

Сильноточные низковольтные ключи для импульсов нс-длительности на основе тиристорных гомо- и гетероструктур (Al)GaAs/GaAs

© С.О. Слипченко¹, А.А. Подоскин¹, И.В. Шушканов¹, В.А. Крючков¹, А.Э. Ризаев¹,
М.И. Кондратов¹, А.Е. Гришин¹, Н.А. Пихтин¹, Т.А. Багаев^{1,2}, В.Н. Светогоров²,
М.А. Ладугин², А.А. Мармалюк², В.А. Симаков²

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

² Акционерное общество «Научно-исследовательский институт „Полус“ им. М.Ф. Стельмаха»,
117342 Москва, Россия

E-mail: SergHPL@mail.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 17 октября 2023 г.

В окончательной редакции 3 ноября 2023 г.

Принята к публикации 3 ноября 2023 г.

Разработан ряд низковольтных тиристорных токовых ключей на основе гомо- и гетероструктур (Al)GaAs/GaAs с областью объемного заряда, сформированной в слабо легированном слое базы *p*-GaAs. Исследованы особенности переходных процессов в режиме генерации импульсов наносекундной длительности. Показано, что использование широкозонного барьера на основе AlGaAs на границе *n*-эмиттер/*p*-база позволяет снизить минимальную амплитуду тока управления с 30 до 3 мА, а время задержки включения может быть сокращено до 6 нс. Для разработанных тиристорных ключей было продемонстрировано минимальное время переходного процесса 3.7–3.9 нс при работе в контуре с конденсатором емкостью 1 нФ. В цепи с резистивной нагрузкой номиналом 10 м тиристорные ключи обеспечивали пиковый ток 17.5 А при длительности импульса 3.7 нс.

Ключевые слова: гомотиристор, гетеротиристор, токовый ключ, импульс тока, гетероструктура AlGaAs/GaAs, полупроводниковая гомоструктура.

DOI: 10.61011/FTP.2023.08.56967.5670

1. Введение

В настоящее время для создания дальномеров и 3D лидаров, основанных на времяпролетном принципе, актуальной задачей является генерация мощных лазерных импульсов наносекундной длительности. В общем случае задача накачки импульсами тока наносекундной длительности полупроводниковых лазеров решается в рамках базового подхода, который основан на использовании емкостных накопителей электрической энергии и токовых ключей, которые формируют замкнутый контур с полупроводниковым лазером. В случае, когда емкость можно рассматривать как идеальный источник тока, его характеристики определяются именно токовым ключом. В настоящее время разрабатывается несколько типов токовых ключей. В работах [1,2] были продемонстрированы линейки лазерных диодов и источники импульсного тока на основе GaN-транзисторов. Авторам удалось сформировать импульсы тока длительностью 3–10 нс с амплитудой ~ 1 кА, что обеспечило генерацию лазерных импульсов с пиковой мощностью от 0.6 кВт для одиночных до 2.2 кВт для туннельно-связанных лазерных структур. Другим вариантом быстродействующих сильноточных ключей являются лавинные транзисторы. В работах [3–5] были продемонстрированы импульсные лазеры с пиковой мощностью до 120 В и длительностью импульсов 1–1.5 нс. В качестве токовых ключей были использованы GaAs *S*-диоды и биполярные лавинные

кремниевые транзисторы. Оценка тока позволяет говорить о максимальной амплитуде импульса до 45 А, при этом рабочие напряжения достигали 200 В для *S*-диодов и 100 В для биполярных лавинных кремниевых транзисторов. В работах [6–8] была продемонстрирована возможность создания источников лазерных импульсов на основе многопереходных гетероструктур, которые включали лазерную часть и обеспечивали электрическую бистабильность тиристорного типа. Подобные гетероструктуры при рабочих напряжениях до 25 В позволили продемонстрировать импульсы длительностью от 10 до 100 нс, однако максимальная мощность 47 Вт была получена только для длинных импульсов, а сокращение длительности сопровождалось пропорциональным уменьшением пиковой мощности и снижением излучательной эффективности. Как показали последующие исследования, падение излучательной эффективности было связано с пространственной локализацией тока и неоднородностью токовой накачки области усиления, влияние которой усиливается при сокращении длительности импульса [6,9]. Исследования показали, что тиристорные ключи на основе AlGaAs/GaAs гетероструктур обладают рядом преимуществ, таких как: 1) возможность вертикальной интеграции и создания сборок с лазерными диодами и линейками на их основе, что снижает возможные электрические потери в контуре тока; 2) высокая энергетическая эффективность за счет низких остаточных напряжений; 3) простота управле-

Описание экспериментальных структур тиристоров

№ слоя	Тип слоя	Легирование, см ⁻³	Тип структуры					
			1		2		3	
			Состав	Толщина, мкм	Состав	Толщина, мкм	Состав	Толщина, мкм
1	<i>n</i> -эмиттер <i>n-p-n</i> -транзистора	10 ¹⁸	<i>n</i> -GaAs	1	<i>n</i> -GaAs/ <i>n</i> -Al _{0.1} Ga _{0.9} As	1/0.1	<i>n</i> -GaAs/ <i>n</i> -Al _{0.1} Ga _{0.9} As	1/0.1
2	<i>p</i> -база <i>n-p-n</i> -транзистора	10 ¹⁸ /10 ¹⁵	<i>p</i> ⁺ -GaAs/ <i>p</i> ₀ -GaAs	0.1/4	<i>p</i> ⁺ -GaAs/ <i>p</i> ₀ -GaAs	0.1/4	<i>p</i> ⁺ -GaAs/ <i>p</i> ₀ -GaAs	0.1/4
3	<i>n</i> -коллектор <i>n-p-n</i> -транзистора	10 ¹⁸	<i>n</i> -GaAs	1	<i>n</i> -GaAs	0.5	<i>n</i> -GaAs	1
4	<i>p</i> -эмиттер <i>p-n-p</i> -транзистора	10 ¹⁸	<i>p</i> -GaAs	0.5	<i>p</i> -GaAs	0.5	<i>p</i> -GaAs	0.5

ния, которая не требует создания отдельных коротко импульсных схем управления, как в полевых транзисторах. Возможность решения проблемы пространственной локализации тока в тиристорах и использование их как токовых ключей была исследована в работах [10,11], где в качестве базовых рассматривались конструкции гетероструктур с оптической обратной связью. В результате были продемонстрированы возможности генерации лазерных импульсов длительностью 6.5–80 нс с пиковой мощностью 20–80 Вт при рабочих напряжениях до 30 В. Полученные результаты показали высокие возможности низковольтных тиристоров. В рамках данной работы продолжены исследования, направленные на оптимизацию конструкции тиристорных структур с целью улучшения их рабочих характеристик как низковольтных сильноточных ключей наносекундной длительности.

2. Экспериментальные образцы

Были разработаны и исследованы три типа структур (см. таблицу). Выбранные типы структур являются компромиссом между технологичностью их изготовления и желанием реализовать высокую скорость переходных процессов и высокую энергоэффективность при генерации коротких импульсов. Все разработанные структуры имели ряд общих параметров конструкции. Область объемного заряда формировалась в слаболегированном *p*₀ слое базы. Толщина слоя *p*₀ базы была выбрана 4 мкм, которая являлась оптимальной при ранее проведенных исследованиях лазер-тиристоров [12].

Для предотвращения эффекта смыкания *p-n*-переходов в состоянии блокировки область *p*₀ базы была ограничена тонким *p*⁺-слоем, сформированным со стороны *n*-эмиттера *n-p-n*-транзисторной части. Первый тип структуры включал только базовые элементы конструкции в следующей последовательности: *n*-GaAs-эмиттер толщиной 1 мкм; *p*-GaAs-база, которая включала слои с различным легированием, как было описано вы-

ше; *n*-GaAs-коллектор толщиной 1 мкм, формирующий *n-p-n*-транзисторную часть; далее выращивался слой *p*-GaAs-эмиттера *p-n-p*-транзисторной части толщиной 0.5 мкм. Конструкция второго типа структуры отличалась от базовой добавленным в состав *n*-эмиттера *n-p-n*-транзистора слоя широкозонного *n*-Al_{0.1}Ga_{0.9}As толщиной 0.1 мкм, а также уменьшенной толщиной слоя *n*-GaAs-коллектора до 0.5 мкм. Конструкция третьего типа структуры отличалась от базовой только добавленным в состав эмиттера *n-p-n*-транзистора слоя широкозонного *n*-Al_{0.1}Ga_{0.9}As толщиной 0.1 мкм, при этом толщина слоя *n*-GaAs-коллектора не менялась. Включение широкозонного слоя *n*-Al_{0.1}Ga_{0.9}As было сделано для оценки влияния утечки дырок из *p*-базы, обеспечивающей эффективность *n-p-n*-транзисторной части. Уменьшение толщины слоя коллектора *n-p-n*-транзистора было сделано для оценки влияния рекомбинационной составляющей для дырок, инжектированных из анодного контакта (*p*-GaAs-эмиттера).

Экспериментальные гетероструктуры выращивались на подложке *n*-GaAs методом МОС-гидридной эпитаксии. Далее были сформированы конструкции токовых тиристорных ключей, для которых анодный контакт на основе Ti/Pt имел диаметр 150 мкм. Катодный контакт имел сплошную конструкцию, был выполнен на основе AuGe и наносился на подложку *n*-GaAs. Контакт электрода управления был сформирован в слое *n*-GaAs-коллектора *n-p-n*-транзисторной части.

Для экспериментальных исследований динамических характеристик чипы тиристоров монтировались параллельно с конденсатором номиналом 1 нФ. При этом в зависимости от проводимых экспериментов последовательно с конденсатором также могла включаться дополнительная резистивная нагрузка. Питание конденсатора осуществлялось от внешнего источника напряжения. Динамические характеристики исследовались с помощью пассивного щупа и осциллографа с полосой частот 300 МГц и 2 ГГц соответственно.

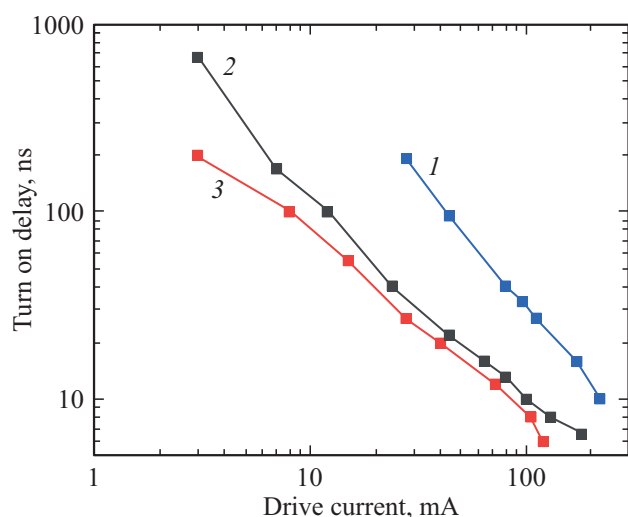


Рис. 1. Зависимость задержки включения от амплитуды импульса тока управления для блокируемого напряжения 50 В для тиристоров на основе структур: 1 — тип 1, 2 — тип 2, 3 — тип 3.

3. Результаты и анализ экспериментальных исследований

В первой части работы были проведены экспериментальные исследования времени задержки включения. На рис. 1 показаны зависимости для трех типов исследованных структур, полученные для блокируемого напряжения 50 В. Наибольшим временем задержки включения характеризуется базовая структура 1 типа, что связано с отсутствием ограничивающего барьерного слоя. В результате для структуры 1 типа рабочий диапазон амплитуд импульса тока управления составил от 30 до 220 мА, что соответствовало управляемому изменению времени задержки включения от 184 до 10 нс.

Использование широкозонного барьера на границе эмиттер-база для $n-p-n$ -транзисторной части позволяет эффективно ограничивать утечку избыточных дырок из слоя p -базы, что заметно повышает эффективность данного транзистора и, как следствие, позволяет повысить эффективность управления тиристорной структу-

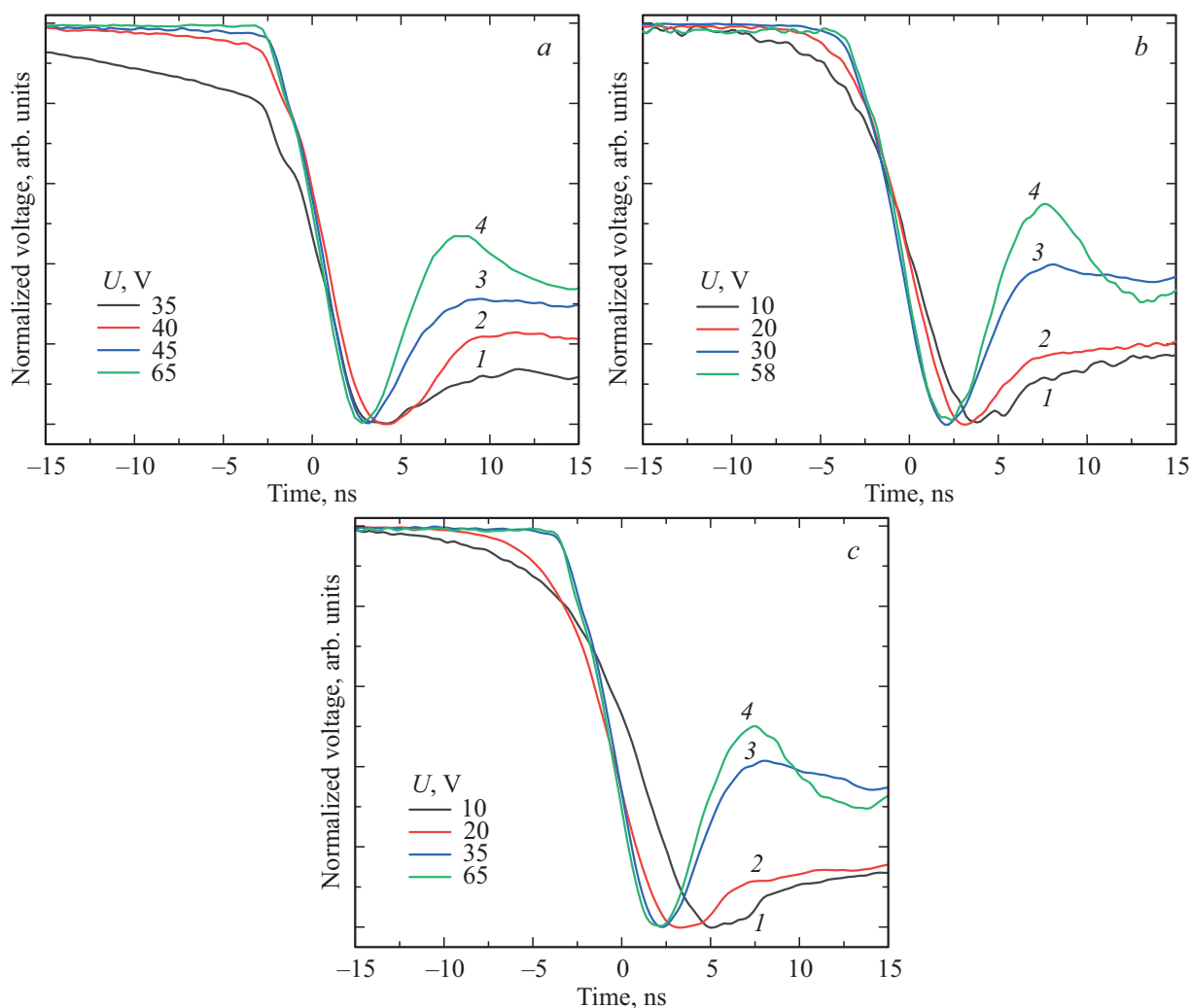


Рис. 2. Зависимости величины нормированного напряжения на разрядном конденсаторе от времени при переходе в включенное состояние для схемы тиристор-конденсатор и структур типа 1 (a), 2 (b) и 3 (c), полученные для различных блокируемых напряжений. (Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи).

рой. В результате для такого же значения блокируемого напряжения минимальные амплитуды импульса тока управления, при которых наблюдалось эффективное включение, составили 3 мА для гетероструктур 2 и 3 типа. Включение барьера также позволяет уменьшить значение минимальной задержки включения, которое достигало 6 нс для обеих структур с барьерными слоями.

Из рис. 1 видно, что снижение толщины *n*-GaAs-коллектора с 1 мкм в структуре 3 типа до 0.5 мкм в структуре 2 типа также привело к повышению эффективности управления тиристорным ключом. Данный эффект наиболее выражен в области малых амплитуд токов управления. Так, при токе управления 3 мА указанное уменьшение толщины *n*-GaAs-коллектора привело к снижению задержки включения с 674 до 195 нс.

Вторая часть работы была связана с экспериментальными исследованиями динамики включения. На первом этапе исследовалась динамика разряда емкости в контуре без нагрузочных сопротивлений, т. е. конденсатор был включен параллельно тиристорному. Типичные зависимости динамики напряжения при разрядке конденсатора емкостью 1 нФ показаны на рис. 2.

Для удобства анализа приведены нормированные зависимости, которые позволяют наглядно сравнить изменение скорости переходного процесса для различных значений блокируемых напряжений. Видно, что эффективное включение структуры 1 типа наблюдается для минимальных блокируемых напряжений 30–35 В, при этом на динамике напряжения можно выделить два участка. Начальный участок характеризуется низкой скоростью включения, а его длительность может достигать 30 нс для низких блокируемых напряжений. Однако вклад данного участка в общую динамику практически отсутствует для напряжений блокировки, близких к максимальным (в нашем случае > 45 В). Для второго участка скорость переходного процесса максимальна независимо от блокируемого напряжения, при этом переход от первого участка ко второму на динамике разряда емкости достаточно резок. Это может свидетельствовать о различных механизмах включения, работающих на данных участках. Для первого участка избыточные носители могут поставляться в базовые области в основном за счет процессов дрейф-диффузионного транспорта, тогда как для второго участка генерация избыточных носителей может быть связана с процессами ударной ионизации. Достигаемое минимальное время переходного процесса по уровню 10–90% для гетероструктуры 1 типа составляет 3.8 нс. Для структур 2 и 3 типа характер динамики напряжения и включения тиристорного ключа заметно отличаются. В первую очередь на динамике отсутствует явно участок медленного включения. При этом достигается заметно меньшее значение минимального блокируемого напряжения 10 В, при котором наблюдается эффективное включение. Время переходного процесса для минимального блокируемого напряжения 10 В по уровню 10–90% составляет 7.3 и 9.2 нс для гетероструктур 2 и 3 типа соответственно (рис. 2). Увеличение бло-

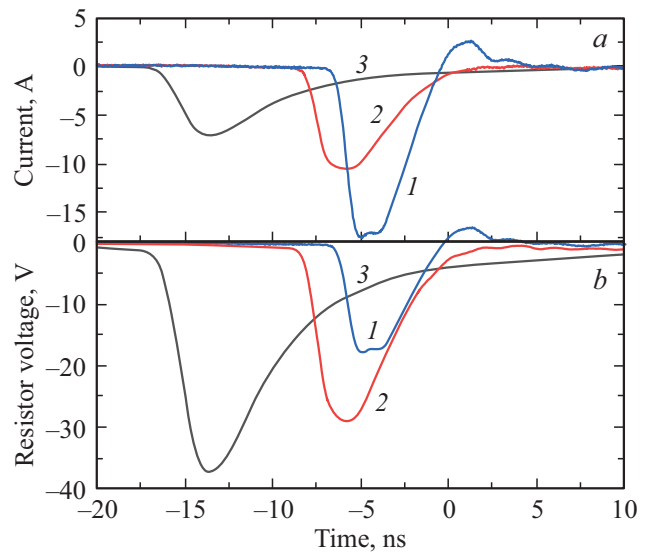


Рис. 3. Зависимости тока в контуре (а) и напряжения на нагрузочном резисторе (б) от времени для тиристорного ключа на основе структуры типа 2, работающего в контуре с резистивной нагрузкой номиналом, Ом: 1 — 1, 2 — 2.7, 3 — 5.1. Емкость конденсатора 1 нФ.

кируемого напряжения ведет к ускорению переходного процесса. В результате для блокируемого напряжения 30 В время переходного процесса по уровню 10–90% составляет 3.9 и 3.8 нс для гетероструктур 2 и 3 типа соответственно и с дальнейшим увеличением блокируемого напряжения не меняется (рис. 2). Полученные результаты демонстрируют, что для начальных значений блокируемого напряжения эффективность накопления избыточных носителей в *p*-базе вносит существенный вклад. Это связано с тем, что поставка избыточных дырок в *p*-базу осуществляется дрейф-диффузионным транспортом из области анодного контакта. В результате рекомбинационные потери в *n*-GaAs-коллекторе оказывают заметное влияние, что подтверждают результаты экспериментов: максимальное время переходного процесса для блокируемого напряжения 10 В наблюдается для гетероструктуры 3 типа с толщиной *n*-GaAs коллектора 1 мкм. Для блокируемых напряжений > 30 В время переходного процесса постоянно и имеет одинаковое значение для структур 2 и 3. Данный факт может свидетельствовать об определяющем вкладе ударной ионизации в области коллекторного *p-n*-перехода *n-p-n*-транзисторной части. В данном случае именно ударная ионизация является основным источником избыточных дырок для *p*-базы, т. е. процесс поставки дырок за счет дрейф-диффузионного транспорта из анодного контакта через *n*-GaAs-коллектор уже не является определяющим при блокируемых напряжениях > 30 В.

В заключительной части исследовалась динамика переходных процессов в контуре с резистивной нагрузкой. Включение резистора позволяет смоделировать варианты работы тиристорного ключа с различными вари-

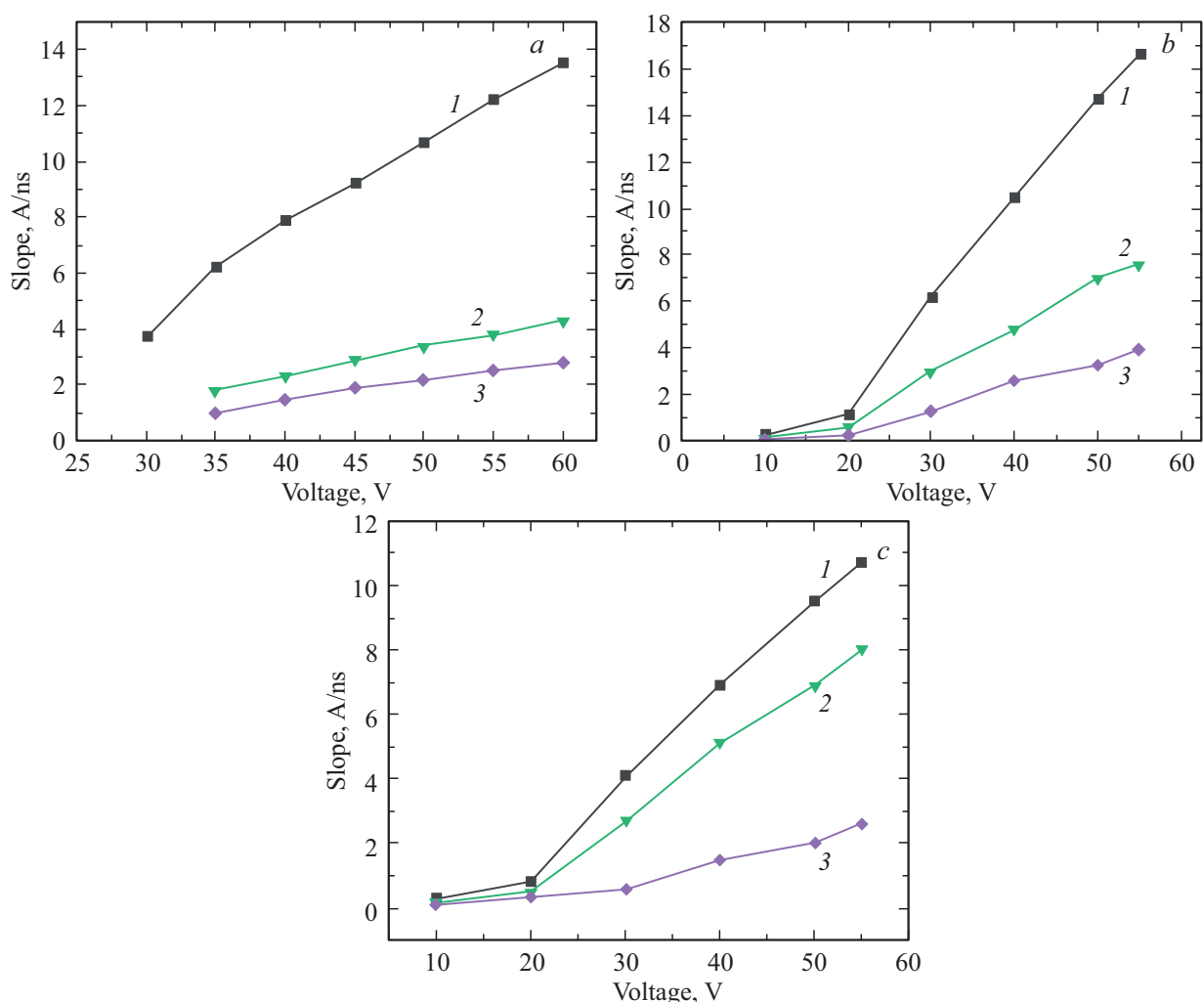


Рис. 4. Зависимости скорости нарастания импульса тока по уровню 10–90% от блокируемого напряжения для тиристорных ключей на основе гетероструктур типа 1 (*a*), 2 (*b*) и 3 (*c*), работающих в контуре с резистивной нагрузкой номиналом (Ом): 1 — 1, 2 — 2.7, 3 — 5.1. Емкость конденсатора 1 нФ.

антами нагрузок, а также сделать оценку амплитуды импульса тока, генерируемого в контуре. На рис. 3, *b* показаны типичные импульсы напряжения, измеренные на нагрузочных резисторах различного номинала при включении тиристора с блокируемого напряжения 55 В и емкости конденсатора 1 нФ, а также определенные импульсы тока на рис. 3, *a*. Достижимая максимальная амплитуда импульса тока для резистора номиналом 1 Ом достигала 17.5 А при длительности на уровне половины от максимума 3.7 нс. Используя полученные экспериментальные импульсы тока, была сделана оценка скорости нарастания тока при включении тиристорного ключа для различных условий включения: блокируемое напряжение и нагрузочный резистор. Скорость нарастания тока определялась как наклон переднего фронта импульса тока на уровне 10–90% от максимальной амплитуды. Полученные зависимости показаны на рис. 4.

Видно, что для всех структур наклон полученных зависимостей увеличивается при снижении нагрузочного

сопротивления. Для структур 2 и 3 типа зависимости также включают два участка. На первом участке при блокируемых напряжениях 10–20 В наблюдается слабый рост, соответствующий медленному включению тиристора. Далее с ростом напряжения в зависимости наблюдается излом и переход к режимам быстрого включения тиристора (блокируемые напряжения > 20 В). Видно, что увеличение нагрузочного сопротивления способствует снижению скорости переходного процесса и при номинале 5 Ом излом практически исчезает, что может свидетельствовать о реализации только медленного режима работы тиристора для всего диапазона напряжений. Данный факт свидетельствует о том, что для реализации условий высокой скорости переходного процесса важным параметром является не только блокируемое напряжение, но также плотность тока. Данный эффект может объясняться тем, что при низкой плотности тока невозможно реализовать условия для формирования домена электрического поля, где

происходит ударная ионизация, являющаяся важным каналом быстрой поставки избыточных дырок в p -базу.

4. Заключение

Разработанный ряд низковольтных тиристорных структур продемонстрировал возможность создания сильноточных ключей, обеспечивающих коммутацию импульсов тока амплитудой ≥ 10 А с минимальным временем переходного процесса в емкостном контуре 3.7–3.9 нс. Проведенная оптимизация параметров тиристорной структуры позволяет говорить о том, что для создания эффективных ключей, обеспечивающих решение задачи генерации одиночных импульсов, оптимальной является конструкция с барьерным слоем на границе эмиттер/ p -база и минимальной толщиной n -GaAs-коллектора. Разработанные конструкции тиристорных ключей позволяют реализовать плотную упаковку ряда элементов, что можно использовать для создания матриц с целью повышения пикового тока. В дальнейшем полученные результаты планируется использовать для создания импульсных источников лазерного излучения на основе лазерных диодов.

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. Technol.*, **35**, 065016 (2020). DOI: 10.1088/1361-6641/ab8397
- [2] N. Ammouri, H. Christopher, J. Fricke, A. Ginolas, A. Liero, A. Maaßdorf, H. Wenzel, A. Knigge. *Electron. Lett.*, **59**, e12680 (2023). DOI: 10.1049/ell2.12680
- [3] I.A. Prudaev, S.N. Vainshtein, M.G. Verkholetov, V.L. Oleinik, V.V. Kopyev. *IEEE Trans. Electron Dev.*, **68**, 57 (2020). DOI: 10.1109/TED.2020.3039213
- [4] S. Vainshtein, G. Duan, T. Rahkonen, Z. Taylor, V. Zemlyakov, V. Egorkin, T. Skotnicki, W. Knap. *Results Phys.*, **19**, 103509 (2020). DOI: 10.1016/j.rinp.2020.103509
- [5] S. Vainshtein, V. Zemlyakov, V. Egorkin, A. Maslevtsov, A. Filimonov. *IEEE Trans. Power Electron.*, **34**, 3689 (2018). DOI: 10.1109/TPEL.2018.2853563
- [6] S.O. Slipchenko, A.A. Podoskin, O.S. Soboleva, N.A. Pikhtin, T.A. Bagaev, M.A. Ladugin, A.A. Marmalyuk, V.A. Simakov, I.S. Tarasov. *J. Appl. Phys.*, **121**, 054502 (2017). DOI: 10.1063/1.4975411
- [7] S.O. Slipchenko, A.A. Podoskin, O.S. Soboleva, N.A. Pikhtin, T.A. Bagaev, M.A. Ladugin, A.A. Marmalyuk, V.A. Simakov, I.S. Tarasov. *Opt. Express*, **24**, 16500 (2016). DOI: 10.1364/OE.24.016500
- [8] S.O. Slipchenko, A.A. Podoskin, O.S. Soboleva, D.A. Veselov, V.V. Zolotarev, N.A. Pikhtin, T.A. Bagaev, M.A. Ladugin, A.A. Marmalyuk, V.A. Simakov, I.S. Tarasov. *IEEE Trans. Electron Dev.*, **63**, 3154 (2016). DOI: 10.1109/TED.2016.2582700
- [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). DOI: 10.1134/S1063782620050140
- [10] S.O. Slipchenko, A.A. Podoskin, V.S. Golovin, M.G. Rastegaeva, N.V. Voronkova, N.A. Pikhtin, T.A. Bagaev, M.A. Ladugin, A.A. Marmalyuk, V.A. Simakov. *IEEE Phot. Techn. Lett.*, **33** (1), 11 (2020). DOI: 10.1109/LPT.2020.3040026
- [11] S.O. Slipchenko, A.A. Podoskin, V.V. Zolotarev, L.S. Vavilova, A.Yu. Leshko, M.G. Rastegaeva, I.V. Miroshnikov, I.S. Shashkin, N.A. Pikhtin, T.A. Bagaev, M.A. Ladugin, A.A. Padalitsa, A.A. Marmalyuk, V.A. Simakov. *Bull. Lebedev Phys. Inst.*, **50**, S527 (2023). DOI: 10.3103/S1068335623170141
- [12] S. Slipchenko, A. Podoskin, O. Soboleva, N. Pikhtin, I. Tarasov, V. Yuferev. *Proc. Physics and Simulation of Optoelectronic Devices XXIV* (SPIE OPTO, San Francisco, California, US, 2016) 97420I. DOI: 10.1117/12.2212583

Редактор Г.А. Оганесян

High-current low-voltage switches for nanosecond pulse durations based on thyristor (Al)GaAs/GaAs homo- and heterostructures

S.O. Slipchenko¹, A.A. Podoskin¹, I.V. Shushkanov¹, V.A. Krychkov¹, A.E. Rizaev¹, M.I. Kondratov¹, A.E. Grishin¹, N.A. Pikhtin¹, T.A. Bagaev^{1,2}, V.N. Svetogorov², M.A. Ladugin², A.A. Marmalyuk², V.A. Simakov²

¹ Ioffe Institute, 194021 St. Petersburg, Russia

² Open Joint-Stock Company M.F. Stel'makh Polyus Research Institute, 117342 Moscow, Russia

Abstract A series of low-voltage thyristor current switches based on (Al)GaAs/GaAs homo- and heterostructures with a volume charge region formed in the lightly doped p -GaAs base layer have been developed. The transient processes characteristics in pulse generation mode of nanosecond duration have been studied. It has been shown that the use of a wide-bandgap barrier based on AlGaAs at the n -emitter/ p -base junction allows reducing the minimum control current amplitude from 30 to 3 mA, and the turn-on delay time can be shortened to 6 ns. For the developed thyristor switches, a minimum transition time of 3.7–3.9 ns was demonstrated when operating in a circuit with a 1 nF capacitive load. In a circuit with a nominal 1 Ω resistive load, the thyristor switches provided a peak current of 17.5 A with a pulse duration of 3.7 ns.