

Влияние длины резонатора на выходную оптическую мощность полупроводниковых лазеров-тиристоров на основе гетероструктур AlGaAs/GaAs/InGaAs

© П.С. Гаврина¹, А.А. Подоскин¹, И.В. Шушканов¹, И.С. Шашкин¹, В.А. Крючков¹, С.О. Слипченко¹, Н.А. Пихтин¹, Т.А. Багаев¹, М.А. Ладугин², А.А. Мармалюк², В.А. Симаков²

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

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

E-mail: gavrina@mail.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 12 декабря 2023 г.

В окончательной редакции 19 марта 2024 г.

Принята к публикации 19 марта 2024 г.

Исследовалось влияние длины резонатора лазера-тиристора на характеристики генерируемых лазерных импульсов. Установлено, что для длительностей импульса $\sim 20\text{--}30$ нс, обеспечиваемых номиналом разрядного конденсатора 22 нФ, увеличение длины резонатора с 480 до 980 мкм позволяет поднять максимальную пиковую мощность с 16.6 до 25.4 Вт. Дальнейшее увеличение длины резонатора до 1950 мкм приводит к несущественному падению максимальной пиковой мощности до 23.7 Вт из-за более низкой внешней дифференциальной эффективности образцов на начальном участке ватт-амперной характеристики, однако обеспечивает снижение длительности оптического импульса по сравнению с образцами других длин во всем диапазоне напряжений питания.

Ключевые слова: лазеры-тиристоры, полупроводниковые лазеры, токовые ключи, импульсные лазеры.

DOI: 10.61011/FTP.2024.02.57876.5843

1. Введение

В настоящее время импульсные источники лазерного излучения с рабочей длиной волны 890–910 нм имеют широкий спектр применений, включая области лазерной дальнометрии [1], диагностики [2,3] и медицины [4]. В связи с этим актуальной остается задача разработки простых в реализации систем для генерации мощных лазерных импульсов длительностью от единиц до сотен наносекунд. Одним из подходов к созданию энергоэффективных и компактных излучателей является объединение в одной полупроводниковой гетероструктуре непосредственно лазерного излучателя и токового ключа для обеспечения токовой накачки. Примером реализации такого подхода можно назвать лазер-тиристор (далее — ЛТ), состоящий из лазерного диода и фототранзистора. Подробно принцип и некоторые особенности работы схожих с исследуемыми здесь ЛТ изложены в [5,6]. В типичной электрической схеме питание ЛТ осуществляется источником постоянного напряжения, подающегося на анод и катод прибора и заряжающего подключенный параллельно ЛТ конденсатор. Переключение ЛТ в открытое состояние происходит после подачи на секции управления импульсов тока малой амплитуды (как правило, единицы или десятки миллиампер). Накачку лазерной части обеспечивает разряжающийся через открытый ЛТ конденсатор, выбор номинала которого определяется требуемой длительностью импульса.

Современные полосковые лазеры для работы в интересующем нас спектральном диапазоне 890–910 нм могут иметь самые разные длины резонатора в зависимости от типа излучателя. Так, длина образцов с интегрированными брэгговскими решетками может достигать 4 мм [1,7] или даже 6 мм [8], что связано в первую очередь с необходимостью просветлять достаточно длинную секцию самой решетки (1 мм) мощным спонтанным излучением, получить которое можно лишь увеличением длины секции усиления. Мощные лазеры на основе многопереходных гетероструктур без секций брэгговской решетки представлены, как правило, в вариантах с меньшими длинами резонатора, однако в этой области единого подхода не наблюдается. В работах [9,10] были продемонстрированы результаты эффективной работы лазеров с несколькими туннельно-связанными излучающими областями с длиной резонатора 750 мкм и шириной полоска 200 мкм. При этом авторы особо подчеркивают важность получения низкого сопротивления образцов для их эффективной работы. В работе [11] исследуются лазеры схожей конструкции, однако длина их резонатора уже составляет 3 мм, а ширина полоска варьируется от 3 до 100 мкм. Таким образом, в каждом отдельном случае оптимальная длина резонатора должна быть подобрана с учетом конкретных особенностей прибора. Лазеры-тиристоры также являются приборами на основе многопереходных гетероструктур, при этом важный с практической точки зрения вопрос выбора оптимальной длины резонатора для максимально эффек-

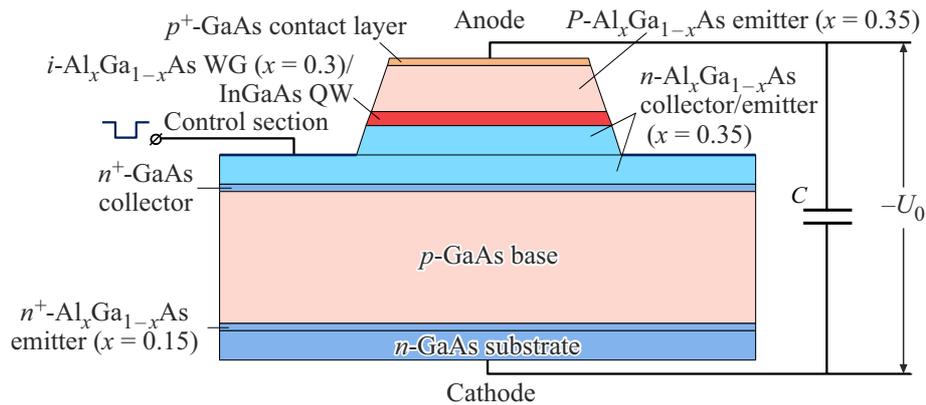


Рис. 1. Схематическое изображение образца ЛТ с электрической схемой подключения. (Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи).

тивной работы излучателя данного типа до текущего момента изучен не был. В связи с этим в настоящей работе было исследовано влияние длины резонатора на такие характеристики ЛТ, как выходная оптическая мощность и длительность оптического импульса.

2. Экспериментальные образцы и схема измерений

Экспериментальные образцы были изготовлены из гетероструктуры, выращенной методом МОС-гидридной эпитаксии на подложке n -GaAs. Фототранзисторная часть состояла из n^+ - $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x = 0.15$) эмиттера, слабо легированной p -GaAs базы толщиной 4.4 мкм и составного коллектора n^+ -GaAs/ n - $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$. Расширение толщины базовой области по сравнению с рассмотренными в работах [5,6] аналогами позволило добиться увеличения максимального напряжения блокировки до 27 В, что должно было, во-первых, повысить быстродействие прибора за счет более эффективной ударной ионизации, а во-вторых, позволить заряжать подключенный параллельно ЛТ конденсатор до больших напряжений, получая больший пиковый ток.

Лазерная часть включала в себя n - и p -эмиттеры $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ (слой n - $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ одновременно является частью составного коллектора фототранзисторной части), волновод i - $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ толщиной 0.4 мкм и активную область — квантовую яму со спейсерами i -GaAs/InGaAs/ i -GaAs. Дизайн лазерной части был разработан для излучения в спектральном диапазоне ~ 905 нм. Ранее полупроводниковые лазеры полосковой конструкции с похожим дизайном неоднократно демонстрировали свою эффективность [12–14].

Готовые образцы ЛТ имели ширину полоска лазерной части 200 мкм (совпадает с шириной анодного контакта), по две секции управления, располагающиеся слева и справа от полоска, длину резонатора 480, 980 или 1950 мкм (длина резонатора совпадает с длиной образца). На грани резонатора не наносились просветляющее

и отражающее покрытия. На рис. 1 представлено схематическое изображение образца ЛТ с электрической схемой его подключения. Для генерации лазерных импульсов длительностью 20–30 нс были выбраны конденсаторы C подходящего номинала — 22 нФ. Для всех исследуемых образцов использовались ток управления одинаковой амплитуды 10.4 мА и одинаковая частота следования импульсов 203 Гц. Все измерения проводились при комнатной температуре.

3. Результаты измерений

В ходе эксперимента для образцов с разной длиной резонатора (480, 980 и 1950 мкм) были проведены измерения динамики выходной оптической мощности и разрядки конденсатора в диапазоне напряжений питания от 3 до 20 В. По результатам этих измерений оценивались: уровень пиковой мощности ЛТ, длительности оптического и электрического импульсов. Как упоминалось выше, ЛТ могут блокировать до 27 В, поэтому диапазон рабочих напряжений технически мог бы быть расширен. Однако в ходе измерений стало ясно, что уже при напряжении 20 В появляются признаки насыщения уровня выходной оптической мощности, поэтому дальнейшее увеличение напряжения питания не было целесообразным.

На рис. 2 показаны зависимости пиковой мощности (Peak power) образцов разной длины от напряжения питания (Supply voltage). Видно, что во всем диапазоне напряжений питания сохраняется следующая закономерность: максимальный уровень мощности достигается при использовании образцов с длиной резонатора 980 мкм, минимальный уровень демонстрируют образцы с длиной резонатора 480 мкм, образцы с длиной резонатора 1950 мкм занимают промежуточное положение.

В качестве примера на рис. 3 представлен набор оптических импульсов при малом напряжении питания 7 В (рис. 3, *a*) и высоком напряжении питания 20 В (рис. 3, *b*). Уровни пиковой мощности образцов

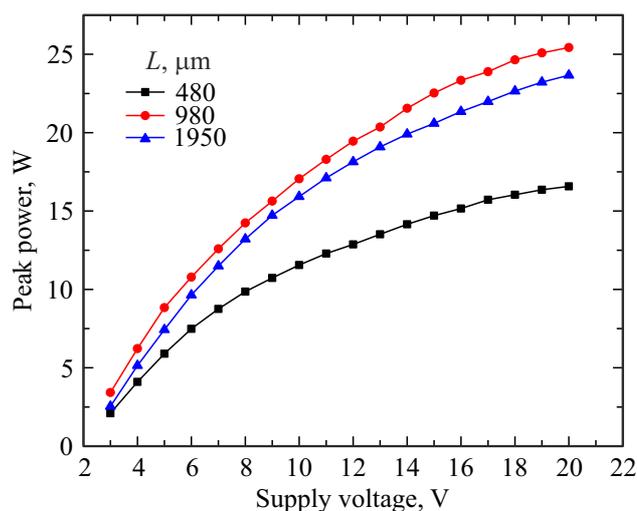


Рис. 2. Зависимость пиковой мощности образцов ЛТ разной длины от напряжения питания.

составляют 12.5 Вт (7 В) и 24.8 Вт (20 В) при длине резонатора 980 мкм, 8.7 Вт (7 В) и 16.6 Вт (20 В) при длине резонатора 480 мкм, 11.5 Вт (7 В) и 23.7 Вт (20 В) при длине резонатора 1950 мкм. Видно, что при низком напряжении питания 7 В оптические импульсы всех образцов имеют схожую колоколообразную форму и практически симметричны относительно координаты своего пика, разность между длительностью переднего фронта и длительностью спада Δ не превышает 10% от длительности импульса. Здесь и далее при обсуждении длительности оптического импульса мы будем говорить о значениях на уровне 10% от амплитуды. С повышением напряжения питания симметричность оптического импульса нарушается, при этом наиболее совершенную форму импульса сохраняют образцы длиной 1950 мкм, в диапазоне напряжений питания 7–20 В Δ не превышает 7% от длительности импульса. Для сравнения можно отметить, что аналогичные значения для других образцов могут быть существенно выше — до 15% (17 В) для образцов длиной 480 мкм и до 25% (17 В) для образцов длиной 980 мкм.

На рис. 4, а представлены зависимости длительности оптического импульса от напряжения питания. Во всем диапазоне напряжений питания наиболее короткий импульс демонстрируют образцы с длиной резонатора 1950 мкм, при этом его длительность плавно возрастает с повышением напряжения питания от 18.4 нс (3 В) до 22.4 нс (20 В). Длительность оптического импульса образцов длиной 480 мкм увеличивается с 20.6 нс (3 В) до 28.5 нс (20 В). Зависимость длительности оптического импульса от напряжения питания образцов длиной 980 мкм имеет более сложный характер — возрастает с 18.8 нс (3 В) до 27.3 нс (14 В), а затем плавно уменьшается до 26.4 нс (20 В).

Рассмотрим зависимость энергии в оптическом импульсе от энергии, запасенной в конденсаторе (рис. 4, б).

Хорошо видно, что зависимость энергии в оптическом импульсе образцов длиной 980 мкм идет заметно выше, чем для двух других типов образцов, но при превышении напряжения питания 14 В (обозначено вертикальной пунктирной линией) имеет излом, что связано со снижением длительности импульса (рис. 4) и нехарактерно для образцов других длин.

Из данных рис. 2–4 можно сделать следующие выводы. Образцы с длиной резонатора 480 мкм при номинале разрядного конденсатора 22 нФ имеют наихудшие показатели по уровню выходной оптической мощности и наибольшую длительность оптического импульса среди всех рассмотренных образцов. Снижение уровня пиковой мощности по сравнению с наиболее мощными образцами длиной 980 мкм варьируется от 22.7 до 36% в зависимости от напряжения питания. Увеличение длительности оптического импульса относительно образцов длиной 1950 мкм составляет от 9.3 до 42.1%. Таким образом, длина образцов 480 мкм не может рассматриваться в качестве оптимальной ни в одном из указанных аспектов.

Что касается длин резонатора 980 и 1950 мкм, выбор наиболее оптимальной из них представляется чуть более сложной задачей. С одной стороны, образцы длиной 980 мкм продемонстрировали преимущество в уровне выходной оптической мощности во всем диапазоне напряжений питания. С другой стороны, образцы длиной 1950 мкм показали значительно меньшую длительность оптического импульса. Таким образом, выбор той или иной длины резонатора будет зависеть от конкретных задач — достижения максимального уровня выходной оптической мощности либо получения минимально возможной длительности оптического импульса. На рис. 5 эта ситуация рассмотрена более подробно. Первая зависимость демонстрирует разность (Difference) уровня пиковой мощности, вторая — длительности оптического импульса образцов длиной 980 и 1950 мкм, в обоих случаях сравнение приводится относительно образца длиной 1950 мкм. Видно, что увеличение пиковой мощности образцов длиной 980 мкм относительно образцов длиной 1950 мкм становится все менее существенным по мере повышения напряжения питания — от 35% (3 В) до 7.5% (20 В). Отдельно можно выделить интервал напряжений 10–18 В, где разность пиковой мощности укладывается в диапазон 7–8.8%, при этом образцы длиной 980 мкм демонстрируют увеличение длительности оптического импульса более чем на 20% (максимум на 31.1% при 13 В). Можно сказать, что именно в этом диапазоне напряжений использование образцов длиной 1950 мкм наиболее целесообразно с точки зрения сокращения длительности оптического импульса без существенного снижения уровня выходной оптической мощности.

Итак, проведенные измерения позволили установить, что наиболее предпочтительными при номинале разрядного конденсатора 22 нФ являются образцы с длинами резонаторов 980 и 1950 мкм. Первые демонстрируют

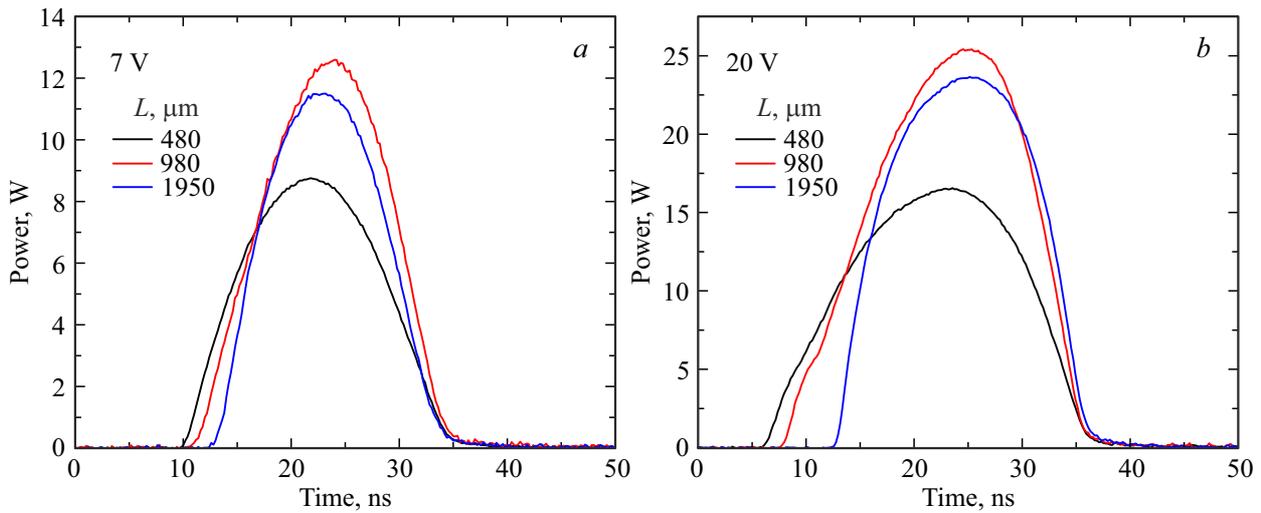


Рис. 3. Динамика выходной оптической мощности для образцов ЛТ длиной 480, 980 и 1950 мкм при напряжениях питания 7 В (а) и 20 В (б). (Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи).

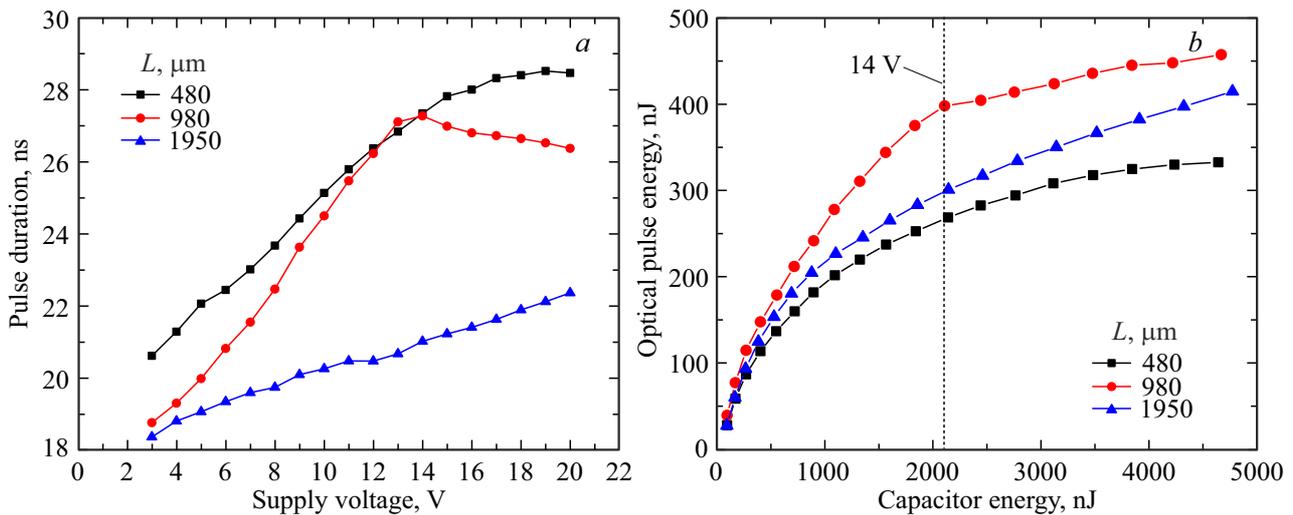


Рис. 4. Зависимость длительности оптического импульса от напряжения питания для образцов ЛТ разной длины (а); зависимость энергии в оптическом импульсе от энергии, запасённой в конденсаторе (б).

максимальный уровень пиковой мощности, в то время как вторые имеют меньшую длительность оптического импульса во всем диапазоне напряжений питания. О причинах рассмотренного в этом разделе поведения образцов ЛТ с разными длинами резонатора пойдет речь далее.

4. Обсуждение результатов

4.1. Исследование динамики напряжения на конденсаторе

Как было показано ранее, от длины резонатора образцов ЛТ зависят как длительность оптического импульса, так и его амплитуда. В динамике выходной оптической

мощности (рис. 3) не видно явных признаков наличия эффектов срыва лазерной генерации, поэтому будем считать, что длительность и амплитуда лазерного импульса напрямую зависят от длительности и амплитуды протекающего через ЛТ тока. Таким образом, у образцов с наименьшей длительностью оптического импульса должен наблюдаться и наиболее короткий электрический импульс. На рис. 6 представлена динамика напряжения на конденсаторе номиналом 22 нФ для образцов длиной 480, 980 и 1950 мкм и напряжений питания 7 В (а) и 20 В (б).

Стандартная методика оценки амплитуды тока ЛТ в условиях отсутствия нагрузочного сопротивления основывается на возможности корректно дифференцировать динамику напряжения на конденсаторе и умножении по-

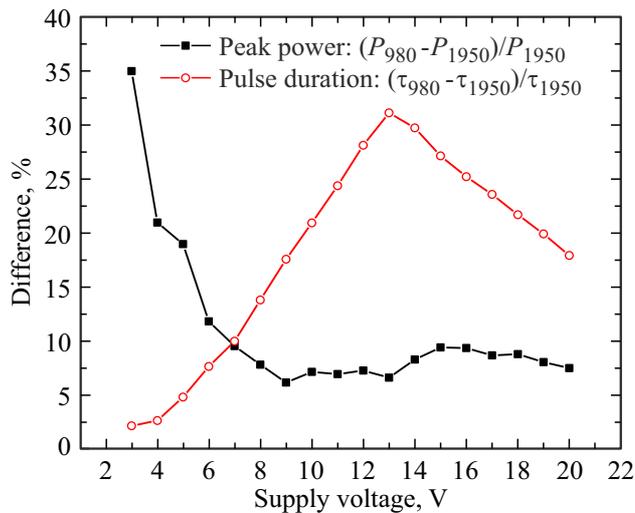


Рис. 5. Зависимости превышения уровня пиковой мощности P и длительности оптического импульса τ образцов ЛТ длиной 980 мкм над образцами длиной 1950 мкм от напряжения питания.

лученного результата на его номинал [5]. К сожалению, в данном случае оценка амплитуды тока по описанной методике для образцов длиной 980 и 1950 мкм оказалась затруднена из-за сложной динамики напряжения на конденсаторе. Дифференцирование динамики напряжения в случае короткого образца длиной 480 мкм на низких напряжениях питания дало следующий результат: при 7 В расчетная амплитуда тока составила 9.3 А (см. вставку на рис. 6, *a*). И для образцов длиной 980 мкм, и для образцов длиной 1950 мкм расчетные значения амплитуды тока оказались существенно заниженными и порождали завышенные значения наклона ватт-амперной характеристики (ВтАХ).

Несмотря на то что в данном эксперименте дифференцирование динамики напряжения на конденсаторе дает неточные численные значения амплитуды тока, по имеющимся результатам измерений можно сделать некоторые выводы о самом характере зависимости пикового тока ЛТ от напряжения питания. Во-первых, эта зависимость имеет преимущественно нелинейный характер с небольшим линейным участком от 3 до 7 В. Во-вторых, в этом же диапазоне напряжений питания 3–7 В длительность электрических импульсов образцов длиной 980 и 1950 мкм практически идентична, разность не превышает 1 нс, что в условиях одинаковых напряжений питания и номинала конденсатора может свидетельствовать о сопоставимой амплитуде протекающего через ЛТ тока. При повышении напряжения питания длительность электрического импульса образцов длиной 980 мкм возрастает с 27.4 нс (8 В) до 30.3 нс (14 В), затем снижается до 28.4 нс (20 В), в то время как длительность импульса образцов длиной 1950 мкм плавно снижается с 26.1 нс (8 В) до 24 нс (20 В). Таким образом, в диапазоне напряжений питания 8–20 В меньшая длительность электрического импульса образцов длиной 1950 мкм может свидетельствовать о большей амплитуде протекающего через ЛТ тока. Образцы длиной 480 мкм имеют большую длительность электрического импульса по сравнению с образцами длиной 1950 мкм во всем диапазоне напряжений питания и, соответственно, меньшую амплитуду тока.

Наблюдаемая динамика разрядки конденсатора несколько отличается от ожидаемой. Можно было бы предположить, что при компактном монтаже элементов кратное изменение площади ЛТ (в данном случае за счет изменения длины резонатора) приведет к сопоставимому изменению сопротивления разрядного контура. В реальности же поведение разрядного контура оказалось менее предсказуемым, поэтому было проведено

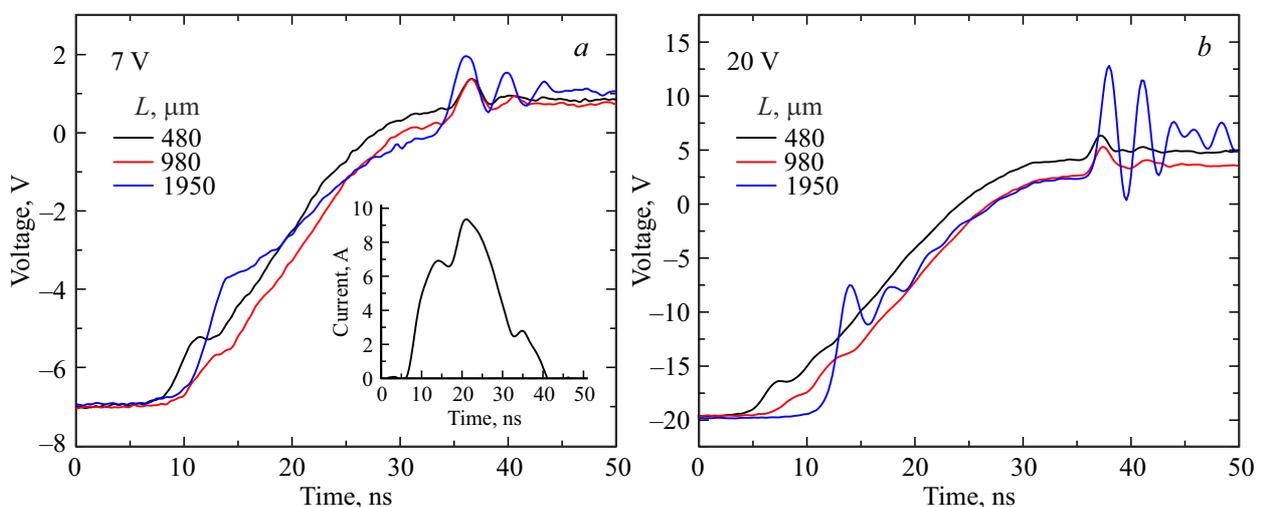


Рис. 6. Динамика напряжения на конденсаторе номиналом 22 нФ для образцов ЛТ длиной 480, 980 и 1950 мкм и напряжений питания 7 В (*a*) и 20 В (*b*). На вставке *a* — расчетная динамика тока для образцов длиной 490 мкм при напряжении питания 7 В.

предварительное моделирование его динамики с учетом известных нам параметров.

Максимальный вклад в сопротивление контура вносит непосредственно кристалл ЛТ, максимальный вклад в индуктивность контура дает паразитная индуктивность его элементов, а максимальный вклад в емкость — емкость конденсатора, 22 нФ, поскольку она значительно превосходит значения барьерной (десятки пФ) и диффузионной (в пределах 1 нФ) емкостей p - n -переходов для использованной гетероструктуры ЛТ.

Можно дать некоторые оценки наблюдаемым различиям в динамике разрядки конденсатора. В контуре с образцом длиной 480 мкм максимальны и индуктивность (≤ 1 нГн), и сопротивление (может превышать 1.5 Ом). Поэтому мы видим, с одной стороны, максимальное напряжение обратной полярности на конденсаторе из-за высокой индуктивности, а с другой стороны, колебания в конце импульса разрядки, связанные с переходом ЛТ в закрытое состояние, имеют минимальную амплитуду и быстро затухают из-за высокого сопротивления контура.

Контур с образцом длиной 1950 мкм имеет как минимальную индуктивность (~ 0.1 нГн), так и существенно меньшее сопротивление по сравнению с другими образцами. Однако, судя по всему, имеющиеся параметры контура все же не являются для 1950 мкм образца идеальными, поскольку не дают возможности реализовать имеющееся преимущество в сопротивлении и прокачать через кристалл существенно больший ток. Контур с образцами ЛТ длиной 980 и 1950 мкм имеют близкие значения индуктивности, поэтому при больших амплитудах протекающего тока (в частности, при напряжении питания 20 В) напряжение обратной полярности на конденсаторе в них одинаковое. Продолжение оптимизации электрической схемы, включая более детальный анализ переходных процессов и борьбу с паразитными параметрами, является целью нашей дальнейшей работы.

4.2. Измерение спектров лазерной генерации

Помимо амплитуды протекающего через ЛТ тока, на виде зависимости выходной оптической мощности от напряжения питания (рис. 2) могут сказываться повышенные внутренние оптические потери. Оценка их влияния началась с измерения спектров лазерной генерации всех образцов ЛТ с целью выявления возможных особенностей. Характерный вид спектров образцов ЛТ разных длин представлен на рис. 7, в качестве примера показаны результаты измерений при напряжениях питания 7, 15 и 20 В.

Видно, что положение центральной линии спектра существенно зависит от длины резонатора, при этом разница между соответствующими значениями у образцов длиной 480 и 1950 мкм составляет ~ 30 нм. Само по себе подобное поведение спектров генерации лазеров на основе гетероструктур системы AlGaAs/GaAs/InGaAs без селектирующих длины волн излучения элементов является типичным. В работе [15] было прямо показано

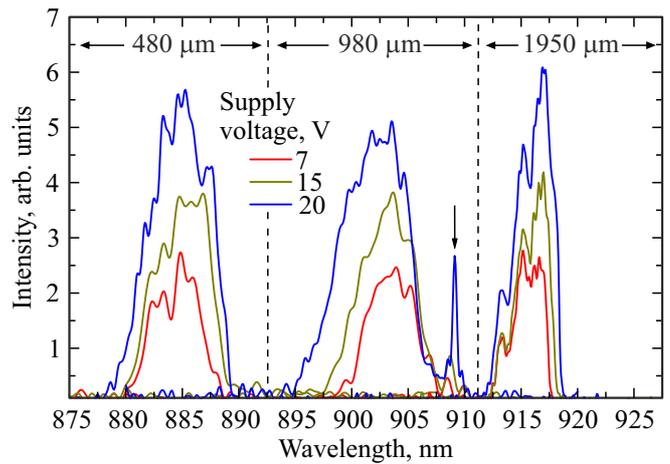


Рис. 7. Спектры лазерной генерации образцов ЛТ длиной 480, 980 и 1950 мкм для напряжений питания 7, 15 и 20 В.

наличие зависимости положения линии лазерной генерации от длины резонатора. В большей степени о наличии негативно влияющих на уровень выходной оптической мощности факторов могла бы говорить заметная деформация спектра образцов одной длины при повышении тока накачки. Здесь и далее будут приводиться данные для уровня 10% от нормированной амплитуды спектров. В нашем случае у образцов длиной 480 и 1950 мкм наблюдается типичное для полупроводниковых лазеров расширение спектров генерации по мере повышения напряжения питания и, соответственно, амплитуды тока. Это расширение слабее всего проявляется у длинных 1950 мкм образцов — изменение ширины спектра от 3 до 20 В составляет всего 2 нм, максимальная ширина спектра 6.1 нм, в то время как у образцов длиной 480 мкм спектр расширяется на 4.2 нм, максимальная ширина — 10.3 нм. Разность в ширине спектров может объясняться тем, что при одном и том же напряжении питания плотность тока выше в образце длиной 480 мкм. Сдвиг правого края спектра в длинноволновую область относительно своего первоначального положения не превышает 2.2 нм для 1950 мкм образца и 2.7 нм для 480 мкм образца, существенного смещения центральной длины волны спектра в какую-либо сторону не наблюдается. Сравнивая полученные результаты с опубликованными данными по другим излучателям со схожим дизайном одиночной лазерной части [13,14], можно констатировать отсутствие дополнительного разогрева активной области лазерной части ЛТ по сравнению с активными областями лазерных чипов по крайней мере для двух из трех исследованных длин резонатора — 480 и 1950 мкм. Таким образом, характер имеющихся в этих образцах внутренних оптических потерь не позволяет внести критические изменения в вид спектров генерации.

Иная ситуация сложилась с образцами длиной 980 мкм. Как видно из рис. 7, спектр имеет основную часть шириной до 11.8 нм и дополнительные линии

справа от основных (показаны вертикальной стрелкой). При этом общая ширина спектра с учетом дополнительных линий может достигать 14.5 нм, что значительно превышает аналогичные значения для образцов других длин. Поскольку подобный вид спектра генерации ранее не фиксировался [13,14], можно связать его особенности не просто с дизайном лазерной части, но с работой ЛТ в целом. Нельзя исключать, что приводящие к ухудшению спектральных характеристик образцов длиной 980 мкм процессы также ограничивают уровень максимально достижимой выходной оптической мощности ЛТ.

4.3. Оценка внешней дифференциальной эффективности

Итак, самыми узкими и наиболее слабо расширяющимися с увеличением напряжения питания спектрами лазерной генерации обладают образцы длиной 1950 мкм, что может быть связано с большей добротностью резонатора по сравнению с образцами меньшей длины. Внутренние оптические потери в 1950 мкм образцах не вносят существенных изменений во внешний вид спектров лазерной генерации. Кажется очевидным тот факт, что полупроводниковый лазер с большей длиной резонатора будет испытывать негативное влияние внутренних оптических потерь на уровень выходной оптической мощности в большей степени, нежели лазер с меньшей длиной резонатора. Однако масштаб этого влияния будет определяться в первую очередь самой величиной внутренних оптических потерь.

Положение секций управления слева и справа от лазерного полоска ЛТ не позволяет осуществлять эффективную прямую накачку лазерной части током большой амплитуды из-за возникающей неоднородности его протекания [16]. Поэтому для оценки величины внутренних оптических потерь использовались экспериментальные данные, полученные при измерении ВтАХ полупроводниковых лазеров, изготовленных из специально выращенной опорной лазерной гетероструктуры. Дизайн опорной гетероструктуры полностью повторял дизайн лазерной части гетероструктуры ЛТ, ширина лазерного полоска, как и в ЛТ, составила 200 мкм, на грани кристаллов не были нанесены просветляющие и отражающие покрытия. Для проведения характеристики были выбраны образцы длиной 490, 970 и 1480 мкм. Измерения ВтАХ проводились на начальном ее участке, когда выходная оптическая мощность возрастает по мере повышения тока накачки линейно. Дальнейшие расчеты выполнялись с использованием формул (1)–(3) [17,18]:

$$1/\eta_D = (1/\eta_i) \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot L \cdot \alpha_i}{\ln(1/(R_f \cdot R_b))}\right), \quad (1)$$

$$\eta = \eta_D \cdot 1.24/\lambda, \quad (2)$$

$$P_{\text{out}} = \eta \cdot (I - I_{\text{th}}), \quad (3)$$

где $R_f = R_b = 0.3$ — коэффициенты отражения передней и задней граней резонатора соответственно,

Таблица 1. Пороговый ток I_{th} , внутренняя квантовая эффективность η_i и внутренние оптические потери α_i образцов опорной гетероструктуры

L , мкм	η_i	α_i , см	I_{th} , А
490	0.92	2.22	0.57
970			0.65
1480			0.75

Таблица 2. Пороговый ток I_{th} , внешняя дифференциальная квантовая эффективность η_D и внешняя дифференциальная эффективность η лазерной части ЛТ

L , мкм	I_{th} , А	η_D	η , Вт/А
480	0.57	0.85	1.18
980	0.65	0.78	1.07
1950	0.87	0.68	0.93

η_i — внутренний квантовый выход, η_D — внешняя дифференциальная квантовая эффективность, α_i — внутренние оптические потери, L — длина резонатора, η — внешняя дифференциальная эффективность, P_{out} — выходная оптическая мощность, I_{th} — пороговый ток, λ — длина волны излучения.

Из соотношений (1)–(3) по описанной в [18] методике проводилась оценка величин внутреннего квантового выхода η_i и внутренних оптических потерь α_i опорной гетероструктуры. В табл. 1 представлены результаты измерений порогового тока I_{th} образцов длиной 490, 970 и 1480 мкм, а также оценка величин внутреннего квантового выхода η_i и внутренних оптических потерь α_i опорной гетероструктуры.

Полученные при исследовании опорной гетероструктуры данные помогли понять, какими могли бы быть характеристики лазерной части образцов ЛТ. Измерение ВтАХ образцов опорной гетероструктуры с разной длиной резонатора позволило получить зависимость порогового тока от длины резонатора, аппроксимировать ее полиномом 2-го порядка и определить предполагаемые значения порогового тока I_{th} для образцов длиной 480, 980 и 1950 мкм в соответствии с длинами образцов ЛТ. Рассчитанные с помощью аппроксимации значения порогового тока для образцов длиной 480, 980 и 1950 мкм представлены в табл. 2. Кроме того, значения η_i , α_i и реальные данные измеренных спектров лазерной генерации были использованы для расчета внешней дифференциальной квантовой эффективности η_D и внешней дифференциальной эффективности η в соответствии с формулами (1) и (2), эти значения также представлены в табл. 2.

Видно, что при уровне внутренних оптических потерь $\alpha_i = 2.22 \text{ см}^{-1}$ и внутреннем квантовом выходе $\eta_i = 0.92$ внешняя дифференциальная эффективность η

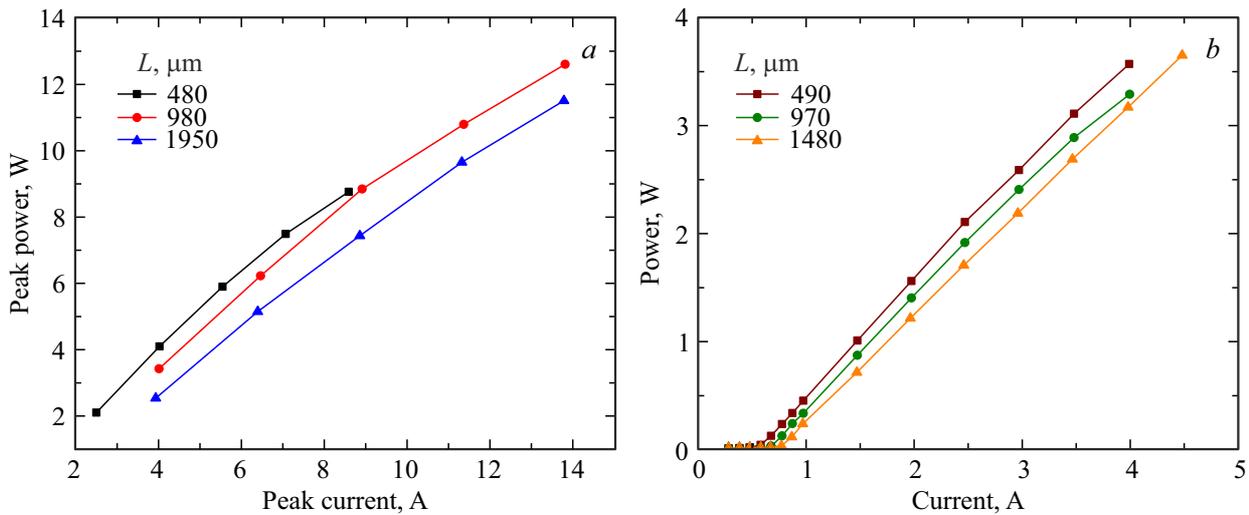


Рис. 8. ВтАХ образцов ЛТ длиной 480, 980 и 1950 мкм в диапазоне напряжений питания 3–7 В (а) и ВтАХ образцов опорной гетероструктуры длиной 490, 970 и 1480 мкм (б).

падает с увеличением длины резонатора от 480 до 1950 мкм на 0,25 Вт/А. Имея данные о внешней дифференциальной эффективности образцов на начальном линейном участке ВтАХ, по формуле (3) можно определить значения пикового тока, которые соответствовали бы реально измеренным значениям пиковой оптической мощности (см. рис. 2). Особенность в том, что линейная зависимость пиковой мощности от напряжения сохраняется в диапазоне напряжений питания 3–5 В, в то время как линейная зависимость пикового тока от напряжения, как было указано ранее, в диапазоне 3–7 В. Поэтому напрямую по формуле (3) пересчет возможен только в меньшем из диапазонов — 3–5 В, а затем линейная зависимость пикового тока может быть аппроксимирована для определения значений пикового тока до 7 В. При более высоких напряжениях питания пиковый ток перестает возрастать линейно, поэтому продолжение аппроксимации невозможно.

На рис. 8, а можно видеть ВтАХ экспериментальных образцов ЛТ, в которой значения пиковой мощности взяты непосредственно из эксперимента (см. рис. 2), а значения пикового тока рассчитаны из соотношения (3) для диапазона напряжений 3–5 В и аппроксимированы до 7 В. На рис. 8, б для наглядности представлены ВтАХ образцов опорной гетероструктуры. И в том и в другом случае эффективность излучателей уменьшается с увеличением длины резонатора. Однако если в случае обычных полосковых лазеров, каковыми и являются образцы на основе опорной гетероструктуры, регулирование уровня выходной оптической мощности осуществляется прямым изменением амплитуды тока накачки, то в случае ЛТ непосредственно управляемым параметром является не амплитуда тока, а напряжение питания. Поскольку зависимость амплитуды тока ЛТ от напряжения питания нелинейная, при анализе общей эффективности работы образцов ЛТ не следует полагаться

исключительно на данные ВтАХ, необходимо учитывать и эффективность работы разрядного контура ЛТ как токового ключа в целом.

Образцы ЛТ длиной 480 мкм, формально имеющие максимальную внешнюю дифференциальную эффективность на начальном линейном участке ВтАХ, демонстрируют наименьшую амплитуду тока по сравнению с более длинными образцами. Вероятной причиной этого явления, как упоминалось ранее, может быть повышенное по сравнению с длинными образцами последовательное сопротивление. Другим недостатком коротких образцов является уменьшение наклона ВтАХ уже при амплитуде тока 7,1 А (6 В), что свидетельствует о снижении внешней дифференциальной эффективности. Согласно данным рис. 2, короткие образцы имеют самую низкую выходную оптическую мощность, поэтому нет оснований полагать, что с дальнейшим повышением напряжения питания и, соответственно, амплитуды протекающего через ЛТ тока ситуация улучшится. Таким образом, образцы длиной 480 мкм обладают меньшей выходной оптической мощностью по сравнению с более длинными образцами при одних и тех же напряжениях питания, с одной стороны, по причине большего последовательного сопротивления и, соответственно, меньшей амплитуды тока, а с другой стороны, из-за снижения внешней дифференциальной эффективности уже при амплитуде тока 7,1 А (6 В).

Образцы длиной 980 и 1950 мкм в диапазоне напряжений питания 3–7 В имеют схожие значения амплитуды тока (что совпадает со сделанным ранее выводом на основе сравнения длительностей электрического импульса), при этом демонстрируя не столь явные признаки загиба ВтАХ и снижения внешней дифференциальной эффективности по сравнению с образцами длиной 480 мкм. Из данных рис. 2 видно, что по мере дальнейшего повышения напряжения питания скорость прироста вы-

ходной оптической мощности для обоих типов образцов существенно снижается, соответственно, уменьшение внешней дифференциальной эффективности станет для них более заметным. С учетом всего вышесказанного можно сделать вывод о том, что основной причиной снижения выходной оптической мощности у образцов длиной 1950 мкм по сравнению с образцами длиной 980 мкм при сопоставимой амплитуде тока является изначально более низкая внешняя дифференциальная эффективность. Этот недостаток потенциально может быть компенсирован возможностью прокачать длинные образцы током большей амплитуды при фиксированном напряжении питания, поскольку их сопротивление самое низкое. Для этого требуется проведение работы по оптимизации параметров разрядного контура, что будет предметом дальнейших исследований.

5. Заключение

В процессе работы для образцов ЛТ с разной длиной резонатора (480, 980 и 1950 мкм) были проведены измерения динамики выходной оптической мощности, динамики напряжения на подключенном параллельно ЛТ конденсаторе номиналом 22 нФ и спектров лазерной генерации. Все образцы ЛТ исследовались при комнатной температуре в одинаковых условиях: ток управления — 10.4 мА, частота следования импульсов — 203 Гц.

Наиболее высокий уровень выходной оптической мощности во всем диапазоне напряжений питания продемонстрировали образцы длиной 980 мкм. Для максимального напряжения питания 20 В значение пиковой мощности составило 25.4 Вт. Наличие дополнительных спектральных линий в правой части спектров лазерной генерации может свидетельствовать о процессах, ограничивающих уровень выходной оптической мощности.

Самую низкую выходную оптическую мощность показали образцы длиной 480 мкм. Первой причиной этого является меньшая по сравнению с другими образцами амплитуда протекающего через ЛТ тока, что может быть связано с большим последовательным сопротивлением образца за счет меньшей прокачиваемой током площади. Вторая причина заключается в снижении значения внешней дифференциальной эффективности от своего первоначального значения 1.18 Вт/А при превышении напряжения питания 6 В, что соответствует амплитуде тока всего 7.1 А.

Образцы длиной 1950 мкм имели меньший уровень выходной оптической мощности по сравнению с образцами длиной 980 мкм за счет изначально меньшего значения внешней дифференциальной эффективности (на линейном участке ВтАХ 0.93 Вт/А против 1.07 Вт/А для образцов длиной 980 мкм). С положительной стороны эти образцы характеризуют минимальные ширина спектра генерации и длительность оптического импульса (от 18.4 нс при 3 В до 22.4 нс при 20 В). В диапазоне напряжений питания 10–18 В образцы длиной 1950 мкм

показали существенное сокращение длительности импульса по сравнению с более мощными образцами длиной 980 мкм (> 20%, максимум на 31.1% при 13 В), уступая последним в уровне выходной оптической мощности всего 7–8.8%.

Таким образом, можно сделать вывод о низкой эффективности образцов ЛТ длиной 480 мкм при работе в режимах генерации импульсов длительностью 20–30 нс. Образцы ЛТ длиной 980 и 1950 мкм могут быть использованы в этих режимах работы, при этом предпочтение той или иной длине резонатора будет отдаваться в соответствии с требованиями либо достижения максимального уровня выходной оптической мощности (980 мкм), либо минимальной длительности оптического импульса (1950 мкм).

Анализ ВтАХ на начальном участке показал, что эффективность лазерной части ЛТ зависит от длины резонатора таким же образом, что и эффективность полускоковых лазеров на основе опорной гетероструктуры. Однако ключевым отличием ЛТ от обычного полупроводникового лазера является нелинейная зависимость тока в контуре ЛТ от напряжения питания, поэтому к вопросу эффективности непосредственно лазерной части добавляется вопрос эффективности работы разрядного контура в целом. Предметом дальнейших исследований будет являться оптимизация параметров разрядного контура с целью получения больших значений пикового тока и, соответственно, выходной оптической мощности при тех же напряжениях питания.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] H. Wenzel, A. Klehr, A. Liero, H. Christopher, J. Fricke, A. Maaßdorf, A. Zeghuzi, A. Knigge. 2019 *IEEE High Power Diode Lasers and Systems Conf. (HPD)* (Coventry, UK, 2019) p. 7. DOI: 10.1109/HPD48113.2019.8938682
- [2] S.S. Freeborn, J. Hannigan, F. Greig, R.A. Suttie, H.A. MacKenzie. *Rev. Sci. Instrum.*, **69**, 3948 (1998). DOI: 10.1063/1.1149204
- [3] B. Huang, T.T.W. Wong. *J. Biomedical Optics*, **29** (S1), S11503 (2023). DOI: 10.1117/1.JBO.29.S1.S11503
- [4] B. Svobodova, A. Kloudova, J. Ruzicka, L. Kajtmanova, L. Navratil, R. Sedlacek, T. Suchy, M. Jhanwar-Uniyal, P. Jendelova, M. Jhanwar-Uniyal, P. Jendelova. *Sci Rep.*, **9**, 7660 (2019). DOI: 10.1038/s41598-019-44141-2
- [5] S.O. Slipchenko, A.A. Podoskin, A.V. Rozhkov, N.A. Pikhtin, I.S. Tarasov, T.A. Bagaev, M.A. Ladugin, A.A. Marmalyuk, A.A. Padalitsa, V.A. Simakov. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **27**, 307 (2015). DOI: 10.1109/LPT.2014.2370064
- [6] P.S. Gavrina, A.A. Podoskin, D.N. Romanovich, V.S. Golovin, D.A. Veselov, S.O. Slipchenko, N.A. Pikhtin, T.A. Bagaev, M.A. Ladugin, A.A. Marmalyuk, V.A. Simakov. *Semicond. Sci. Technol.*, **34**, 065025 (2019). DOI: 10.1088/1361-6641/ab1c0a

- [7] N. Ammouri, H. Christopher, J. Fricke, A. Ginolas, A. Liero, A. Maaßdorf, H. Wenzel, A. Knigge. *Electron. Lett.*, **59**, e12680 (2023). DOI: 10.1049/el2.12680
- [8] A. Knigge, A. Klehr, H. Wenzel, A. Zeghuzi, J. Fricke, A. Maaßdorf, A. Liero, G. Tränkle. *Phys. Status Solidi A*, **215**, 1700439 (2018). DOI: 10.1002/pssa.201700439
- [9] Y. Qiu, Y. Xie, W. Wang, W. Liu, L. Kuang, X. Bai, M. Hu, J. Ho. *2019 IEEE 4th Optoelectronics Global Conf. (OGC)* (Shenzhen, China, 2019) p. 32. DOI: 10.1109/OGC.2019.8925087
- [10] Y. Zhao, G. Yang, Y. Zhao, S. Tang, Y. Lan, Y. Liu, Z. Wang, A. Demir. *IEEE Photonics J.*, **14**, 1557006 (2022). DOI: 10.1109/JPHOT.2022.3211964
- [11] J. Fricke, H. Wenzel, A. Maaßdorf, C. Zink, M. Matalla, R. Unger, A. Knigge. *Semicond. Sci. Technol.*, **37**, 095021 (2022). DOI: 10.1088/1361-6641/ac860f
- [12] М.А. Ладугин, Ю.П. Коваль, А.А. Мармалюк, В.А. Петровский, Т.А. Багаев, А.Ю. Андреев, А.А. Падалица, В.А. Симаков. *Квант. электрон.*, **43**, 407 (2013). [*Quant. Electron.*, **43**, 407 (2013)]. DOI: 10.1070/QE2013v043n05ABEH015156
- [13] А.А. Мармалюк, Е.И. Давыдова, М.В. Зверков, В.П. Коняев, В.В. Кричевский, М.А. Ладугин, Е.И. Лебедева, С.В. Петров, С.М. Сапожников, В.А. Симаков, М.Б. Успенский, И.В. Яроцкая, Н.А. Пихтин, И.С. Тарасов. *ФТП*, **45**, 528 (2011).
- [14] S.O. Slipchenko, A.A. Podoskin, D.A. Veselov, V.A. Strelets, N.A. Rudova, N.A. Pikhin, T.A. Bagaev, M.A. Ladugin, A.A. Marmalyuk, P.S. Kor'ev. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **34**(1), 35 (2022).
- [15] J.J. Coleman, K.J. Beernink. *J. Appl. Phys.*, **75**, 1879 (1994). DOI: 10.1063/1.356333
- [16] О.С. Соболева, В.С. Головин, В.С. Юферев, П.С. Гаврина, Н.А. Пихтин, С.О. Слипченко, А.А. Подоскин. *ФТП*, **54**, 478 (2020). [*Semiconductors*, **54**, 575 (2020)]. DOI: 10.21883/FTP.2020.05.49265.9341
- [17] L.A. Coldren, S.W. Corzine, M.L. Mashanovitch. *Diode lasers and photonic integrated circuits* (Hoboken-N.J., John Wiley & Sons, 2012).
- [18] А.Е. Жуков, М.В. Максимов. *Современные инжекционные лазеры* (СПб., Изд-во Политехн. ун-та, 2009).

Редактор Г.А. Оганесян

The effect of the cavity length on the output optical power of semiconductor laser-thyristors based on AlGaAs/GaAs/InGaAs heterostructures

P.S. Gavrina¹, A.A. Podoskin¹, I.V. Shushkanov¹, I.S. Shashkin¹, V.A. Kriychkov¹, S.O. Slipchenko¹, N.A. Pikhin¹, T.A. Bagaev¹, M.A. Ladugin², A.A. Marmalyuk², V.A. Simakov²

¹ Ioffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

² Open Joint-Stock Company Stel'makh Polyus
Research Institute,
117342 Moscow, Russia

Abstract The effect of laser-thyristor cavity length on the characteristics of the generated laser pulses has been studied. Results show that for pulse durations of approximately 20–30 ns, achieved with a nominal discharge capacitor of 22 nF, increasing the cavity length from 480 to 980 μm enables a rise in maximum peak power from 16.6 W to 25.4 W. A further extension of the cavity length to 1950 μm causes an insignificant decrease in the maximum peak power to 23.7 W due to lower external differential efficiency of the samples at the initial linear region of the light-current curve. However, this extension provides a reduction of optical pulse duration compared to samples of other lengths over the entire supply voltage range.