

Предельные параметры мощных однополосковых лазерных диодов диапазона 800–808 нм в импульсном режиме

© В.В. Безотосный[¶], В.Ю. Бондарев, О.Н. Крохин, В.А. Олещенко, В.Ф. Певцов, Ю.М. Попов, Е.А. Чешев

ФИАН, 119991 Москва, Россия

(Получена 1 июня 2013 г. Принята к печати 16 июня 2013 г.)

Представлены экспериментальные результаты исследования выходных параметров мощных непрерывных лазерных диодов, работающих в импульсном режиме, и результаты численного моделирования полного кпд лазерных диодов с длиной резонатора 3 и 4 мм в широком диапазоне токов накачки. Изучены спектральные параметры мощных ЛД при различной частоте следования импульсов. Обсуждаются возможные причины ограничения выходной мощности в импульсном режиме работы.

Мощные лазерные диоды (ЛД) имеют ряд важных применений при работе импульсным режимом, в частности в навигации для решения задач дальнометрии и локации. Кроме того, такие режимы работы ЛД востребованы в медицине и в технологиях микрообработки материалов.

Наши исследования были посвящены изучению наиболее важных для практических применений параметров мощных непрерывных ЛД, работающих в импульсном режиме, а именно:

- выходной мощности и причин ее ограничения;
- спектрального состава излучения;
- зависимости выходной мощности от частоты следования импульсов;
- особенностей генерации непрерывных ЛД в импульсном режиме.

Полупроводниковые лазеры в силу своей компактности (размеры кристалла мощного лазерного диода составляют $4 \times 0.5 \times 0.12$ мм, размеры наиболее компактного теплоотводящего элемента типа С-маунт составляют $7 \times 6.4 \times 4.5$ мм, а размеры современного оптического модуля, содержащего ЛД, термоэлектрический элемент Пельтье, термистор и фотодиод контроля мощности составляют всего $30 \times 12.7 \times 8$ мм) в указанной выше области применений по совокупности технических параметров не имеют конкурентов.

Однако их широкое использование в импульсном режиме работы зачастую ограничено отсутствием надежных сведений о допустимых режимах работы, их выходных параметрах в этих режимах и отсутствием на рынке надежных, компактных и бюджетных драйверов (источников питания) на диапазон токов накачки до 100–500 А. В таких драйверах необходимо применять быстродействующие переключатели, работающие на токах до 0.5 кА, причем проблемой является согласование выхода драйвера с нагрузкой — лазерным диодом. Лазерный диод представляет собой, во-первых, низкоомную нагрузку (типичное значение последовательного сопротивления однополоскового лазерного кристалла с шириной полоскового контакта 100–200 мкм и дли-

ной резонатора 3–4 мм составляет около 50 мОм), во-вторых, эта нагрузка нелинейная и имеет сложную зависимость комплексного импеданса от уровня накачки.

В наших экспериментах мы использовали драйвер Р1000/1/100, разработанный и изготовленный фирмой „Эльфолум“ (ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН).

На базе указанного драйвера был разработан и собран измерительный стенд для изучения предельных параметров мощных лазерных диодов в импульсном режиме работы. Основным элементом измерительного стенда является импульсный источник питания. Он выполнен на основе двух блоков формирователя импульсов с панелью для размещения лазерного диода, соединенного кабелем с адаптером напряжения питания. В качестве задающего генератора был использован генератор Г5-48.

Главные проблемы, которые возникли при разработке стенда, — это достоверное измерение величины импульсного тока и калибровка измерений абсолютной импульсной мощности.

Измеритель импульсного тока питания ЛД был изготовлен самостоятельно, он представляет собой пояс Роговского, выполненный в виде замкнутого соленоида с равномерной обмоткой. Принцип его работы основан на регистрации магнитного поля, создаваемого измеряемым током. Для уменьшения емкостной связи с внешними цепями и компенсации наводок от внешних источников переменных магнитных полей по оси соленоида проложен провод в виде обратного витка. Параметры пояса Роговского и интегрирующей цепочки подобраны таким образом, чтобы он работал в режиме трансформатора тока.

В качестве измерителя мощности излучения лазерного диода в импульсном режиме был использован измерительный фотоэлемент типа ФЭК-29 КПУ. Для получения более точных значений выходной мощности ФЭК-29 КПУ калибровался по мощности с помощью аналогичного прибора, калиброванного в метрологической лаборатории. Кроме того, для контроля измерений абсолютной мощности и повышения их достоверности был использован калиброванный и сертифицированный калориметрический датчик, с помощью которого измерялась средняя мощность излучения ЛД.

[¶] E-mail: victorbe@sci.lebedev.ru

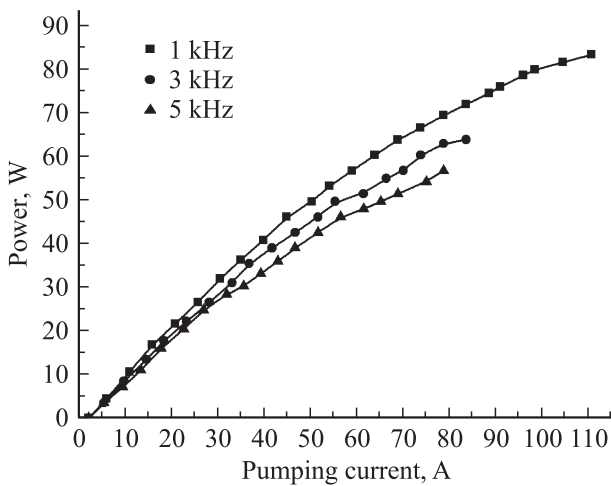


Рис. 1. Ватт-амперные характеристики лазерного диода. Длительность импульса 100 нс. Частота повторения 1, 3, 5 кГц.

Для повышения достоверности измерений были также использованы контрольные точки ватт-амперной характеристики (ВтАх) в области линейности ВтАх в непрерывном режиме, до тока накачки 15 А. ВтАх в импульсном режиме, при частоте следования импульсов 1, 3, 5 кГц показаны на рис. 1. Выходная мощность на начальном этапе (контрольная точка 10.1 А/10 Вт) хорошо согласуется с измерениями ВтАх в непрерывном режиме. Отличие в крутизне ВтАх в импульсном и непрерывном режимах на начальном линейном участке ВтАх составило около 0.14 Вт/А, поэтому в импульсном режиме в контрольной точке при накачке в 10.1 А мощность была больше на 1.25 Вт и составила 11.25 Вт при частоте следования импульсов 1 кГц.

Как видно из графиков, область токов накачки, в которой наблюдается линейность ВтАх, с увеличением частоты следования импульсов уменьшается с 35 А при частоте 1 кГц до 25 А при частоте 5 кГц. Наблюдается существенное отклонение ВтАх от линейности, т.е. снижение дифференциальной квантовой эффективности как при увеличении тока накачки, так и при увеличении частоты следования импульсов. При частотах 200 Гц и ниже 200 Гц ВтАх существенно не изменялась, что свидетельствует о незначительном увеличении среднего нагрева активной среды в данном диапазоне частот. При частоте 1 кГц наблюдалось заметное снижение эффективности ЛД при токе накачки более 35 А. При токе накачки 65 А выходная мощность падает приблизительно на 20% при увеличении частоты следования от 1 до 5 кГц. Заметим, что в нашем конструктивном варианте С-маунт с чипом ЛД крепится непосредственно на корпусе драйвера накачки, теплоотводящий элемент драйвера имеет небольшие размеры, принудительное охлаждение лазерного кристалла отсутствует, поэтому было сделано предположение о том, что наблюдаемое снижение эффективности ЛД при увеличении частоты следования импульсов обусловлено увеличением сред-

ней температуры активной области лазерного кристалла. Это предположение подтвердилось при измерении температуры С-маунта.

Для выяснения причин насыщения ВтАх, а также для получения данных о спектральных характеристиках, важных для практических применений ЛД в импульсном режиме, были исследованы спектральные параметры в различных режимах накачки.

Для измерения спектральных зависимостей излучения лазерного диода использован волоконный спектрометр типа „AvaSpec-102“, разработанный фирмой „Avantes“.

На рис. 2 показаны спектры излучения при токах накачки от 15 до 100 А при частоте повторения 1 кГц. Как видно, при увеличении тока накачки максимум огибающей спектра сдвигается в длинноволновую область приблизительно на 2 нм, а ширина спектра на половине высоты увеличивается от 0.6 до 3 нм, т.е. на величину около 2.4 нм. За время импульса, вследствие динамического нагрева активной среды, максимум огибающей смещается в длинноволновую область. При этом на немного более значительную величину увеличивается полуширина огибающей спектра. Такое поведение ширины спектра соответствует картине, обычно наблюдаемой в лазерах с широким полосковым контактом, спектр излучения которых определяется не только уширением контура усиления, но также пространственной неоднородностью генерации по ширине полоскового контакта и эффектами, связанными с пространственным перераспределением поля в поперечном направлении при высоком уровне накачки.

Динамический спектральный сдвиг максимума и увеличение ширины спектра около 2–2.5 нм за время импульса 100 нс при увеличении тока накачки в диапазоне 15–100 А в соответствии с температурной зависимостью ширины запрещенной зоны активной области 0.25–0.3 нм/градус позволяют оценить величину динамического перегрева активной области за время импульса. Оценка дает значение не более 8–10 градусов.

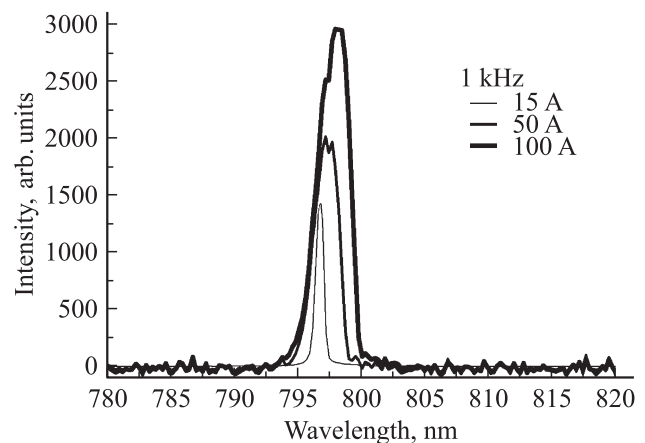


Рис. 2. Спектральные характеристики лазерного диода. Длительность импульса 100 нс, частота повторения 1 кГц.

На рис. 3 приведены спектральные параметры на частоте 5 кГц. По сравнению с кривыми на рис. 2, к динамическому нагреву активной области за время импульса добавляется существенный дополнительный средний нагрев теплоотводящего элемента и лазерного кристалла вследствие недостаточной эффективности отвода тепла пассивным теплоотводящим элементом в нынешней конструкции лазерной головки драйвера. Этот эффект проявляется в том, что даже при небольшом уровне накачки максимум огибающей спектра при 5 кГц по сравнению с 1 кГц заметно смещается в длинноволновую область, а спектральный контур уширяется, при частоте 1 кГц полуширина спектра равна 0.6 нм, а при частоте 5 кГц она увеличивается вдвое и составляет около 1.2 нм. При этом максимум спектра также сдвигается на величину около 1.2 нм.

Мы предполагаем, что введение в конструкцию драйвера принудительного охлаждения — термостабилизации (например, при помощи термоэлектрического элемента на основе эффекта Пельтье — ТЭМО) позволит компенсировать средний нагрев теплоотводящего элемента кристалла ЛД и стабилизировать выходную мощности при увеличении частоты следования импульсов. В то же время эта мера не позволит решить проблему динамического нагрева кристалла за время импульса, вследствие короткой длительности импульса и большой инерционности системы охлаждения кристалла.

Для понимания причин замедления роста выходной мощности в условиях экстремальной накачки было проведено численное моделирование полного КПД мощного ЛД до токов накачки более 300 А.

Расчет полного КПД проводился по упрощенной формуле (1), предложенной в работе [1]:

$$n_t = n_d \frac{(I - I_{th})E_g}{I[U_{th} + R_s(I - I_{th})]}, \quad (1)$$

$$n_d = n_i \left(1 + \frac{2\alpha_i L}{\ln(R_1 R_2)^{-1}}\right)^{-1} \times \left(1 + \sqrt{\frac{R_2}{R_1}} \frac{1 - R_2}{1 - R_1}\right)^{-1}, \quad (2)$$

n_t — полный КПД, n_d — внешняя дифференциальная квантовая эффективность, n_i — внутренний квантовый выход, α_i — внутренние потери, E_g — ширина запрещенной зоны, L — длина резонатора, R_1, R_2 — коэффициенты отражения зеркал 1, 2, I_{th} — пороговый ток, U_{th} — пороговое напряжение, R_s — последовательное сопротивление, I — ток накачки.

Согласно результатам моделирования, при увеличении тока накачки скорость нарастания КПД для ЛД с длиной резонатора 4 мм на начальном участке меньше, чем для ЛД с $L = 3$ мм. Важным параметром теплового режима лазерного кристалла является пороговый ток ЛД, который заметно выше для ЛД с более длинным резонатором, к тому же имеющем большую ширину поперечного контакта. Максимальный КПД для резонатора с $L = 4$ мм по сравнению с КПД ЛД с $L = 3$ мм меньше и достигается при более высоком токе накачки. Однако

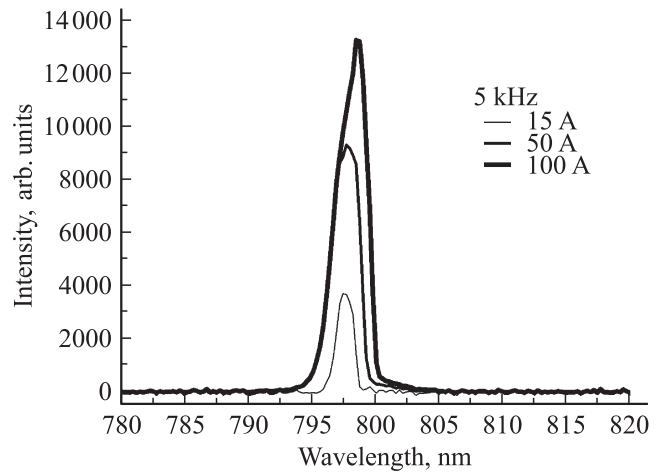


Рис. 3. Спектральные характеристики лазерного диода. Частота следования импульсов 5 кГц.

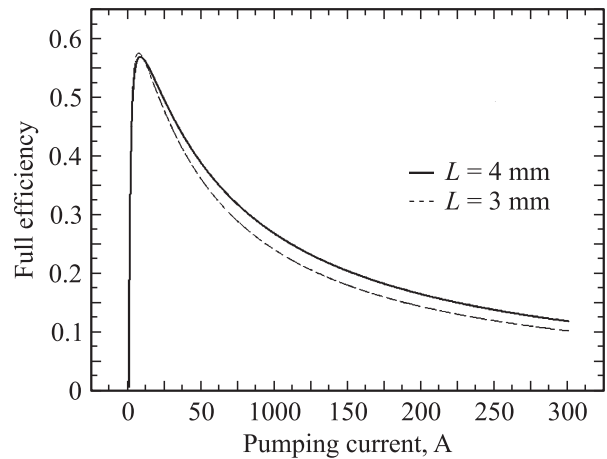


Рис. 4. Расчетный полный КПД мощного лазерного диода при длине резонатора 3 и 4 мм.

при токе накачки около 15 А они сравниваются и при более высоких уровнях возбуждения КПД ЛД с $L = 4$ мм превосходит КПД ЛД с $L = 3$ мм.

На рис. 4 приведены результаты моделирования полного КПД от порога генерации до токов накачки 300 А. При токе накачки около 100 А КПД ЛД с $L = 4$ мм превосходит КПД ЛД с $L = 3$ мм примерно на 2.5%, при этом, как видно, разница возрастает с током накачки до тока 100 А и далее изменяется незначительно.

Результаты измерения спектральных сдвигов максимума огибающей спектра при высоком уровне накачки в импульсном режиме принципиально согласуются с расчетными данными, приведенными на рис. 4. Таким образом резкое увеличение температуры активной зоны наблюдается в диапазоне резкого падения полного КПД (ток накачки более 50 А). Оценки динамического перегрева активной области и данные спектральных измерений при токах накачки до 150 А дают величину более 35°C. В то же время наблюдаемые сдвиги максимума

спектров и увеличение их полуширины по абсолютной величине оказались несколько меньше ожидавшихся при анализе полученных ВтАх.

Это вполне приемлемо и благоприятно для практических применений, когда использование узкополосных спектральных фильтров дает возможность снизить паразитные шумы и повысить параметры систем управления на основе импульсных ЛД.

В то же время приходится констатировать, что все механизмы насыщения выходной мощности в предельных импульсных режимах накачки достоверно установить пока не удалось, и эта тема представляет собой предмет дальнейших исследований. Возможно, дополнительные причины насыщения мощности обусловлены не только тепловыми проблемами и особенностями протекания тока в лазерной гетероструктуре при высоком уровне инжекции, но и другими факторами, в частности параметрами работы драйвера накачки. Свою лепту могут вносить особенности конструкции активного элемента, определяемые пост-ростовой технологией его изготовления, в частности важную роль в предельных режимах генерации могут играть эффекты возбуждения замкнутых мод резонатора и возрастания токовых утечек вследствие снижения эффективности диэлектрической изоляции и увеличения растекания тока под полосковым контактом.

Важными проблемами, препятствующими получению более точных и достоверных данных по предельным параметрам в импульсном режиме при экстремально высоких токах накачки, являются технические аспекты согласования комплексного импеданса ЛД с выходным трактом драйвера, а также проблема калибровки абсолютных значений тока накачки и выходной мощности.

Для снижения влияния среднего нагрева кристалла активного элемента на ВтАх максимальная выходная мощность регистрировалась при частоте следования импульсов 100 Гц (рис. 5).

Предельная мощность ЛД с длиной резонатора 3 и 4 мм составила немногим более 140 Вт, для 4 мм ЛД она достигнута при токе 166 А, а для 3 мм ЛД при токе 190 А, что принципиально соответствует расчетам кпд на рис. 4. Заметим, что полного насыщения выходной мощности на участке 120–140 А и в момент достижения мощности 140 Вт не наблюдалось. При мощности от 140 до 150 Вт была зафиксирована необратимая деградация ЛД, вероятно связанная с уширением импульса накачки. Анализ показал, что часть исследованных ЛД после деградации сохранили диодную вольт-амперную характеристику, выходные зеркала не были повреждены. Причину деградации этих ЛД установить не удалось. ВтАх на рис. 5 можно условно разделить на 3 участка с характерными значениями крутизны:

- диапазон токов от порога генерации до тока 50 А, крутизна 1.34 Вт/А;
- диапазон от 50 до 120 А, крутизна около 1 Вт/А;
- диапазон от 120 до 170 А, крутизна 0.45 Вт/А.

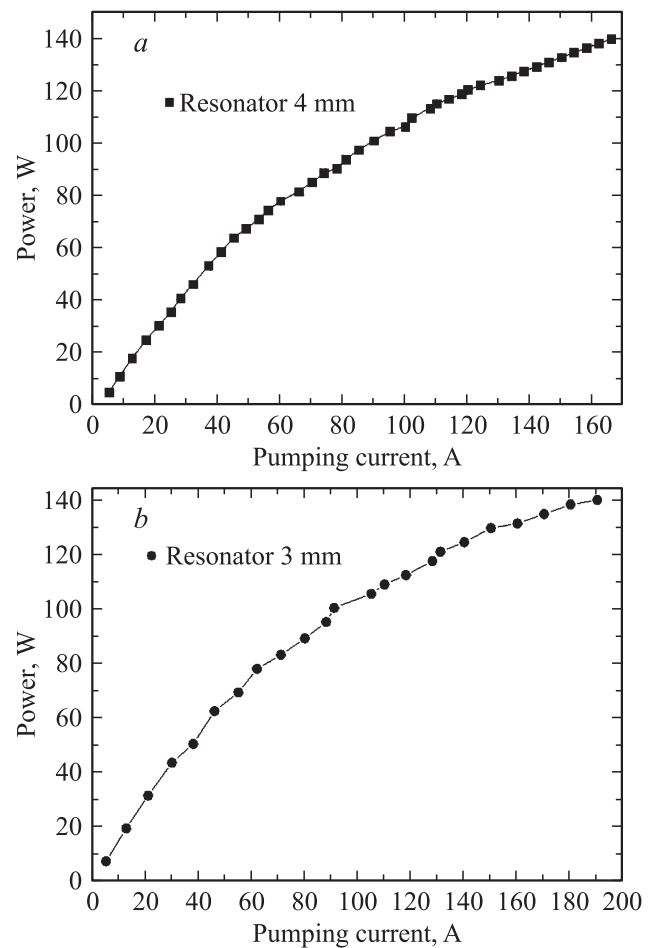


Рис. 5. Предельная импульсная мощность для лазерного диода с длиной резонатора 4 (а) и 3 мм (б). Частота 100 Гц.

В соответствии с расчетным графиком кпд, приведенным на рис. 4, на первом участке при токах от порога до 50 А полный кпд проходит максимум в 53% и составляет не менее 42%, т.е. остается высоким, на втором участке при токе 50–120 А он падает с 42 до 25% и на участке 120–170 А кпд падает с 25 до 22%, что составляет менее половины полного кпд в максимуме (53%).

Характер поведения ВтАх в условиях экстремальной накачки в принципе соответствует характеру модельной зависимости полного кпд. Это позволяет предположить, что, вероятно, основной причиной ограничения мощности в импульсном режиме генерации, так же как и в непрерывном режиме генерации являются тепловые проблемы.

Зависимость максимума спектра от тока накачки показана на рис. 6. Максимум огибающей спектра при увеличении тока накачки движется в длинноволновую сторону согласно зависимости $E_g(T)$, а полуширина спектра насыщается на уровне около 3 нм.

В импульсном режиме, при частоте повторения импульсов 100 Гц, длина волны составила около 798 нм при токе 10 А, в то время как в непрерывном режиме при

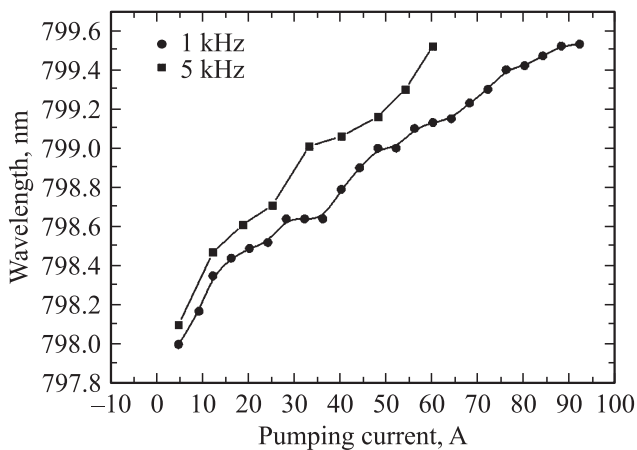


Рис. 6. Зависимость максимума огибающей спектра излучения от тока накачки.

том же токе накачки она была равна 805 нм, т.е. нагрев активной области в непрерывном режиме при токе 10 А составляет около 25° относительно „холодной“ активной среды.

1. Обсуждение результатов

В качестве одного из возможных механизмов насыщения мощности ЛД в работе [2] был предложен механизм конечного времени захвата носителей заряда в квантово-размерных активных областях, которое может ограничивать скорость стимулированной рекомбинации в активном слое. Отметим, что теоретический анализ, проделанный в работе [2], не учитывал тепловых эффектов. В работе [3] указанный механизм насыщения мощности был исследован экспериментально в ЛД на длине волны 1040 нм, а сравнение теоретических результатов работы [2] с экспериментальными проведено в работе [4]. В отличие от работы [3], в наших ЛД на 800 нм мы не наблюдали насыщения мощности на основной длине волны генерации и аномального расширения спектра в коротковолновую область (в упомянутой работе [3] ширина спектра увеличивалась до 60 нм). Возможно, утечка носителей из активной области и их рекомбинация в волноводном слое, проявляющаяся в спектре излучения лазеров на 1040 нм [3], также имеет место в нашем случае, но не проявляется в спектре излучения отчасти вследствие того, что волноводные слои AlGaAs в нашей гетероструктуре на 800 нм непрямозонные. С ростом тока накачки в наших образцах при плавном сдвиге максимума спектра в длинноволновую область полуширина спектра имела тенденцию к насыщению и составляла при токе 100 А не более 3 нм. Частота следования импульсов накачки играла существенную роль, а именно, при частоте 100 Гц выходная мощность на токе 90 А составила 100 Вт, на частоте 1 кГц — 82 Вт, а на частоте 5 кГц — 63 Вт. Значительные отличия в спектральных параметрах в предельном импульсном

режиме обусловлены, на наш взгляд, существенными различиями в конструкции гетероструктур на 1040 и 800 нм, прежде всего это касается величины гетеробарьеров и материала активного слоя. Высокое содержание алюминия ($x = 0.4$) в структуре на 800 нм обеспечивает эффективное электронное ограничение носителей в квантовой яме при высоких уровнях накачки, в том числе при повышенных температурах, однако платой за это, т.е. существенным недостатком структуры на 800 нм является более высокое последовательное сопротивление по сравнению с ЛД на 1040 нм. Последнее играет ключевую роль в зависимости КПД от тока накачки при экстремальных уровнях накачки и ограничивает максимальную мощность ЛД на 800 нм и частоту следования импульсов вследствие тепловой проблемы.

Поскольку полученная максимальная мощность в наших экспериментах для ЛД с разной длиной резонатора 3 и 4 мм и разной шириной полоскового контакта соответственно 130 и 200 мкм практически совпадают с таковой для ЛД на 1040 нм (около 140 Вт), логично принять во внимание тот факт, что для накачки был использован одинаковый тип драйвера, поэтому наряду с рассмотренным механизмом насыщения импульсной мощности может быть связано с приборным эффектом — неполным согласованием выхода драйвера с нагрузкой при высоком уровне накачки, приводящем вследствие нелинейных свойств нагрузки к отражению мощности накачки и уширению импульса накачки при токах более 100 А. С точки зрения конструирования новых типов гетероструктур, для повышения предельной мощности представляется актуальным практическое применение модели [2] для уменьшения скорости захвата носителей в квантовую яму и снижения внутренней дифференциальной квантовой эффективности.

Вследствие того что задача повышения предельной и ресурсной импульсной мощности и яркости излучения весьма актуальна для практических применений, то, по нашему мнению, она требует дальнейших экспериментальных и теоретических исследований.

2. Заключение

Сравнение ВТАх и спектров излучения ЛД на 800–808 нм в непрерывном режиме и в импульсном режиме позволяет сделать следующие выводы.

1. В непрерывном режиме генерации ресурсная мощность ЛД на 808 нм с шириной полоска 130 мкм и длиной резонатора 3 мм при сборке на медном теплоотводящем элементе типа С-маунт составляет 7–7.5 Вт. Статистика показывает, что для небольшой части образцов (около 20%) можно гарантировать ресурсную мощность 8 Вт. Предельная непрерывная мощность при сборке на медном С-маунте составляет 25–27 Вт при кратковременных измерениях [5]. В работе [6] показано, что область линейности ВТАх и непрерывная ресурсная мощность могут быть увеличены с 7 Вт по крайней мере

до 12 Вт за счет более эффективного охлаждения активной области при монтаже ЛД на алмазные сабмаунты. Линейность ВтАх до мощности 12 Вт для ЛД, собранных на алмазных сабмаунтах и С-маунтах, и их устойчивая работа на этой мощности позволяют предположить, что возможно дальнейшее повышение ресурсной мощности ЛД на 808 нм при использовании имеющихся лазерных чипов путем повышения эффективности отвода тепла за счет совершенствования монтажа на алмазных сабмаунтах и применения более мощных базовых теплоотводящих элементов типа F-маунт.

2. В импульсном режиме, при частоте следования импульсов 100 Гц ВтАх ЛД на 800 нм с длиной резонатора 3 и 4 мм были близки к линейным до мощности 50–60 Вт при токе накачки 45–60 А. Таким образом, при обеспечении высокого качества оптических покрытий зеркал резонатора выходная мощность около 60 Вт от ЛД с шириной полоскового контакта 130 мкм для данного типа гетероструктур — это, вероятно, предел мощности для непрерывного режима, к которому можно приблизиться, если удастся найти новые высокоэффективные методы охлаждения активного слоя. Предельная мощность в импульсном режиме составила около 140 Вт при длительности импульса около 100 нс и токе 166 А для 4 мм ЛД и токе 190 А для 3 мм ЛД, что качественно соответствует расчетным значениям кпд. Зависимости выходной мощности лазеров от частоты следования импульсов, а также спектральные параметры свидетельствуют о том, что основной механизм насыщения мощности при высоком уровне импульсной накачки имеет тепловой характер.

Работа выполнена при поддержке программы ОФН РАН 7ОФ и гранта РФФИ 11-02-00922-а .

Список литературы

- [1] В.В. Безотосный, И.Д. Залевский, Х.Х. Кумыков, Н.В. Маркова. Квант. электрон., **25** (7), 611 (1998).
- [2] Levon V. Asryan, Serge Luryi, Robert A. Suris. IEEE J. Quant. Electron., **39** (3), 404 (2003).
- [3] С.О. Слипченко, З.Н. Соколова, Н.А. Пихтин, К.С. Борщев, Д.А. Винокуров, И.С. Тарасов. ФТП, **40** (8), 1017 (2006).
- [4] З.Н. Соколова, И.С. Тарасов, Л.В. Асрян. ФТП **45** (11), 1553 (2011).
- [5] В.В. Безотосный, В.Ю. Бондарев, О.Н. Крохин, Г.Т. Микаелян, В.А. Олещенко, В.Ф. Певцов, Ю.М. Попов, Е.А. Чешев. Квант. электрон., **39** (3), 241 (2009).
- [6] Е.Е. Ашкинази, В.В. Безотосный, В.Ю. Бондарев, В.И. Коваленко, В.И. Конов, О.Н. Крохин, В.А. Олещенко, В.Ф. Певцов, Ю.М. Попов, А.Ф. Попович, В.Г. Ральченко, Е.А. Чешев. Квант. электрон., **42** (11), 959 (2012).

Редактор Т.А. Полянская

The marginal pulse output parameters of high-power 800–808 nm laser diodes

V.V. Bezotosnyi, V.Yu. Bondarev, O.N. Krokhin,
V.A. Oleshenko, V.F. Pevtsov, Yu.M. Popov,
E.A. Cheshev

Lebedev Physical Institute,
Russian Academy of Sciences,
119991 Moscow, Russia

Abstract The results of experimental research of high-power laser diodes output parameters in pulse operation and results of total efficiency numerical simulation for laser resonator length 3 mm and 4 mm in wide pumping current range are presented. Spectral parameters of high-power laser diodes are tested under different pulse repetition rates. The possible reasons of power limits in pulse operation are discussed.