

Исследование эффекта восстановления излучательных параметров мощных лазерных диодов на основе напряженных гетероструктур GaAsP/AlGaAs/GaAs на длине волны 808 нм

© В.В. Безотосный[†], В.А. Олещенко, Е.А. Чешев

Физический институт им. П.Н. Лебедева
119991 Москва, Россия

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

Экспериментально исследованы выходные параметры мощных лазерных диодов на длине волны 808 нм, изготовленных на основе напряженных гетероструктур GaAsP/AlGaAs/GaAs и забракованных по результатам первоначальных измерений. Найдены методы восстановления их излучательных параметров до уровня лучших образцов. Обсуждаются возможные причины наблюдаемых явлений.

1. Актуальность

Стандартные методы оценки качества изготовленных мощных лазерных диодов (ЛД) включают в себя предварительные измерения параметров (так называемые параметры на первом измерении), кратковременные испытания, именуемые тренировкой или по-английски burn-in test (обычно около 100 ч), и долговременные испытания (обычно около 2000 ч). Предварительные измерения проводятся на всех без исключения образцах, кратковременные испытания проводятся обычно на образцах, отобранных по данным предварительных измерений, а образцы, не прошедшие предварительных измерений, как правило, бракуются. Долговременные испытания проводятся на произвольной выборке образцов, прошедших предварительные измерения.

Накопленные нами экспериментальные данные свидетельствуют о том, что в ряде случаев указанная методика может быть в некоторых случаях пересмотрена. В частности, это касается ЛД, изготовленных из напряженных гетероструктур, в которых вследствие рассогласования параметров кристаллических решеток активной области (квантово-размерного слоя) и волноводного слоя активная область подвергнута напряжению растяжения или сжатия.

В данной работе были исследованы образцы ЛД на длине волны 808 нм, изготовленные из гетероструктур GaAsP/AlGaAs/GaAs с одной квантово-размерной активной областью GaAsP, находящейся в состоянии растяжения. Мы полагаем, что приведенные далее результаты свидетельствуют о возможности и целесообразности пересмотра указанных выше методик по отношению к лазерам на основе гетероструктур GaAsP/AlGaAs/GaAs и, возможно, на основе других типов напряженных гетероструктур и разработки реальной методики восстановления параметров ЛД, не прошедших первоначальные тесты. После набора необходимых статистических данных и проведения ресурсных тестов таких образцов мы надеемся, что применение новой методики сделает возможным повышение выхода годных ЛД.

2. Мотивация

Ватт-амперные характеристики типичной серии из 11 ЛД, отобранных по результатам первого измерения, приведены на рис. 1. Всего в данной серии было собрано 14 образцов. Три образца были забракованы, поскольку наклон их ватт-амперной характеристики (ВтАч) на первом измерении был существенно (в 1.5–2 раза) меньше, чем для ВтАч ЛД, приведенных на рис. 1.

Первое наблюдение, на которое мы обратили внимание, анализируя параметры отобранных из нескольких партий сборки как годные на первом измерении ЛД, заключается в том, что в процессе кратковременных испытаний (наработка около 100 ч) выходная мощность немного возрастает, причем в большей степени у тех ЛД, у которых на первом измерении она была ниже, чем на лучших образцах.

Обычно прирост мощности на таких образцах находился в диапазоне 0.1–0.3 Вт и происходил в течение первых 24 ч наработки, после 100 ч наработки на токе 8 А однородность параметров ЛД по кривым ВтАч для всех образцов возрастала, приближаясь к ВтАч лучших образцов ЛД (контрольная точка 8 А/8 Вт). Традиционно наблюдаемое явление трактовалось нами

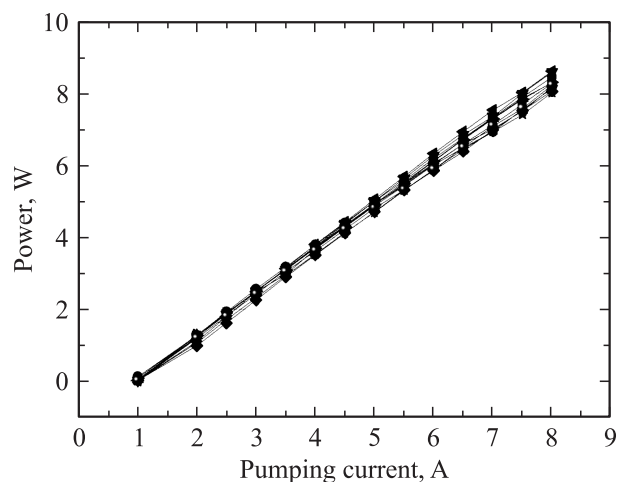


Рис. 1. ВтАч серии из 11 ЛД на 808 нм.

[†] E-mail: victorbe@sci.lebedev.ru

ранее как процесс „приработки“ контактов и контактной металлизации.

Мы также неоднократно наблюдали на некоторых ЛД значительные колебания мощности при первом измерении и предварительных измерениях спектров излучения, дальних зон излучения и других выходных параметров, а также на первом этапе кратковременных испытаний. Такие образцы квалифицировались как потенциально ненадежные, снимались с испытаний и браковались. Высказывались предположения, что нестабильность параметров может быть обусловлена „мостиками“ или „закоротками“ припоя, попавшего в процессе сборки на боковые грани или зеркала чипов лазерных кристаллов.

Иногда удавалось идентифицировать такие дефекты сборки при изучении паяного соединения собранного ЛД в сканирующем электронном микроскопе. Яркий пример попадания припоя на зеркало ЛД показан на рис. 2.

Сверху в виде темного прямоугольника на рис. 2 расположен кристалл ЛД, снизу — теплоотводящий элемент, светлые тени сверху — золотые проволочки верхнего электрода. Из-за ошибок в толщине слоя металлизации и режиме монтажа на зеркале этого ЛД виден „язык“ припоя, а также капли припоя вблизи верхнего контакта. Указанный выше механизм образования каналов утечки тока в принципе возможен, однако в приведенном случае вольт-амперная (ВАХ) и ватт-амперная характеристики (ВтАх) данного ЛД были в норме, более того, этот образец ЛД успешно прошел кратковременные испытания в течение 100 ч. „Язык“ припоя не был в данном случае источником канала утечки тока, поскольку он „лежит“ на зеркале, покрытом диэлектрической пленкой. В приведенном случае „язык“ припоя также не приводит к заметным искажениям диаграммы направленности излучения. Несмотря на это, мы продолжаем браковать такие ЛД с дефектами сборки по внешним признакам как потенциально ненадежные, поскольку из-за эффекта „ползучести“ припоя невозможно прогнозировать их параметры после наработки в несколько тысяч часов.

В ряде случаев ВтАх ЛД имели низкую эффективность, но нам не удалось наблюдать дефекты сборки и выбросы припоя на зеркалах или боковых гранях чипа.

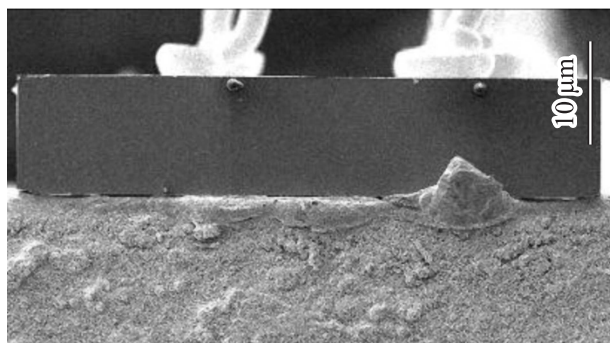


Рис. 2. Микрофотография на сканирующем электронном микроскопе. Зеркало забракованного ЛД с выбросом припоя.

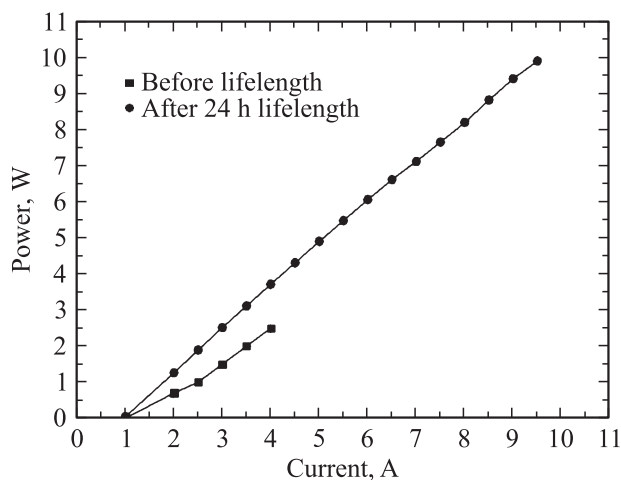


Рис. 3. ВтАх ЛД на первом измерении после сборки и после 24 ч наработки.

Заметим, что на боковых гранях чипов, как видно на рис. 2, имеются канавки, покрытые диэлектриком, они играют существенную позитивную роль в предотвращении короткого замыкания мостиками припоя, возникающими при сборке, а также явлений „ползучести“ припоя, иногда наблюдаемых при работе лазера, в особенности на „мягких“ припоях типа индия.

Мы предположили, что причина наблюдаемого явления кроется в объеме лазерного кристалла. Также было замечено, что подобные явления в значительно большей степени наблюдаются в ЛД на длине волны 808 нм по сравнению с ЛД на длинах волн 980 и 1060 нм.

На рис. 3 приведены две ВтАх одного из забракованных ЛД, измеренные сразу после сборки и после 24 ч наработки.

На первом измерении данный образец ЛД показал мощность 2.5 Вт при токе 4 А, а его спектр излучения свидетельствовал о перегреве активной области. Было установлено, что дальнейшее увеличение тока накачки в образцах, аналогичных приведенному на рис. 2, приводит к насыщению мощности на уровне 3–5 Вт и к последующей необратимой деградации ЛД при увеличении тока накачки.

Мы попытались восстановить параметры данного и подобных ему образцов. Для этого был проведен низкотемпературный кратковременный отжиг, после которого ЛД был поставлен на измерительный стенд при токе накачки 4 А.

После 24 ч наработки, как видно из рис. 2, пороговый ток уменьшился, наклон ВтАх значительно возрос, выходная мощность составила 10 Вт при токе 9.6 А, что соответствует параметрам лучших образцов, причем в течение следующих 24 ч наработки параметры данного образца ЛД практически не изменились в пределах точности измерений. Таким образом, обнаружена возможность восстановления излучательных параметров

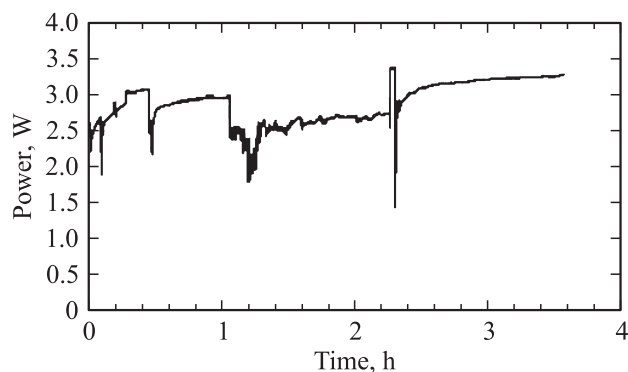


Рис. 4. Зависимость выходной мощности от времени работы ЛД.

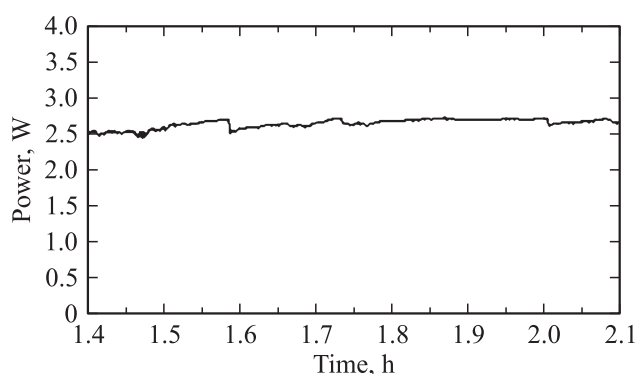


Рис. 5. Зависимость выходной мощности от времени работы ЛД в мелком масштабе.

забракованных образцов. Для исследования данного эффекта было написано новое программное обеспечение для управления измерительным стендом, позволяющее фиксировать основные излучательные параметры (ВтАх, ВАХ, спектры излучения) с небольшим интервалом времени.

Выходная мощность данного ЛД при токе накачки 4 А была зафиксирована с шагом по времени в 10 с в течение 24 ч работы. На рис. 4 приведены результаты в наиболее интересном временном интервале от начала работы до 3.5 ч, в течение которого наблюдаются наиболее значительные колебания выходной мощности излучения. В течение 3.5 ч работы выходная мощность увеличилась с 2.5 до 3.3 Вт, при этом обнаружены участки существенно немоного поведения мощности. Более подробное поведение мощности в интервале времени 1.4–2.1 ч показано на рис. 5. Просматриваются временные интервалы, в течение которых мощность сравнительно плавно нарастает и затем резко падает. Наблюдается также увеличение периода этого процесса. В момент времени 2.3 ч наработки, перед резким падением мощности наблюдается также резкое нарастание мощности. Возможно, шаг измерений по времени в 10 с не позволил увидеть более быстрые процессы.

Интересно сравнить поведение выходной мощности с поведением напряжения на ЛД. На рис. 6 показаны результаты аналогичных временных измерений для напряжения. Сравнение кривых на рис. 4 и 6 показывает, что выходная мощность и напряжение меняются синхронно во времени, в одни и те же моменты времени синхронно мощность и напряжение увеличиваются и резко падают. Из зависимости напряжения от времени наработки еще более отчетливо видно, что в интервалах времени между наиболее яркими событиями, происходящими в моменты около 0.1, 0.5, 1 и 2.3 ч, в приведенном интервале времени наблюдаются похожие по форме указанных крупных событий колебания мощности и напряжения, но с меньшей амплитудой, т.е. моментам резкого падения мощности предшествуют периоды относительно плавного, но немоного (рис. 5) нарастания мощности.

Наблюдаются также синхронизированные по времени с пиками изменения мощности и напряжения колебания длины волны излучения. Как видно из рис. 7, длина волны при резком уменьшении мощности и напряжения увеличивается. Это происходит на фоне плавного увеличения длины волны от 799.5 до 800.7 нм на начальном участке в течение первого часа работы. Заметим, что наиболее значительные события во временном поведе-

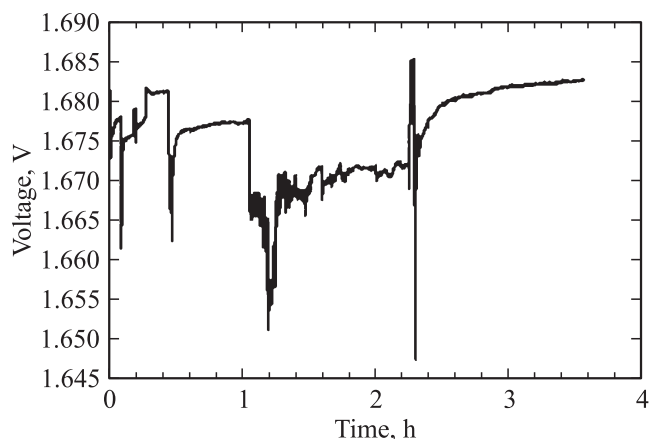


Рис. 6. Зависимость напряжения на ЛД от времени работы.

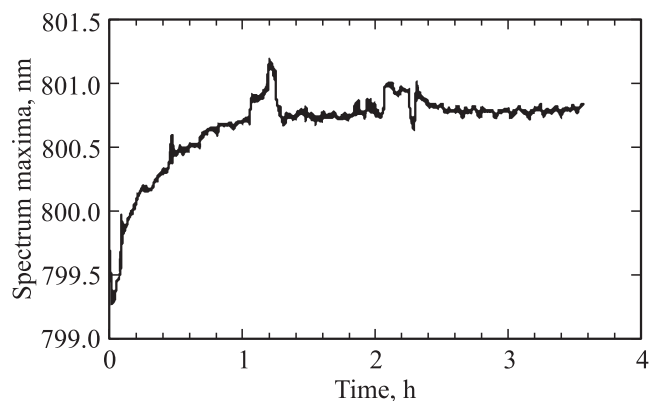


Рис. 7. Зависимость максимума огибающей спектра от времени работы ЛД.

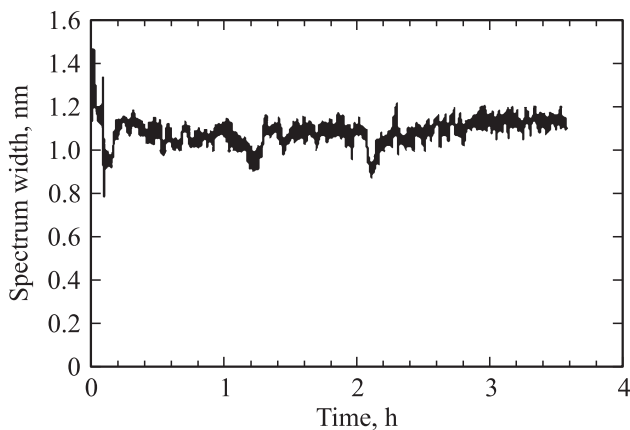


Рис. 8. Зависимость ширины огибающей спектра на половине высоты от времени работы ЛД.

нии спектра наблюдаются в тех же отрезках 1.05–1.3 и 2.05–2.3 ч, это отрезки, на которых наблюдаются наиболее значительные колебания мощности.

Размах изменений спектра составляет около 1.3 нм, что соответствует уменьшению энергии кванта на 2.5 мэВ.

На рис. 8 приведены аналогичные зависимости для полной ширины спектра излучения на половине высоты.

В рассматриваемом временном интервале также наблюдаются нестабильности ширины спектра излучения. В течение первых минут работы ширина спектра сначала резко увеличивается от 1.2 до 1.4 нм, затем уменьшается до минимального значения 0.8 нм в момент 0.1 ч, растет до уровня около 1.1 нм и колеблется в интервале значений 1–1.2 нм с двумя характерными минимумами в моменты времени 1.2 и 2.1 ч.

Благодаря направленному применению разработанной методики выходные параметры нескольких образцов таких забракованных по первоначальным измерениям ЛД были восстановлены, и они затем успешно прошли кратковременные испытания в течение 100 ч.

3. Обсуждение результатов

Попытаемся проанализировать полученные данные.

Главный и позитивный результат заключается в том, что образцы лазерных диодов или по крайней мере часть этих образцов, ранее считавшихся браком (предположительно из-за дефектов гетероструктуры, операций процессинга чипа лазерного кристалла и сборочных операций), могут полностью восстановить свои излучательные параметры в процессе наработки в течение 20–50 ч. Как установлено, в отдельных случаях их параметры могут быть почти полностью восстановлены без наработки путем кратковременного низкотемпературного отжига лазерных чипов перед сборкой. Более эффективно восстановить параметры можно комбинацией метода отжига и наработки в правильно выбранной рабочей

точке (наиболее эффективно выбрать рабочую точку в области перехода линейного участка ВtАх в участок насыщения мощности). В каждом конкретном случае для достижения успеха требуется творческое применение указанных методик.

Одной из возможных причин наблюдаемых явлений является механизм безызлучательной рекомбинации, приводящей к увеличению порогового тока и падению внешней дифференциальной квантовой эффективности ЛД. В процессе наработки в течение 10–50 ч или в результате отжига в определенных условиях, по крайней мере на части образцов собранных ЛД, в той и иной степени канал или каналы безызлучательной рекомбинации, вероятно ассоциированные с дефектами, нейтрализуются, в пользу чего свидетельствует синхронный рост напряжения и мощности. Одной из возможных причин наличия центров безызлучательной рекомбинации может быть присутствие в полупроводниковой гетероструктуре водорода и дейтерия, попадающих в гетероструктуру в процессе роста. Источником водорода и дейтерия может быть газ-носитель (как в процессе МОС-гидридной эпитаксии), а также арсин и фосфин, применяемые как источники фосфора и мышьяка. Необходимо отметить, что в классической технологии молекулярно-пучковой эпитаксии водород не используется, но во многих случаях в современных ее модификациях он также используется либо присутствует в применяемых при росте соединениях. Водород, как известно [1–3], может образовывать комплексы с дефектами полупроводников, такими как вакансии элементов V группы, кроме того он может вести себя в полупроводниках как амфотерная примесь. В гетероструктуре GaAsP/AlGaAs/GaAs в активной области присутствует фосфор, кроме того имеется напряжение растяжения, что может служить причиной наблюдаемых явлений. Водородные комплексы, связанные с вакансией фосфора, нестабильны, вследствие чего они могут разрушаться под воздействием температуры, тока накачки и оптической мощности внутри резонатора.

Полученных результатов явно недостаточно для выяснения причин наблюдаемых явлений. Для изучения и понимания механизмов происходящих процессов требуются современные методы исследований, такие как специальная инфракрасная спектроскопия [1] (LVM — local vibrational mode spectroscopy) и спектроскопия глубоких уровней [2].

4. Заключение

Экспериментально, с временным разрешением 10 с исследовано поведение выходной мощности ЛД, напряжения на ЛД, а также спектров излучения забракованных по результатам начальных измерений образцов мощных ЛД.

Установлено, что комбинацией методов кратковременного низкотемпературного отжига и наработки в пра-

вильно выбранной рабочей точке ВтАх параметры первоначально забракованных образцов могут быть восстановлены до уровня лучших образцов в серии. Несколько таких ЛД успешно прошли кратковременные испытания в течение 100 ч. Изучение физических механизмов обнаруженных процессов представляет значительный научный и практический интерес.

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

Список литературы

- [1] J. Dekker, A. Tukiainen, N. Xiang, S. Orsila, M. Saarinen, M. Toivonen, M. Pessa, N. Tkachenko, H. Lemmetyinen. *J. Appl. Phys.*, **86** (№ 7), 3709 (1999).
- [2] M.D. McCluskeya, N.M. Johnson. *J. Vac. Sci. Technol. A*, **17** (4), 2188 (1999).
- [3] S.W. Bland. J. Mimila-Arroyo, *Mod. Phys. Lett. B*, **15**, Issue 17–19, 585 (2001).

Редактор Т.А. Полянская

The study of recovery effect of high-power 808 nm laser diodes on the base of stressed GaAsP/AlGaAs/GaAs heterostructures

V.V. Bezotosnyi, V.A. Oleshenko, E.A. Cheshev

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

Abstract We investigated the output parameters of high-power 808 nm laser diodes manufactured at the base of stressed heterostructures GaAsP/AlGaAs/GaAs and excluded according to results of the first measurements after assembling. The methods of such lasers parameters recovery up to the level of the best samples in the lot were developed. The possible reasons of the observed phenomena are discussed.