

Температурная зависимость выходной оптической мощности полупроводниковых лазеров-тиристоров на основе гетероструктур AlGaAs/GaAs/InGaAs

П.С.Гаврина, А.А.Подоскин, И.В.Шушканов, С.О.Слипченко, Н.А.Пихтин, Т.А.Багаев, М.А.Ладугин, А.А. Мармалюк, В.А.Симаков

Проведены измерения выходной оптической мощности, спектров лазерной генерации, длительности оптического импульса и задержек включения полупроводниковых лазеров-тиристоров с шириной полоска 200 мкм и длиной 980 мкм в диапазоне рабочих температур от 20 до 70 °С при номинале разрядного конденсатора 22 нФ и амплитуде тока управления 10.4 мА. Показано, что лазеры-тиристоры обладают высокой температурной стабильностью. При нагреве приборов с 20 до 70 °С уровень снижения выходной пиковой мощности не превысил 15% для напряжений питания 4–20 В и 25% для напряжения 3 В, сдвиг центральной длины волны спектра генерации в среднем составил 0.21 нм/°С.

Ключевые слова: лазеры-тиристоры, импульсные лазеры, температурные измерения, токовые ключи.

1. Введение

В настоящее время импульсные полупроводниковые лазеры имеют широкий спектр практических применений, одним из которых является область лазерной дальнометрии [1–3]. Существенное число дальномеров ориентировано на условия минимального поглощения излучения водяными парами атмосферы и спроектировано для работы в спектральном диапазоне 890–915 нм. Это связано, с одной стороны, с высокой эффективностью и надёжностью непосредственно полупроводниковых лазеров, а с другой стороны, с высокой фоточувствительностью коммерчески доступных кремниевых фотодетекторов. Однако, помимо непосредственно эффективности источника излучения и фотодетектора, в готовом приборе на первый план выходит проблема повышения энергоэффективности в целом.

Традиционные решения для накачки лазерных излучателей различной конфигурации основаны на использовании внешних импульсных источников тока как на полевых [4–6], так и на биполярных токовых ключах [3, 7–9]. Однако привлекательными выглядят решения, основанные на принципах эпитаксиальной интеграции, к основным преимуществам которых можно отнести дополнительное упрощение электрической схемы питания с уменьшением её паразитных параметров относительно схем с внешним токовым ключом. К таким решениям относится полупроводниковый лазер-тиристор (ЛТ), который объединяет в одной эпитаксиальной гетероструктуре фототранзисторный токовый ключ и лазерный диод по-

лосковой конструкции. Источником накачки для лазерного диода является подключённый параллельно чипу ЛТ конденсатор, номинал которого подбирается с учётом требуемой длительности оптического импульса. Питание ЛТ осуществляется с помощью источника постоянного напряжения и импульсов управления с малой амплитудой тока, на уровне единиц либо десятков миллиампер, что выгодно отличает ЛТ от стандартных лазерных излучателей, для питания которых требуется применение внешних генераторов импульсов тока амплитудой десятки ампер. Ранее была продемонстрирована возможность генерации с помощью ЛТ лазерных импульсов длительностью от долей до сотен наносекунд и мощностью от долей до десятков ватт [10, 11].

Помимо повышения электрической эффективности непосредственно накачки полупроводникового излучателя, важным вопросом является минимизация энергозатрат на термостабилизацию прибора. Поскольку для элементов Пельтье требуется организация дополнительных источников питания, преимущество будут иметь такие системы, которые могут работать в условиях отсутствия термостабилизации без существенного ухудшения своих характеристик.

Отсутствие термостабилизации может негативно сказаться на уровне выходной оптической мощности излучателя как в случае повышенной температуры окружающей среды, так и при работе на высоких частотах, когда происходит дополнительный разогрев кристалла и элементов электрической цепи. В связи с этим изучение особенностей работы прибора в широком диапазоне температур представляет существенный практический интерес. Так, в [2] рассматривались образцы полупроводниковых лазеров на основе многопереходных гетероструктур с четырьмя излучающими областями длиной 750 мкм и с шириной полоска 200 мкм в диапазоне рабочих температур от 25 до 125 °С при длительности импульса 200 нс. Было показано, что уровень выходной оптической мощности снижается на 4% за каждые 10 °С возрастающей температуры. Кроме того, для этих образцов при амплитуде тока 24 А сдвиг центральной длины волны спектра составил

П.С.Гаврина, А.А.Подоскин, И.В.Шушканов, С.О.Слипченко, Н.А.Пихтин, Т.А.Багаев. Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН, Россия, 194021 С.-Петербург, Политехническая ул., 26; e-mail: gavrina@mail.ioffe.ru
М.А.Ладугин, А.А. Мармалюк, В.А.Симаков. ОАО «НИИ “Полус” им. М.Ф.Степана», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3, корп.1

Поступила в редакцию 7 мая 2024 г., после доработки – 15 июля 2024 г.

0.28 нм/°С. Сопоставимые значения процента снижения пиковой мощности и сдвига центральной длины волны спектра генерации заявлены современными производителями лазерных диодов, такими как Osram Opto Semiconductors (для излучателей типа SPL PL90_3с и SPL PL90 – 0.4%/°С, 0.28 нм/°С), Laser Components (для излучателей серии 905D1SxxUA – около 0.3%/°С и 0.27 нм/°С), Lite-on (для излучателей LTE-L201E-01 – до 0.37%/°С и 0.25 нм/°С). Таким образом, разрабатываемые источники лазерного излучения для спектрального диапазона 890–915 нм должны обладать аналогичной температурной стабильностью.

В [12] были исследованы образцы полупроводниковых лазеров на основе гетероструктур системы AlGaAs/GaAs/InGaAs, спроектированных для излучения на длине волны ~1060 нм, с различными длинами резонатора (от 600 до 2900 мкм) и шириной полоска 100 мкм в режиме генерации импульсов ~100 нс. Было показано, что эффективность работы при повышенных температурах (до 90 °С) существенным образом зависит от длины резонатора – короткие образцы длиной 600 мкм более других подвержены негативному влиянию разогрева, а оптические импульсы имеют явные признаки срыва генерации. При этом эффекты срыва генерации в образцах длиной 1000 и 2900 мкм проявляются значительно слабее. В [13] также рассматривался вопрос влияния длины резонатора на уровень выходной оптической мощности, но применительно к образцам ЛТ на основе гетероструктур системы AlGaAs/GaAs/InGaAs, излучающим в спектральном диапазоне 890–915 нм, ширина полоска лазерной части составляла 200 мкм. Было установлено, что наиболее высоким уровнем выходной оптической мощности отличаются образцы длиной 980 мкм, однако влияние температуры на их характеристики не исследовалось. В связи с этим целью настоящей работы стало изучение поведения ЛТ длиной 980 мкм с дизайном из [13] в диапазоне рабочих температур от 20 до 70 °С.

2. Экспериментальные образцы

В этой работе использовались экспериментальные образцы длиной 980 мкм из [13], при этом измерения проводились с теми же параметрами электрической цепи:

номинал конденсатора 22 нФ, амплитуда тока управления 10.4 мА, диапазон напряжений питания от 3 до 20 В.

Управление температурой осуществлялось с помощью элемента Пельтье в диапазоне от 20 до 70 °С, контроль температуры проводился в непосредственной близости от места размещения ЛТ и элементов разрядного контура.

В ходе работы были измерены динамика напряжения на конденсаторе, динамика выходной оптической мощности и спектры лазерной генерации. На основе проведенных измерений были получены оценки значений задержек включения, длительности оптических импульсов и сдвига центральной длины волны спектра генерации.

3. Динамика напряжения на конденсаторе и задержки включения ЛТ

Первым шагом при оценке влияния температуры на выходные характеристики ЛТ стало исследование динамики напряжения на конденсаторе. На рис.1 в качестве примера представлены результаты для температур 20, 45 и 70 °С при напряжениях питания 7 и 20 В. Также на вставке рис.1,б показан типичный вид зависимости длительности электрического импульса τ от напряжения питания (сохраняется во всем диапазоне температур), характерный для образцов ЛТ длиной 980 мкм. Уменьшение длительности электрического импульса τ при достижении напряжения питания 14 В в данном случае может объясняться ускорением процесса перехода ЛТ в открытое состояние за счёт усиления ударной ионизации по мере возрастания напряжения питания. Аналогичные зависимости длительности оптического импульса будут более подробно рассмотрены далее.

Как уже упоминалось в [13], для образцов длиной 980 мкм оценка амплитуды протекающего через ЛТ тока затруднена, однако на основании данных рис.1 можно выдвинуть некоторые предположения относительно поведения параметров разрядного контура. Главным образом повышение температуры может влиять на два параметра – на номинал конденсатора и на последовательное сопротивление ЛТ. Согласно справочным данным, используемые конденсаторы имеют стабильную ёмкость в диапазоне температур 10–50 °С, в диапазоне же темпе-

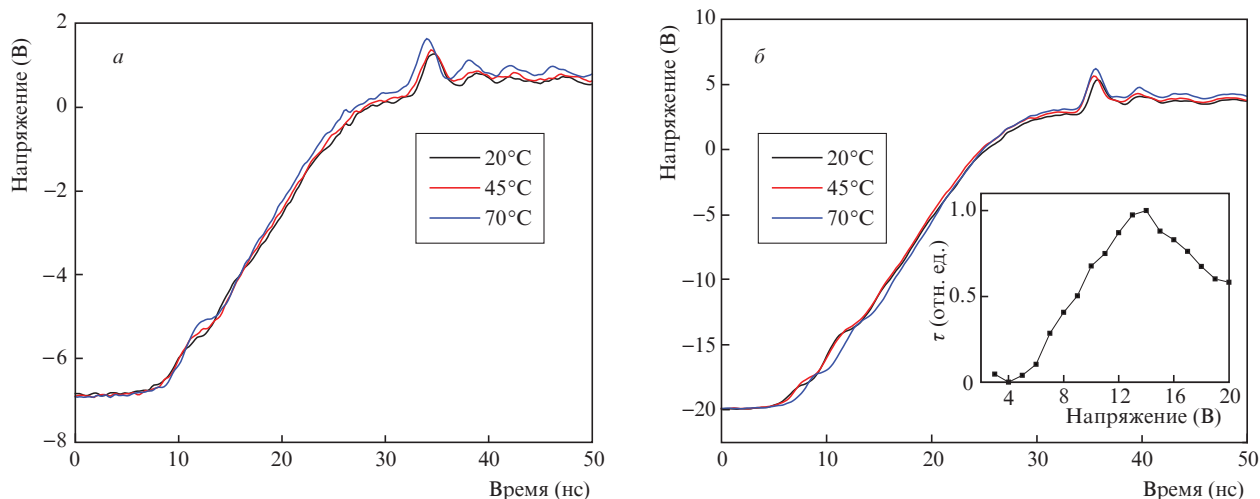


Рис.1. Динамика разрядки конденсатора номиналом 22 нФ для температур 20, 45 и 70 °С при напряжениях питания 7 (а) и 20 В (б). На вставке: типичный вид зависимости длительности электрического импульса τ от напряжения питания.

ратур 50–70 °С ёмкость уменьшается не более чем на 5%. Такое уменьшение ёмкости с 22 до 20.9 нФ может привести к уменьшению длительности импульса на ~ 1 нс. Об уменьшении сопротивления ЛТ могло бы говорить повышение значений напряжения, до которого конденсатор заряжается с обратной полярностью. Действительно, совокупность факторов уменьшения ёмкости конденсатора и последовательного сопротивления ЛТ привела к некоторым изменениям внешнего вида динамики разрядки конденсатора. В частности, длительность электрического импульса τ при $T = 70$ °С сократилась относительно значения при $T = 20$ °С на ~ 1.5 нс, а напряжение обратной полярности увеличилось на ~ 200 мВ для напряжения питания 7 В и на 390 мВ для напряжения питания 20 В (в момент времени 30 нс). Однако с учётом длительностей импульса 20–30 нс и диапазона напряжений питания 3–20 В эти изменения можно считать незначительными. Таким образом, параметры разрядного контура от температуры зависят слабо, т.е. изменения в уровне пиковой мощности будут преимущественно связаны не с изменением амплитуды тока ЛТ, а с изменением эффективности лазерной части.

При этом повышение температуры оказывает заметное влияние на такой важный параметр ЛТ, как время задержки включения. Известно [14, 15], что при возрастании температуры уменьшаются напряжение включения тиристора и амплитуда минимального тока управления, необходимые для включения прибора. Основной причиной этого явления можно назвать повышение коэффициентов передачи тока, вызванное несколькими факторами: увеличением времени жизни носителей заряда [16], сопутствующим уменьшением рекомбинационного тока в р-GaAs-базе транзистора, а также усилением термогенерации неосновных носителей заряда, которые вносят дополнительный вклад в управляющий ток. Однако в случае наличия в приборе ударной ионизации напряжение включения при повышении температуры будет возрастать за счёт уменьшения длины свободного пробега. Наблюдаемые экспериментально зависимости задержек включения от температуры будут иллюстрировать конкуренцию двух этих механизмов.

Применительно к условиям нашего эксперимента, когда амплитуда тока управления постоянна и набор напряжений питания фиксирован, повышение температуры

могло бы привести либо к уменьшению задержек включения, если основным ответственным за переключение ЛТ механизмом является фотогенерация, либо к возрастанию задержек включения, если именно ударная ионизация даёт преимущественный вклад в процесс. Ранее похожий эксперимент проводился для ЛТ на основе гетероструктуры, которая характеризовалась меньшим максимальным блокируемым напряжением, чем было связано с использованием более тонкой р-базы (2 мкм) [17]. Было отмечено, что характер изменения задержек включения непосредственно связан с плотностью тока управления. На малых плотностях тока управления задержки включения возрастали с температурой, т.к. в этом случае фотогенерация носителей заряда в р-базе была слабой, и переключение ЛТ в открытое состояние происходило преимущественно за счёт ударной ионизации. По мере увеличения плотности тока управления и усиления фотогенерации температурная зависимость задержек включения становилась всё менее заметной. В текущем эксперименте ток управления был достаточно высоким, чтобы наблюдать следующую стадию – уменьшение задержек включения по мере возрастания температуры. Результаты измерений времени задержек включения для исследуемой гетероструктуры можно видеть на рис.2,а (время задержки включения определялось как время от начала импульса управления до момента спада напряжения на конденсаторе на 10% от исходного). На рис.2,б показана температурная зависимость изменения задержек включения относительно значений при 20 °С.

Видно, что задержки включения уменьшаются с повышением температуры во всём диапазоне напряжений питания, однако чем выше напряжение, тем слабее эта зависимость. Можно было бы ожидать, что зависимость на рис.2,б для напряжения питания 20 В окажется выше аналогичной зависимости для напряжения 16 В, поскольку с повышением напряжения питания вклад ударной ионизации в процесс переключения ЛТ должен возрастать. Однако эффективность ударной ионизации, как упоминалось ранее, с повышением температуры снижается за счёт уменьшения длины свободного пробега. В итоге мы видим, что в диапазоне температур 45–70 °С вклад ударной ионизации в процесс переключения ЛТ для напряжений питания в диапазоне 16–20 В практически одинаков.

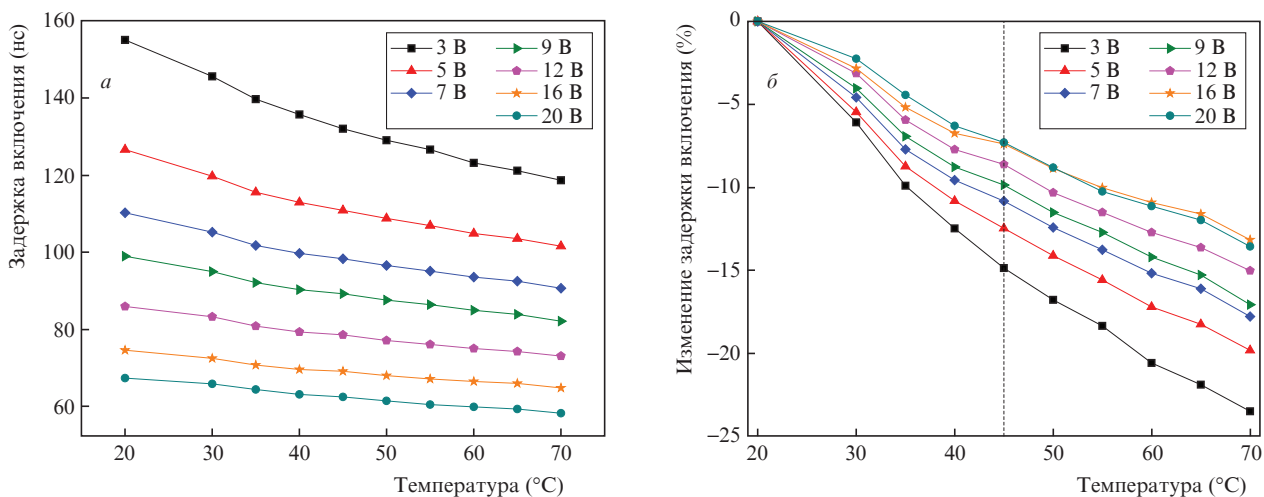


Рис.2. Температурные зависимости задержек включения (а) и изменения задержек включения относительно значений при 20 °С (б).

4. Динамика выходной оптической мощности

Одновременно с контролем напряжения на конденсаторе измерялась и выходная оптическая мощность. На рис.3 представлена динамика выходной оптической мощности при напряжениях питания 7 и 20 В для температур 20, 45 и 70 °С, а на рис.4 можно видеть зависимости пиковой мощности от напряжения питания и температуры. Можно констатировать, что при повышении температуры не наблюдается признаков срыва лазерной генерации, однако уровень выходной оптической мощности плавно снижается. Для максимального напряжения питания 20 В повышение температуры с 20 до 70 °С приводит к понижению пиковой мощности на 13%, а в целом для диапазона напряжений питания 4–20 В снижение пиковой мощности не превышает 15%. Этот результат оказался сопоставим с результатом измерений для полупроводниковых лазеров со схожим дизайном лазерной части, аналогичной шириной полоса 200 мкм и длиной резонатора 1200–1400 мкм [18]. Максимальное снижение мощности (~25%) наблюдается при минимальном для ЛТ напряжении питания 3 В и, соответственно, минимальной амплитуде тока ЛТ. В этих условиях возрастание пороговой плотности тока будет сильнее сказываться на уровне вы-

ходной оптической мощности, чем при более высоких напряжениях питания.

Как было показано ранее, параметры разрядного контура ЛТ при повышении температуры изменяются слабо, а значит, условия электрической накачки лазерной части ЛТ остаются практически неизменными во всём диапазоне температур. Поэтому основной вероятной причиной уменьшения выходной оптической мощности ЛТ можно назвать понижение эффективности непосредственно лазерной части ЛТ, по мере возрастания температуры должна возрастать пороговая плотность тока [19]. Это значит, что для преодоления порога лазерной генерации ток в цепи должен вырасти до больших значений при высоких температурах, чем при низких. Следовательно, будет увеличиваться и задержка между моментом начала разрядки конденсатора и моментом преодоления порога лазерной генерации. Аналогичная ситуация должна наблюдаться и при окончании разрядки конденсатора – лазерная генерация будет заканчиваться тем раньше, чем выше температура. Таким образом, уменьшение длительности оптического импульса по мере возрастания температуры могло бы подтвердить гипотезу о повышении пороговой плотности тока.

На рис.5 представлены результаты оценки длительности оптического импульса в зависимости от напряжения

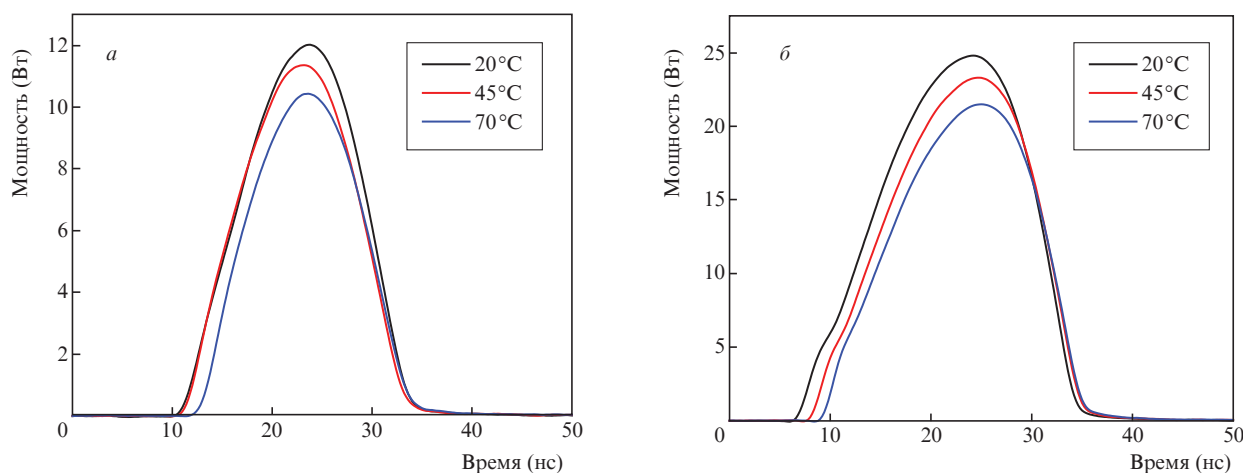


Рис.3. Динамика выходной оптической мощности для температур 20, 45 и 70 °С при напряжениях питания 7 (а) и 20 В (б).

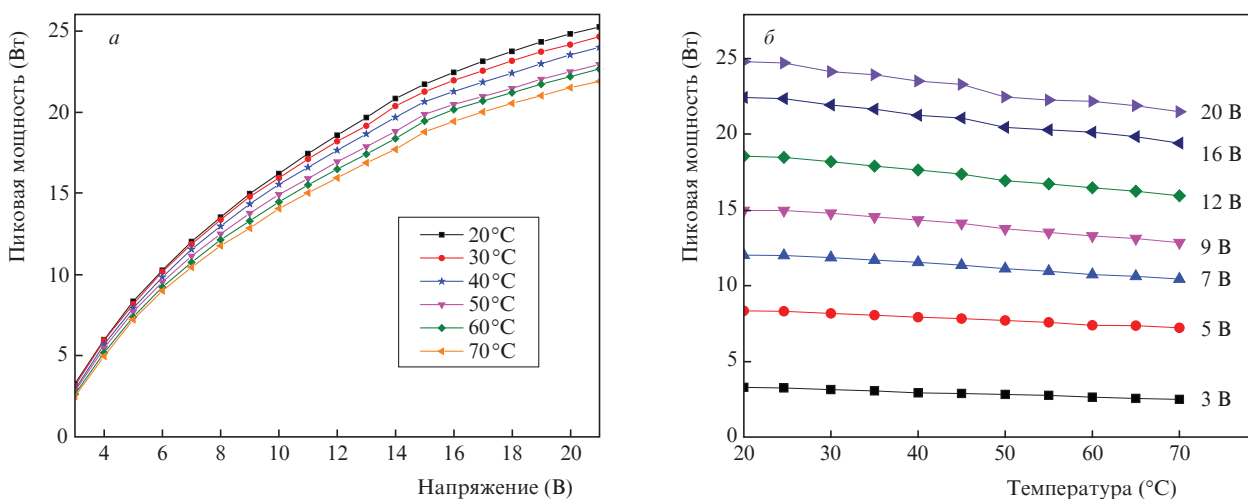


Рис.4. Зависимости пиковой мощности от напряжения питания (а) и от температуры (б).

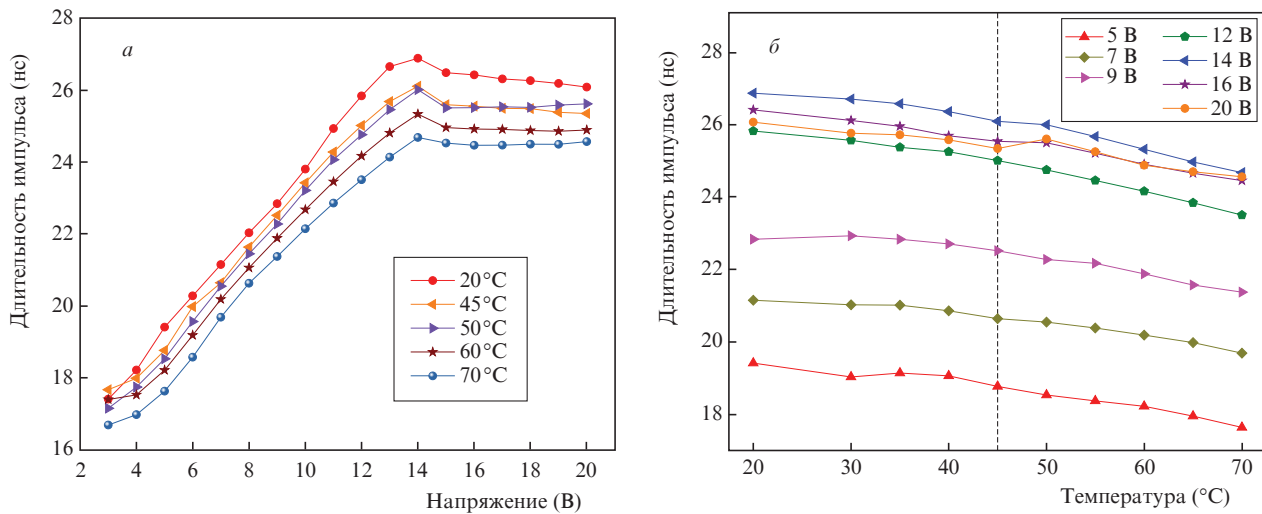


Рис.5. Зависимости длительности оптического импульса от напряжения (а) и температуры (б) (по уровню 10% от максимальной амплитуды).

питания и температуры, оценка проводилась по уровню 10% от максимальной амплитуды. Видно, что до 14 В длительность оптического импульса возрастает при любой температуре, что совпадает с поведением длительности соответствующего электрического импульса τ (см. вставку рис.1,б). С 15 В характер зависимости меняется: в диапазоне температур 20–45 °С длительность импульса постепенно сокращается по мере возрастания напряжения питания, в то время как в диапазоне температур 50–70 °С остаётся практически стабильной. При любой температуре максимальная длительность оптического импульса наблюдается при напряжении питания 14 В. Эта особенность характерна именно для образцов ЛТ с данной длиной резонатора 980 мкм. Зависимости длительности импульса от напряжения питания для других длин резонатора – 480 и 1950 мкм – не имеют подобных экстремумов [13]. Причина наблюдаемого эффекта в данный момент не до конца ясна и будет установлена в ходе дальнейших исследований.

5. Спектры лазерной генерации

Также представляет интерес поведение спектров лазерной генерации при повышении температуры. В [13] было показано, что при комнатной температуре спектры генерации образцов длиной 980 мкм имеют дополнительные линии в красной области. На рис.6 представлен набор спектров лазерной генерации для напряжения питания 20 В при температурах 20, 30, 40, 50, 60 и 70 °С. Наблюдается характерный для полупроводниковых лазеров сдвиг спектров в красную область, при этом центр смещается с 902.5 до 913 нм, т. е. в среднем прирост длины волны составляет 0.21 нм/°С. Безусловно, стабилизированные по длине волны образцы полупроводниковых лазеров с распределёнными брэгговскими отражателями могут демонстрировать и меньшие значения сдвига длины волны при возрастании температуры (например, в [20] сдвиг составляет 65 пм/°С), однако полученный результат полностью соответствует современным представлениям о лазерах с высокой температурной стабильностью и может считаться удовлетворительным. Ширина спектра для всех рабочих температур укладывается в диапазон

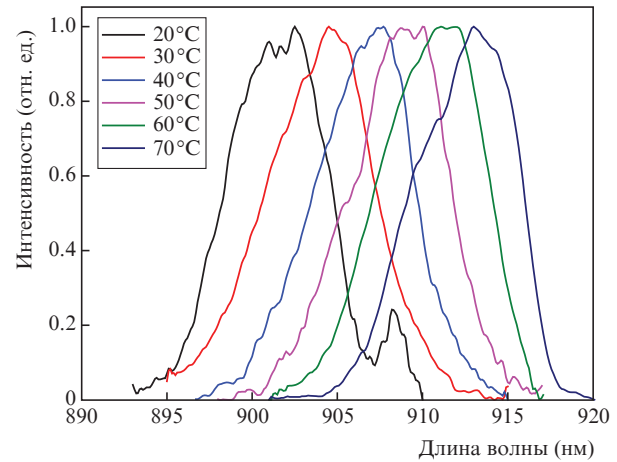


Рис.6. Спектры лазерной генерации для напряжения питания 20 В при температурах 20, 30, 40, 50, 60 и 70 °С.

6.6–7.4 нм на полувысоте и 11.3–14.1 нм на уровне 10% от нормированной амплитуды.

Примечательно, что упомянутые выше дополнительные линии в спектре присутствуют только при температуре 20 °С, при повышении температуры до 30 °С они превращаются в плавное расширение спектра, а затем и вовсе исчезают. Подобное поведение спектра может говорить о том, что дополнительные линии в красной области связаны с особенностями конфигурации квантовой ямы InGaAs и спейсеров GaAs.

6. Заключение

В ходе работы были проведены исследования полупроводниковых лазеров-тиристоров полосковой конструкции с длиной резонатора лазерной части 980 мкм, дизайн которых был представлен в работе [13] и продемонстрировал наилучшие мощностные характеристики. Измерения проводились при номинале разрядного конденсатора 22 нФ, амплитуде тока управления 10.4 мА в диапазоне рабочих температур от 20 до 70 °С и при напряжениях питания от 3 до 20 В. Показано, что лазеры-тиристоры обладают высокой температурной стабильно-

стью характеристик, как с точки зрения уровня выходной оптической мощности, так и с точки зрения сдвига центральной длины волны спектров лазерной генерации.

Уровень пиковой оптической мощности планомерно снижается по мере возрастания температуры с 20 до 70 °С, однако изменение не превышает 15% в диапазоне напряжений питания 4–20 В. Таким образом, в среднем уменьшение уровня выходной оптической мощности происходит со скоростью 0.3%/°С, т.е. достигнутый результат по температурной стабильности не уступает образцам из работы [2], а также коммерчески доступным лазерным диодам без стабилизации длины волны с помощью распределённых брэгговских отражателей. При минимальном напряжении питания ЛТ 3 В выходная оптическая мощность снижается на 25%, что связано с более заметным негативным влиянием повышения пороговой плотности тока. Максимальный уровень пиковой мощности во всём диапазоне температур достигается при напряжении питания 20 В–25.2 Вт (20 °С), 23.8 Вт (45 °С), 21.9 Вт (70 °С).

Установлено, что задержки включения ЛТ уменьшаются при повышении температуры во всём диапазоне напряжений питания, при этом в диапазоне 3–16 В скорость снижения задержек тем выше, чем ниже напряжение. Так, при напряжении 3 В задержки уменьшаются примерно на 10% быстрее, чем при напряжении 16 В. В диапазоне напряжений 16–20 В аналогичная зависимость наблюдается лишь при температурах 20–45 °С, в то время как при температурах 45–70 °С скорость изменения задержек практически перестаёт зависеть от напряжения питания. Задержки включения при напряжении питания 20 В – 67.2 нс (20 °С), 62.3 нс (45 °С), 58 нс (70 °С).

Зависимость длительностей как электрического (τ), так и оптического импульсов от напряжения питания имеет максимум в точке 14 В для всех рассматриваемых температур, что является отличительной особенностью образцов длиной 980 мкм по сравнению с аналогичными образцами длиной 480 и 1950 мкм [13]. Значения длительности оптического импульса для напряжения питания 20 В – 26.1 нс (20 °С), 25.3 нс (45 °С), 24.6 нс (70 °С).

Измерения спектров генерации показали, что сдвиг центральной линии в длинноволновую область происходит в среднем со скоростью 0.21 нм/°С, что соответствует современным представлениям о полупроводниковых лазерах с высокой температурной стабильностью.

1. Wenzel H., Fricke J., Maaßdorf A., Ammouri N., Zink C., Martin D., Martin D., Knigge A. *Electron. Lett.*, **58**, 121 (2022). DOI: 10.1049/el12.12366.
2. Qiu Y., Xie Y., Wang W., Liu W., Kuang L., Bai X., Hu M., Ho J., in *2019 IEEE 4th Optoelectronics Global Conference* (IEEE, 2019, pp. 32-35). DOI: 10.1109/OGC.2019.8925087.

3. Першин С.М., Гришин М.Я., Завозин В.А., Макаров В.С., Леднёв В.Н., Фёдоров А.Н., Мясников А.В., Тюрин А.В. *Квантовая электроника*, **51**, 423 (2021) [*Quantum Electron.*, **51**, 423 (2021)]. DOI: <https://doi.org/10.1070/QEL17544>.
4. Slipchenko S.O., Podoskin A.A., Gavrina P.S., Pikhtin N.A., Kop'ev P.S., Bagaev T.A., Ladugin M.A., Padalitsa A.A., Marmalyuk A.A., in *2021 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference* (IEEE, 2021, p. 1-1). DOI: 10.1109/CLEO/Europe-EQEC52157.2021.9541707.
5. Bahat Treidel E., Christopher H., Hilt O., Klehr A., Ginolas A., Liero A., Würfl J. *Electron. Lett.*, **56**, 1084 (2020). DOI: 10.1049/el.2020.0896.
6. Blasco G., Dörich D., Isern E., Burkard R., Martin E., in *2020 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)* (IEEE, 2020, pp. 1-5). DOI: 10.1109/ISCAS45731.2020.9181207.
7. Vainshtein S., Zemlyakov V., Egorin V., Maslevtsov A., Filimonov A. *IEEE Trans. Power Electron.*, **34**, 3689 (2018). DOI: 10.1109/TPEL.2018.2853563.
8. Cho H.C., Choi H.Y., Kwon W.B., Lim Y.C. *Microw. Opt. Technol. Lett.*, **58**, 2540 (2016). DOI: 10.1002/mop.30094.
9. Slipchenko S.O., Podoskin A.A., Golovin V.S., Gavrina P.S., Shamakhov V.V., Nikolaev D.N., Zolotarev V.V., Pikhtin N.A., Bagaev T.A., Ladugin M.A., Marmalyuk A.A., Simakov V.A. *IEEE Trans. Electron Devices*, **67**, 193 (2019). DOI: 10.1109/TED.2019.2951033.
10. Slipchenko S., Podoskin A., Soboleva O., Zakharov M.S., Bakhvalov K., Romanovich D., Pikhtin N., Tarasov I., Bagaev T., Ladugin M., Marmalyuk A., Simakov V., in *Smart Photonic and Optoelectronic Integrated Circuits XVIII* (SPIE, 2016, Vol. 9751, pp. 100-104). DOI: 10.1117/12.2212544.
11. 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). DOI: 10.1364/OE.24.016500.
12. Гаврина П.С., Подоскин А.А., Фомин Е.В., Веселов Д.А., Шамахов В.В., Слипенченко С.О., Пихтин Н.А., Копьев П.С. *Квантовая электроника*, **51**, 129 (2021) [*Quantum Electron.*, **51**, 129 (2021)]. DOI: 10.1070/QEL17478.
13. Гаврина П.С., Подоскин А.А., Шушканов И.В., Шашкин И.С., Крючков В.А., Слипенченко С.О., Пихтин Н.А., Багаев Т.А., Ладугин М.А., Мармалюк А.А., Симаков В.А. *ФТП*, **58**, 96 (2024).
14. Пасынков В.В., Чиркин Л.К., Шинков А.Д. *Полупроводниковые приборы* (М.: Высш. школа, 1981).
15. *Тиристоры (Технический справочник)*. Под ред. В.А. Лабунцева, С.Г. Обухова, А.Ф. Свиридова (М.: Энергия, 1971).
16. Bergman J.P., Hallin C., Janzén E.J. *Appl. Phys.*, **78**, 4808 (1995). DOI: 10.1063/1.360740.
17. Soboleva O.S., Podoskin A.A., Golovin V.S., Gavrina P.S., Zolotarev V.V., Pikhtin N.A., Slipchenko S.O., Bagaev T.A., Ladugin M.A., Marmalyuk A.A., Simakov V.A. *IEEE Trans. Electron Devices*, **66**, 1827 (2019). DOI: 10.1109/TED.2019.2897841.
18. Коняев В.П., Мармалюк А.А., Ладугин М.А., Багаев Т.А., Зверков М.В., Кричевский В.В., Падалица А.А., Сапожников С.М., Симаков В.А. *ФТП*, **48**, 104 (2014).
19. Жуков А.Е., Максимов М.В. *Современные инжекционные лазеры* (СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009).
20. Knigge A., Klehr A., Wenzel H., Zeghuzi A., Fricke J., Maaßdorf A., Liero A., Tränkle G. *Phys. Status Sol. A*, **215**, 1700439 (2018). DOI: 10.1002/pssa.201700439.