

# Гибридные сборки тиристорный ключ-полупроводниковый лазер на основе гетероструктур Al-In-Ga-As-P/InP для мощных импульсных источников лазерного излучения (1400–1500 нм)

© А.А. Подоскин<sup>1</sup>, И.В. Шушканов<sup>1</sup>, С.О. Слипченко<sup>1</sup>, Н.А. Пихтин<sup>1</sup>, Т.А. Багаев<sup>1</sup>, В.Н. Светогоров<sup>2</sup>, Ю.Л. Рябоштан<sup>2</sup>, М.А. Ладугин<sup>2</sup>, А.А. Мармалюк<sup>2</sup>, В.А. Симаков<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> Акционерное общество „Научно-исследовательский институт „Полус“ им. М.Ф. Стельмаха“, 117342 Москва, Россия

E-mail: podoskin@mail.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 25 апреля 2024 г.

В окончательной редакции 3 мая 2024 г.

Принята к публикации 6 мая 2024 г.

Разработаны и исследованы конструкции гибридных источников лазерного излучения на основе тиристорных токовых ключей и лазерных диодов. Гетероструктуры тиристорных токовых ключей и лазерных диодов были созданы с использованием технологии осаждения металлоорганических соединений из газовой фазы в системах твердых растворов Al-In-Ga-As-P/InP. Для разработанных источников была продемонстрирована пиковая мощность 20 Вт при длительности импульса 65 нс и рабочем напряжении 15 В. Минимальное время задержки включения лазерной генерации относительно начала импульса тока управления составило 10 нс при амплитуде импульса тока 280 мА.

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

DOI: 10.61011/FTP.2024.03.58409.6405

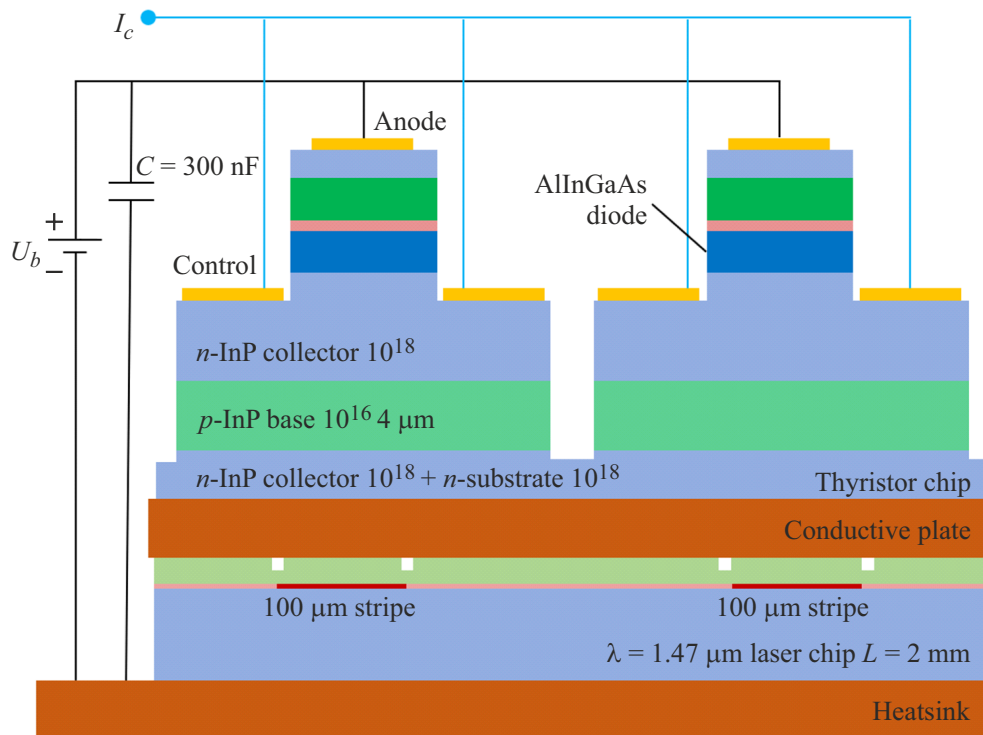
## 1. Введение

В настоящее время импульсные источники лазерного излучения в спектральном диапазоне 1400–1600 нм востребованы для решения задач дальнометрии, создания ЛИДАРов (Light Detection and Ranging) для беспилотных транспортных средств [1,2]. Это обусловлено двумя факторами: (1) в указанном спектральном диапазоне заметно ниже солнечное фоновое излучение, (2) данный спектральный диапазон считается безопасным для глаз [1,3]. Кроме этого, активно развивается направление различных медицинских приложений. Импульсные полупроводниковые лазеры наиболее доступны для решения подобных задач, что связано с малыми габаритами, высокой эффективностью, по сравнению с волоконными лазерами, где требуется дополнительный каскад оптической накачки, возможностью создания многоэлементныхборок, обеспечивающих повышение пиковой мощности. Для генерации импульсного излучения полупроводниковыми лазерами обычно используют импульсные источники на основе транзисторных ключей. На основе подобных решений были продемонстрированы импульсные источники в спектральном диапазоне 1400–1500 нм с пиковой мощностью ~ 20 Вт при длительностях импульсов десятки наносекунд [4–8]. Дальнейшее развитие подобных источников может быть связано с разработкой новых типов токовых ключей, а также интеграцией функций токового ключа и лазерной структуры в одном кристалле. Были предприняты попытки теоретического [9] и экспериментального [10] исследова-

ния токовых ключей тиристорного типа на основе гетероструктур InP/InGaAsP. Были продемонстрированы возможности создания токовых ключей, обеспечивающих наносекундные времена переходных процессов, возможности работы при низких блокирующих напряжениях и токах управления [10]. Однако до настоящего времени не проводились прямые исследования характеристик данных ключей для условий, когда в качестве нагрузки используются полупроводниковые лазеры, работающие в спектральном диапазоне 1400–1500 нм. В статье проведен сравнительный анализ экспериментальных излучательных характеристик импульсных полупроводниковых лазеров, а также гибридныхборок тиристорный ключ-лазерный диод, созданных на основе гетероструктур Al-In-Ga-As-P/InP. Использование именно гетероструктур Al-In-Ga-As-P/InP позволит в дальнейшем перейти к созданию полностью интегральных конструкций подобных источников лазерного излучения.

## 2. Экспериментальные образцы

Для создания экспериментальных образцов лазерных диодов и тиристорных ключей использовались гетероструктуры Al-In-Ga-As-P/InP, выращенные методом МОС-гидридной эпитаксии (Metal Organic Chemical Vapor Deposition — МОСVD). Лазерная гетероструктура включала широкозонные эмиттеры *n*- и *p*-типов проводимости на основе эпитаксиальных слоев InP. На границе эмиттеров и волновода формировались потенциальные барьеры AlInAs для подавления утечки носителей заряда



**Рис. 1.** Схематическое изображение образца гибридной сборки тиристорного ключа и лазерного кристалла на общем теплоотводе (приведен вид с излучающего торца лазерного кристалла, чип тиристора — развернут для удобства отображения).  $C$  — питающая емкость,  $U_b$  — напряжение питания,  $I_c$  — ток управления,  $L$  — длина резонатора лазерного кристалла. (Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи).

из волновода в широкозонные эмиттеры. Волноводный слой был выполнен на основе эпитаксиального слоя AlInGaAs толщиной 0.5 мкм. В центре волноводного слоя располагались две квантовые ямы AlInGaAs толщиной по 6 нм каждая. Состав квантовых ям выбирался для обеспечения люминесценции из спектрального диапазона 1400–1600 нм. Из выращенной гетероструктуры изготавливались лазеры полостковой конструкции с резонатором Фабри-Перо и шириной излучающей апертуры 100 мкм. Для экспериментальных исследований излучательных характеристик были подготовлены два типа образцов. Первый тип образцов — лазерные кристаллы с длиной резонатора 1500–3000 мкм — использовались для исследования оптических свойств гетероструктуры и тестирования излучательных характеристик отдельных кристаллов полупроводниковых лазеров. Для этого каждый кристалл спаивался полоском вниз на медный теплоотвод.

Для исследования излучательных характеристик также были разработаны образцы второго типа — гибридные сборки „тиристорный ключ–лазерный диод“ (рис. 1). Гетероструктуру тиристорного ключа можно представить в виде последовательно включенных  $n-p-n$  транзисторной части и  $n-p$  светодиодной части. Транзисторная часть была реализована на основе слоев InP. При этом слои  $n$ -InP были легированы кремнием до

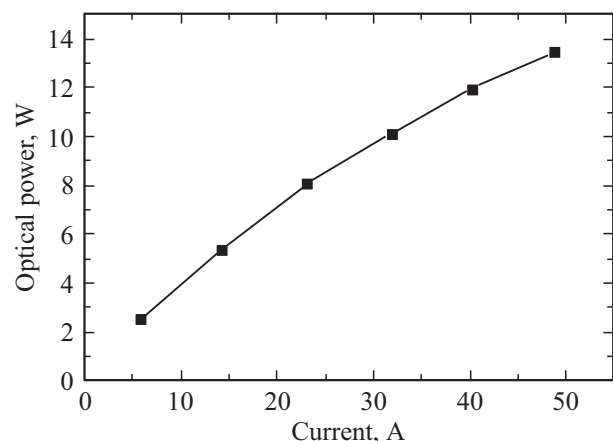
$10^{18} \text{ см}^{-3}$ , а слой  $p$ -InP базы был легирован цинком до  $10^{16} \text{ см}^{-3}$  и имел толщину 4 мкм. Светодиодная часть включала широкозонные эмиттеры  $n$ -InP и  $p$ -InP, легированные до  $10^{18} \text{ см}^{-3}$  кремнием и цинком соответственно, между которыми располагался волновод AlInGaAs ( $E_g = 1.24 \text{ эВ}$ ) толщиной 0.4 мкм. Для создания кристаллов тиристорного ключа из разработанной гетероструктуры были изготовлены трехэлектродные конструкции. Анодный контакт формировался к слою  $p$ -InP-эмиттера транзисторной части, катодный контакт формировался к  $n$ -InP-подложке, которая являлась продолжением  $n$ -InP-эмиттера транзисторной части, а контакт управления формировался к слою  $n$ -InP-коллектора транзисторной части. Анодный контакт имел полосковую геометрию с шириной 200 мкм, а его длина определялась длиной изготавливаемого кристалла тиристорного ключа. Контакты управления располагались с двух сторон вдоль анодного контакта. На основе предложенных тиристорных ключей и лазерных кристаллов изготавливались гибридные сборки. Принципиальная конструкция гибридной сборки (рис. 1) аналогична описанной в работе [11]. В разработанных гибридных сборках кристалл лазерного диода имел излучающую апертуру на основе двух областей с шириной по 100 мкм каждая, разделенных непрокачиваемой пассивной областью шириной 300 мкм. В проводимых экспериментальных исследованиях длина

резонатора лазерного диода составляла 2000 мкм. Кристалл тиристорного ключа включал два субэлемента, которые монолитно располагались на общей подложке  $n$ -InP и были разделены мезоканавой. Каждый субэлемент имел свой анодный электрод и контакты управления, при этом катод для субэлементов был общий. В разработанной гибридной сборке кристалл лазерного диода монтировался на медный теплоотвод  $n$ -контактом вниз. Далее на  $p$ -контакт лазерного диода монтировался кристалл тиристорного ключа. Для экспериментальных исследований излучательных характеристик параллельно с гибридной сборкой включался конденсатор  $C$  номиналом 300 нФ, который имел общий контакт с катодным и анодными контактами.

### 3. Результаты экспериментальных исследований

В рамках первой части работы была проведена характеристика оптических свойств лазерной гетероструктуры. Для этого в непрерывном режиме, при постоянной температуре теплоотвода 25°C были проведены измерения ватт-амперных характеристик полупроводниковых лазеров с различной длиной резонатора. Полученные экспериментальные значения внешней дифференциальной квантовой эффективности позволили определить внутренние оптические потери и внутренний квантовый выход, которые составили  $2.9 \text{ см}^{-1}$  и 96% соответственно. Оценка внутренних оптических потерь и внутреннего квантового выхода проводилась в соответствии с методикой, описанной в работе [12]. Повышенное значение внутренних оптических потерь  $2.9 \text{ см}^{-1}$  связано с использованием конструкции с узким волноводом, которая, с одной стороны, обеспечивает высокий фактор оптического ограничения в активной области и позволяет получать высокое модальное усиление, что важно для создания лазеров с коротким резонатором, но с другой — ограничивает внешнюю дифференциальную квантовую эффективность стимулированного излучения при использовании длинных резонаторов. В дальнейшем планируется провести оптимизацию конструкции лазерной гетероструктуры для решения задачи повышения внешней дифференциальной квантовой эффективности стимулированного излучения и пиковой оптической мощности. Для исследования импульсных характеристик использовался разработанный в нашей лаборатории внешний источник накачки. Типичные зависимости пиковой оптической мощности от пикового тока накачки для кристалла лазерного диода с длиной резонатора 2000 мкм и шириной излучающей апертуры 100 мкм показаны на рис. 2.

Видно, что отклонение от линейности проявляется уже начиная с токов  $> 15 \text{ А}$ . Причина подобного поведения связана с ростом внутренних оптических потерь за счет накопления носителей заряда в области волновода и снижением внутреннего квантового выхода, что может



**Рис. 2.** Зависимость пиковой оптической мощности от пикового тока при накачке импульсами длительностью 100 нс и частотой 1 кГц для одиночного полупроводникового лазера с длиной резонатора 2 мм, шириной излучающей апертуры 100 мкм. Температура теплоотвода 25°C.

быть связано с паразитной безызлучательной и спонтанной рекомбинацией в различных слоях гетероструктуры. Данные факторы могут существенно усиливаться за счет эффектов пространственного выжигания носителей заряда вдоль резонатора. Анализ подобных эффектов требует использования двухмерных моделей, как, например, в работе [13].

Вторая часть работы была посвящена исследованиям электрооптических характеристик гибридныхборок тиристорный ключ-лазерный диод (далее гибридная сборка). Принцип включения гибридныхборок может быть описан в рамках следующих этапов. На первом этапе происходит зарядка конденсатора от внешнего источника напряжения до требуемого стационарного значения рабочего напряжения. В рамках данной работы диапазон рабочих напряжений  $U_b$  составлял 5–15 В. Для перевода тиристорного ключа во включенное состояние на втором этапе к электродам управления подавался импульс тока. Третий этап связан с переходом тиристорного ключа во включенное состояние с низким сопротивлением, что сопровождается разрядкой емкостного накопителя. В конце третьего этапа, когда емкостный накопитель разрядится до состояния, которое не позволяет поддерживать ток больше, чем ток удержания, тиристорный ключ переходит в закрытое состояние. Первая часть экспериментальных исследований была связана с измерениями характеристик задержек включения гибридной сборки. На рис. 3 показаны характерные времена задержек включения лазерной генерации относительно начала импульса тока управления, полученные для различных амплитуд импульса тока управления при выбранном значении рабочего напряжения. Минимальная задержка включения достигает 10 нс и обеспечивается при амплитуде тока управления 280 мА и рабочего напряжения 15 В.

Стоит заметить, что времена задержек включения < 100 нс обеспечиваются токами управления от 30 до 100 мА, что демонстрирует эффективность включения при малосигнальном управлении. Однако если задержка включения не является критической, то эффективное включение также возможно импульсами тока амплитудой до 6 мА, при этом задержка возрастает до ~ 650 нс. Видно, что снижение рабочего напряжения приводит к смещению всей зависимости в область больших времен задержек. При изменении рабочего напряжения не наблюдается заметных искажений в характере получаемых зависимостей. Это может свидетельствовать о том, что включение обеспечивается одним набором механизмов. Важно отметить, что изменение рабочего напряжения существенно сказывается на времени задержки включения в области минимальных амплитуд импульсов тока управления. Так, снижение рабочего напряжения с 15 до 5 В при амплитуде импульса тока управления 10 мА приводит к увеличению задержки включения с 345 до 645 нс, а для амплитуды тока управления 280 мА задержка включения увеличивается с 10 до 13 нс.

Далее проводились исследования временной динамики электрооптических характеристик гибридных сборок. Лазерные импульсы, излучаемые кристаллом гибридной сборки, показаны на рис. 4, а, а зависимости напряжения на емкостном накопителе во время его разряда через включенный тиристорный токовый ключ показаны на рис. 4, б. Динамика напряжения измерялась с использованием щупа и осциллографа с полосами частот 200 МГц и 1 ГГц соответственно.

Для анализа динамики напряжения было проведено дифференцирование экспериментальных зависимостей, показанных на рис. 4, б. Анализ проводился в рамках дифференциального уравнения, описывающего связь то-

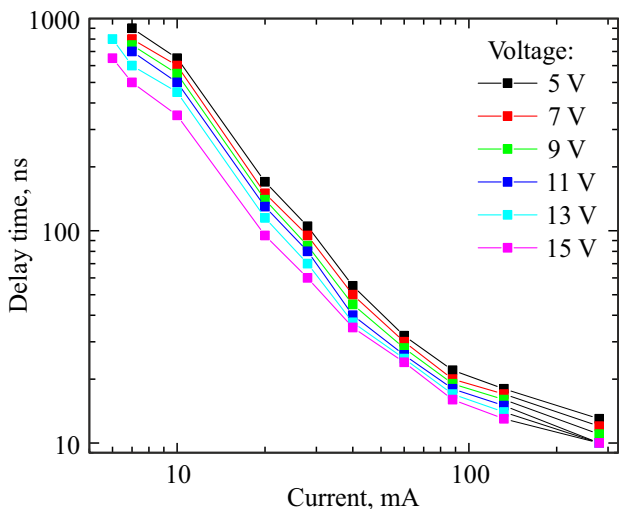


Рис. 3. Зависимости времен задержек включения от амплитуды импульса тока управления для рабочих напряжений в диапазоне 5–15 В гибридной сборки на основе тиристорного ключа и лазерного диода. Температура теплоотвода 25°С.

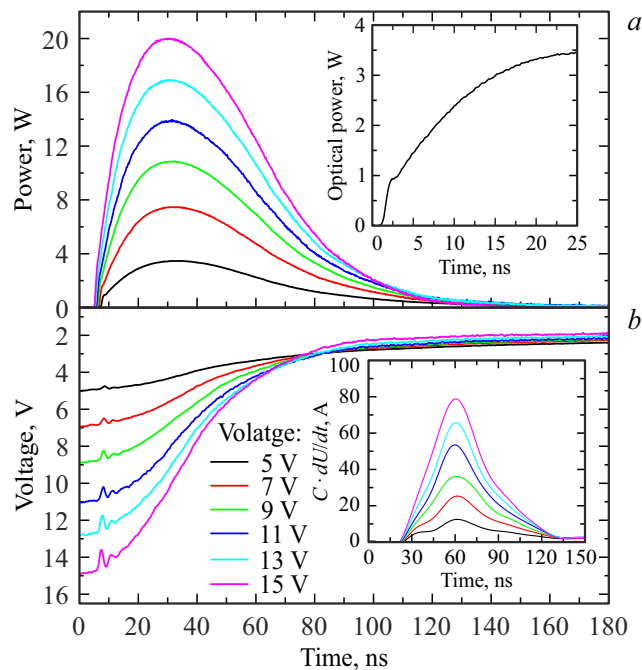
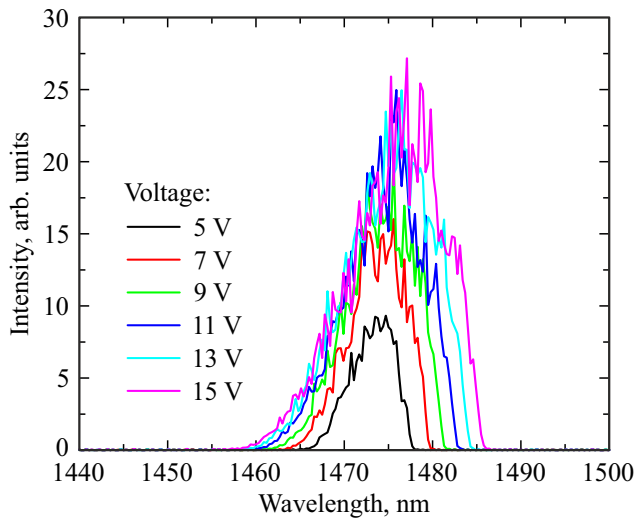


Рис. 4. Динамика (а) выходной оптической мощности и (б) напряжения на емкостном накопителе во время его разряда для различных напряжений питания, полученные для гибридной сборки на основе тиристорного ключа и лазерного диода. Температура теплоотвода 25°С. На вставке а показана передняя часть лазерного импульса для рабочего напряжения 5 В, на вставке б показаны расчетные импульсы тока.

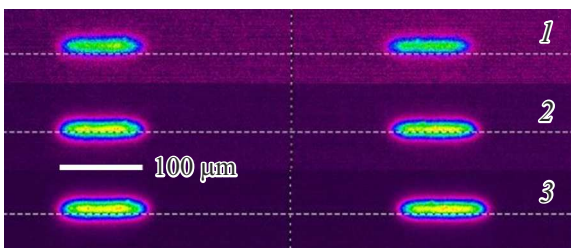
ка и напряжения при разрядке конденсатора [14]:

$$I = C \cdot dU/dt,$$

где  $I$  — ток через конденсатор (А),  $U$  — напряжение на конденсаторе (В),  $C$  — емкость конденсатора (Ф). В приближении постоянной емкости и несущественном вкладе индуктивности данная величина может быть использована для оценки динамики тока в контуре гибридной сборки [15]. Упрощение несущественности вклада от индуктивности контура может быть обосновано отсутствием отрицательных осцилляций напряжения [15]. Проведенный анализ позволяет говорить об оценочном значении максимальной амплитуды тока 80 А для разработанного контура гибридной сборки (см. вставку на рис. 4, б). При этом наблюдается близкая к линейной зависимость оценочной амплитуды тока от рабочего напряжения. Из рис. 4, а видно, что достигаемая пиковая оптическая мощность для рабочего напряжения 15 В составила 20 Вт, а длительность лазерного импульса на уровне половины от максимума интенсивности — 65 нс. Важно отметить, что продемонстрированная пиковая оптическая мощность 20 Вт для гибридной сборки была сравнима с пиковой оптической мощностью, демонстрируемой отдельным лазерным кристаллом, накачиваемым внешним импульсным источником (рис. 2, лазерный кристалл с шириной излучающей апертуры 100 мкм).



**Рис. 5.** Спектры лазерной генерации гибридной сборки для различных рабочих напряжений питания. Температура теплоотвода 25°C.



**Рис. 6.** Распределения интенсивности излучения на выходном торце лазерной части гибридной сборки для различных напряжений питания, В: 1 — 5, 2 — 11, 3 — 15. Температура теплоотвода 25°C.

Это позволяет утверждать, что конструкция сборки и функции токового ключа не вносят заметных потерь и обеспечивают эффективную токовую накачку и лазерную генерацию. Снижение рабочего напряжения до 5 В ведет как к снижению пиковой оптической мощности до 3.5 Вт, так и к длительности импульса до 55 нс. Для пояснения особенностей динамики лазерной генерации на вставке к рис. 4, а показана передняя часть импульса для рабочего напряжения 5 В. Видно, что передний фронт импульса по сравнению с задним имеет более быстрый участок. Однако в рамках данных экспериментов использовался стенд на основе фотодетектора с InGaAs активной областью, который имеет полосу частот 200 МГц, что позволяет корректно описывать динамику основной части оптического импульса, и не позволяет разрешить достигаемые скорости переходных процессов в момент включения. В дальнейшем при исследовании более коротких импульсов, когда фронт включения будет важен, планируется решить данную проблему за счет использования разработанной ранее методики измерения субнаносекундной динамики лазерной генерации мощных полупроводниковых лазеров

с широкой излучающей апертурой [16]. Полученные результаты говорят о том, что передний фронт лазерного импульса не полностью отражает форму переднего фронта импульса тока, который генерируется в контуре гибридной сборки. Однако задние фронты имеют существенно более высокую степень совпадения.

На рис. 5 и 6 представлены измеренные спектры лазерной генерации и распределения интенсивности излучения на торце лазерной части разработанной гибридной сборки. Измерения проводились для температуры теплоотвода 25°C. Для всего диапазона рабочих напряжений максимум спектра излучения находится в диапазоне 1475–1478 нм, при этом ширина на уровне половины от максимума достигает 12 нм при излучаемой пиковой оптической мощности 20 Вт.

Распределение интенсивности на выходном торце лазерной части гибридной сборки было получено с использование оптической системы, которая дает увеличенное изображение выходного зеркала на поверхности матрицы CCD камеры. Видно, что для всех рабочих напряжений излучение в ближней зоне распределено равномерно в каждой отдельной части излучающей апертуры. Также отсутствует явная асимметрия между частями излучающей апертуры. Из этого следует, что предложенная конструкция гибридной сборки обеспечивает однородную накачку кристалла лазерного диода даже с составной апертурой общей габаритной шириной 500 мкм. Таким образом, в дальнейшем возможно увеличение пиковой оптической мощности за счет расширения излучающей области без потери в качестве и однородности накачки.

#### 4. Заключение

Проведенные исследования продемонстрировали возможность применения гибридных сборок тиристорный ключ-лазерный диод для создания источников излучения с длительностью импульса < 100 нс. Здесь важно отметить экспериментальную демонстрацию факта эффективной работы тиристорного токового ключа на основе гетероструктуры Al-In-Ga-As-P/InP в контуре с нагрузкой в виде полупроводникового лазера, излучающего на длине волны ~ 1475 нм. Это позволяет говорить о возможности создания монолитной эпитаксиальной структуры с конструкцией лазер-тиристора в системе твердых растворов Al-In-Ga-As-P/InP, в которой будут объединены функции как тиристорного токового ключа, так и лазерного источника излучения. Достигнутые значения пиковой оптической мощности лазерных импульсов в разработанных гибридных сборках составляли 20 Вт при длительности 65 нс и общей ширине излучающей апертуры 200 мкм, что сравнимо с оптической мощностью излучения дискретных мощных плосковых лазерных диодов на длину волны 1.47 мкм [4–8]. При этом использованные токи управления от 6 до 280 мА позволяли иметь задержки включения от 900 до 10 нс в диапазоне рабочих напряжений питания от 5 до 15 В.

Это подтверждает высокую эффективность работы как лазерного диода, так и тиристорного токового ключа. Полученные результаты демонстрируют высокий потенциал для разработки источников как с большей пиковой оптической мощностью за счет расширения излучающей апертуры, так и с меньшей длительностью импульсов.

### 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] V. Molebny, P.F. McManamon, O. Steinvall, T. Kobayashi, W. Chen. *Opt. Eng.*, **56** (3), 031220 (2017). DOI:10.1117/1.OE.56.3.031220
- [2] J. Rapp, J. Tachella, Y. Altmann, S. McLaughlin, V.K. Goyal. *IEEE Signal Proc. Mag.*, **37** (4), 62 (2020). DOI:10.1109/MSP.2020.2983772
- [3] *Safety of Laser Products — Pt 1: Equipment Classification and Requirements, document IEC 60825-1:2014*, International Electrotechnical Commission (Geneva, Switzerland, 2014).
- [4] N. Volkov, A. Andreev, I. Yarotskaya, Y. Ryaboshtan, V. Svetogorov, M. Ladugin, A. Padalitsa, A. Marmalyuk, S. Slipchenko, A.V. Lyutetskii, D. Veselov, N. Pikhtin. *Quant. Electron.*, **51** (2), 133 (2021). DOI:10.1070/QEL17480
- [5] D.A. Veselov, N.A. Pikhtin, S.O. Slipchenko, I.K. Kirichenko, A.A. Podoskin, N.V. Shuvalova, N.A. Rudova, L.S. Vavilova, M.G. Rastegaeva, T.A. Bagaev, V.N. Svetogorov, A.A. Padalitsa, Yu.L. Ryaboshtan, M.A. Ladugin, A.A. Marmalyuk. *J. Luminesc.*, **263**, 120164 (2023). DOI: 10.1016/j.jlum.2023.120164
- [6] V.N. Svetogorov, Yu.L. Ryaboshtan, M.A. Ladugin, A.A. Padalitsa, N.A. Volkov, A.A. Marmalyuk, S.O. Slipchenko, A.V. Lyutetskii, D.A. Veselov, N.A. Pikhtin. *Quant. Electron.*, **50** (12), 1123 (2020). DOI:10.1070/QEL17448
- [7] L.W. Hallman, B.S. Ryvkin, E.A. Avrutin, J.T. Kostamovaara. *Electron. Lett.*, **57** (23), 891 (2021). DOI:10.1049/ell2.12298
- [8] J.F. Boucher, J. J. Callahan. *Laser Technology for Defense and Security VII*, **8039**, 45 (2011). DOI:10.1117/12.882930
- [9] S.O. Slipchenko, O.S. Soboleva, A.A. Podoskin, Y.K. Kirichenko, T.A. Bagaev, I.V. Yarotskaya, N.A. Pikhtin. *Semiconductors*, **57** (4), 288 (2023). DOI: 10.61011/FTP.2024.03.58409.6405
- [10] S.O. Slipchenko, A.A. Podoskin, P.S. Gavrina, Yu.K. Kirichenko, N.V. Shuvalova, N.A. Rudova, V.A. Kapitonov, A.Yu. Leshko, I.V. Shushkanov, V.V. Zolotarev, V.A. Kryuchkov, N.A. Pikhtin, T.A. Bagaev, I.V. Yarotskaya, V.N. Svetogorov, Yu.L. Ryaboshtan, M.A. Ladugin, A.A. Marmalyuk, V.A. Simakov. *Techn. Phys. Lett.*, **49** (3), 231 (2023). DOI: 10.1134/S106378502390087X
- [11] S. Slipchenko, M. Ladugin, A. Marmalyuk, V. Simakov, A. Podoskin, V. Golovin, P. Gavrina, V.V. Shamakhov, D. Nikolaev, V.V. Zolotarev, N. Pikhtin, T. Bagaev. *IEEE Trans. Electron Dev.*, **68** (6), 2855 (2021). DOI: 10.1109/TED.2021.3072606
- [12] L.A. Coldren, S.W. Corzine, M.L. Mashanovitch. *Diode lasers and photonic integrated circuits* (Hoboken—N.J., John Wiley & Sons, 2012).
- [13] S.O. Slipchenko, O.S. Soboleva, V.S. Golovin, N.A. Pikhtin. *Quant. Electron.*, **53** (1), 17 (2023). DOI:10.3103/S1068335623170153
- [14] R.P. Feynman, R.B. Leighton, M. Sands. *Electromagnetism and Matter, Basic Books*, 2010.
- [15] 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 ЖТФ*, **50** (4), 43 (2024).
- [16] S.O. Slipchenko, A.A. Podoskin, V.S. Golovin, N.A. Pikhtin, P.S. Kop'ev. *IEEE Phot. Technol. Lett.*, **33** (1), 7 (2020). DOI:10.1109/LPT.2020.3040063

Редактор Г.А. Оганесян

### Hybrid stacks of thyristor switch—semiconductor laser based on AlInGaAsP/InP heterostructures for high-power pulsed laser sources (1400–1500 nm)

A.A. Podoskin<sup>1</sup>, I.V. Shushkanov<sup>1</sup>, S.O. Slipchenko<sup>1</sup>, N.A. Pikhtin<sup>1</sup>, T.A. Bagaev<sup>1</sup>, V.N. Svetogorov<sup>2</sup>, Yu.L. Ryaboshtan<sup>2</sup>, M.A. Ladugin<sup>2</sup>, A.A. Marmalyuk<sup>2</sup>, V.A. Simakov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Ioffe Institute,  
194021 St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup> Open Joint-Stock Company Stelmakh Polyus  
Research Institute,  
117342 Moscow, Russia

**Abstract** Designs of hybrid laser sources based on thyristor current switches and laser diodes have been developed and investigated. The heterostructures of the thyristor current switches and laser diodes were created using MOCVD technology in the AlInGaAsP/InP solid solution systems. For the developed sources, a peak power of 20 W was demonstrated at a pulse duration of 65 ns and an operating voltage of 15 V. The minimum turn-on delay of the laser generation relative to the start of the control current pulse was 10 ns at a pulse amplitude of 280 mA.