за счет процессов рекомбинации в легированном слое *n*-коллектора.

5. Заключение

В заключение проведенных исследований можно сказать, что разработанная конструкция гетероструктуры тиристорного ключа позволяет решать задачи генерации импульсов тока заметно более высокой амплитуды при сохранении требуемых длительностей импульса в наносекундном диапазоне. Оценка динамических характеристик импульса тока показывает возможность достижения амплитуды 68 А при длительности 2.9 нс. Достижение указанных характеристик стало возможно за счет увеличения максимального блокируемого напряжения до 120 В в статическом режиме в конструкции с увеличенной толщиной *p*-базы. Продемонстрированные динамические характеристики показывают, что, несмотря на увеличенную толщину *p*-базы, характеристики задержки включения и параметры импульсов тока управления сравнимы с тиристорными ключами, имеющими более тонкие базовые области. В результате были продемонстрированы минимальные задержки включения 7 нс при токе управления 220 мА. Для динамического режима работы была продемонстрирована возможность генерации последовательности импульсов с частотой 20 кГц при рабочем напряжении 110 В и частотой 120 кГц при рабочем напряжении 30 В.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] https://www.infineon.com/part/IAUZ40N08S5N100#documents
[2] https://epc-co.com/epc/products/gan-fets-and-ics/epc2252
[3] И.А. Прудаев, В.В. Копьев, В.Л. Олейник, М.С. Скакунов, А.С. Сотникова, С.М. Гущин, В.Е. Земляков. Письма ЖТФ, **51** (4), 23 (2025). DOI: https://doi.org/10.21883/0000000000
[4] S. Vainshtein, G. Duan, T. Rahkonen, Z. Taylor, V. Zemlyakov, V. Egorkin, O. Smolyanskaya, T. Skotnicki, W. Knap. Results Phys., **19**, 103509 (2020). DOI: 10.1016/j.rinp.2020.103509
[5] К.С. Жидяев, А.Б. Чигинева, Н.В. Байдусь, И.В. Самарцев, А.В. Кудрин. ФТП, **59** (1), 48 (2025). DOI: 10.61011/FTP.2025.01.60500.7741
[6] S.O. Slipchenko, A.A. Podoskin, I.V. Shushkanov, M.G. Rastegaeva, A.E. Rizaev, M.I. Kondratov, A.E. Grishin, N.A. Pikhtin, T.A. Bagaev, M.A. Ladugin, A.A. Marmalyuk, V.A. Simakov. Chinese Optics Lett., **22** (7), 072501 (2024). DOI: 10.3788/COL202422.072501
[7] S. Slipchenko, A. Podoskin, I. Shushkanov, A. Rizaev, M. Kondratov, V. Shamakhov, V. Kapitonov, K. Bakhvalov, A. Grishin, T. Bagaev, M. Ladugin, A. Marmalyuk V. Simakov, N. Pikhtin. Photonics, **12** (2), 130 (2025). DOI.ORG/10.3390/PHOTONICS12020130
[8] 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. Мармалюк, В.А. Симаков, Н.А. Пихтин. Письма ЖТФ, **51** (11), 7 (2025). DOI: 10.61011/PJTF.2025.11.60479.20235
[9] 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. Мармалюк, В.А. Симаков. Письма ЖТФ, **50** (4), 43 (2024). DOI: 10.61011/PJTF.2024.04.57101.19771
[10] S.O. Slipchenko, A.A. Podoskin, I.V. Shushkanov, M.G. Rastegaeva, A.E. Rizaev, M.I. Kondratov, A.E. Grishin, N.A. Pikhtin, T.A. Bagaev, M.A. Ladugin, A.A. Marmalyuk, V.A. Simakov. Chinese Optics Lett., **22** (7), 072501 (2024).

Редактор Г.А.Оганесян

High-speed current switches based on AlGaAs/GaAs heterostructure thyristors with a thick p-base (8 μm)

S.O. Slipchenko[1], *A.A. Podoskin*[1], *I.V. Shushkanov*[1], *M.I. Kondratov*[1], *A.E. Grishin*[1], *A.E. Rizaev*[1], *V.V. Shamakhov*[1], *I.S. Shashkin*[1], *D.N. Nikolaev*[1], *N.A. Pikhtin*[1], *A.S. Bashkatov*[2], *T.A. Bagaev*[3], *M.A. Ladugin*[3], *A.A. Marmalyuk*[3], *V.A. Simakov*[3]

[1] Ioffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia
[2] FSBI „VNIIR“,
141002 Moscow Region, Mytishchi, Russia
[3] Scientific Research Institute „Polyus“
named after M.F. Stelmakh,
117342 Moscow, Russia

Abstract AlGaAs/GaAs heterostructures with thick p-base (8 μm) have been developed for thyristors, and current switches based on these structures have been created. In static mode, a maximum blocked voltage of 120 V has been demonstrated. Minimum turn-on delays reached 7 ns under control current of 220 mA. It was shown that generation of pulse sequences with frequency up to 20 kHz at operating voltage of 110 V and up to 120 kHz at operating voltage of 30 V is possible. Evaluation of dynamic characteristics indicates the capability of generating current pulses with amplitude of 68 A and duration of 2.9 ns.