

07.2

Тиристорные ключи на основе гетеро- и гомоструктур (Al)GaAs/GaAs для генерации наносекундных импульсов тока с высокой частотой

© 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 РАН, Санкт-Петербург, Россия

² АО „НИИ „Полюс“ им. М.Ф. Стельмаха“, Москва, Россия

E-mail: SergHPL@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 18 октября 2023 г.

В окончательной редакции 20 ноября 2023 г.

Принято к публикации 22 ноября 2023 г.

Разработаны и исследованы низковольтные тиристорные токовые ключи для генерации высокочастотной последовательности токовых импульсов. Максимальная частота (400 kHz при 35 V) продемонстрирована для структуры гомотиристора GaAs (HoT). Гетероструктура тиристора с AlGaAs-барьером (HeT) демонстрировала меньший ток удержания; как следствие, максимальная частота достигала 170 kHz при 10 V. Для максимальных напряжений 55 V частоты достигали 55 и 40 kHz для структур HoT и HeT соответственно. При этом в контуре генерировались импульсы тока длительностью 3.5 ns и амплитудой 24 A.

Ключевые слова: тиристор, токовый ключ.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.04.57101.19771

В настоящее время для создания 3D-лидаров, способных регистрировать быстропротекающие процессы, необходимы эффективные и компактные источники лазерных импульсов, работающие на высоких частотах [1]. В работе [2] представлены линейки полупроводниковых лазеров из 48 элементов с источником тока на основе GaN-транзисторов, что позволило продемонстрировать лазерные импульсы с пиковой мощностью 600 W за счет реализации накачки импульсами тока длительностью от 4 до 10 ns с амплитудой до 1 kA при частотах до 10 kHz. Альтернативный подход к формированию импульсной накачки предложен в [3], где в качестве сильноточного ключа использовался GaAs S-диод с рабочим напряжением порядка 200 V. В результате была продемонстрирована пиковая мощность 135 W, полученная от лазеров на основе туннельно-связанных гетероструктур с эффективностью порядка 3 W/A, за счет формирования импульсов тока накачки длительностью 1.5 ns и амплитудой 45 A. В [4] для генерации коротких импульсов использовался ключ на основе высоковольтного биполярного лавинного кремниевого транзистора с рабочим напряжением до 110 V, что позволило реализовать генерацию лазерных импульсов с пиковой мощностью 90 W, длительностью 1 ns и частотой повторения 200 kHz при амплитуде и длительности импульсов тока накачки 40 A и 1.14 ns соответственно, при этом в качестве излучателей также использовались туннельно-связанные гетероструктуры. В [5,6] был предложен подход, в котором для реализации импульсной накачки использовались низковольтные гетеротиристоры с оптической обратной связью с рабочими напряжениями до 30 V. Это позволило создать источники, обеспечива-

ющие пиковую мощность лазерных импульсов 47 W с длительностью 6.4 ns и частотами повторения до 1 MHz при сформированных импульсах тока накачки амплитудой до 60 A. Данные результаты позволяют говорить об актуальности и практической значимости исследований, направленных на разработку высокоэффективных сильноточных ключей для накачки мощных полупроводниковых лазеров. В настоящей работе представлены новые результаты, демонстрирующие возможности генерации высокочастотных последовательностей импульсов тока высокоэффективными низковольтными тиристорными ключами.

В [7] было показано, что ток удержания является важной характеристикой, обеспечивающей работу высокоэффективных тиристорных ключей на высоких частотах. С другой стороны, технологичность изготовления тиристорных структур является важным условием их практического использования. В связи с этим в настоящей работе рассмотрены экспериментальные образцы тиристорных ключей на основе двух типов структур: гомоструктуры GaAs (homothyristor, далее HoT) и гетероструктуры AlGaAs/GaAs (heterothyristor, далее HeT). Все структуры выращивались методом металлоорганической газофазной эпитаксии (МОС-гидридной эпитаксии) на подложках *n*-GaAs. Структура HoT включала следующую последовательность: слой 1 — *n*-GaAs толщиной 1 μm , слой 2 — *p*-GaAs толщиной 0.1 μm , слой 3 — *p*₀-GaAs толщиной 4 μm , слой 4 — *n*-GaAs толщиной 1 μm , слой 5 — *p*-GaAs толщиной 0.5 μm . Структура HeT отличалась включением широкозонного барьерного слоя Al_{0.1}Ga_{0.9}As между слоями 1 и 2. Малые толщины слоев, сформированных на основе GaAs, обеспечивают

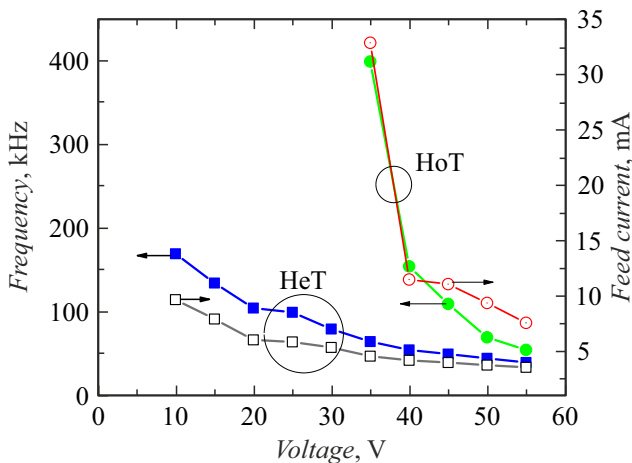


Рис. 1. Зависимости максимальной частоты генерации импульсов тока в контуре тиристор–конденсатор, а также среднего тока источника питания от блокируемого напряжения для тиристоров на основе структур HoT и HeT. Емкость конденсатора 1 nF.

технологичность изготовления подобных структур. Блокировка обеспечивалась обратносмещенным $p-n$ -переходом с областью объемного заряда, сформированной в основном в слое p_0 -GaAs. Несмотря на это, рабочие блокируемые напряжения достигали 55 V для обоих типов структур. Широкозонный барьер AlGaAs позволяет управлять величиной тока удержания: 60 mA для HoT и 12 mA для HeT.

Для экспериментальных исследований возможности генерации высокочастотной последовательности импульсов использовался простейший контур на основе чипа тиристора и конденсатора емкостью 1 nF. Зарядка конденсатора осуществлялась от постоянного источника напряжения, включенного параллельно тиристор (подробное описание схемы включения и этапов работы приведено в [5–7]). Для всех экспериментов включение тиристоров осуществлялось импульсами тока управления амплитудой 70 mA и длительностью 200 ns. Частота импульсов управления задавала частоту генерируемых импульсов тока. Рассматриваемый подход для генерации импульсов тока является наиболее простым, однако для эффективной зарядки конденсатора внешним постоянным источником напряжения тиристор должен быть переведен в закрытое состояние. Это возможно, когда конденсатор разряжен, а ток, протекающий через тиристор, не превышает тока удержания. На рис. 1 показаны зависимости максимальной частоты генерации импульсов тока в цепи тиристор–конденсатор и среднего тока источника питания от блокируемого напряжения для тиристоров на основе структур HoT и HeT. В нашем случае максимальная частота определялась условием возможности перехода тиристора в закрытое состояние после разрядки конденсатора. Увеличение частоты выше максимального значения приводило к тому, что тиристор переставал выключаться и постоянно

находился в открытом состоянии. Видно, что максимальную частоту 400 kHz для блокируемого напряжения 35 V демонстрирует структура HoT с большим током удержания, при этом ток потребления составил 34 mA. Увеличение блокируемого напряжения до 55 V ведет к снижению максимальной частоты до 55 kHz и тока потребления до 7.6 mA. Данное падение максимальной частоты может быть обусловлено вкладом тока смещения барьерной емкости. Тиристоры на основе структуры HeT демонстрируют максимальную частоту 170 kHz для блокируемого напряжения 10 V. Повышение блокируемого напряжения до 55 V ведет к снижению максимальной частоты до 40 kHz и тока потребления до 3.7 mA. Видно, что для максимальных блокируемых напряжений максимальные частоты для обеих структур имеют близкие значения, т.е. влияние тока удержания не оказывает существенного влияния. Для оценки пикового тока в контур последовательно с тиристором был включен нагрузочный резистор номиналом 0.5 Ω . На рис. 2, a показаны типичная динамика напряжения на конденсаторе и импульс тока, полученный при измерении динамики напряжения на нагрузочном резисторе для тиристора на основе структуры HeT. Для обоих типов структур достигаемая длительность импульсов тока при максимальных напряжениях составила около 3.5 ns на уровне половины от максимума. Зависимость достигаемой пиковой амплитуды импульса тока от блокируемого напряжения для тиристора на основе структуры HeT показана на рис. 2, b. Видно, что пиковый ток для напряжения 55 V достигает 24 A. Полученное максимальное значение пикового тока близко для обеих структур. Однако для структуры HoT наблюдается меньший диапазон рабочих напряжений. Это обусловлено тем, что при низких напряжениях структура HoT не демонстрирует быстрой динамики включения. Также была сделана оценка динамики тока в контуре тиристорного ключа в рамках численного расчета переходного процесса разряда конденсатора в $R-L-C$ -контуре со следующими характеристиками: $R = 1.1 \Omega$, $L = 2.2$ nH, $C = 1$ nF (рис. 2, a). Полученные результаты наглядно демонстрируют вклад индуктивности, при этом расчеты подтверждают приведенную экспериментальную оценку пикового тока, формы и длительности импульса в исследуемом контуре. Моделирование показало, что удовлетворительное совпадение наблюдается при эквивалентном сопротивлении контура 1.1 Ω , что выше значения нагрузочного резистора и может быть связано с дополнительным вкладом как собственного сопротивления тиристорного ключа, так и сопротивления конденсатора. Здесь следует отметить, что диаметр анодного контакта составлял величину 170 μm и для снижения сопротивления может быть увеличен.

Типичная динамика напряжения на конденсаторе во время генерации высокочастотной последовательности импульсов показана на примере тиристоров структуры HeT (рис. 3, a). Видно, что динамика напряжения после разряда конденсатора включает два участка. Первый

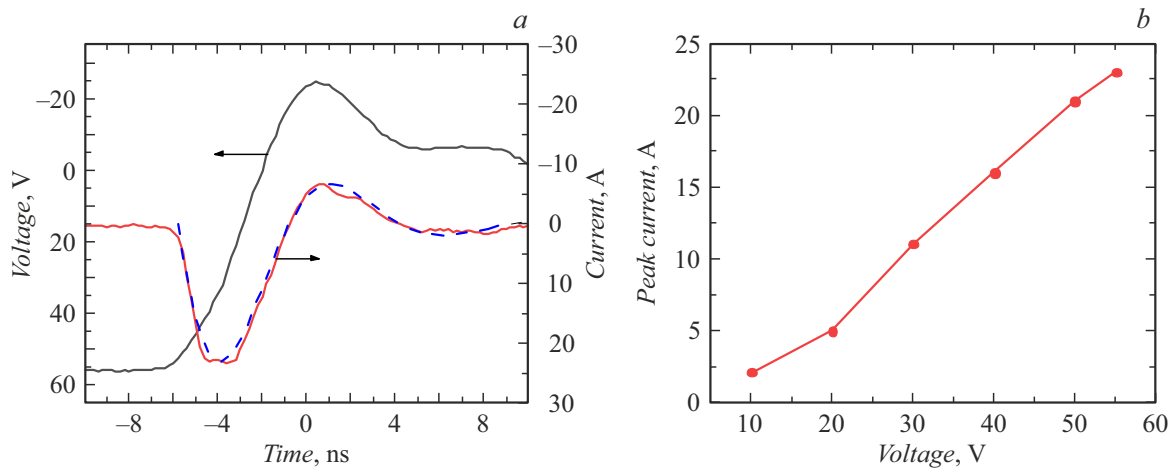


Рис. 2. *a* — зависимость напряжения на конденсаторе от времени при переходе тиристора во включенное состояние, а также форма импульса тока, измеренного на нагрузочном резисторе (сплошная линия) и рассчитанного для $R-L-C$ -контура (штриховая линия) со следующими характеристиками: $C = 1$ nF на нагрузку $R = 1.1 \Omega$, $L = 2.2$ nH при начальном напряжении 55 V. *b* — зависимость пикового тока от напряжения. Номинал нагрузочного резистора 0.5Ω , тиристор на основе структуры HeT, емкость конденсатора 1 nF.

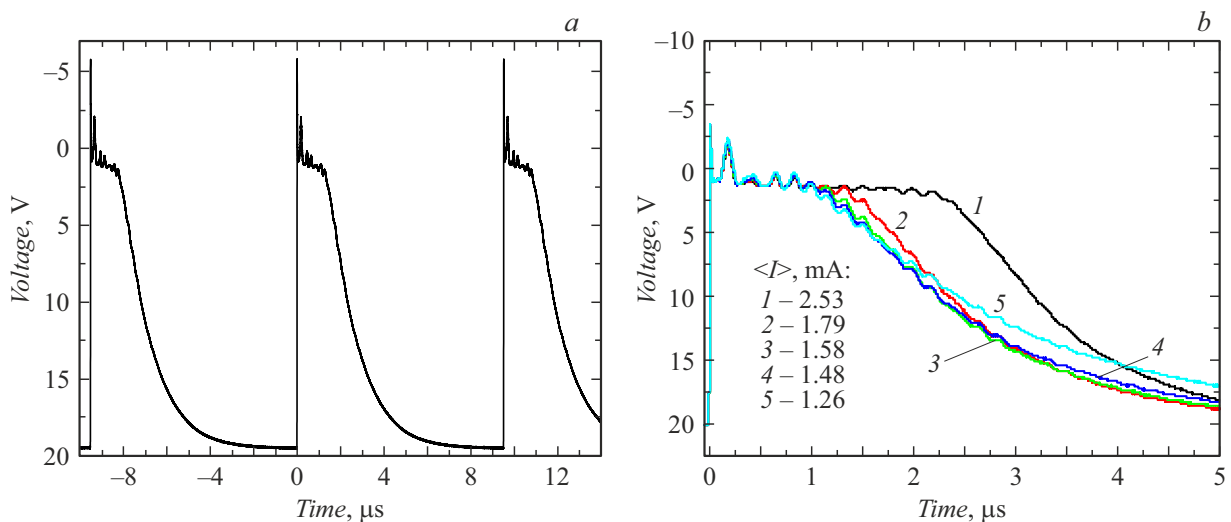


Рис. 3. *a* — зависимость напряжения на конденсаторе от времени в режиме максимальной частоты следования. *b* — зависимость напряжения на конденсаторе от времени для различных средних токов источника питания $\langle I \rangle$. Блокируемое напряжение 20 V, тиристорный ключ на основе структуры HeT, конденсатор емкостью 1 nF.

соответствует минимальному для всего цикла и постоянному напряжению на конденсаторе, которое формирует „полку“ на треке динамики. В нашем случае данная величина определяет минимальное напряжение тиристора, которое составляет порядка 1.3 V. Второй участок соответствует процессу зарядки конденсатора, когда тиристор закрыт. Отсутствие роста напряжения для первого участка может быть связано с тем, что, несмотря на низкий ток, тиристор находится в открытом состоянии с низким сопротивлением. Это обеспечивает канал утечки тока и отсутствие заряда конденсатора, а переход тиристора в закрытое состояние с высоким сопротивлением на втором участке обеспечивает эффективный заряд конденсатора.

На рис. 3, *b* показано, как меняется длительность первого участка в зависимости от среднего тока источника питания. Видно, что длительность первого участка имеет пороговое минимальное значение, которое достигается при снижении среднего тока источника питания и для блокируемого напряжения 20 V составляет 960 ns. При этом увеличение среднего тока приводит к возрастанию длительности первого участка. Исследования показали, что минимальная длина „полки“ увеличивается с ростом блокируемого напряжения. Таким образом, максимальная частота модуляции низковольтных тиристорных ключей в области низких рабочих напряжений определяется величиной тока удержания, а также временем удержания включенного состояния после разряда кон-

денсатора; для рабочих напряжений, близких к максимальному значению, существенный вклад вносят токи смещения при зарядке барьерной емкости обратносмещенного $p-n$ -перехода. При этом вклад токов смещения в процесс включения усиливается при увеличении блокируемого напряжения. Это связано с сокращением области квазинейтральной базы p_0 -GaAs за счет расширения области объемного заряда и увеличения концентрации избыточных дырок.

Полученные результаты демонстрируют, что разработанные низковольтные тиристорные ключи могут быть использованы для решения задачи накачки мощных полупроводниковых лазеров. Демонстрируемые пиковые токи и высокие частоты генерации свидетельствуют о высоком практическом потенциале предложенного подхода, который может быть усилен за счет использования многоэлементных линеек и решеток на основе низковольтных тиристорных ключей, что, как показано в [5,6], позволяет поднять пиковый ток без ухудшения других характеристик.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] R.H. Hadfield, J. Leach, F. Fleming, D.J. Paul, C.H. Tan, J.S. Ng, R.K. Henderson, G.S. Buller, *Optica*, **10** (9), 1124 (2023). DOI: 10.1364/OPTICA.488853
- [2] A. Klehr, A. Liero, H. Christopher, H. Wenzel, A. Maaßdorf, P. Della Casa, J. Fricke, A. Ginolas, A. Knigge, *Semicond. Sci. Technol.*, **35** (6), 065016 (2020). DOI: 10.1088/1361-6641/ab8397
- [3] I.A. Prudaev, S.N. Vainshtein, M.G. Verkholetov, V.L. Oleinik, V.V. Kopyev, *IEEE Trans. Electron Dev.*, **68** (1), 57 (2021). 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.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. Padalitsa, A.A. Marmalyuk, V.A. Simakov, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **33** (1), 11 (2020). DOI: 10.1109/LPT.2020.3040026
- [6] 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** (Suppl 5), S527 (2023). DOI: 10.3103/S1068335623170141
- [7] 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** (8), 3154 (2016). DOI: 10.1109/TED.2016.2582700