

07 Компактные источники мощных лазерных импульсов (940 nm) наносекундной длительности на основе вертикальных сборок полупроводниковый лазер–тиристорный ключ

© С.О. Слипченко¹, А.А. Подоскин¹, И.В. Шушканов¹, А.Э. Ризаев¹, М.И. Кондратов¹,
Н.А. Рудова¹, В.А. Стрелец¹, Н.В. Шувалова¹, А.Е. Гришин¹, Т.А. Багаев², М.А. Ладугин²,
А.А. Мармалюк², В.А. Симаков², Н.А. Пихтин¹

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

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

E-mail: SergHPL@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 24 декабря 2024 г.

В окончательной редакции 21 февраля 2025 г.

Принято к публикации 24 февраля 2025 г.

Разработаны и исследованы источники мощных лазерных импульсов наносекундной длительности на основе вертикальных сборок полупроводниковый лазер–тиристорный ключ, излучающих на длине волны 940 nm. Продемонстрирована возможность повышения пиковой мощности до 45.6 W и сокращения длительности импульса до 2.25 ns при использовании монолитной конструкции излучающей апертуры с шириной 400 μm . Для разработанных источников удалось сократить неоднородность включения лазерной генерации вдоль излучающей апертуры до 50–80 ps.

Ключевые слова: тиристор, токовый ключ, вертикальная сборка, полупроводниковый лазер.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.11.60479.20235

Компактные источники коротких лазерных импульсов востребованы для ряда практических приложений. Сегодня такие источники активно используются для создания автомобильных лидаров, обеспечивающих построение трехмерной картины окружающего пространства. Это позволяет сформировать требования к излучательным характеристикам. Использование кремния для создания фотодетекторов позволяет сделать блок регистрации доступным с точки зрения стоимости по сравнению с детекторами на основе InGaAs, что определяет рабочий спектральный диапазон оптического источника $\sim 850\text{--}950\text{ nm}$. Другими важными характеристиками являются длительность и пиковая мощность лазерных импульсов. Длительность оптического импульса определяет разрешающую способность системы. Однако эффективные приемники для регистрации маломощных оптических сигналов субнаносекундной длительности характеризуются малым размером приемной площадки, что ограничивает возможность регистрации маломощных оптических сигналов. В этом случае оптические импульсы длительностью в единицы наносекунд являются компромиссным решением. При этом для повышения дальности и уровня сигнал–шум требуется повышать пиковую мощность лазерного импульса. В работах [1,2] для излучателей в виде сборок токовых ключей и чипов на основе гетероструктуры с тремя лазерными частями и двумя туннельными $p\text{--}n$ -переходами были продемонстрированы длительности оптических импульсов 1.5 и 1.92 ns. Полная выходная оптическая мощность достигала 135 и 184 W соответственно, а в расчете на одиночную лазерную гетероструктуру — 45 и 61 W

соответственно. Однако использованные для генерации импульсов тока накачки токовые ключи требовали высокого напряжения питания — до 300 V. В работе [3] длительность импульса была снижена до 1.1 ns, оптическая мощность с одной лазерной части превышала 30 W, при общей мощности излучателя 92 W. Напряжение питания снизилось, но составляло значительные 110 V. В работе [4] было продемонстрировано, что использование GaAs/AlGaAs тиристорных токовых ключей в вертикальной сборке с лазерным излучателем позволило получить лазерные импульсы длительностью 3 ns с общей пиковой мощностью 33 W с одиночной лазерной части. Напряжение питания при этом составило 55 V, что демонстрирует перспективность использования подобных токовых ключей для создания импульсных источников излучения. Однако нерешенным остается вопрос оптимизации конструкции излучающей апертуры полупроводникового лазера, обеспечивающей максимальную мощность при выбранной конструкции токового ключа. Было показано, что для лазерных импульсов наносекундной длительности конструкция излучающей апертуры оказывает существенное влияние на динамику лазерной генерации из-за возникновения эффекта неоднородного включения [4–6]. В частности, при формировании излучающей апертуры оптически не связанными волноводами возникает как неоднородность включения, которая достигает 160 ps [4], так и неоднородность интенсивности между элементами апертуры [4,5]. При использовании монолитных сверхшироких излучающих апертур (например, 800 μm) неоднородность включения только усиливается [6]. Таким образом, предлагаемая

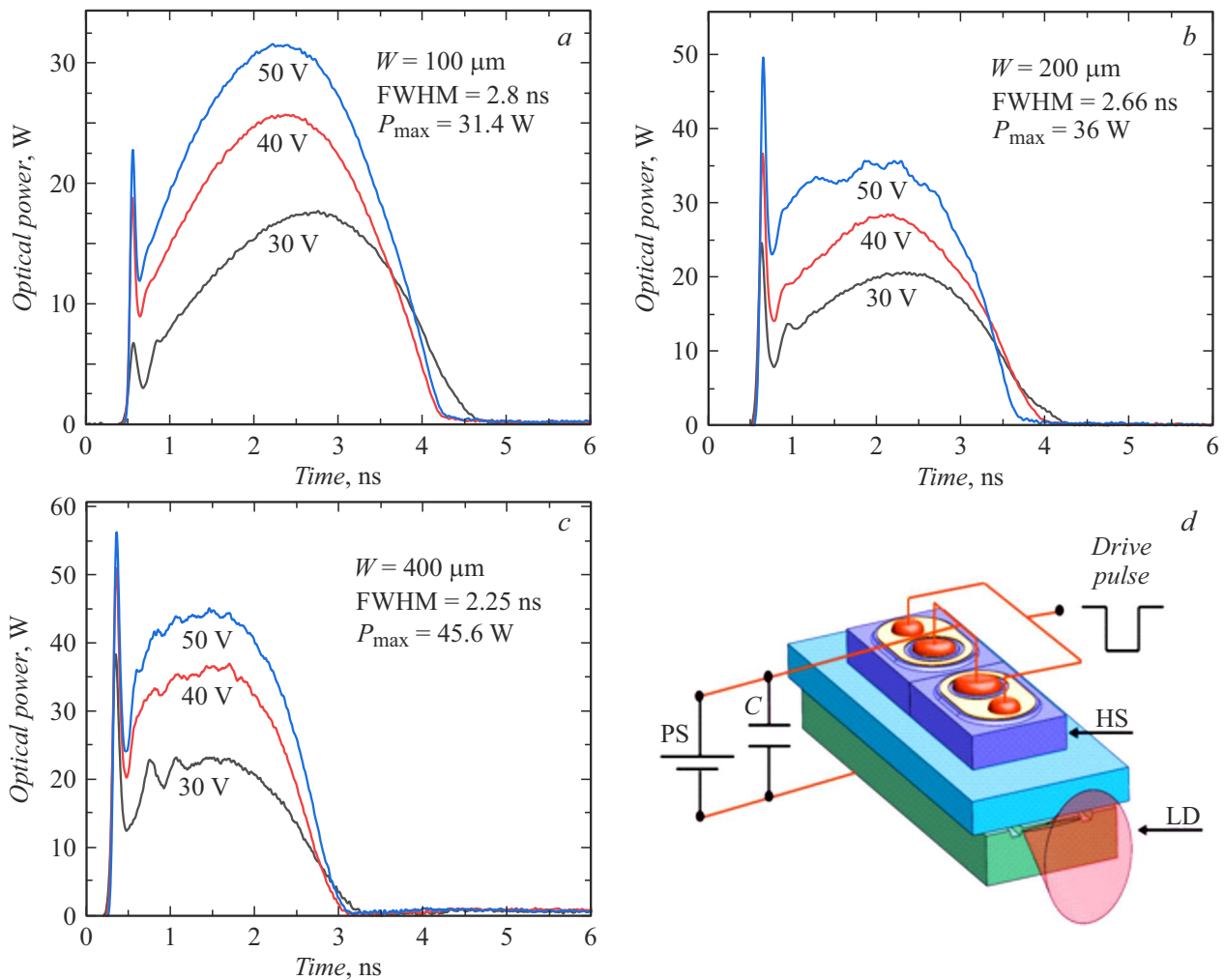


Рис. 1. Лазерные импульсы для различных значений рабочих напряжений, генерируемые вертикальными сборками с шириной излучающей апертуры лазерной части 100 (a), 200 (b) и 400 μm (c). На фрагменте d показано схематическое изображение экспериментального источника лазерных импульсов, включающего в себя лазерный диодный чип (LD), на котором установлен токовый ключ на основе гетеротристора (HS), накопительный конденсатор (C), источник питания (PS) и источник импульсов управления.

работа направлена на создание компактных источников мощных лазерных импульсов наносекундной длительности на длине волны 940 nm на основе вертикальныхборок полупроводниковый лазер–тиристорный ключ, а также на исследование влияния ширины монолитной излучающей апертуры полупроводникового лазера на мощностные и динамические характеристики при создании импульсного источника.

Схематическое изображение экспериментального источника лазерных импульсов показано на вставке к рис. 1, d. Он представляет собой вертикальную сборку, состоящую из тиристорного ключа и полупроводникового лазера. Тиристорные ключи изготавливались на основе полупроводниковой гетероструктуры, выращенной методом газовой фазной эпитаксии из металлоорганических соединений (МОС-гидридной эпитаксии) на подложке $n\text{-GaAs}$ и включающей следующие слои:

$n\text{-Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ ($0.1 \mu\text{m}$, $n = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$), $p\text{-GaAs}$ ($0.1 \mu\text{m}$, $p = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$), $p\text{-GaAs}$ ($4 \mu\text{m}$, $p = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$), $n\text{-GaAs}$ ($1 \mu\text{m}$, $n = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$), $p\text{-GaAs}$ ($0.5 \mu\text{m}$, $p = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$). Конструкция тиристорных ключей включала анодный контакт, сформированный к верхнему слою $p\text{-GaAs}$, электрод управления, сформированный на слое $n\text{-GaAs}$, и катодный контакт, сформированный на подложке. Лазерная гетероструктура была выращена методом МОС-гидридной эпитаксии на подложке $n\text{-GaAs}$ и включала следующие слои: $n\text{-эмиттер}$ на основе $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$, $p\text{-эмиттер}$ на основе $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$, волновод толщиной $2 \mu\text{m}$ на основе $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ и квантовую яму InGaAs , размещенную на расстоянии $0.8 \mu\text{m}$ от $p\text{-эмиттера}$. Излучающая апертура полупроводниковых лазеров была сформирована меза-канавками, при этом в экспериментальных кристаллах ширина излучающей апертуры составила 100, 200 и 400 μm . Для всех кристаллов длина резонатора

составила 2 мм. Далее с использованием вертикальных сборок формировался контур тока полупроводниковый лазер—тиристорный ключ—конденсатор. Номинал конденсатора составил 1.5 нФ, что, как показано далее, обеспечивает длительности оптических импульсов в наносекундном диапазоне. Для управляемого включения тиристорного ключа использовались импульсы тока амплитудой 200 мА. Исследования динамики лазерной генерации проводились для различных напряжений заряда внешнего конденсатора (рабочих напряжений), которые обеспечивают различные амплитуды импульсов тока накачки полупроводникового лазера, генерируемых в сформированном контуре. На рис. 1 показаны лазерные импульсы для различных значений рабочих напряжений, генерируемые разработанными вертикальными сборками (при построении было выбрано общее начало оптических импульсов для каждой серии образцов). На переднем фронте оптических импульсов наблюдался характерный переходный процесс в виде короткого и мощного импульса с последующими затухающими колебаниями. Данный переходный процесс является типичным проявлением динамики лазерной генерации как реакции на резкое изменение тока накачки и концентрации носителей заряда в активной области [7]. Динамические характеристики этого определяются скоростью изменения условий накачки и параметрами конкретного лазерного резонатора. Также видно, что ширина излучающей апертуры оказывает заметное влияние на динамику лазерной генерации. Изменения в наблюдаемых длительностях оптических импульсов при увеличении напряжения питания объясняются следующими факторами: 1) изменяется скорость разрядки питающего конденсатора (что связано в том числе и с изменением динамики работы тиристорного токового ключа при изменении напряжения питания); 2) изменяется амплитуда токового импульса, и соответственно изменяется длительность части импульса, для которой мгновенные значения тока накачки превосходят порог лазерной генерации; 3) динамика включения лазерной генерации и ее задержка относительно фронта тока накачки зависят от крутизны этого фронта, которая также меняется с изменением напряжения питания. Таким образом, формируется достаточно сложный характер изменения длительности оптического импульса с ростом напряжения питания. Образцы лазеров с шириной апертуры 100 мкм демонстрируют наименьшую пиковую мощность и наибольшую длительность оптического импульса, которые составляют 31.4 Вт и 2.8 нс соответственно. Расширение излучающей апертуры приводит к сокращению длительности и повышению пиковой мощности оптических импульсов: 2.66 нс и 36 Вт для 200 мкм, 2.25 нс и 45.6 Вт для 400 мкм. Снижение длительности импульса и повышение пиковой мощности может быть связано с влиянием таких факторов, как сопротивление, диффузионная емкость и особенности включения лазерной генерации в режиме модуляции

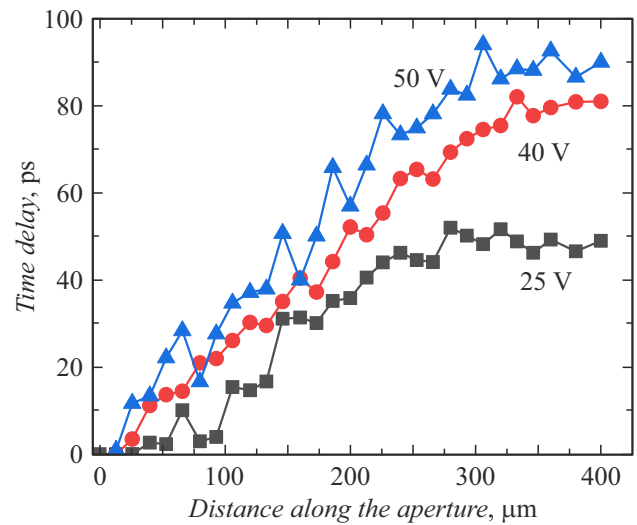


Рис. 2. Распределения времени задержки включения лазерной генерации вдоль излучающей апертуры, измеренные для различных значений рабочих напряжений, для импульсного источника с шириной излучающей апертуры 400 мкм.

усиления. Здесь мы можем провести только качественный анализ данных факторов, а количественная оценка вклада каждого фактора потребует как дополнительного численного моделирования, так и проведения экспериментов, что выходит за рамки данного короткого сообщения. Повышение сопротивления контура тока при сужении ширины излучающей апертуры приводит как к увеличению длительности импульса тока, так и к снижению пикового тока за счет увеличения времени разряда конденсатора. Это обусловлено увеличением постоянной RC , характеризующей динамику контура. Диффузионная емкость структуры связана с накоплением избыточных носителей заряда в волноводе [8,9]. В результате с повышением плотности тока накачки будет увеличиваться компонента тока, отвечающая за зарядку диффузионной емкости, что приводит к снижению пикового тока накачки активной области для структуры с более узкой излучающей апертурой. При неизменной длине резонатора расширение излучающей апертуры приводит к снижению плотности тока накачки. В результате для накопления пороговой концентрации носителей заряда в активной области потребуется больше времени для лазеров, накачиваемых меньшей плотностью тока. Таким образом, время задержки включения лазерной генерации будет больше для лазеров с более широкой излучающей апертурой, что приводит к уменьшению длительности лазерного импульса.

Следующим важным фактором, характеризующим динамику включения лазерной генерации, является время задержки включения вдоль излучающей апертуры. На рис. 2 показаны распределения времени задержки включения лазерной генерации вдоль излучающей апертуры, измеренные для различных значений рабочих напряже-

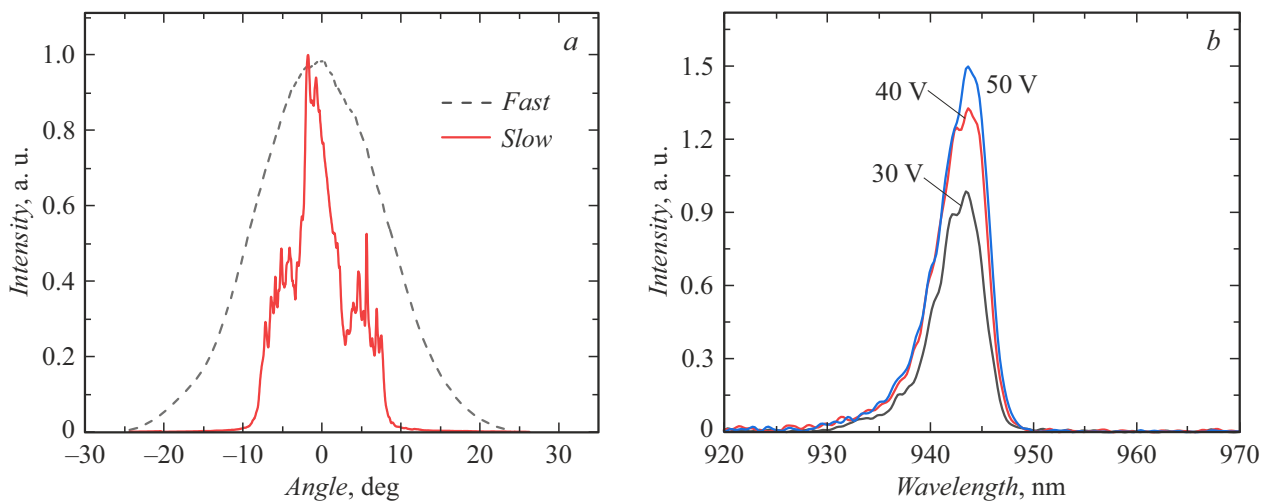


Рис. 3. Типичные распределения интенсивности перпендикулярного (по быстрой оси) и параллельного (по медленной оси) дальнего поля (а) и спектры лазерной генерации для импульсных источников с шириной излучающей апертуры $400\ \mu\text{m}$ (b).

ний. Видно, что лазерная генерация начинается с одного края излучающей апертуры. Включение противоположного края происходит с задержкой, величина которой составляет 50, 90 и 80 ps для рабочих напряжений 25, 40 и 50 V соответственно. Полученные значения заметно меньше неоднородности для излучающих апертур шириной $800\ \mu\text{m}$ [6], которые достигали 300 ps.

На рис. 3 показаны типичные распределения перпендикулярного и параллельного дальнего поля, а также спектры лазерной генерации для импульсных источников с шириной излучающей апертуры $400\ \mu\text{m}$. Измерения показали, что в исследуемом диапазоне рабочих напряжений (токов накачки) поля и спектральные характеристики сохраняют свою форму.

В заключение можно отметить, что ширина излучающей апертуры является критически важным фактором при создании источников мощных лазерных импульсов наносекундной длительности. Ее увеличение позволяет улучшить все основные излучательные и мощностные характеристики: сократить длительность лазерного импульса и повысить пиковую оптическую мощность. Кроме того, использование именно монолитных конструкций позволяет повысить однородность включения, как с точки зрения интенсивности, так и с точки зрения времени задержки включения. В результате оптимизации конструкции излучающей апертуры удалось существенно повысить пиковую мощность со значения 33 W, продемонстрированного в [4], до 45.6 W в представленной работе.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] A. Prudaev, S.N. Vainshtein, M.G. Verkholeto, V.L. Oleinik, V.V. Kopyev, *IEEE Trans. Electron. Dev.*, **68** (1), 57 (2021). DOI: 10.1109/TED.2020.3039213
- [2] S. Vainshtein, V. Zemlyakov, V. Egorkin, A. Maslevtsov, A. Filimonov, *IEEE Trans. Power Electron.*, **34** (4), 3689 (2019). DOI: 10.1109/TPEL.2018.2853563
- [3] 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
- [4] 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
- [5] A.A. Подоскин, И.В. Шушканов, А.Э. Ризаев, В.А. Крючков, А.Е. Гришин, Н.А. Пиктин, *ФТП*, **58** (1), 42 (2024). DOI: 10.61011/FTP.2024.01.57634.5766 [A.A. Podoskin, I.V. Shushkanov, A.E. Rizaev, V.A. Krychkov, A.E. Grishin, N.A. Pikhtin, *Semiconductors*, **58** (1), 38 (2024). DOI: 10.61011/SC.2024.01.58120.5766]
- [6] 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
- [7] L.A. Coldren, S. Corzine, *Diode lasers and photonic integrated circuits* (Wiley, N.Y., 1995).
- [8] O. Soboleva, V. Zolotarev, V. Golovin, S. Slipchenko, N. Pikhtin, *IEEE Trans. Electron. Dev.*, **67** (11), 4977 (2020). DOI: 10.1109/TED.2020.3024353
- [9] J. Piprek, *Opt. Quantum Electron.*, **51**, 60 (2019). DOI: 10.1007/s11082-019-1776-1.