

Увеличение диапазона токов накачки одночастотного лазерного диода с частотой излучения, настроенной на линию D_2 цезия

О.О.Багаева, А.В.Иванов, В.Н.Дроздовский, В.Д.Курносов,
К.В.Курносов, В.И.Романцевич, В.А.Симаков, Р.В.Чернов

Экспериментально и теоретически показано, что при увеличении тока накачки лазерного диода и при одновременном уменьшении его температуры можно на порядок увеличить диапазон токов накачки, в котором частота излучения диода настроена на линию D_2 цезия. Проведено сравнение со случаем, когда температуры лазерного диода и волоконной брэгговской решетки поддерживаются постоянными, а изменяется только ток накачки лазера.

Ключевые слова: одночастотный перестраиваемый лазер, волоконная брэгговская дифракционная решетка, спектральные и мощностные характеристики, настройка на линию D_2 цезия.

1. Введение

Разработка лазерных излучателей, предназначенных для использования в качестве высокостабильных источников резонансного излучения для накачки и детектирования эталонного квантового перехода в квантовых стандартах частоты (КСЧ) на пучках и парах атомов цезия (^{133}Cs) и рубидия (^{87}Rb), способствует дальнейшему улучшению технических характеристик глобальных навигационных спутниковых систем GPS и ГЛОНАСС.

Наиболее перспективными для использования в атомно-лучевых трубках (АЛТ) являются одночастотные лазерные диоды (ЛД), которые отличаются малыми габаритами и весом, простотой накачки, высокой эффективностью преобразования электрической энергии в когерентное излучение в диапазоне длин волн 850–895 нм, охватывающем область резонансных оптических переходов в атомах цезия.

Вопросам разработки одночастотных лазеров в настоящее время уделяется большое внимание (в том числе на диапазон 1.3–1.6 мкм для передачи больших объемов информации). В работе [1] сообщается о разработке мощного (200 мВт с мезаполосковой структуры шириной 3 мкм, с подавлением боковых мод 30–50 дБ) гребневого одночастотного лазера с боковой дифракционной решеткой первого порядка на длину волны излучения 1.5–1.6 мкм. Обычно процесс создания РОС-лазера включает в себя два цикла: выращивание требуемой гетероструктуры (ГС) и формирование брэгговской решетки. Для завершения процесса формирования структуры лазерного прибора необходимо закрыть открытую поверхность решетки полупроводниковым материалом, используя процесс эпитаксиального наращивания. Этот процесс сопровождается рядом технологических сложностей, приводящих к формированию дефектов.

О.О.Багаева, А.В.Иванов, В.Н.Дроздовский, В.Д.Курносов, К.В.Курносов, В.И.Романцевич, В.А.Симаков, Р.В.Чернов. АО «НИИ “Полюс” им. М.Ф.Степеля», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3, корп. 1; e-mail: KurnosovKV@niipolyus.ru

Поступила в редакцию 19 июля 2021 г.

Вышеупомянутых недостатков можно избежать, применяя технологию, основанную на использовании продольной решетки Брэгга, расположенной по бокам от активной области и оптически связанной с ней. Дифракционная решетка формировалась с помощью электронно-лучевой литографии в ИСВЧПЭ РАН, а выращивание ГС, формирование активного элемента, сборка и исследование параметров проводилось в АО «НИИ “Полюс” им. М.Ф.Степеля». Данная технология может быть использована и для создания одночастотного лазера на длину волны 852 нм.

В настоящей работе для получения одночастотного режима работы ЛД предложена конструкция излучателя на базе дифракционной решетки, сформированной в одномодовом оптическом волокне [2]. В этом случае длину волны излучателя можно менять как путем изменения температуры и тока накачки ЛД, так и путем изменения температуры волоконной брэгговской решетки (ВБР), что позволяет осуществлять точную настройку длины волны излучателя на сверхтонкие переходы атомов цезия.

В работе [3] представлена расчетная модель ЛД с внешним резонатором, содержащим ВБР, и показано, что в данной модели можно получить режим одночастотной генерации без учета спектрального выгорания носителей. Экспериментально определены области изменения тока и температуры ЛД, а также температуры брэгговской решетки, при которых возможна настройка лазера на линию D_2 цезия.

Экспериментальное и теоретическое исследование спектральных характеристик излучателя с брэгговской решеткой, питаемой на термоэлектрический охладитель (ТЭО), проведено в работе [4]. Описана модель излучателя с учетом давления, возникающего после напайки брэгговской решетки на термоохладитель, а также температуры и дисперсии. Полученные теоретические и экспериментальные данные удовлетворительно совпадают.

Пороговые, мощностные и спектральные характеристики излучателя с ВБР теоретически и экспериментально исследовались в работе [5]. Показана важность учета нагрева активной области ЛД, его теплового сопротивления и выводимой из резонатора мощности излучения, поскольку это позволяет удовлетворительно объяснить на-

блюдаемые на мощностных и спектральных характеристиках разрывы.

В работе [6] изучались мощностные и спектральные характеристики ЛД с ВБР при различных длинах волноконного световода и значениях теплового сопротивления диода. Получено упрощенное выражение для коэффициента усиления ЛД.

Для работы КСЧ необходимо использовать систему автоматического поддержания частоты (длины волны) лазерного излучателя. Чем шире будет диапазон токов накачки, в котором его частота настроена на линию D_2 цезия, тем более надежной будет система автоматической подстройки частоты излучения. В настоящей работе предложен способ увеличения диапазона токов накачки лазерного диодного излучателя на базе дифракционной решетки, сформированной в одномодовом оптическом волокне. Блок-схема лазера с волоконной решеткой и оптимизация его параметров описаны в работах [7–9]. Вопросы применения одночастотных лазеров рассмотрены в работе [10]. Использование оптических методов в АЛТ позволяет заменить магнитную селекцию атомов по состояниям более эффективными методами – оптической накачкой и оптическим детектированием. В результате упрощаются геометрия и конструкция прибора, снижается его вес, существенно повышаются эффективность использования рабочего вещества и амплитуда выходного сигнала [3].

В настоящей работе показано, что, если с увеличением тока накачки ЛД одновременно уменьшать его температуру, можно на порядок увеличить диапазон токов накачки, для которых длина волны излучения будет соответствовать настройке на линию D_2 цезия. Сначала рассмотрен случай, когда температуры ЛД и ВБР поддерживаются постоянными, и изучены спектральные и мощностные характеристики излучателя при изменении тока накачки. Затем эти же характеристики рассмотрены при постоянной температуре ВБР и изменении температуры ЛД, и проведено их сравнение. Результаты расчетов спектральных и мощностных характеристик удовлетворительно совпали с экспериментальными данными.

2. Эксперимент

Схема лазерного излучателя с волоконной брэгговской решеткой представлена на рис.1. В экспериментах использовались выращенные по МОС-гибридной технологии ЛД на основе GaAs/AlGaAs с толщиной активной области 90 \AA . Справа и слева от активной области лазера располагались волноведущие слои толщиной 0.12 мкм и эмиттерные слои толщиной 1.5 мкм . Длина ЛД составляла 1200 мкм . На грань кристалла ЛД, обращенную к объ-

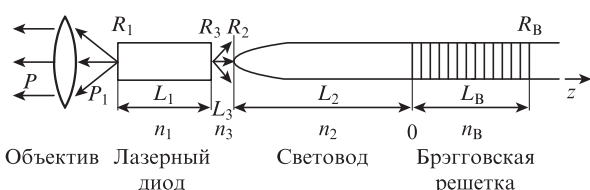


Рис.1. Схема полупроводникового лазера с брэгговской решеткой в волоконном световоде:

$L_1, n_1, L_2, n_2, L_3, n_3, L_B, n_B$ – длины и показатели преломления полупроводникового лазера, волоконного световода, воздушного зазора и брэгговской решетки; R_1, R_2, R_3, R_B – коэффициенты отражения.

ективу, наносилось защитное покрытие, а на противоположную грань, обращенную к ВБР, – просветляющее покрытие с коэффициентом отражения менее 0.5% . ЛД напайвались на контактную пластину активной областью вверх, контактная пластина напайвалась на ТЭО. После этого осуществлялись юстировка и фиксация металлизированного оптического волокна, содержащего ВБР, относительно активной области ЛД. Волокно с ВБР закреплялось на втором ТЭО. Период изменения показателя преломления ВБР выбирался из условия получения лазерной генерации на длине волны 852 нм .

Измерения спектральных и мощностных характеристик лазерного излучения проводились по схеме, показанной на рис.2. В процессе измерения параметров излучатель 4 находился во внешнем термостате. Излучение ЛД с помощью светоделительных кубиков 7 и 8 поступало на входы оптического анализатора спектра 9 (Yokogawa AQ6319), блока насыщенной спектроскопии 10 (TEM-Messtechnik CoSy) и сканирующего конфокального интерферометра 12 (аппаратная функция интерферометра 1.5 МГц , область свободной дисперсии 250 МГц). Лазерное излучение подавалось на оптический анализатор спектра с помощью коллиматора и отрезка оптического волокна (на рис.2 не показаны). Сигнал с блока насыщенной спектроскопии регистрировался на осциллографе 11, а с интерферометра – на осциллографе 13.

При проведении измерений температуру внутри внешнего термостата, который использовался для уменьшения влияния на ЛД изменения температуры окружающей среды, устанавливали равной 23.0°C . Режимы термостабилизации ЛД и ВБР обеспечивались контроллерами температуры 1 и 2. Ток накачки ЛД поступал от контроллера постоянного тока 6 (SRS LDC500). Дополнительно с помощью генератора 5 на постоянный ток накачки накладывался треугольно модулированный ток с частотой 10 Гц и амплитудой в максимуме $3\text{--}5 \text{ мА}$, обеспечивающий небольшое сканирование длины волны излучения. При настройке излучателя на линию D_2 цезия на экране осциллографа 11, подключенного к блоку насыщенной спектроскопии 10, наблюдалось шесть переходов, которые соответствовали тонкой структуре атомов цезия (см. также [11], рис.15). Одновременно на экран осциллографа 11 выводился треугольный сигнал тока сканирования, выставляемый по центру экрана. С помощью регулировки тока накачки и температуры ЛД пик, соответствующий переходу $4'\text{--}5'$ (этот переход выбран как наиболее

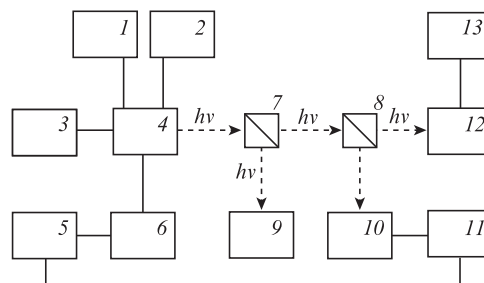


Рис.2. Блок-схема соединения приборов для контроля настройки на линию D_2 цезия:

1, 2 – контроллер температуры; 3 – мультиметр; 4 – излучатель, установленный во внешнем термостате; 5 – генератор; 6 – контроллер тока SRS LDC500; 7, 8 – куб светоделительный; 9 – оптический анализатор спектра Yokogawa AQ6319; 10 – блок насыщенной спектроскопии TEM-Messtechnik CoSy; 11, 13 – осциллограф; 12 – сканирующий конфокальный интерферометр.

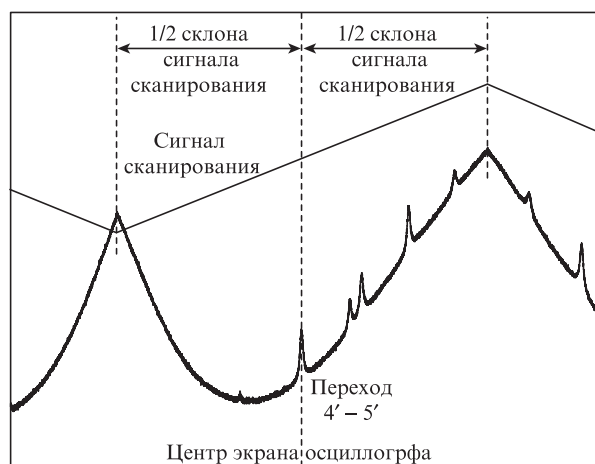


Рис.3. Переходы линии D_2 цезия, наблюдаемые на экране осциллографа.

четко выраженный среди прочих и расположенный близко к максимуму свечения линии D_2 атомов цезия), также размещался по центру экрана осциллографа (рис.3). Таким образом, при уменьшении сигнала сканирования до нуля постоянная величина тока накачки ЛД, идущего от контроллера тока b , соответствует настройке излучателя на переход $4'-5'$.

Измерение параметров лазерного излучения проводилось в два этапа. На первом этапе при измерении параметров изменялся только ток накачки ЛД, а температуры ЛД и ВБР были зафиксированы. На втором этапе температура и ток накачки ЛД изменялись одновременно, а температура ВБР была фиксированной.

В начале проведения измерений при помощи контроллеров 1 , 2 и 6 (изменение температур ЛД и ВБР, изменение тока накачки ЛД) настраивали частоту излучателя на линию D_2 и на экране осциллографа 11 наблюдали переходы, отвечающие этой линии. После настройки излучателя на линию D_2 температуры ЛД и ВБР фиксировали и начинали изменять ток накачки ЛД как в большую, так и в меньшую сторону относительно его значения при настройке на линию D_2 . При этом измерялись длина волны и мощность оптического излучения (измеритель мощности на рис.2 не показан). Одновременно с этим с помощью сканирующего интерферометра контролировалась одночастотность лазерного излучения. Лазерное излучение было одночастотным, если на экране осциллографа 13 наблюдались одиночные пики без каких-либо боковых составляющих. При измерении оптической мощности, длины волны лазерного излучения и контроле одночастотности модуляция тока накачки ЛД отключалась.

На рис.4 представлены зависимости выходной мощности и длины волны излучателя от тока накачки при постоянных температурах ЛД и ВБР. Ток накачки, соответствующий точке А, равен 47.9 мА, а точке В – 67 мА, т.е. диапазон изменения тока накачки равен 19.1 мА. В этом диапазоне токов накачки наблюдалась одна мода внешнего резонатора. При увеличении тока накачки после точки В происходило переключение на другую моду ЛД. Штриховкой отмечен диапазон токов, соответствующих многочастотному режиму генерации (отметим, что для любого тока накачки в выделенной штриховкой области можно получить одночастотную генерацию путем соответствующего выбора температурных режимов работы ЛД и ВБР).

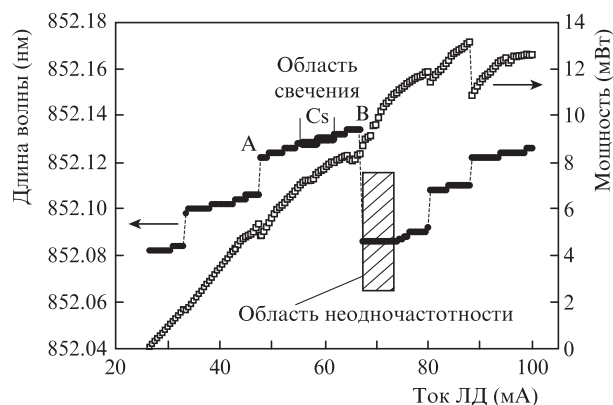


Рис.4. Зависимости оптической мощности на выходе излучателя и длины волны излучения от тока накачки при постоянных температурах ЛД и ВБР.

Также необходимо отметить, что небольшие скачки длины волны излучения в промежутке между точками А и В на рис.4 объясняются недостаточным спектральным разрешением анализатора оптического спектра Yokogawa AQ6319, хотя длина волны изменяется непрерывно между ними (разрешающая способность анализатора 0.01 нм).

На рис.4 отмечена область токов накачки, соответствующая свечению паров атомов цезия; ширина этой области равна 5.7 мА (от 56 до 61.7 мА). Таким образом, при заданных температурах ЛД и ВБР нельзя получить свечение паров атомов цезия во всем диапазоне токов А–В, изменяя только ток накачки, – необходимо также изменять температуру либо ЛД, либо ВБР.

Далее параметры лазерного излучения измерялись при одновременном изменении тока накачки и температуры ЛД и фиксированной температуре ВБР. Излучатель опять настраивался на линию D_2 , используя данные, полученные на первом этапе. На экране осциллографа 11 наблюдались шесть соответствующих тонкой структуре атомов цезия переходов и треугольный сигнал сканирующего тока, выставленный симметрично относительно центра экрана. При изменении тока накачки или температуры ЛД изменяется длина волны лазерного излучения, что приводит к смещению пиков на экране осциллографа. Регулировкой тока накачки и температуры ЛД пик, соответствующий переходу $4'-5'$, размещали по центру экрана (см. рис.3). Таким образом, при уменьшении тока сканирования до нуля значение тока накачки ЛД отвечает настройке излучателя на переход $4'-5'$. Соответствующие значения тока накачки ЛД и сопротивления контрольного терморезистора, определявшего температуру ЛД и напаянного на контактной пластине рядом с ним, фиксировались (сопротивление терморезистора измерялось мультиметром 3 , см. рис.2).

При проведении измерений ток накачки ЛД изменялся примерно на 1 мА в большую или меньшую сторону, что приводило к смещению рассматриваемого перехода $4'-5'$ в ту или иную сторону от центра экрана осциллографа, однако последующее изменение температуры ЛД возвращало пик обратно к центру. Новые значения тока накачки и сопротивления контрольного терморезистора ЛД фиксировались. Максимальное значение тока накачки ЛД (100 мА) определялось контроллером SRS LDC500. Как и на первом этапе, одночастотность лазерного излучения контролировалась сканирующим интерферометром 12 .

При уменьшении тока ниже 36 мА наблюдался пере-
скок генерации лазерного излучения на другую продоль-
ную моду внешнего резонатора. Поэтому дальнейшие из-
мерения длины волны и мощности излучения осуществля-
лись в точках, рассчитанных путем экстраполяции ранее
полученных экспериментальных данных – значения со-
противления R_{ct} контрольного терморезистора ЛД вы-
числялись с помощью приведенной ниже зависимости от
тока накачки I .

Полученные в результате измерений на втором этапе
экспериментальные данные представлены на рис.5 и 6.
На рис.5 показаны зависимости мощности и длины вол-
ны излучения от тока накачки при одновременном изме-
нении и тока накачки, и температуры ЛД. Для всех точек
в диапазоне токов накачки 36–100 мА длина волны излу-
чения соответствует переходу 4'–5', причем излучение
было одночастотным в диапазоне токов 30–100 мА.

На рис.6 представлены экспериментальная и аппрок-
симирующая зависимости сопротивления контрольного
терморезистора ЛД от тока накачки. Точки в диапазоне
токов 36–100 мА получены в условиях настройки длины
волны излучателя на переход 4'–5'. Экспериментально
найденная зависимость в этом диапазоне токов может
быть аппроксимирована следующим многочленом:

$$R_{ct}(I) = 10.189 + 0.0132I + 4.311 \times 10^{-5}I^2 - 4.047 \times 10^{-8}I^3. \quad (1)$$

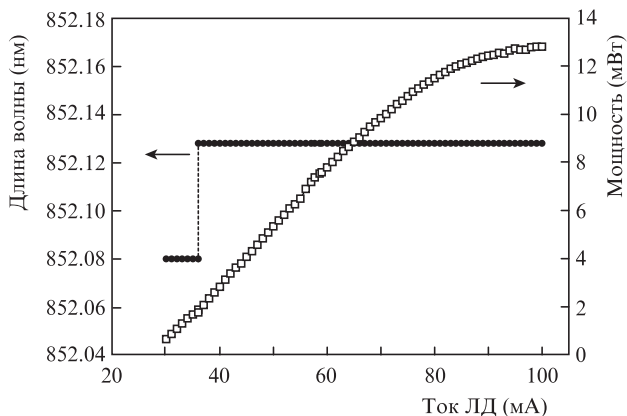


Рис.5. Зависимости оптической мощности на выходе излучателя и длины волны излучения от тока накачки при постоянной темпера-
туре ВБР и одновременном изменении температуры ЛД.

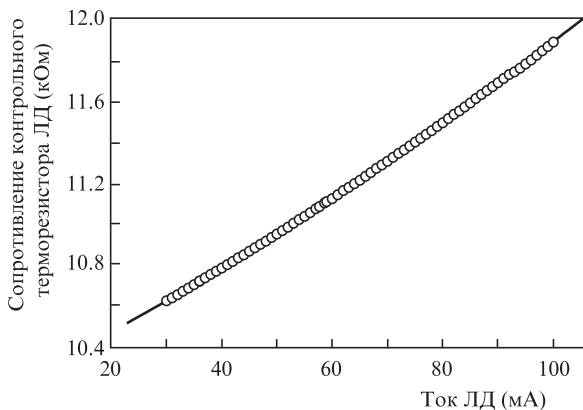


Рис.6. Экспериментальная (точки) и аппроксимирующая (линия) зависимости сопротивления контрольного терморезистора ЛД от тока накачки.

Для токов накачки ниже 36 мА, при которых настрой-
ка излучателя на переход 4'–5' не может быть осуществ-
лена из-за перескока его длины волны, значения R_{ct} рас-
считывались с помощью этого выражения. Отметим, что
последними двумя членами в (1) можно пренебречь, тогда
зависимость $R_{ct}(I)$ будет линейной, что, как показал экс-
перимент, имеет место в большинстве случаев.

При измерении зависимостей, изображенных на рис.5,
значение R_{ct} изменялось в диапазоне 10.6–11.9 кОм
(рис.6). Для оценки изменения температуры ЛД при та-
ком изменении R_{ct} используем формулу

$$T_i = \frac{\beta}{\beta/T_0 - \ln(R_0/R_{cti})}, \quad (2)$$

где $R_0 = 10$ кОм при температуре $T_0 = (273 + 25)$ К;
 $\beta = 3970$ К; $i = 1, 2$. Следовательно, сопротивлению $R_{ct1} =$
10.6 кОм будет соответствовать температура $T_1 = 296.70$ К,
а $R_{ct2} = 11.9$ кОм – температура $T_2 = 294.16$ К, и измене-
ние температуры ЛД при измерении зависимостей, изо-
браженных на рис.5, $T_1 - T_2 = 2.54$ °С.

Таким образом, если создать систему обратной связи,
обеспечивающую изменение сопротивления контрольного
терморезистора по формуле (1), мы получим в диапазоне
токов 36–100 мА неизменную длину волны излучения, со-
ответствующую переходу 4'–5'. При этом если диапазон
токов, где наблюдалось свечение паров цезия, при неиз-
менных температурах ЛД и ВБР составлял 5.7 мА, то те-
перь диапазон токов, в котором длина волны излучения
будет соответствовать переходу 4'–5', вырос более чем на
порядок – до 64 мА.

3. Теория

Создание излучателя, настроенного на заданную дли-
ну волны, с максимально возможным диапазоном изме-
нения тока накачки без переключения на соседнюю моду
является ключевым вопросом при разработке систем ав-
томатической подстройки частоты излучения. Приведен-
ные ниже расчеты показали, что диапазон изменения
тока накачки при настройке на заданную длину волны
излучения можно расширить, одновременно увеличивая
ток ЛД и уменьшая его температуру.

Расчет проведем, опираясь на результаты, получен-
ные в работах [4–6, 11]. Коэффициент усиления запишем
в виде [11]:

$$g_i = \frac{dg}{dn_a} [n_a D_i - n_{a0}(I)], \quad (3)$$

где $D_i = 1 - [2(E_i - E_g)/\Delta E_g]^2$; $E_i = 1.24/\lambda_i$ – энергия фотона;
 λ_i – длина волны излучения i -й моды (в мкм); ΔE_g – шири-
на спектра коэффициента усиления; n_a – плотность носи-
телей в активной зоне ЛД; $n_{a0}(I) = a + bI$ – плотность но-
сителей, при которой коэффициент усиления равен нулю;
 $a = 2.17 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$; $b = -1.67 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}/\text{мА}$.

Ширина запрещенной зоны E_g описывается следую-
щим выражением:

$$E_g = E_0 - 5.4 \times 10^{-4} \frac{T^2}{204 + T} - 2k_g n_a^{1/3}, \quad (4)$$

где $E_0 = 1.63$ эВ; коэффициент 2 в последнем члене учиты-
вает равенство плотностей электронов и дырок ($n_a = p_a$);

$k_g = 2 \times 10^{-8}$ эВ·см. Температуру активной области ЛД T_{LD} запишем в виде

$$T_{LD}(I, P_1) = T_0 + \delta T(I, P_1) + T_{ref}(I), \quad (5)$$

где

$$\delta T(I, P_1) = R_T(U_{pn}I \times 10^{-3} + (I \times 10^{-3})^2 R_g - 2P_1 \times 10^{-3}) \quad (6)$$

– нагрев активной области за счёт протекающего через ЛД тока накачки I и мощности излучения P_1 , выводимой из резонатора ЛД; R_T – тепловое сопротивление ЛД; U_{pn} – напряжение на р–n-переходе; R_g – динамическое сопротивление ЛД. Дополнительное изменение (уменьшение) нагрева ЛД представим в виде

$$T_{ref}(I) = fI \times 10^{-3}, \quad (7)$$

где f – коэффициент пропорциональности между дополнительным изменением температуры ЛД и током накачки.

Оптическая мощность на выходе резонатора ЛД с коэффициентом отражения R_1 [2–4]:

$$P_1 = hv \frac{c_0}{n_{igr}} A_c (1 - R_1) \sum_i S_{li}, \quad (8)$$

где A_c – площадь поперечного сечения активной области лазера; c_0 – скорость света в вакууме; S_{li} – усредненная плотность фотонов в резонаторе ЛД (определяется формулой (3) работы [4]); n_{igr} – групповой показатель преломления. Оптическая мощность на выходе объектива излучателя P принимается равной $0.8P_1$.

Ток накачки излучателя представим в виде

$$I = I_{th} + qV_a \frac{c_0}{n_{igr}} \sum_i \Gamma_a g_i S_{li}, \quad (9)$$

где V_a – объем активной области ЛД; I_{th} – пороговый ток; Γ_a – коэффициент оптического ограничения; q – заряд электрона.

В случае, когда нас интересуют спектральные характеристики лазера при изменении тока накачки ЛД, но при фиксированной температуре T_0 контактной пластины, на которую установлен ЛД, и при фиксированной температуре ВБР, показатель преломления ЛД может быть представлен как

$$n_1(T_{LD}) = n_{10} \left\{ 1 + \frac{1}{n_{10}} \frac{\partial n_1}{\partial \lambda} (\lambda - \lambda_B) + \frac{1}{n_{10}} \left[\frac{\partial n_1}{\partial T_{LD}} + \Gamma_a \frac{\partial n_1}{\partial n_a} \frac{\partial n_a}{\partial T_{LD}} \right] (T_{LD} - T_0) \right\}, \quad (10)$$

где n_{10} – показатель преломления ЛД при $T_{LD} = T_0$ и $\lambda = \lambda_B$ – длине волны Брэгга; $\partial n_1 / \partial n_a$ – изменение показателя преломления ЛД при изменении плотности носителей в активной области лазера; $\partial n_a / \partial T_{LD}$ – изменение плотности носителей с изменением температуры активной области ЛД.

Показатели преломления ВБР и световода приняты в виде

$$n_B(\lambda) = n_{B0} \left[1 + \frac{1}{n_{B0}} \frac{\partial n_B}{\partial \lambda} (\lambda - \lambda_B) \right], \quad (11)$$

$$n_2(\lambda) = n_{20} \left[1 + \frac{1}{n_{20}} \frac{\partial n_2}{\partial \lambda} (\lambda - \lambda_B) \right], \quad (12)$$

где n_{B0} , n_{20} – показатели преломления ВБР и световода при $\lambda = \lambda_B$. Показатель преломления воздушного зазора $n_3 = 1$. Длина ЛД зависит от температуры как

$$L_1(T_{LD}) = L_1(T_0)[1 + \alpha_T(T_{LD} - T_0)], \quad (13)$$

где α_T – коэффициент линейного расширения ЛД.

Для расчетов принимались следующие значения: $\Gamma_a = 9.6 \times 10^{-3}$, $L_1 = 0.12$ см, $L_2 = 0.76$ см, $L_3 = 30$ мкм, $L_B = 1.0$ см (см. рис.1), $n_{10} = 3.3$, $n_{20} = n_{B0} = 1.452$, $n_3 = 1$, $R_1 = 0.3$, $R_2 = 0.04$, $R_3 = 0.005$, $R_B = 0.04$, $\partial n_1 / \partial \lambda = -3 \times 10^3$ см⁻¹, $\partial n_2 / \partial \lambda = \partial n_B / \partial \lambda = -160$ см⁻¹, $n_{10}^{-1} [\partial n_1 / \partial T + \Gamma_a (\partial n_1 / \partial n_a) \times (\partial n_a / \partial T)] = 0.77 \times 10^{-4}$, $R_g = 5$ Ом, $U_{pn} = 1.46$ В, $R_T = 18$ К·Вт⁻¹.

На рис.7 представлены зависимости мощности и длины волны излучения ЛД от тока накачки для $f = 0$ при фиксированных температурах ЛД и ВБР, коэффициент связи между встречными волнами $K_0 = 6$ см⁻¹ [5]. Сравнение рис.4 и 7 демонстрирует удовлетворительное совпадение результатов расчета и эксперимента.

На рис.8 показаны зависимости мощности и длины волны излучателя от тока накачки для $f = -25.5$ К/А при фиксированной температуре ВБР и температуре ЛД, изменяемой в соответствии с формулой (5) для того же f и $K_0 = 6$ см⁻¹. Вновь мы видим удовлетворительное совпадение результатов, представленных на рис.5 и 8. Расчеты показывают, что дополнительное уменьшение нагрева ЛД, определяемое формулой (7), для тока накачки 100 мА составляет 2.55°С, что коррелирует с ранее полученной величиной 2.54°С.

Итак, показано, что если с увеличением тока накачки лазерного диода одновременно уменьшать его температуру, то в этом случае можно на порядок увеличить диапазон токов накачки, для которых длина волны излучения будет соответствовать переходу 4'–5' линии D₂ цезия. Такая процедура управления длиной волны излучателя обеспечивает на порядок больший диапазон изменения тока накачки ЛД, чем в случае, когда температуры ла-

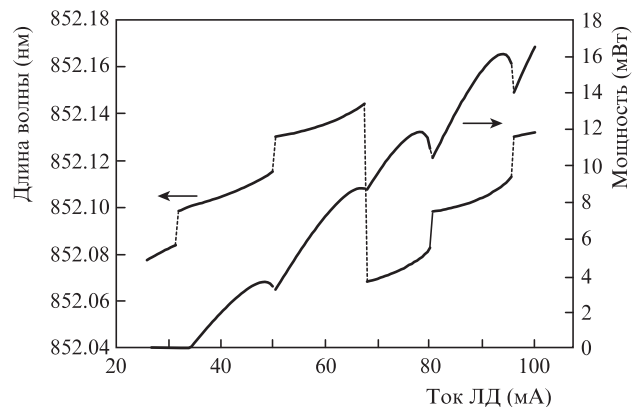


Рис.7. Зависимости мощности и длины волны излучения ЛД от тока накачки для $f = 0$.

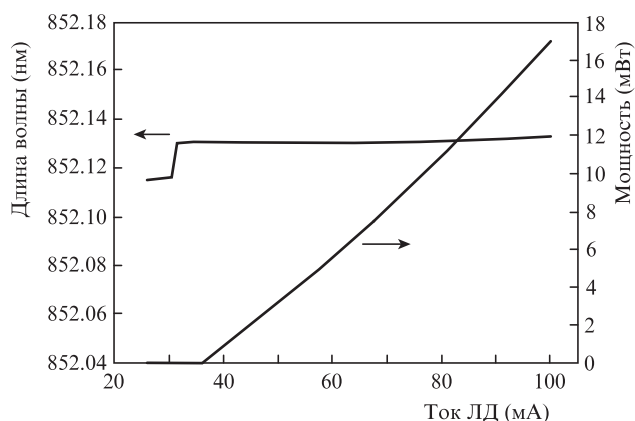


Рис.8. Зависимости мощности и длины волны излучения ЛД от тока накачки для $f = -25.5$ К/А.

зерного диода и брэгговской решетки поддерживаются постоянными. Показано удовлетворительное совпадение экспериментальных и расчетных характеристик.

1. Багаева О.О., Галиев Р.Р., Данилов А.И. и др. *Квантовая электроника*, **50**, 143 (2020) [*Quantum Electron.*, **50**, 143 (2020)].

2. Журавлева О.В., Иванов А.В., Леонович А.И., Курносов В.Д., Курносов К.В., Чернов Р.В., Шишков В.В., Плешанов С.А. *Квантовая электроника*, **36**, 741 (2006) [*Quantum Electron.*, **36**, 741 (2006)].
3. Журавлева О.В., Иванов А.В., Курносов В.Д., Курносов К.В., Мустафин И.Р., Симаков В.А., Чернов Р.В., Плешанов С.А. *Квантовая электроника*, **38**, 319 (2008) [*Quantum Electron.*, **38**, 319 (2008)].
4. Иванов А.В., Курносов В.Д., Курносов К.В., Романцевич В.И., Чернов Р.В., Мармалюк А.А., Волков Н.А., Жолнеров В.С. *Квантовая электроника*, **41**, 692 (2011) [*Quantum Electron.*, **41**, 692 (2011)].
5. Жолнеров В.С., Иванов А.В., Курносов В.Д., Курносов К.В., Лобинцов А.В., Романцевич В.И., Чернов Р.В. *ЖТФ*, **82** (6), 63 (2012) [*Tech. Phys.*, **57** (6), 797 (2012)].
6. Жолнеров В.С., Иванов А.В., Курносов В.Д., Курносов К.В., Романцевич В.И., Чернов Р.В. *ЖТФ*, **84** (3), 108 (2014) [*Tech. Phys.*, **59** (3), 416 (2014)].
7. Timofeev F.N., Simin G.S., Shatalov M.S., Gurevich S.A., Bayvel P., Wyatt R., Lealman I., Kashyap R. *Fiber Integrated Opt.*, **19**, 327 (2000).
8. Hisham H.K., Abas A.F., Mahdiraji G.A., Mahdi M.A., Mahamd Adikan F.R. *Opt. Eng.*, **53**, 1 (2014).
9. Hisham H.K. *Open Phys. J.*, **3**, 55 (2016).
10. Fang Z., Cai H., Chen G., Qu R. *Single Frequency Semiconductor Lasers* (Springer, 2017).
11. Wieman C.E., Holberg L. *Rev. Sci. Instrum.*, **62**, 1 (1991).