07

Источники мощных лазерных импульсов субнаносекундной длительности на основе структур тиристорный ключ—лазерный диод для спектрального диапазона 1500 nm

© А.А. Подоскин[1], С.О. Слипченко[1], И.В. Шушканов[1], В.А. Крючков[1], В.А. Капитонов[1], Н.В. Шувалова[1], Д.А. Веселов[1], Н.А. Пихтин[1], Т.А. Багаев[1,2], В.Н. Светогоров[2], М.А. Ладугин[2], А.А. Мармалюк[2], В.А. Симаков[2]

[1] ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия
[2] АО „НИИ „Полюс“ им. М.Ф. Стельмаха“, Москва, Россия
E-mail: Podoskin@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 12 мая 2025 г.
В окончательной редакции 20 июня 2025 г.
Принято к публикации 27 июня 2025 г.

Разработаны и исследованы источники лазерных импульсов субнаносекундной длительности на основе компактных вертикальных сборок тиристорный ключ—лазерный диод. Представленные источники, излучающие в спектральном диапазоне 1500 nm, реализованы с использованием гетероструктур AlInGaAs/InP. Продемонстрирована возможность генерации одиночных лазерных импульсов с пиковой мощностью 1.4 W, шириной 75 ps и частотой повторения до 500 kHz.

Ключевые слова: импульсный полупроводниковый лазер, тиристор, токовый ключ.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.17.60976.20371

Источники мощных лазерных импульсов, излучающие в диапазоне длин волн 1300—1600 nm, востребованы в области информационных технологий, например для построения линий связи в свободном пространстве, для различных областей медицины, связанных с диагностикой и терапией, а также при создании мощных лазерных систем на основе волоконных лазеров в качестве задающего генератора. При этом возможность реализации режима генерации лазерных импульсов с субнаносекундной длительностью позволяет заметно повысить такие характеристики, как пространственное и временнóе разрешение, скорость. В настоящее время достаточно широко исследуются подходы для генерации импульсов субнаносекундной длительности полупроводниковыми лазерами на основе гетероструктур GaAs/AlGaAs, которые излучают в спектральном диапазоне 850—900 nm [1–3]. При этом было показано, что классические лазерные гетероструктуры, оптимизированные для работы в непрерывном режиме генерации, способны также излучать высокие пиковые мощности лазерных импульсов [4]. Переход к спектральному диапазону 1300—1600 nm требует изменения используемой системы материалов. Кроме того, теоретические и экспериментальные исследования [5–7] показывают, что в подобных структурах независимо от дизайна присутствуют дополнительные потери, которые заметно ограничивают пиковую мощность в режиме генерации импульсов наносекундной длительности. Данный факт свидетельствует о том, что требуется проведение отдельных исследований, направленных на оценку возможности работы лазерных гетероструктур AlInGaAs/InP в режиме генерации лазерных импульсов субнаносекундной длительности. В случае мощных многомодовых лазеров, когда требуются амплитуды импульсов тока накачки амперного уровня, для решения данной задачи используется подход, основанный на реализации режима модуляции усиления (gain switching) [8], когда за счет задержки в накоплении пороговой концентрации фотонов в резонаторе возможно накопление носителей выше стационарного порога лазерной генерации и дальнейший лавинообразный сброс за короткий промежуток времени, сопровождающийся излучением одиночного лазерного импульса. При этом длительность лазерного импульса заметно меньше, чем длительность импульса тока накачки, что позволяет использовать генераторы импульсов тока наносекундной длительности. В настоящее время для генерации импульсов тока широко используются полевые транзисторы [9], однако невозможность интеграции таких транзисторов с кристаллом полупроводникового лазера и необходимость использования дополнительных контуров управления накладывают ограничения при создании компактных интегральных источников. Данные проблемы могут быть решены за счет использования токовых ключей тиристорного типа. Ранее была продемонстрирована возможность токовых ключей тиристорного типа на основе гетероструктур GaAs/AlGaAs для создания источников лазерных импульсов субнаносекундной длительности в спектральном диапазоне 900 nm [4]. Однако для спектрального диапазона 1300—1600 nm использование подобных токовых ключей позволит создавать только конструкции с гибридной интеграцией. Поэтому анализ возможности создания источников мощных лазерных импульсов субнаносекундной длительности на основе вертикальной

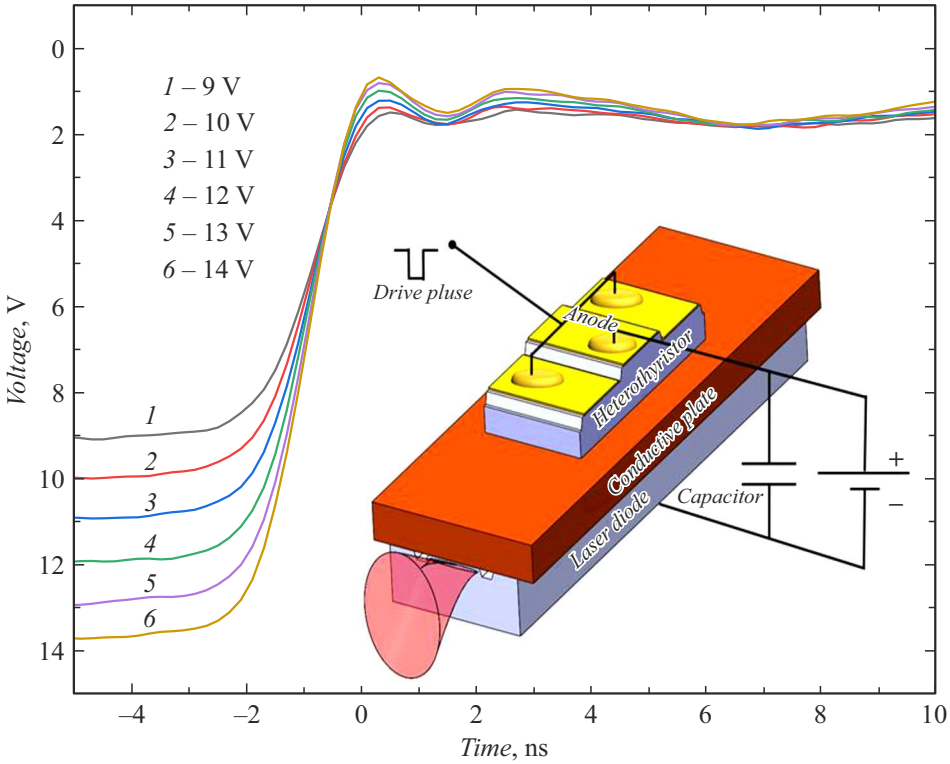

Рис. 1. Зависимость напряжения на конденсаторе от времени в контуре сборки тиристорный ключ–лазерный диод на основе гетероструктур AlInGaAs/InP. На вставке — схематическое изображение сборки тиристорный ключ–лазерный диод.

сборки InP-тиристорный ключ и AlInGaAs/InP-лазерный диод позволит в дальнейшем перейти к созданию монолитно интегрированной конструкции, реализованной на основе гетероструктуры, объединяющей функции и токового ключа, и лазерного диода. Таким образом, в настоящей работе рассмотрены последние результаты в области создания компактных источников лазерных импульсов субнаносекундной длительности для спектрального диапазона в области 1500 nm, реализованных на основе компактных вертикальных сборок InP-тиристорный ключ–AlInGaAs/InP-лазерный диод.

Конструкция разработанного источника лазерных импульсов, показанная на вставке к рис. 1, включает кристалл тиристорного ключа, который смонтирован через проводящий носитель на p-контакт кристалла полупроводникового лазера. Для экспериментальных исследований использовался тиристорный ключ на основе гетероструктуры AlInGaAs/InP. В отличие от GaAs-тиристорных ключей область $n-p-n$-транзистора имела гомоструктуру на основе эпитаксиальных слоев InP: n-InP-эмиттер (толщина $0.2\,\mu$m, легирование $n = 10^{18}\,\text{cm}^{-3}$), p-InP-база (толщина $4\,\mu$m, легирование $n = 10^{16}\,\text{cm}^{-3}$) и n-InP-коллектор (толщина $0.2\,\mu$m, легирование $n = 10^{18}\,\text{cm}^{-3}$). Сверху на InP транзисторной части располагался InP/AlInGaAs-гетеродиод, включающий в себя узкозонный n-AlInGaAs ($E_g = 1.25\,\text{eV}$) толщиной $0.4\,\mu$m и сильнолегированный p-InP-эмиттер, выполняющий роль контактного слоя. Тиристорный ключ имел трехэлектродную конструкцию с электродом управления, сформированным к коллектору n-InP. Конструкция тиристорного ключа имела полосковую геометрию анодного контакта шириной $200\,\mu$m и длиной $500\,\mu$m. Электроды управления имели также полосковую геометрию и располагались вдоль длинной стороны анодного контакта. Для экспериментов были выбраны размеры кристалла тиристорного ключа $800 \times 500\,\mu$m. Исследования статических характеристик показали, что максимальное блокируемое напряжение достигало 20 V, поэтому в экспериментах диапазон рабочих напряжений был ограничен 14 V. Лазерный диод был изготовлен на основе гетероструктуры AlInGaAs/InP, оптимизированной для работы в непрерывном режиме генерации, включающей барьерные слои AlInAs, волноводный слой AlInGaAs толщиной 200 nm и расположенную в центре активную область на основе одной квантовой ямы AlInGaAs толщиной 7 nm. Исследования в непрерывном режиме показали, что разработанная гетероструктура имеет внутренние оптические потери $2\,\text{cm}^{-1}$ и внутренний квантовый выход 90 %. Для экспериментальных исследований были выбраны лазерные кристаллы с длиной резонатора 2 mm и шириной излучающей апертуры $100\,\mu$m. Исследования ватт-амперных характеристик лазерных диодов в непрерывном режиме генерации при комнатной температуре продемонстрировали пороговый ток 400 mA и оптическую мощность на линейном участке 1.5 W при токе 3 A. Для реализации режима

модуляции усиления был собран контур, который включал вертикальную сборку тиристорный ключ–лазерный диод и накопительный конденсатор емкостью 224 pF. Для питания и управляемого включения тиристорного ключа использовались внешний источник постоянного напряжения и генератор импульсов тока амплитудой 250 mA. Для демонстрации динамических характеристик тиристора как быстродействующего ключа использовался щуп с полосой частот 500 MHz. Полученные зависимости дают качественное представление о времени разряда конденсатора и длительности импульса, однако не позволяют дать количественную оценку параметров генерируемых импульсов тока. В дальнейшем данную задачу планируется решать с использованием более высокочастотных щупов, а также с привлечением методов численного моделирования для интерпретации экспериментальных результатов.

Экспериментальные исследования динамики лазерной генерации проводились с использованием разработанной ранее методики измерения динамики лазерной генерации с пространственным разрешением [4,10]. Использование подобной методики необходимо при исследовании мощных многомодовых полупроводниковых лазеров, так как невозможно собрать излучение из всей излучающей апертуры на фоточувствительной поверхности быстрых фотодетекторов из-за ее малых размеров. Потеря излучения из части излучающей апертуры может привести к искажению интегральной формы лазерного импульса, что связано с задержкой включения различных частей излучающей апертуры в мощных многомодовых лазерных диодах. Измерение интегральной формы лазерного импульса проводилось с использованием быстрого фотодетектора NewFocus 1444-50 (20 GHz) и стробоскопического осциллографа Agilent 86117A (50 GHz). Для расчета пиковой мощности проводились измерения средней мощности с использованием измерителя Ophir 3A-P-FS-12, откалиброванного для рабочего спектрального диапазона.

На рис. 1 показаны треки динамики напряжения на накопительном конденсаторе. Можно видеть, что скорость разряда на уровне 10–90 % составляет 700 ps, это может служить оценкой длительности импульса тока, генерируемого в контуре. Видно, что скорость включения тиристорного ключа незначительно увеличивается с ростом рабочего напряжения, что может быть связано с усилением вклада процесса ударной ионизации, как было показано в работе [11]. Наблюдаемая динамика включения тиристорного ключа может свидетельствовать о том, что для исследуемых диапазонов рабочих напряжений длительность импульса тока накачки изменяется также слабо.

Формы интегральных лазерных импульсов для рабочих напряжений 9–14 V показаны на рис. 2. При блокируемых напряжениях менее 9 V лазерной генерации не наблюдалось. Видно, что увеличение блокируемого напряжения сопровождается как ростом пиковой мощности первого короткого лазерного пика, так и

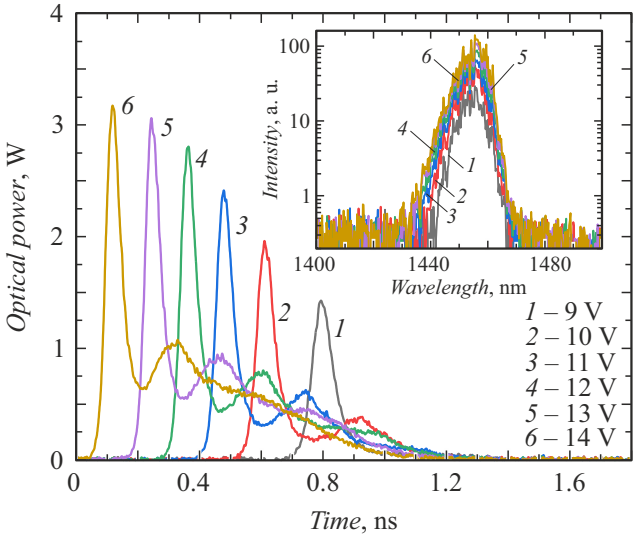

Рис. 2. Лазерные импульсы, полученные при различных рабочих напряжениях, для сборки тиристорный ключ–лазерный диод на основе гетероструктур AlInGaAs/InP. На вставке — спектры лазерной генерации при различных рабочих напряжениях. Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи.

ростом длительности более медленной части лазерного импульса. Так, при максимальном напряжении пиковая мощность достигает 3.2 W, а длительность первого пика 58 ps на уровне половины от максимума, при этом общая длительность медленной части лазерного импульса достигает 600 ps. Снижение блокируемого напряжения приводит к уменьшению амплитуды импульса тока накачки, что сопровождается как уменьшением пиковой мощности, так и сокращением длительности медленной части импульса. В результате для блокируемого напряжения 9 V был продемонстрирован импульс, включающий только быструю часть с пиковой мощностью 1.4 W и длительностью 75 ps. В общем случае видно, что увеличение амплитуды тока накачки без заметного увеличения его длительности сопровождается, с одной стороны, увеличением пиковой мощности и длительности медленной части лазерного импульса, а с другой — уменьшением длительности быстрой части импульса. Исследования спектров лазерной генерации показали, что независимо от формы лазерного импульса максимум спектра соответствует длине волны 1456 nm, при этом его форма изменяется несущественно (вставка к рис. 2).

Важной с практической точки зрения является работа на высоких частотах. На рис. 3 показаны формы лазерных импульсов, полученных при работе в режиме одиночного короткого пика для различных частот повторения, а также трек зарядки конденсатора при частоте 500 kHz. Видно, что изменение частоты в диапазоне 160–500 kHz не оказывает существенного влияния на режим работы созданной сборки, т. е. не наблюдается существенных изменений в длительности и пиковой мощ-

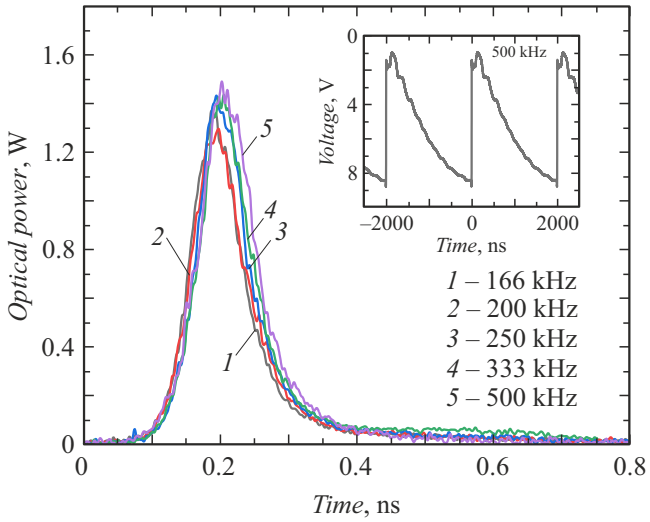

Рис. 3. Лазерные импульсы, полученные для рабочего напряжения 9 V и различных частот повторения. На вставке — трек зарядки накопительного конденсатора для частоты 500 kHz.

ности генерируемых импульсов. При этом предельная частота 500 kHz была ограничена переходом тиристорного ключа во включенное состояние. Как отмечалось в работе [12], это может быть связано с достижением током зарядки конденсатора значения тока удержания, что не позволяет тиристору выключиться после полного разряда накопительной емкости. Эта проблема может решаться за счет оптимизации дизайна тиристорной гетероструктуры, обеспечивающей повышение тока удержания без потери других характеристик, например за счет использования составной базовой области $n-p-n$-транзистора, включающей сильнолегированный слой [12].

В заключение можно отметить, что использование разработанных конструкций тиристорный ключ–лазерный диод, основанных полностью на гетероструктурах AlInGaAs/InP, позволяет создавать источники мощных лазерных импульсов субнаносекундной длительности, обеспечивающие пиковую оптическую мощность 1.4 W в режиме генерации одиночного короткого импульса шириной 75 ps. В дальнейшем развитие в сторону увеличения пиковой мощности и частоты повторения возможно за счет оптимизации ширины излучающей апертуры лазерной части, а также оптимизации конструкции тиристорной части. Кроме того, использование только гетероструктур на основе AlInGaAs/InP позволяет говорить о возможности создания в будущем полностью интегральных структур, объединяющих функции токового ключа и лазерного источника.

Финансирование работы

Разработка, изготовление и исследования экспериментальных образцов выполнены в рамках проекта Российского научного фонда № 22-79-10159. Разработка постростовых операций выполнена в рамках государственного задания ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] 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, Chin. Opt. Lett., **22** (7), 072501 (2024). DOI: 10.3788/COL202422.072501

[2] B. Ryvkin, E.A. Avrutin, J.T. Kostamovaara, J. Lightwave Technol., **27** (12), 2125 (2009). DOI: 10.1109/JLT.2008.2009075

[3] J.T. Kostamovaara, J. Huikari, L.W. Hallman, I. Nissinen, J. Nissinen, H. Rapakko, E.A. Avrutin, B.S. Ryvkin, IEEE Photon. J., **7** (2), 7800215 (2015). DOI: 10.1109/JPHOT.2015.2402129

[4] 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**, 130 (2025). DOI: 10.3390/PHOTONICS12020130

[5] J. Piprek, J. White, A. Springthorpe, IEEE J. Quantum Electron., **38** (9), 1253 (2002). DOI: 10.1109/JQE.2002.802441

[6] L.W. Hallman, B.S. Ryvkin, E.A. Avrutin, J.T. Kostamovaara, Electron. Lett., **57** (23), 891 (2021). DOI: 10.1049/ELL2.12298

[7] T.M. Diallo, C. Rodriguez, E. Desfonds, J.F. Boucher, M.S. Rouifed, Proc. SPIE, **13345**, 133450P (2025). DOI: 10.1117/12.3041973

[8] L.A. Coldren, S.W. Corzine, M.L. Mashanovitch, *Diode lasers and photonic integrated circuits* (John Wiley & Sons, 2012).

[9] N. Ammouri, H. Christopher, J. Fricke, A. Ginolas, A. Liero, A. Maassdorf, H. Wenzel, A. Knigge, Electron. Lett., **59** (1), 1 (2022). DOI: 10.22541/AU.166520352.25121396/V1

[10] S.O. Slipchenko, A.A. Podoskin, V.S. Golovin, N.A. Pikhtin, P.S. Kop'ev, IEEE Photon. Technol. Lett., **33** (1), 7 (2021). DOI: 10.1109/LPT.2020.3040063

[11] А.А. Подоскин, И.В. Шушканов, С.О. Слипченко, Н.А. Пихтин, Т.А. Багаев, В.Н. Светогоров, И.В. Яроцкая, М.А. Ладугин, А.А. Мармалюк, В.А. Симаков, ФТП, **58** (3), 161 (2024). DOI: 10.61011/FTP.2024.03.58408.6404 [A.A. Podoskin, I.V. Shushkanov, S.O. Slipchenko, N.A. Pikhtin, T.A. Bagaev, V.N. Svetogorov, I.V. Yarotskaya, M.A. Ladugin, A.A. Marmalyuk, V.A. Simakov, Semiconductors, **58** (3), 155 (2024). DOI: 10.61011/SC.2024.03.58841.6404].

[12] 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 в ЖТФ, **50** (4), 43 (2024). DOI: 10.61011/PJTF.2024.04.57101.19771 [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, Tech. Phys. Lett., **50** (2), 81 (2024). DOI: 10.61011/TPL.2024.02.57993.19771].