

ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИЯ ЛАЗЕРНОГО ДИОДНОГО МОДУЛЯ С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕМЕНТОВ ПЕЛЬТЬЕ

А. А. Холин, А. А. Ластовкин, А. Н. Климов, А. В. Мартынов, В. А. Лебедев

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Лазерная накачка один из наиболее распространённых способов создания инверсии населенности в среде. Она становится все более востребованной из-за малых габаритов и высокого КПД (до 80 %) лазерных диодов. Помимо множества преимуществ, указанному виду накачки присущ и существенный недостаток, связанный с сильной температурной зависимостью спектральных характеристик лазерных диодов. Спектр излучения самого лазерного диода весьма широкий (2–4 нм), и средняя длина волны сильно зависит от температуры (примерно $\frac{\Delta\lambda}{\Delta T} = 0,3 \text{ нм/К}$) [7].

Изменение положения центральной линии спектра излучения лазерного диода с температурой связано с изменением ширины запрещенной зоны с температурой [1]. Данная зависимость описывается эмпирической формулой Варшни [6]. С помощью неё можно получить зависимость длины от температуры:

$$\frac{\Delta\lambda}{\Delta T} = -\frac{\lambda^2}{c} \frac{1}{h} \frac{dE_g}{dT} = \frac{\alpha\lambda^2}{hc} \left(1 - \left(\frac{\beta}{T+\beta} \right)^2 \right) \quad (1)$$

$E_g(0)$ – ширина запрещенной зоны при абсолютном нуле; α, β – параметры кристалла (α, β – положительные числа).

Как видно из данной формулы с увеличением температуры длина волны так же возрастает. Изменение длины волны с температурой приводит к снижению эффективности накачки из-за слабого перекрытия спектров излучения лазерных диодов и поглощения активной среды лазера. Особенно заметно данный эффект проявляется при экспериментах в широком температурном интервале. Для преодоления данной ситуации, как правило, используют системы термостабилизации диодов накачки.

Как правило, термостабилизация модулей осуществляется с помощью жидкости с заданной температурой с точностью 0,1 °С. Причем для различных модулей температура стабилизации может отличаться. Обеспечить термостабилизацию модулей в больших системах является сложной технической задачей, решение которой часто сводится к сортировке модулей по температурным группам. Для таких систем приходится использовать многоконтурную жидкостную систему охлаждения, обеспечивающую поддержание температуры индивидуально для каждой такой группы модулей. Каждая температурная группа модулей рассчитана на определенную температуру втекающей воды. Данную температуру следует поддерживать на протяжении всего времени работы системы.

Принцип охлаждения лазерных модулей с помощью элементов Пельтье состоит в следующем [9]. Тепло, выделяемое на медном основании лазерного диодного модуля, отводится холодной стороной элементов Пельтье. В свою очередь горячая часть элементов Пельтье охлаждается водой. Сам элемент Пельтье работает по принципу теплового насоса. С помощью термоконтроллера устанавливается подходящий режим питания элементов Пельтье, тем самым подбирается подходящий температурный режим функционирования системы. Пример такой схемы охлаждения показан на рис. 1.

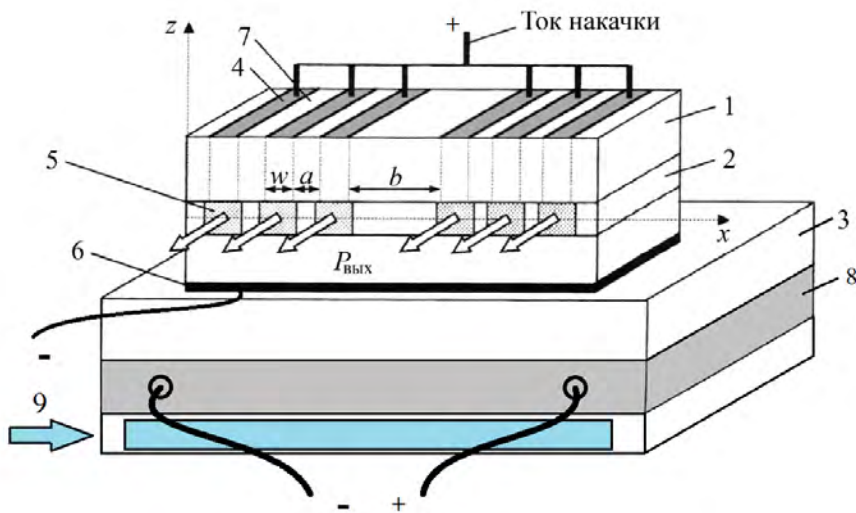


Рис. 1. Система охлаждения одного лазерного модуля с элементами Пельтье: 1 – полупроводниковый кристалл, 2 – активная среда гетероструктуры, 3 – теплоотводящее основание, 4 – одиночный полосковый контакт шириной w , 5 – одиночная излучающая площадка активной области, 6 – контактный слой, 7 – изолирующий промежуток шириной a между соседними полосковыми контактами; b – расстояние между группами полосковых контактов, 8 – элемент Пельтье, 9 – водяное охлаждение

Применение элементов Пельтье для охлаждения лазерных диодных модулей позволит упростить конструкцию системы охлаждения и уменьшить ее габариты. Так же такая система охлаждения будет способна функционировать с одним типом охлаждающей жидкости. Причем в этом случае не будет требования на конкретную температуру воды, система способна функционировать с водой любой температуры из некоторого интервала. Так же с помощью элементов Пельтье возможно добиться высокоточного поддержания температуры каждого модуля индивидуально, в этом случае отпадает потребность в сортировке модулей по температурным группам. При такой организации системы охлаждения снижаются требования к качеству воды, в этом случае не происходит непосредственного контакта основания лазерного модуля и воды, они контактируют через элемент Пельтье, обкладки которого изготовлены из керамики.

Диапазон температур воды, при которой такая система может функционировать, определяется используемыми элементами Пельтье и организацией водяного охлаждения. При увеличении разности температур на обкладках мощность, отводимая от холодной стороны элемента Пельтье, уменьшается, данная зависимость является характеристикой элемента Пельтье [4]. Т. е. существует максимальная температура горячей стороны элемента Пельтье, при которой на обкладках элемента установятся такие температуры, что не будет возможен теплосъем требуемой мощности, и температура лазерного модуля будет выше требуемой ($13\text{ }^{\circ}\text{C}$). Этой температурой и определяется диапазон температур воды, в котором система охлаждения работает корректно.

Лазерная диодная линейка, используемая в данной работе, относится к гетероструктурным лазерам с раздельным удержанием [6]. В состав данного лазерного модуля входят две лазерные диодные линейки. В каждом оптическом тракте такой лазерной линейки содержатся линзовый растр, брэгговское зеркало, цилиндрическая линза. Излучение из двух трактов собирается коллиматором. Использование брэгговских зеркал уменьшает зависимость длины волны излучения модуля от температуры [5].

На рис. 2 представлена принципиальная схема эксперимента.

Основным элементом схемы охлаждения является термоэлектрический модуль. Под его охлаждаемой металлической пластиной находятся 4 элемента Пельтье. От нагреваемой поверхности тепло отводится с помощью воды, которая подается через предназначенные для нее отверстия в корпусе. Для подачи воды нами использовался водяной термостат, обеспечивающий возможность контроля и автоматического поддержания температуры воды.

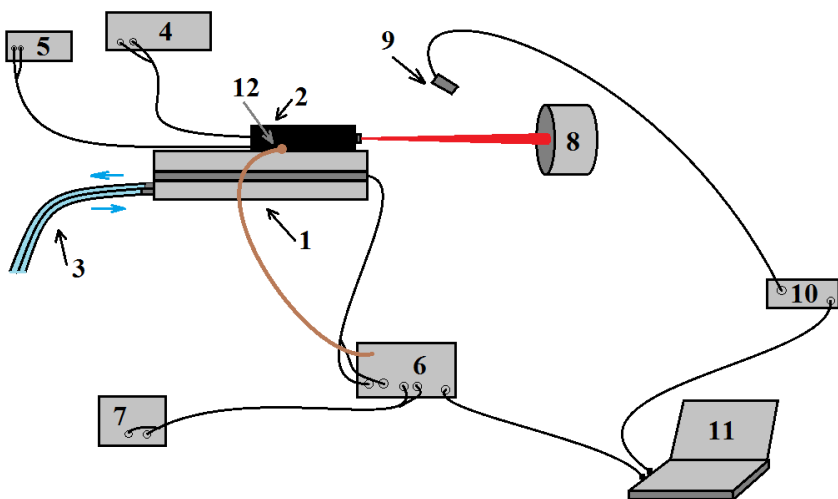


Рис. 2. Схема экспериментальной установки: 1 – термоэлектрическая сборка, 2 – лазерный модуль, 3 – водяное охлаждение, 4 – источник питания для лазерного модуля, 5 – источник питания системы термостабилизации брэгговских зеркал, 6 – термоконтроллер, 7 – источник питания для термоконтроллера, 8 – ловушка лазерного излучения, 9 – волоконный вход спектрометра, 10 – спектрометр, 11 – ПК, 12 – термодатчик

Измерение температуры непосредственно лазерной диодной линейки не предоставляется возможным из-за конструкции лазерного модуля. Поэтому осуществлялся контроль температуры медного теплоотвода лазерного модуля. Следует полагать, что во время генерации температура непосредственно линеек лазерных диодов несколько выше измеряемой термодатчиком.

Для поддержания температуры лазерного модуля нами использовался термоконтроллер. Он обеспечивает режим питания элементов Пельтье для поддержания установленной температуры. Это управление осуществляется в ПИД (пропорционально-интегральный-дифференцирующий) режиме [2]. Подаваемая электрическая мощность на термоэлектрическую сборку зависит от разности текущей температуры на термодатчике и рабочей температуры ($13\text{ }^{\circ}\text{C}$). Так же от того как это температура изменялась со временем.

Для определения рабочего диапазона температур воды, подаваемой в термоэлектрическую сборку, проводились следующие эксперименты. Изначально устанавливалась температура воды на водяном термостате. Далее при выключенном питании лазерного модуля, устанавливалась начальная температура системы (температура в точке измерения), на эту температуру система выводилась с помощью термоконтроллера. Затем включалось питание лазерного модуля, в лазерных линейках возникала генерация, при этом начиналось обильное тепловыделение. В этот момент начинал работать термоконтроллер с установленными ПИД коэффициентами, изменяя подаваемую электрическую мощность на элементы Пельтье, выводя систему на установленную температуру [3]. Параллельно проводились измерения спектра излучения лазерного модуля и температуры во времени.

Было проведено 8 экспериментов с различными начальными условиями.

Характерная зависимость температуры медного основания лазерного диодного модуля от времени при включенном питании модуля представлена на рис. 3.

В этом эксперименте температура охлаждающей воды составляла $5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Как видно из графика, система изначально была выведена на рабочую температуру ($13\text{ }^{\circ}\text{C}$), это обговаривалось выше.

Первая вертикальная линия соответствует моменту времени, когда было включено питание лазерного модуля. Последующие вертикальные полосы соответствуют моментам времени, в которые производилось измерения спектра излучения лазерного модуля.

Как видно из этого графика, после включения питания лазерного модуля, температура его основания начала увеличиваться, это связано с тепловыделениями лазерных диодных линеек при работе в лазерном модуле. При увеличении разности между температурами медного основания модуля и рабочей, термоконтроллер увеличивает электрическую мощность, подаваемую на термо-

электрическую сборку, тем самым увеличивается отводимая тепловая мощность от лазерного модуля. Со временем система постепенно выходит на рабочий режим. Такое изменение температуры со временем было характерно всем тем случаям, в результате которых удалось термостабилизировать лазерный модуль на требуемой температуре (13°C).

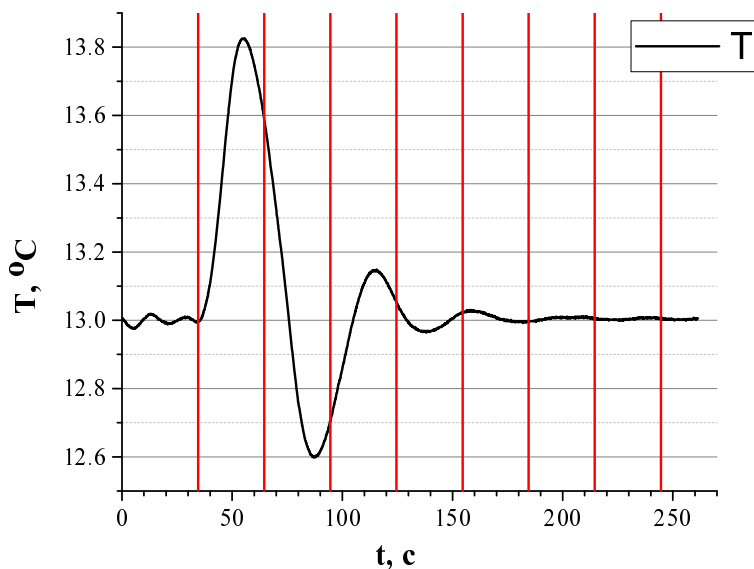


Рис. 3. Зависимость температуры на термодатчике от времени

В результате проведенных экспериментов, удалось термостабилизировать систему при температуре охлаждающей воды из интервала $5\text{--}18^{\circ}\text{C}$. В случае более высокой температуры воды, система термостабилизации не способна отводить нужную тепловую мощность.

Характерный вид спектра излучения лазерного диодного модуля показан на рис. 4. Центральная длина волны излучения лазерного диодного модуля и ширина его спектра излучения в среднем во всей серии экспериментов составили $(780,036 \pm 0,004)$ нм и (61 ± 4) пм соответственно.

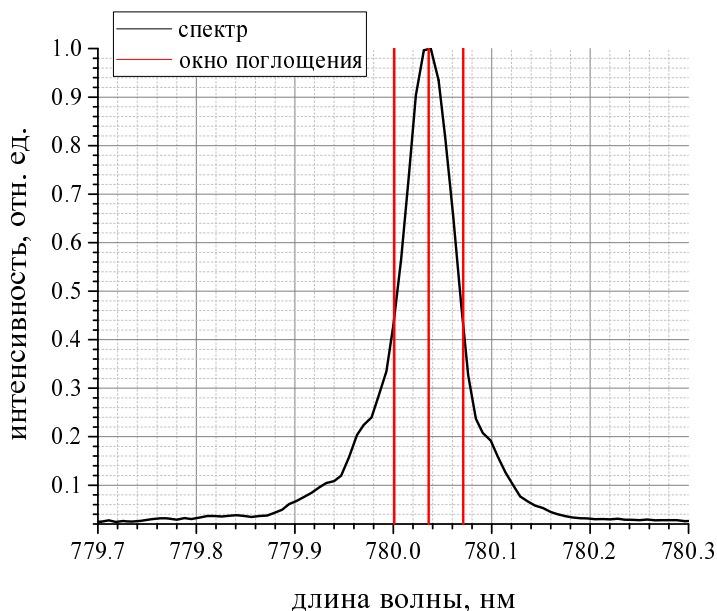


Рис. 4. Спектр излучения лазерного модуля

Спектр излучения лазерного модуля весьма узкий, это связано с тем, что в состав модуля входит брэгговское зеркало, которое обладает достаточно узким спектром пропускания. Это зеркало в то же время является одним из зеркал резонатора оптической схемы лазерного модуля. Вертикальные полосы на графике соответствуют окну поглощения активной среды, накачка которой и производится данным лазерным модулем. Центральная длина волны окна поглощения – 780,036 нм. Ширина на полувысоте – 136 пм.

Эффективностью накачки определяется по формуле (2).

$$\eta = \frac{\int S_{laser}(\lambda) S_{abs}(\lambda) d\lambda}{\int S_{laser}(\lambda) d\lambda} \quad (2)$$

где $S_{laser}(\lambda)$ – спектр излучения лазерного диодного модуля при данных параметрах системы, $S_{abs}(\lambda)$ – спектр поглощен активной среды.

Контур линии поглощения активной среды описывается функцией Лоренца со следующими параметрами:

$$\sigma(\lambda_{air}) = \frac{\sigma_{br}}{1 + \left(\frac{\lambda_{air} - \lambda_{sair}}{\frac{\Delta\lambda_{FWHMair}}{2}} \right)^2} \quad (3)$$

где σ_{br} – сечение уширенной спектральной линии в максимуме в см^2 , λ_{air} – длина волны в воздухе, λ_{sair} – длина волны накачки активной среды в воздухе с учётом сдвига, $\Delta\lambda_{FWHMair}$ – ширина спектральной линии по полувысоте в воздухе.

Характерные значения выше приведенных параметров следующие: $\lambda_{sair} = 780,036$ нм, $\Delta\lambda_{FWHMair} = 0,136 \cdot 10^{-9}$ нм.

Вид спектра излучения лазерного диодного модуля практически не изменялся в течение эксперимента, об этом можно судить по значению эффективности накачки в таблице. Она практически не изменялась со временем.

Эффективность накачки активной среды

Время	Эффективность
30 сек	73,0 %
1 мин	72,6 %
1 мин 30 сек	73,1 %
2 мин	73,3 %
2 мин 30 сек	72,7 %
3 мин	72,5 %
3 мин 30 сек	73,1 %

Из данной таблицы можно сделать вывод, что в эксперименте достигнут достаточный уровень термостабилизации, в течение опыта изменение длины волны не существенные, ее изменение почти не сказывается на эффективности накачки.

В результате всех проведенных экспериментов были подобраны оптимальные начальные условия системы и оптимальный режим работы контроллера:

1) Для лучшего функционирования системы её следует выводить на рабочую температуру до включения лазерного модуля. Это осуществляется с помощью термоконтроллера. Если температура

теплового баланса системы ниже рабочей температуры, то следует включить функцию нагрева на термоконтроллере. Оптимальные коэффициенты ПИД-регулятора для этого режима следующие – $K_p = 100$, $K_i = 5$, $K_d = 350$.

2) Перед включением лазерного модуля на термоконтроллере стоит задать следующие коэффициенты ПИД-регулятора:

– если температура воды выше рабочей температуры ($13\text{ }^\circ\text{C}$) – $K_p = 60$, $K_i = 5$, $K_d = 220$. Так же нужно выключить функцию нагрева термоконтроллера

– если температура воды ниже рабочей температуры ($13\text{ }^\circ\text{C}$) – $K_p = 90$, $K_i = 5$, $K_d = 230$. Так же нужно включить функцию нагрева термоконтроллера

В ходе работы было показано, что рабочий диапазон температур воды – от плюс $5\text{ }^\circ\text{C}$ до плюс $18\text{ }^\circ\text{C}$. Предполагается, что нижнюю границу можно расширить вплоть до отрицательных температур. В данных экспериментах использовалась серийная термоэлектрическая сборка. Верхний предел диапазона можно увеличить при использовании иной термоэлектрической сборки с другими термоэлектрическими элементами.

Достаточно долгое время выхода системы на рабочую температуру и сильные переколебания температуры в начале процесса термостабилизации связаны с неоптимальным креплением датчика температур термоконтроллера. Он был закреплен на медном основании тепловода лазерного диодного модуля. Место его крепления находилось достаточно далеко от самих лазерных диодных линеек, относительно размеров самого модуля. Данный факт вызывал задержку между изменениями температуры самой линейки и показаниями термодатчика [8]. Что и отразилось на быстродействии системы термостабилизации.

Заключение

В результате проведенных экспериментов была обеспечена термостабилизация лазерных модулей в диапазоне температуры воды от плюс $5\text{ }^\circ\text{C}$ до плюс $8\text{ }^\circ\text{C}$ воды, были подобраны оптимальные начальные условия системы и оптимальный режим работы контроллера. При этом длина волны излучения данного лазерного модуля составила – $(780,036 \pm 0,004)$ нм, ширина спектра излучения на полувысоте – (61 ± 4) пм (при $13\text{ }^\circ\text{C}$ и 26 В напряжения питания системы термостабилизации брэгговских зеркал), точность поддержания температуры лазерного модуля не хуже $0,1\text{ }^\circ\text{C}$, время выхода на рабочий режим – около 30 с . На основе полученных данных были проведены расчеты и определена эффективность накачки активной среды с помощью лазерного диодного модуля, и зависимость этой эффективности от силы тока в модуле.

Применение элементов Пельтье позволит снизить массу и габариты системы термостабилизации лазерных модулей, внести в неё существенные упрощения, «заплатив» за это ростом электропотребления. Такая система термостабилизации функционирует с одним типом охлаждающей жидкости, температура которой лежит в широком температурном интервале. Продемонстрированный способ термостабилизации лазерных модулей открывает новый путь к созданию лазерных систем высокой мощности с индивидуальным контролем температуры каждого модуля.

Список литературы

1. Звелто О. Принципы лазеров // 4-е изд. С.-Пб.: Лань, 2008. С. 720.
2. Термоконтроллер ТМ-119-06-24. Руководство по эксплуатации. ООО «Системы СТК», 2008 г.
3. Термоконтроллер Laird PR-59. Руководство по эксплуатации. Laird Technologies, Inc, 2017 г.
4. Термоэлектрическая сборка Laird DL-210-24-00-00-00. Руководство по эксплуатации. Laird Technologies, Inc, 2017 г.
5. Volodin B. L., Dolgy S. V., Melnik E. D., Downs E., Shaw J., Ban V. S. Wavelength stabilization and spectrum narrowing of high-power multimode laser diodes and arrays by use of volume Bragg gratings // Optics Letters, 2004. Vol. 29. N 16.

6. Грибковский В. П. Теория поглощения и испускания света в полупроводниках. Минск: изд-во «Наука и техника», 1975. С. 464.

7. Астахова А. П., Баранов А. Н., Висе А., Именков А. Н., Колчанов Н. М., Стоянов Н. Д., Черняев А., Яреха Д. А., Яковлев Ю. П. Тепловая и токовая перестройка длины волны излучения квантово-размерных лазеров диапазона 2,0–2,4 мкм // Физика и техника полупроводников, 2003. Т. 37. Вып. 4.

8. Лыков А. В. Теория теплопроводности // М.: Высшая школа, 1967. С. 600.

9. Шелестов Д. А., Томилов С. М. Стабилизация длины волны излучения диодных лазеров. Динамические характеристики элементов Пельтье // Лазеры и лазерные системы, 2016. № 4/58.