

07

Компактные источники коротких (1 ns) лазерных импульсов на основе гетеротристорных токовых ключей

© С.О. Слипченко¹, А.А. Подоскин¹, И.В. Шушканов¹, А.Э. Ризаев¹, М.И. Кондратов¹, А.Е. Гришин¹, Н.А. Пихтин¹, А.С. Башкатов², Т.А. Багаев³, В.Н. Светогоров³, М.А. Ладугин³, А.А. Мармалюк³, В.А. Симаков³

¹ ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

² Всероссийский научно-исследовательский институт радиоэлектроники, Мытищи, Московская обл., Россия

³ АО „НИИ “Полюс“ им М.Ф. Стельмаха“, Москва, Россия

E-mail: SergHPL@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 23 декабря 2025 г.

В окончательной редакции 19 февраля 2026 г.

Принято к публикации 27 февраля 2026 г.

Разработаны и исследованы импульсные источники лазерного излучения на основе сборки гетеротристорный токовый ключ—лазерный диод, излучающие на длине волны 940 nm. Показано, что использование гетеротристорных токовых ключей с расширенной базой позволяет поднять рабочее напряжение до 100 V без потери скорости переходных процессов. В результате продемонстрирована возможность генерации лазерных импульсов длительностью 1 ns с максимальной импульсной мощностью 50 W.

Ключевые слова: тиристор, токовый ключ, лазерные импульсы, гетеротристор.

DOI: 10.21883/0000000000

Источники лазерных импульсов с длительностью в единицы наносекунд активно разрабатываются, что связано с широкими возможностями их использования: передача информации в свободном пространстве, дальнометрия, обработка материалов. Однако практическое применение сопряжено с рядом требований, среди которых можно выделить доступность, компактность, высокую пиковую оптическую мощность. Если кристаллы полупроводниковых лазеров удовлетворяют этим требованиям, то внешние электрические системы все еще находятся в стадии активного развития. Вместе с этим, когда речь идет о мощных лазерных импульсах с длительностями в наносекундном диапазоне, электрическую и оптическую части нельзя рассматривать отдельно, т.е. разрабатываемые подходы должны учитывать их взаимное влияние. В первую очередь это выражается в поиске решений, обеспечивающих создание интегральных конструкций, включающих быстродействующий токовый ключ и кристалл лазерного диода. При этом важно, чтобы была возможность сокращения длительностей лазерных импульсов, что позволит расширить области их применения. В настоящее время уже продемонстрированы подходы, позволяющие создавать такие источники, с длительностями импульсов в единицы наносекунд и пиковой мощностью в десятки ватт, работающие в спектральном диапазоне 900–1060 nm. В работе [1] импульсные источники были реализованы на основе лазерных диодов с длиной волны 905 nm и внешнего контура, сформированного GaN полевыми транзисторами. Авторы отмечают, что в зависимости от конструкции используемого полевого транзистора достигаемые минимальные длительности импульсов тока составляют 1.96 ns при рабочих

напряжениях до 100 V, амплитуде тока 63 A и факторе 1.5×1.5 mm. Также показано, что дальнейшее повышение амплитуды тока в разработанных решениях возможно за счет увеличения фактора и рабочего напряжения полевого транзистора GaN, однако такие изменения также сопровождаются уширением импульса.

Кроме того, можно отметить подходы, в которых в качестве силовых ключей используются быстродействующие лавинные S-диоды [2] и биполярные транзисторы [3], демонстрирующие импульсы тока 17 A/1.2 ns (амплитуда/длительность) и 40 A/1.1 ns соответственно. Другой подход основан на использовании в качестве силовых ключей низковольтных гетеротристорных. В работе [4] продемонстрированы источники лазерных импульсов на основе сборки низковольтные гетеротристоры—лазерный диод с длительностью импульса 2.25 ns и пиковой мощностью 45.6 W, что при эффективности лазера 1 W/A может обеспечиваться генерируемыми в контуре импульсами тока с амплитудой и длительностью около 46 A и 2.3 ns соответственно.

Таким образом, для ряда разрабатываемых подходов сохраняется актуальность решения задачи снижения длительности лазерных импульсов до 1 ns без потери уровня достигаемых пиковых мощностей. В рамках настоящей работы исследованы источники лазерных импульсов, созданные на основе сборки лазерный диод—тиристорный ключ и демонстрирующие возможность снижения длительности импульсов тока и соответственно лазерных импульсов до 1 ns при одновременном повышении достигаемой пиковой мощности. Для генерации коротких импульсов тока наибольшее распространение получили схемы, использующие ем-

костной накопитель энергии в виде конденсатора. Тогда амплитуда и длительность импульса тока будут связаны с рабочим напряжением и величиной емкости. В общем случае при выбранном рабочем напряжении уменьшение длительности импульса тока в таких схемах может быть реализовано за счет уменьшения емкости конденсатора, но это приводит к снижению амплитуды тока в том числе. Поэтому необходимо решать проблему повышения скорости переходных процессов в схеме. Скорость переходных процессов в таких схемах ограничивается двумя факторами: 1) паразитные элементы контура тока; 2) скорость работы силовоточного ключа. Экспериментальные исследования показывают, что негативное воздействие оказывают как активные, так и реактивные паразитные элементы контура тока. Наглядно влияние добавочного омического сопротивления продемонстрировано в работе [5] и выражается в увеличении длительности и снижении амплитуды импульса тока, что демонстрирует важность в разработке конструкций токовых ключей с низким добавочным сопротивлением. Кроме того, критически важно снижать паразитную индуктивность контура тока. Поиск оптимальных конструкций позволяет снизить паразитную индуктивность, однако не до нулевого значения. По этой причине задача снижения длительности импульса тока без уменьшения пикового тока сводится к одновременному повышению рабочего напряжения и снижению емкости конденсатора. Для тиристорного токового ключа максимальное рабочее напряжение ограничивается максимальным блокируемым напряжением, при котором тиристор произвольно переходит во включенное состояние. Повышение максимального блокируемого напряжения возможно за счет расширения объема области обратносмещенного $p-n$ -перехода. Проведенное моделирование позволило выбрать оптимальную с точки зрения динамических характеристик и технологии изготовления конструкцию такой области. Основное решение связано с использованием составной p -базы $n-p-n$ транзисторной части тиристора. Составная p -база включает сильнолегированный p -слой, который „запирает“ электрическое поле обратносмещенного $p-n$ -перехода и предотвращает эффект смыкания, а также слаболегированный p -слой увеличенной толщины, который обеспечивает поле с пиковой напряженностью менее порога пробоя. В результате методом газозащитной эпитаксии из металлоорганических соединений (МОС-гидридной эпитаксии) были изготовлены гетероструктуры полупроводниковых лазеров и тиристоров. Гетероструктура тиристора включала следующие слои для $n-p-n$ транзисторной части: сильнолегированный n -эмиттер на основе $n-Al_{0.1}Ga_{0.9}As$ ($n = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$), составную p -базу на основе сильнолегированного $p-GaAs$ ($p = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) и слаболегированного $p-GaAs$ ($p = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$), сильнолегированный n -коллектор $n-GaAs$ ($n = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$). Для $p-n-p$ транзисторной части p -эмиттер был выполнен на основе $p-GaAs$ ($p = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$). Толщины слоев составной p -базы были равны $0.1 \mu\text{m}$ для сильнолегированной

части и $8 \mu\text{m}$ для слаболегированной части. Далее на планарной гетероструктуре со стороны эпитаксиальных слоев формировались анодный контакт диаметром $200 \mu\text{m}$, контакт секции управления, окружающий анодный электрод. Катодный контакт формировался со стороны подложки. Лазерная гетероструктура имела асимметричную конструкцию с активной областью на основе квантовой ямы $InGaAs$. Для изготовления кристаллов лазерных диодов со стороны слоев создавался полосковый контакт, формирующий излучательную апертуру шириной $400 \mu\text{m}$, а также сплошной контакт со стороны подложки. Импульсные источники лазерного излучения собирались в виде вертикальной сборки, включающей кристалл полупроводникового лазера длиной 2 mm , на который монтировался кристалл тиристорного ключа. Далее вертикальная сборка напаивалась на медное основание и собирался электрический контур, включающий емкостной накопитель и контактные электроды для коммутации с внешним источником питания и генератором импульсов тока управления.

Исследования динамики лазерной генерации проводились с использованием методики, описанной в [6]. В рамках предварительных экспериментов был выбран оптимальный номинал конденсатора (300 pF), обеспечивающий длительность оптического импульса 1 ns при максимальной пиковой мощности. Динамика лазерной генерации показана на рис. 1, а. Используемая методика измерения лазерных импульсов [6] не позволяет оценить задержку включения лазерной генерации, поэтому на рис. 1, а лазерные импульсы искусственно сведены по переднему фронту. Эксперименты показали, что лазерная генерация отсутствует для рабочих напряжений менее 55 V . При этом для рабочих напряжений менее 55 V тиристорный ключ эффективно включается, однако инжектированного количества носителей заряда недостаточно для выполнения пороговых условий генерации. Также хорошо заметна особенность динамики включения лазерной генерации, выражающаяся в присутствии узкого интенсивного пика. По нашему мнению, данная особенность объясняется тем, что на первом этапе включение лазерной генерации происходит по механизму модуляции усиления, описанному в работе [7]. Данный признак также является косвенным подтверждением высокой скорости включения тока накачки. Максимальная амплитуда релаксационного пика достигает 96 W при длительности на уровне половины от максимума (FWHM), равной 90 ps . Основная часть лазерного импульса имеет правильную колоколообразную форму. При максимальном рабочем напряжении достигаемая пиковая мощность составляет 52 W , а длительность импульса на уровне FWHM равна 1 ns . Снижение рабочего напряжения сопровождается уменьшением амплитуды и длительности лазерного импульса. Уменьшение длительности лазерного импульса даже при неизменной длительности импульса тока накачки объясняется следующими процессами. Для достижения порога лазерной генерации активную область необхо-

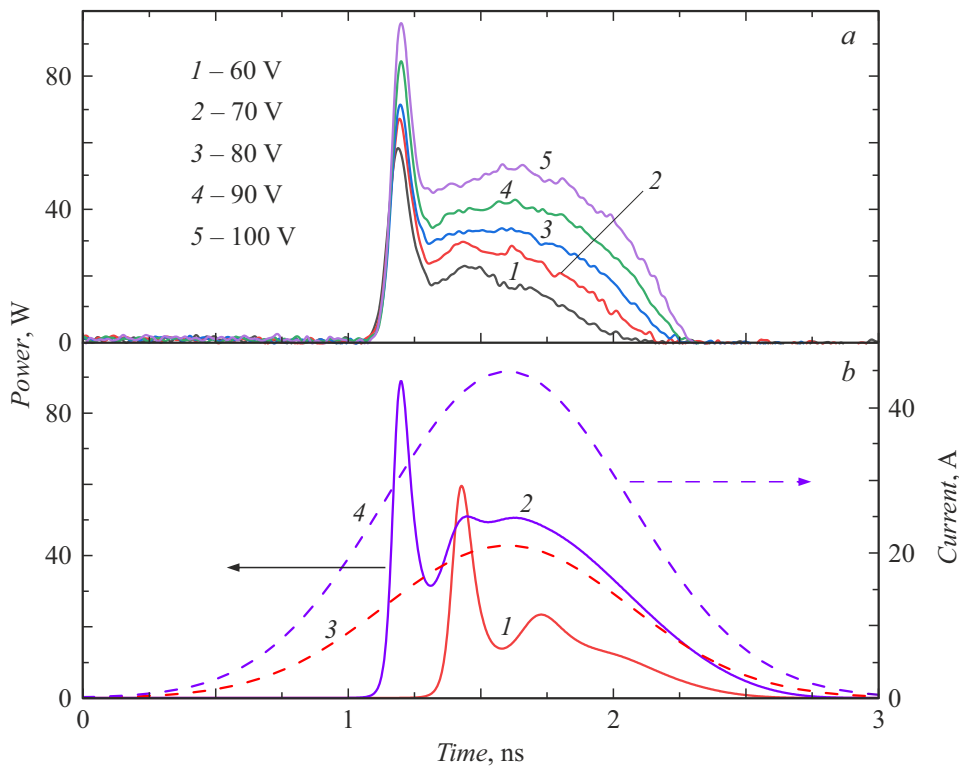


Рис. 1. *a* — экспериментальная динамика лазерной генерации источника импульсов с апертурой $400\ \mu\text{m}$ при различных напряжениях питания; *b* — оптические импульсы, полученные с использованием численного моделирования динамики лазерной генерации (1, 2) (левая ось), и расчетные импульсы тока (3, 4) (правая ось), соответствующие рабочему напряжению 60 (1, 3) и 100 В (2, 4).

димо заполнить определенным количеством носителей заряда. При снижении амплитуды импульса тока накачки происходит снижение скорости заполнения активной области носителями заряда. В результате требуется больше времени для достижения требуемой пороговой концентрации, что приводит к росту задержки включения лазерной генерации и соответственно сокращению его длительности.

С целью оценки пикового тока было проведено численное моделирование динамики лазерной генерации с использованием одномерной модели. В рамках моделирования оптимизировалась форма импульса тока накачки (длительность и амплитуда), обеспечивающая наилучшее совпадение расчета с экспериментом для рабочего напряжения 100 В. Результаты моделирования показаны на рис. 1, *b*. Видно, что наблюдается удовлетворительное совпадение рассчитанных и экспериментальных форм и амплитуд лазерных импульсов. Это позволяет сделать вывод, что расчетные амплитуды и длительности лазерных импульсов на уровне FWHM близки к экспериментальным и достигают 45 А и 1 ns соответственно для максимального рабочего напряжения 100 В. Из рис. 1, *b* видно, что снижение амплитуды импульса тока накачки при сохранении его длительности приводит как к увеличению задержки включения

лазерной генерации, так и к сокращению длительности лазерного импульса.

На рис. 2 приведены спектры лазерной генерации. Форма спектра типична для мощных многомодовых полупроводниковых лазеров, при этом ширина на уровне

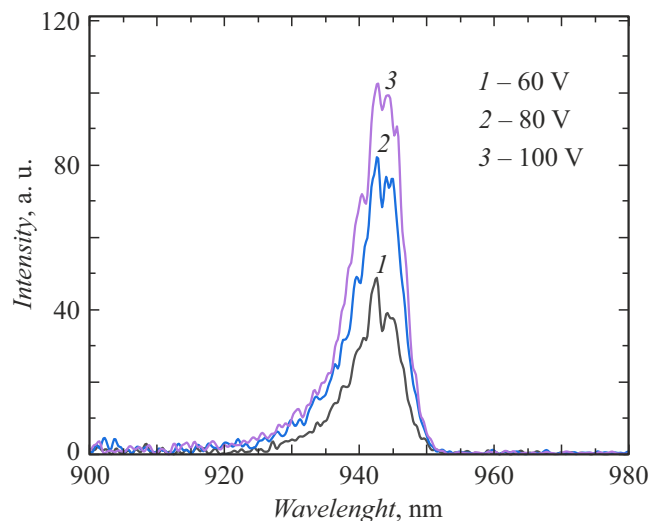


Рис. 2. Спектры лазерной генерации для импульсного источника с шириной излучающей апертуры $400\ \mu\text{m}$ при различных напряжениях питания.

FWHM составляет 8 nm. Несмотря на малую длительность импульсов, большую часть которых занимают переходные процессы включения и выключения лазерной генерации, форма спектров изменяется незначительно.

В заключение можно отметить, что разработанные импульсные источники демонстрируют возможности эффективного снижения длительности лазерных импульсов до 1 ns и повышения пиковой мощности до 52 W при работе на длине волны 945 nm. Продемонстрированная возможность была реализована за счет использования гетеротиристорных ключей с расширенной *p*-базой, обеспечивающих повышение рабочих напряжений до 100 V без потери скорости переходных процессов. Оценка формы импульса тока, генерируемого в контуре токовый ключ–лазерный диод, показала, что достигаемая длительность составляет 1 ns, а амплитуда — 45 A.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] J.S. Glaser, *Efficient Power Conversion Corporation. Application note: AN032* (June 3, 2025) [Электронный ресурс]. <https://epc-co.com/epc/Portals/0/epc/documents/applicationnotes/AN032%20Design%20of%20High%20Current%20Nanosecond%20Resonant%20Pulse%20Drivers.pdf>
- [2] И.А. Прудаев, В.В. Копьев, В.Л. Олейник, М.С. Скакунов, А.С. Сотникова, С.М. Гушин, В.Е. Земляков, Письма в ЖТФ, **51** (4), 23 (2025). [I.A. Prudaev, V.V. Koruev, V.L. Oleinik, M.S. Skakunov, A.S. Sotnikova, S.M. Guschin, V.E. Zemlyakov, *Tech. Phys. Lett.*, **51** (2), 77 (2025). DOI: 10.61011/TPL.2025.02.60638.20128].
- [3] 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
- [4] 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 в ЖТФ, **51** (11), 7 (2025). DOI: 10.61011/PJTF.2025.11.60479.20235 [S.O. Slipchenko, A.A. Podoskin, I.V. Shushkanov, A.E. Rizaev, M.I. Kondratov, N.A. Rudova, V.A. Strelets, N.V. Shuvalova, A.E. Grishin, T.A. Bagaev, M.A. Ladugin, A.A. Marmalyuk, V.A. Simakov, N.A. Pikhtin, *Tech. Phys. Lett.*, **51** (6), 5 (2025). DOI: 10.61011/TPL.2025.06.61280.20235].
- [5] 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, ФТП, **57** (8), 678 (2023). DOI: 10.61011/FTP.2023.08.56967.5670 [S.O. Slipchenko, A.A. Podoskin, I.V. Shushkanov, V.A. Krychkov, A.E. Rizaev, M.I. Kondratov, A.E. Grishin, N.A. Pikhtin, T.A. Bagaev, V.N. Svetogorov, M.A. Ladugin, A.A. Marmalyuk, V.A. Simakov, *Semiconductors*, **57** (8), 657 (2023). DOI: 10.61011/SC.2023.08.57621.5670].
- [6] 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: 10.3390/PHOTONICS12020130
- [7] B. Ryvkin, E.A. Avrutin, J.T. Kostamovaara, *J. Lightwave Technol.*, **27**, 2125 (2009). DOI: 10.1109/JLT.2008.2009075