Источник мощного импульсного лазерного излучения (1060 нм) с высокой частотой следования импульсов на основе гибридной сборки линейки лазерных диодов и 2D массива оптотиристоров как высокоскоростного токового ключа

С.О.Слипченко, А.А.Подоскин, В.В.Золотарев, Л.С.Вавилова, А.Ю.Лешко, М.Г.Растегаева, И.В.Мирошников, И.С.Шашкин, Н.А.Пихтин, Т.А.Багаев, М.А.Ладугин, А.А.Падалица, А.А.Мармалюк, В.А.Симаков

Исследованы электрические и оптические характеристики новой конструкции излучателя на основе вертикальной сборки минилинейки полупроводниковых лазеров (МПЛ, laser diode minibars, LDMB) и 2D многоэлементного тиристорного массива (2D МТМ, multi-element thyristor array, 2D META) в качестве сильноточного ключа, предназначенного для режимов генерации коротких (десятки наносекунд) мощных лазерных импульсов. Установлено, что уменьшение до 200 мкм размеров анодного контакта одиночных элементов 2D МТМ обеспечивает условия для однородного включения всех элементов. Показано, что в режиме «длинных» импульсов (14.6 нс) пиковая мощность лазерного излучения достигала 85 Вт на длине волны 1060 нм, что соответствовало пиковому току, генерируемому в цепи вертикальной сборки, 119 А (19.8 А на одиночный элемент 2D МТМ); при этом максимальная частота следования импульсов для рабочего напряжения 15 В достигала 700 кГц. В режиме «коротких» импульсов (6.4 нс) при частоте следования 1 МГц пиковая оптическая мощность достигала 47 Вт на той же длине волны, что соответствовало генерируемому пиковому току 60 А (10 А на одиночный элемент 2D МТМ). Показано, что в обоих режимах работы при увеличении частоты следования характеристики 2D МТМ в качестве сильноточного ключа не меняются.

Ключевые слова: *полупроводниковые лазеры, лазерные линейки, тиристоры, наносекундные импульсы.*

1. Введение

В настоящее время для решения задач метрологии и дальнометрии, основанных на измерении времени пролета лазерного импульса от источника до цели, активно развиваются мощные импульсные полупроводниковые лазеры благодаря их высокой эффективности и компактным размерам [1–3]. В зависимости от специфики решаемых задач источники лазерного излучения должны обеспечивать генерацию оптических импульсов длительностью от сотен пикосекунд до сотен наносекунд при пиковой мощности от десятков до сотен ватт. Поскольку в большинстве случаев уровень отраженных от цели сигналов невысок, то для эффективного выделения полезного сигнала на уровне помех, а также для увеличения скорости сканирования лазерные источники должны обеспечивать частоты следования импульсов до единиц мегагерц. Для реализации таких источников необходимо иметь сильноточные ключи, генерирующие импульсы с требуемой длительностью, амплитудой и частотой следования.

В большинстве случаев импульсные источники лазерного излучения используют внешние дискретные сильноточные ключи на основе полевых или биполярных транзисторов [3–5]. В такой конфигурации сильноточный ключ располагается в непосредственной близости от кристалла полупроводникового лазера. Однако протяженность такого контура тока создает паразитную индуктивность, которая усложняет решение задачи генерации импульсов тока наносекундной длительности с амплитудой в десятки ампер.

В работах [6, 7] нами были предложены конструкции лазер-тиристоров, в которых функции сильноточного ключа и источника лазерного излучения интегрированы в одну полупроводниковую многопереходную гетероструктуру, что позволяет сократить длину контура тока и уменьшить количество дискретных элементов в электрической схеме. Предложенный подход позволил получить генерацию лазерных импульсов с длительностью менее 100 нс и пиковой мощностью 47 Вт, а также длительностью до 90 пс и пиковой мощностью 1.6 Вт [7, 8]. Однако излучательная эффективность данных конструкций снижалась при уменьшении длительности оптического импульса. Для решения этой проблемы в работе [9] впервые были предложены конструкции вертикальных сборок из линеек полупроводниковых лазеров и сильноточных ключей на основе дискретных одиночных низковольтных тиристоров. Данный подход был исследован в работах [10–12], где изучались различные режимы работы тиристорного ключа (генерация импульсов длительностью от сотен до единиц наносекунд), а также различные конструкции чипа тиристорного ключа. В [10] была продемонстрирована возможность генерации низкочастотной последовательности импульсов длительностью 40 нс с пиковой мощностью 78 Вт, при этом частоты следования

С.О.Слипченко, А.А.Подоскин, В.В.Золотарев, Л.С.Вавилова, А.Ю.Лешко, М.Г.Растегаева, И.В.Мирошников, И.С.Шашкин, Н.А.Пихтин. Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН, Россия, 194021 С.-Петербург, Политехническая ул., 26; e-mail: serghpl@mail.ioffe.ru
Т.А.Багаев, М.А.Ладугин, А.А.Падалица, А.А.Мармалюк, В.А.Симаков. АО «НИИ "Полюс" им М.Ф.Стельмаха», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3, корп. 1

Поступила в редакцию 23 сентября 2022 г.

импульсов ограничивались возможностями тиристорной гетероструктуры.

Настоящая работа посвящена исследованию новой конструкции низковольтного тиристора, позволяющей повысить частоту следования импульсов, а также новой конструкции 2D многоэлементного тиристорного массива (2D МТМ), обеспечивающей сокращение длительности импульса и сохранение высокой пиковой мощности при повышенных частотах следования.

2. Разработка экспериментальных образцов

Простейшая схема вертикальной сборки на основе тиристоров и полупроводниковых лазеров включает в себя внешнюю емкость C, внешний источник питания, обеспечивающий блокирующее напряжение U_b, генератор импульсов тока управления $I_c(t)$ (рис.1,*а*). В общем случае процесс генерации импульса тока накачки с помощью тиристора можно разделить на три этапа. Первый этап свя-

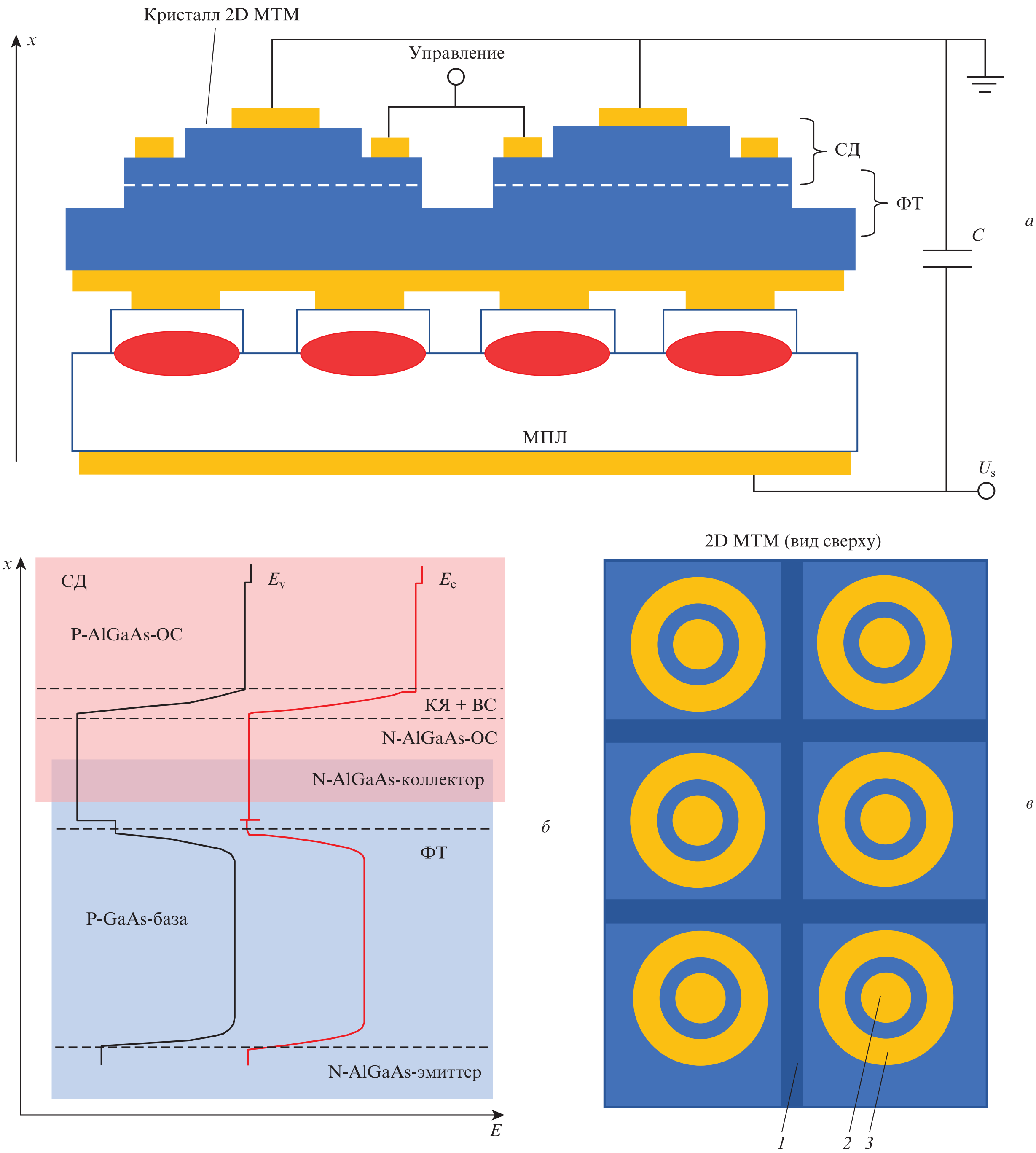

Рис.1. Конструкция вертикальной сборки из 2D МТМ и МПЛ, а также их электрическая схема включения (МПЛ – минилинейка полупроводниковых лазеров, СД и ФТ – светодиодная и фототранзисторная части тиристора, C – внешний конденсатор, U_s – напряжение внешнего источника питания) (*а*); схематическое изображение зонной диаграммы гетероструктуры тиристорного ключа (ОС – обкладочные слои светодиодной части гетероструктуры, КЯ – квантовая яма, ВС – волноводный слой) (*б*); вид сверху кристалла 2D МТМ (*1* – разделительные канавки, *2* – анодный контакт, *3* – контакт управления) (*в*).

зан с зарядом внешней емкости C от внешнего источника питания до напряжения U_b, когда тиристор находится в закрытом состоянии, которое характеризуется высоким сопротивлением. Длительность первого этапа определяется номиналом емкости и величиной тока заряда. Второй этап связан с активацией тиристора за счет подачи импульса тока управления, который запускает процесс управляемого включения тиристора. Длительность этапа определяется временем задержки включения, находящимся в диапазоне от единиц до десятков наносекунд в зависимости от амплитуды тока управления. Третий этап соответствует переходу тиристора в открытое состояние с низким сопротивлением, что обеспечивает эффективный разряд внешней емкости C и генерацию импульса тока через кристалл полупроводникового лазера. Длительность этого этапа определяется номиналом емкости C, скоростью перехода тиристора в открытое состояние, а также эффективным сопротивлением контура тока. Третий этап завершается переходом тиристора в закрытое состояние. Проведенные ранее исследования [13] показали, что максимальная частота включения тиристорной структуры ограничивается двумя процессами. Первый – это неуправляемое включение тиристора за счет емкостного тока коллекторного p–n-перехода при обратном смещении; второй – эффект «залипания» тиристора во включенном состоянии, которое может поддерживаться частью тока заряда внешней емкости, если его величина больше тока удержания тиристора в открытом состоянии. Для уменьшения негативного действия обоих процессов необходимо понизить эффективность обратной связи. В рамках настоящей работы исследуется структура, в которой эффективность обратной связи снижена за счет введения в p-базу фототранзистора сильнолегированного слоя p^+, что повышает скорость безызлучательной рекомбинации избыточных носителей в p-базе.

Экспериментальная гетероструктура тиристора может быть представлена в виде оптопары фототранзистор – светодиод (рис.1,*б*). Часть фототранзистора содержит широкозонный эмиттер n-$Al_{0.15}Ga_{0.85}As$ толщиной 0.15 мкм и коллектор n-$Al_{0.35}Ga_{0.65}As$ толщиной 2 мкм, между которыми расположена p-база, состоящая из сильнолегированного слоя толщиной 0.1 мкм со стороны n-эмиттера и слаболегированного слоя толщиной 4 мкм со стороны n-коллектора. Светодиодная часть включает эмиттеры n-$Al_{0.35}Ga_{0.65}As$ (который одновременно выполняет функцию коллектора фототранзистора) и p-$Al_{0.35}Ga_{0.65}As$, каждый толщиной по 2 мкм, а также активную область InGaAs толщиной 9 нм, расположенную в волноводе $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ толщиной 0.4 мкм. Описанная гетероструктура была выращена методом МОС-гидридной эпитаксии.

На первом этапе экспериментов использовалась стандартная конструкция тиристора с полосковым анодным контактом шириной 200 мкм, который был сформирован со стороны p-эмиттера светодиодной части, и полосковым управляющим контактом шириной 200 мкм, сформированным со стороны n-эмиттера светодиодной части; со стороны подложки был сформирован сплошной катодный контакт (рис.2,*а*). Из полученной структуры выкалывались кристаллы тиристоров длиной 0.5–1 мм и монтировались катодным контактом на медные носители с помощью индиевого припоя.

Исследования статических характеристик показали, что максимальное блокирующее напряжение данных образцов составляет 32 В. Ток удержания, характеризующий эффективность обратной связи, превышает 100 мА, что существенно больше тока удержания 0.1 мА, получавшегося в структуре без дополнительного сильнолегированного слоя в p-базе [13], что подтверждает эффективность предложенного нами решения. Задача разработки 2D многоэлементного тиристорного массива требует выбора оптимального размера одиночного тиристора для повышения фактора заполнения массива. В работе [7] было показано, что для низковольтных тиристоров на основе гетероструктур AlGaAs/GaAs с оптической обратной связью характерна пространственная локализация тока в области начального включения. Для оценки геометрических характеристик области начального включения низковольтного тиристора на основе разработанной в настоящей работе гетероструктуры с составной p-базой были проведены исследования области люминесценции из светодиодной части гетероструктуры. Поскольку конструкция кристаллов имела сплошной анодный контакт, то в эксперименте измерялось распределение излучения из краевой области анодного контакта, выходящего в направлении, перпендикулярном слоям гетероструктуры. Для этой цели с помощью оптической схемы строилось изображение плоскости анодного контакта на CCD-матрице. На рис.2,*а* показана типичная картина распределения интенсивности люминесценции разработанной гетероструктуры при включении тиристора стандартной конструкции с полосковыми контактами при напряжении U_b = 27 В и длительности импульса ~20 нс. Видно, что размер области локализации близок к 200 мкм.

В результате была выбрана следующая конструкция 2D МТМ: одиночный элемент формировался за счет круглого анодного контакта диаметром 200 мкм, управляющий электрод был выполнен отдельно для каждого элемента в виде кольца с внешним диаметром 400 мкм (рис.2,*б*). Одиночные элементы 2D МТМ отделялись друг от друга канавками шириной 200 мкм. Для экспериментальных исследований разработанной конструкции в качестве сильноточных ключей использовались кристаллы 2D МТМ, включающие шесть (3 × 2) одиночных тиристоров (рис.1,*в*). Массив тиристоров был смонтирован на p-сторону сборки минилинейки полупроводниковых лазеров (МПЛ, laser diode minibars, LDMB) с помощью носителя из GaAs.

Минилинейка была сформирована на основе лазерной ассиметричной гетероструктуры, выращенной методом МОС-гидридной эпитаксии. Дизайн данной гетероструктуры позволяет снизить внутренние оптические потери до уровня 0.3–0.5 см$^{-1}$ за счет увеличения толщины волноводного слоя при отсутствии возбуждения высших волноводных мод. Дизайн лазерной гетероструктуры (рис.1,*б*) включает в себя широкозонные $Al_{0.25}Ga_{0.75}As$-эмиттеры, нелегированный волноводный слой $Al_{0.1}Ga_{0.9}As$ толщиной 1.7 мкм, две квантовые ямы InGaAs с длиной волны излучения 1060 нм, смещенные на расстояние 0.2 мкм от центра волноводного слоя для обеспечения генерации исключительно на нулевой моде волновода.

МПЛ состояла из четырех излучающих областей шириной 100 мкм каждая, расположенных с шагом 400 мкм, и напаивалась n-стороной на медный теплоотвод. На рис.2,*б* показаны результаты измерений распределения интенсивности спонтанного излучения с поверхности разработанного кристалла 2D МТМ, полученные при рабочем напряжении 27 В и длительности импульса ~ 20 нс. Видно, что в предложенной геометрии одиночных эле-

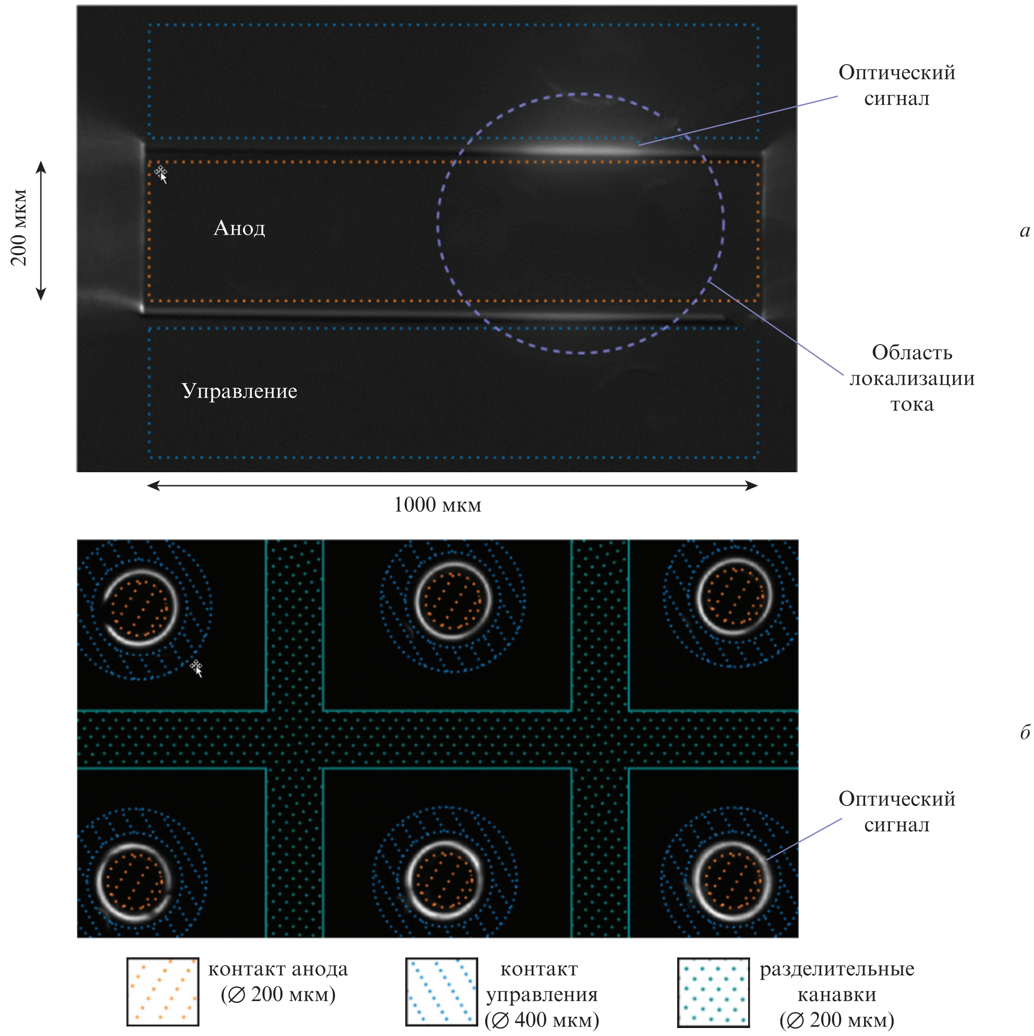

Рис.2. Спонтанное излучение, выходящее с поверхности тиристора, для стандартной полосковой геометрии (*а*) и для 2D массива тиристоров с круглым анодным контактом (*б*). Блокирующее напряжение 27 В, длительность импульса 20 нс.

ментов имеет место однородное распределение интенсивности спонтанного излучения, что говорит о повышенной эффективности использования рабочей площади элементов в новой конструкции тиристорного ключа.

3. Результаты экспериментов

Результаты экспериментальных исследований можно разделить на две части. В первой части представлены рабочие характеристики вертикальных сборок 2D МТМ и МПЛ в режиме генерации длинных импульсов (длительность импульса ~15 нс), а во второй – характеристики сборок в режиме генерации коротких (~6 нс) импульсов. Для реализации режима длинных импульсов использовалась схема (рис.1,*а*) с внешним конденсатором емкостью C = 60 нФ. Во всех экспериментах кристаллы 2D МТМ включались с помощью общего импульса тока управления амплитудой 250 мА (41.6 мА на каждый элемент 2D МТМ при однородном распределении тока). На рис.3 показаны типичные лазерные импульсы, полученные при значениях блокирующего напряжения U_b от 4 до 27 В. При максимальном блокирующем напряжении 27 В и частоте следования импульсов 10 кГц пиковая оптическая мощность достигала 85 Вт, при этом длительность лазерных импульсов составляла 14.6 и 21 нс на уровне 50% и 10% от максимума соответственно.

Для снижения потерь в контуре тока отсутствовали элементы, позволяющие осуществлять прямой контроль токовых импульсов. Поэтому для оценки пикового тока,

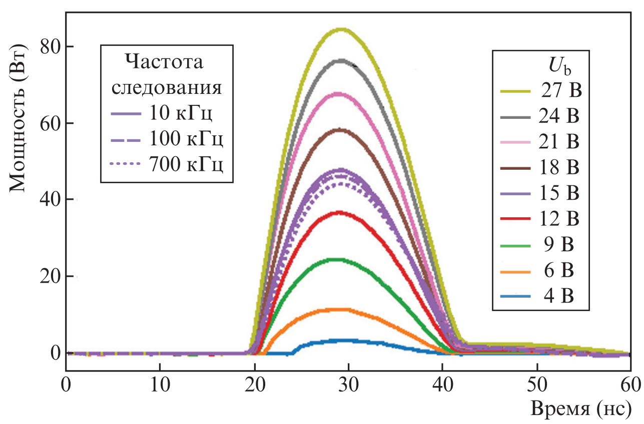

Рис.3. Лазерные импульсы, генерируемые вертикальной сборкой 2D МТМ–МПЛ при различных значениях напряжения U_b и частоты следования импульсов F (C = 60 нФ, амплитуда тока управления 250 мА, длительность импульса управления 100 нс).

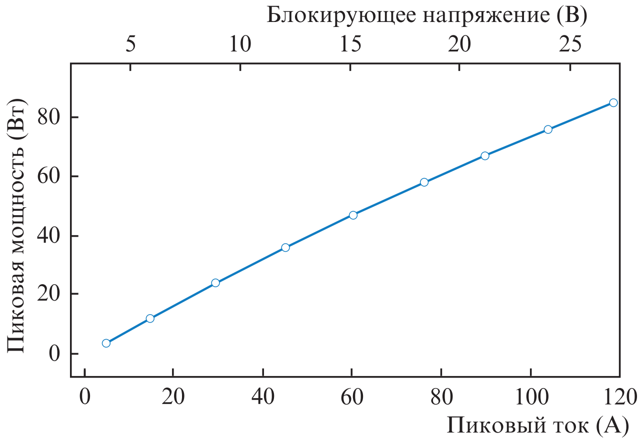

Рис.4. Зависимость измеренной пиковой оптической мощности от тока инжекции и блокирующего напряжения для вертикальной сборки 2D МТМ–МПЛ при частоте следования F = 10 кГц (C = 60 нФ, амплитуда тока управления 250 мА, длительность импульса управления 100 нс).

генерируемого в цепи вертикальной сборки, использовались ватт-амперные характеристики (ВтАХ) единичного полупроводникового лазера, сформированного на основе той же гетероструктуры, что и МПЛ, полученные с помощью калиброванного генератора импульсов с длительностью импульса 100 нс и частотой следования 1 кГц. Измеренная ВтАХ единичного лазера сравнивалась с мощностными характеристиками вертикальных сборок 2D МТМ–МПЛ. В результате установлено, что пиковое значение тока линейно зависит от величины блокирующего напряжения. Ватт-амперная характеристика 2D МТМ–МПЛ представлена на рис.4. Проведенная оценка показывает, что максимальный пиковый ток, обеспечиваемый сильноточным ключом из шести одиночных элементов 2D МТМ, при длительности импульса 15 нс достигает 119 А (19.8 А на одиночный элемент). Отклонение зависимости пиковой оптической мощности от линейной на рис.4 связано с ростом внутренних оптических потерь в лазерных диодах, что типично для мощных импульсных полупроводниковых лазеров при высоких токах накачки [14–17]. Измерения спектров генерации вертикальной сборки 2D МТМ–МПЛ при различных рабочих напряжениях на низких частотах следования (до 10 кГц) показали, что смещение спектра в длинноволновую область сопоставимо с таковым, полученным для спектров полупроводниковых лазеров, накачиваемых внешним источником. Это свидетельствует о том, что в данном режиме накачки дополнительный разогрев МПЛ от работы 2D МТМ, а также самого кристалла 2D МТМ, несущественный.

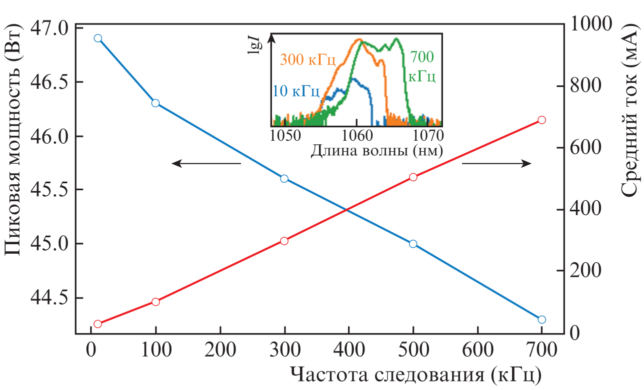

Рис.5. Зависимости пиковой оптической мощности и среднего тока заряда внешнего конденсатора C для вертикальной сборки 2D МТМ–МПЛ от частоты следования F при блокирующем напряжении 15 В. На вставке – спектры генерации МПЛ при различных F (C = 60 нФ, амплитуда тока управления 250 мА, длительность импульса управления 100 нс).

Особенности работы вертикальной сборки в режиме генерации длинных (15 нс) импульсов при высоких частотах следования изучались при рабочем напряжении 15 В. На рис.5 показана зависимость пиковой мощности при таком рабочем напряжении от частоты следования генерируемых импульсов (см. также рис.3). В проведенном эксперименте максимальная частота следования F достигала 700 кГц и была ограничена вышеупомянутым эффектом «залипания» тиристорных ключей. Видно, что с ростом F от 10 до 700 кГц пиковая мощность уменьшается с 46.8 до 44.2 Вт. При этом средний ток заряда до напряжения 15 В составляет 750 мА при внешней емкости C = 60 нФ и F = 700 кГц, а его зависимость от F имеет линейный характер для всего диапазона частот (рис.5). Данный факт говорит о том, что кристалл 2D МТМ не изменяет свои характеристики в качестве сильноточного ключа, т.е. при генерации импульсов тока длительностью 15 нс их амплитуда и форма не меняются вплоть до F = 700 кГц (что также согласуется с сохранением формы лазерных импульсов, см. рис.3). Исследования спектров лазерной генерации показали, что с ростом частоты следования наблюдается их смещение в длинноволновую область вплоть до 5 нм (см. вставку на рис.5), что может быть вызвано как перегревом самой МПЛ, так и дополнительным нагревом от тепла, выделяемого кристаллом 2D МТМ. Для оценки перегрева измерялись спектры генерации полупроводниковых лазеров при фиксированном токе накачки и различных температурах. Сделанные оценки показали, что скорость смещения длинноволнового края спектра генерации составляет 0.38 нм/°С, поэтому зарегистрированное смещение спектра в длинноволновую область на 5 нм при частоте следования импульсов 700 кГц соответствует увеличению температуры активной области МПЛ на 13 °С.

Для сокращения длительности как импульсов тока, так и лазерных импульсов номинал внешней емкости C в цепи вертикальной сборки 2D МТМ–МПЛ был уменьшен до 12 нФ. На рис.6 приведен типичный набор лазерных импульсов, полученный для различных рабочих напряжений при частоте следования 1 МГц. Снижение емкости C позволило уменьшить длительность лазерных импульсов до 6.4 и 9.5 нс на уровне 50% и 10% от максимума соответственно. При этом пиковая оптическая мощность при частоте следования импульсов 1 МГц и максимальном рабочем напряжении 27 В составила 47 Вт. Оценка пикового тока, генерируемого в цепи вертикальной сборки 2D МТМ–МПЛ, сделанная с помощью ВтАХ лазеров при накачке внешним импульсным источником, показала, что при максимальном рабочем напряжении 27 В пиковый ток достигает 60 А, что эквивалентно 10 А на одиночный элемент.

На рис.7 представлены зависимости среднего тока заряда внешней емкости C и пиковой оптической мощности от частоты следования импульсов F. Видно, что пиковая оптическая мощность уменьшается с 49 Вт при F = 10 кГц до 47 Вт при F = 1 МГц (как и в режиме генерации длинных импульсов). Однако в области F около 300 кГц наблюдается незначительный рост пиковой мощности до 50 Вт (ее

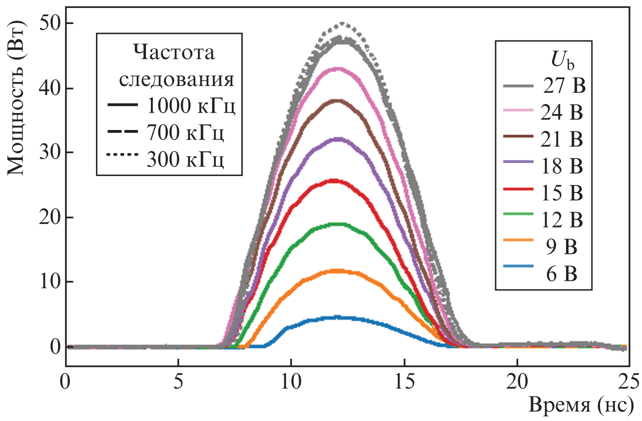

Рис.6. Лазерные импульсы, генерируемые вертикальной сборкой 2D МТМ–МПЛ при различных значениях блокирующего напряжения U_b и частоты следования F (C = 12 нФ, амплитуда тока управления 250 мА, длительность импульса управления 100 нс).

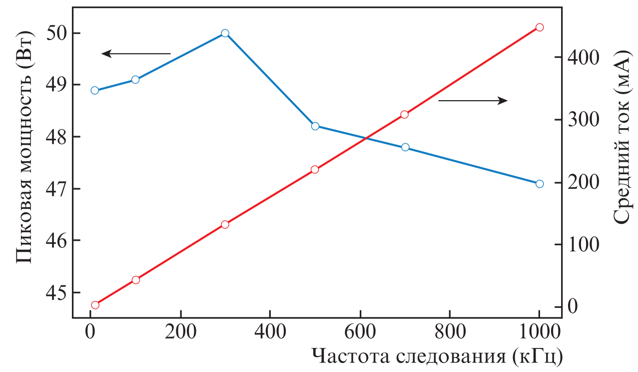

Рис.7. Зависимости пиковой оптической мощности и среднего тока заряда внешнего конденсатора C для вертикальной сборки 2D МТМ–МПЛ от частоты следования F при блокирующем напряжении 27 В (C = 12 нФ, амплитуда тока управления 250 мА, длительность импульса управления 100 нс).

изменение в области пика не превышает 2%), который может быть связан с резонансными явлениями в контуре тока вертикальной сборки. Для всего диапазона частот следования наблюдается линейный рост среднего тока заряда внешней емкости, при этом для максимальной частоты F = 1 МГц и рабочего напряжения 27 В ток заряда достигает 440 мА. Данный факт свидетельствует о том, что в режиме генерации коротких импульсов характеристики 2D МТМ как токового ключа не меняются, а основным фактором снижения пиковой оптической мощности является разогрев МПЛ. Оценка разогрева минилинейки лазеров от частоты следования импульсов для рабочего напряжения 27 В, полученная на основе смещения длинноволнового края спектра генерации, показала, что увеличение F до 1 МГц приводит к перегреву на 9 °С. Полученные значения перегрева и среднего тока заряда позволяют полагать, что достигнутая частота следования не является предельной и может быть увеличена при использовании более высокочастотных генераторов импульсов тока управления.

4. Заключение

Проведенные исследования показали, что предложенная конструкция вертикальной сборки на основе кристалла 2D МТМ в качестве токового ключа и МПЛ позволяет получать эффективную генерацию мощных лазерных импульсов с высокими частотами следования. Продемонстрированные возможности новой конструкции кристалла 2D МТМ показали, что она может использоваться и в других приложениях, где требуется обеспечить генерацию импульсов тока высокой амплитуды в низкоомном контуре тока. Важно отметить, что работа в высокочастотном режиме не приводит к существенному разогреву как 2D МТМ, так и МПЛ. Это позволяет рассчитывать на увеличение частоты следования импульсов, в частности, при снижении их длительности. Показанная возможность снижения длительности импульсов демонстрирует высокий потенциал предложенной конструкции для работы в режиме генерации импульсов длительностью 1–2 нс, что является целью следующих исследований.

Исследования выполнены за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-79-30072).

1. Warren M.E., Podva D., Dacha P., Block M.K., Helms C.J., Maynard J., Carson R.F. *Proc. SPIE*, **10552**, 105520E (2018). DOI: 10.1117/12.2290937.
2. Viheriala J., Aho A.T., Uusitalo T., Lyytikainen J., Hallman L., Ryvkin B.S., Avrutin E.A., Kostamovaara J.T., Guina M. *Proc. IEEE High Power Diode Lasers and Systems Conf. (HPD)* (Coventry, 2019, pp 9 – 10).
3. Klehr A., Liero A., Christopher H., Wenzel H., Maaßdorf A., Della Casa P., Fricke J., Ginolas A., Knigge A. *Semicond. Sci. Technol.*, **35**, 065016 (2020).
4. Wang X., Crump P., Wenzel H., Liero A., Hoffmann T., Pietrzak A., Schultz C.M., Klehr A., Ginolas A., Einfeldt S., Bugge F., Erbert G., Trankle G. *IEEE J. Quantum Electron.*, **46**, 658 (2010).
5. Veselov D., Bobretsova Y., Klimov A., Bondarev A., Lyutetskiy A., Strelets V., Slipchenko S., Pikhtin N., Kop'ev P.S. *Proc. SPIE*, **11262**, 112620H (2020). DOI: 10.1117/12.2546313.
6. Багаев Т.А., Ладугин М.А., Падалица А.А., Мармалюк А.А., Курнявко Ю.В., Лобинцов А.В., Данилов А.И., Сапожников С.М., Кричевский В.В., Зверков М.В., Коняев В.П., Симаков В.А., Слипченко С.О., Подоскин А.А., Пихтин Н.А. *Квантовая электроника*, **49**, 1011 (2019) [*Quantum Electron.*, **49**, 1011 (2019)].
7. Slipchenko S.O., Podoskin A.A., Soboleva O.S., Pikhtin N.A., Bagaev T.A., Ladugin M.A., Marmalyuk A.A., Simakov V.A., Tarasov I.S. *J. Appl. Phys.*, **121**, 054502 (2017).
8. Slipchenko S.O., Podoskin A.A., Soboleva O.S., Pikhtin N.A., Bagaev T.A., Ladugin M.A., Marmalyuk A.A., Simakov V.A., Tarasov I.S. *Opt. Express*, **24**, 16500 (2016).
9. Slipchenko S.O., Podoskin A.A., Golovin V.S., Romanovich D.N., Shamakhov V.V., Nikolaev D.N., Shashkin I.S., Pikhtin N.A., Bagaev T.A., Ladugin M.A., Marmalyuk A.A., Simakov V.A. *Opt. Express*, **27**, 31446 (2019).
10. Slipchenko S.O., Ladugin M.A., Marmalyuk A.A., Simakov V.A., Podoskin A.A., Golovin V.S., Gavrina P.S., Shamakhov V.V., Nikolaev D.N., Zolotarev V.V., Pikhtin N.A., Bagaev T.A. *IEEE Trans. Electron Devices*, **67**, 193 (2020).
11. Slipchenko S.O., Podoskin A.A., Soboleva O.S., Golovin V.S., Romanovich D.N., Kapitonov V.A., Kazakova A.S., Bakhvalov K.V., Pikhtin N.A., Bagaev T.A., Ladugin M.A., Padalitsa A.A., Marmalyuk A.A., Simakov V.A. *IEEE Trans. Electron Devices*, **68**, 2855 (2021).
12. Slipchenko S.O., Podoskin A.A., Golovin V.S., Rastegaeva M.G., Voronkova N.V., Pikhtin N.A., Bagaev T.A., Ladugin M.A., Marmalyuk A.A., Simakov V.A. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **33**, 11 (2021).
13. Slipchenko S.O., Podoskin A.A., Soboleva O.S., Veselov D.A., Zolotarev V.V., Pikhtin N.A., Bagaev T.A., Ladugin M.A., Marmalyuk A.A., Simakov V.A., Tarasov I.S. *IEEE Trans. Electron Devices*, **63**, 3154 (2016). DOI: 10.1109/TED.2016.2582700.
14. Piprek J. *Opt. Quantum Electron.*, **51**, 60 (2019).
15. Ryvkin B.S., Avrutin E.A. *J. Appl. Phys.*, **97**, 113106 (2005).
16. Слипченко С.О., Головин В.С., Соболева О.С., Ламкин И.А., Пихтин Н.А. *Квантовая электроника*, **52** (4), 343 (2022) [*Quantum Electron.*, **52** (4), 343 (2022)].
17. Soboleva O.S., Zolotarev V.V., Golovin V.S., Slipchenko S.O., Pikhtin N.A. *IEEE Trans. Electron Devices*, **67**, 4977 (2020).