

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗЛУЧАТЕЛЯ ЛИДАРА НА ОСНОВЕ ЛАЗЕРА НА КРАСИТЕЛЕ С ЛАМПОВОЙ НАКАЧКОЙ

Введение

Известно, что излучатель в лидаре, предназначенном для исследования примесей верхней атмосферы, должен обладать предельно малой расходимостью излучения, узкой спектральной линией, возможностью плавной перестройки длины волны излучения и большой энергией в импульсе [1]. Перестраиваемые лазеры на красителях с дисперсионным резонатором и ламповой накачкой наилучшим образом подходят для этой цели.

Из уравнения лазерной локации следует, что основными характеристиками передатчика, определяющими эффективность лидара являются энергия и ширина линии излучения, непосредственно связанная с эффективным поперечником рассеяния [2]. Как правило, между этими двумя характеристиками лазерного генератора существует параметрическая связь, т.е. стремление к сужению полосы генерации приводит к неизбежному снижению энергии излучения из-за дополнительных потерь, вносимых в резонатор элементами селекции. При оптимальном выборе характеристик дисперсионного резонатора возможно достижение максимального значения эффективной энергии излучения передатчика, определяемой выражением [3]:

$$E_{эф} = E_0 \cdot \sigma_{эф} / \sigma_{max} ,$$

где E_0 – энергия излучения передатчика; $\sigma_{эф}$ – эффективное сечение рассеяния на атомах примеси; σ_{max} – сечение поглощения (рассеяния) в максимуме линии.

Очевидно, что $E_{эф}$ будет характеризовать энергию излучения лазера, попадающую в спектр поглощения исследуемой примеси. Величина эффективной излученной энергии может быть выбрана в качестве основного критерия оценки эффективности работы передающих устройств, поскольку согласно уравнению лазерной локации определяет уровень принимаемого сигнала.

Цель работы – экспериментальная проверка результатов теоретического анализа спектрально-энергетических параметров лазера на красителе с ламповой накачкой, полученных в работах с участием автора [4, 5].

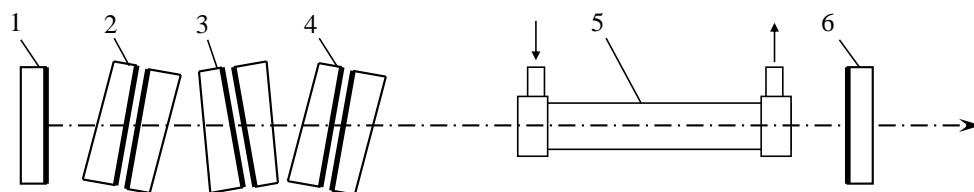
Методика эксперимента и результаты исследований

В экспериментах использовалась ранее описанная конструкция лазерной головки [2], расположенная в плоскопараллельном резонаторе. В качестве генерационной среды использовался спиртовой раствор красителя родамин 6Ж. Интервал изменения длины кюветы с красителем выбирался равным 12 см, что соответствовало разрядному промежутку ламп ИСП-5000, которые использовались в экспериментальных исследованиях.

В качестве внутррезонаторных селекторов в экспериментах использовались юстируемые интерферометры Фабри – Перо с пластинами среднего оптического качества (качество обработки $\sim \lambda/50$ на диаметре 40 мм). Отклонение в толщине зазора по диаметру пучка излучения определялось в основном качеством юстировки зеркал. При этом настройка интерферометров осуществлялась таким образом, чтобы угол наклона на рабочей длине волны находился около 10 мрад. Целесообразность использования юстируемых интерферометров вместо сплошных эталонов очевидно вытекает из сравнения вносимых ими неселективных потерь. Расчеты показывают [5], что потери, вносимые юстируемыми эталонами при малых углах наклона оказываются существенно меньшими, чем для сплошных эталонов более

высокого качества, для которых эти углы, в общем случае, значительно больше. Исключение составляет вариант, в котором в качестве последней ступени селекции применяются интерферометры с базой порядка нескольких миллиметров. В этом случае предельные углы наклона для одного порядка интерференции невелики и использование сплошного эталона оправдано удобством эксплуатации и стабильностью характеристик.

Оптическая схема лазера с дисперсионным резонатором, используемая в экспериментах, представлена на рис. 1.



1,6 – зеркала резонатора; 2,3,4 – интерферометры; 5 – кювета с красителем

Рис. 1

В схеме использовались различные комбинации интерферометров с разными базами. Превышение базы резонатора над длиной кюветы было постоянным во всех случаях, и равнялась 85 см. Выходное зеркало и ближайший интерферометр были удалены от окон кюветы на расстояние не менее 30 см. Окна кюветы были просветлены и наклонены друг к другу и к оси резонатора на углы не менее $0,5^\circ$ для предотвращения паразитной модуляции спектральной линии. В качестве основного селектора в исследованиях использовалась конструкция измерительного интерферометра ИТ-51, с инваровыми прокладками, в котором пластины из кварцевого стекла имели диэлектрические просветляющие и отражающие покрытия. Экспериментальные исследования ряда красителей показали, что при генерации излучения вблизи максимума спектра флуоресценции устойчивая генерация на одном пике пропускания получается с базой первого предселектора около 8 мкм при резкости порядка $F = 5-7$. При этом зазор интерферометра следующей ступени селекции может быть доведен до 0,4 мм, что подтверждает теоретические оценки. Это значение было предельным для системы из двух интерферометров. Попытки использовать предселектор с большей резкостью приводили лишь к уменьшению энергии генерации. Генерация на одном пике пропускания при $t = 0,4$ мм в этом случае была возможна лишь при тщательной взаимной юстировке предселектора и селектора. Дальнейшее увеличение промежутка приводило к неустойчивой генерации одновременно на нескольких линиях. Опыт эксплуатации лазера с дисперсионным резонатором подобного типа в составе лидара показал, что для надежного и долговременного функционирования излучателя величина зазора второго интерферометра должна быть снижена до величин порядка 0,2-0,3 мм, что совпадает с величинами зазоров внутрирезонаторных интерферометров аналогичных излучателей, используемых для резонансной локации [1]. Если для дальнейшего сужения спектра излучения в резонаторе использовался третий интерферометр, то при тщательной взаимной юстировке интерферометров генерация на одном пике пропускания получалась при величине зазора до 3 мм. Экспериментально получено, что в то время как соотношение баз второй и первой ступеней селекции может быть доведена до 50, кратность баз следующих ступеней не превосходило 20. Таким образом, подтверждена тенденция к снижению допустимого соотношения баз каждой последующих ступеней, что связано с уменьшением предельно достижимого реального фактора резкости при увеличении зазоров интерферометров и прогрессирующим ростом суммарных потерь.

На рис. 2 представлены экспериментальные результаты исследования характеристик излучения лазера с двумя внутрирезонаторными интерферометрами при изменении длины кюветы. Спектр излучения рассчитывался посредством машинной обработки, регистрируемых ПЗС матрицей интерферограмм, полученных с помощью интерферометра ИСП-51 и

фокусирующего объектива. Энергия излучения измерялась с помощью измерителя калориметрического типа ИКТ-1М. Выходное зеркало с коэффициентом отражения 30% было неизменным в течение всего эксперимента. Исследования проводились с базой юстируемого предселектора, равной 8 мкм и коэффициентом отражения зеркал 0,7. База второго интерферометра, который являлся основным равнялась 0,3 мм, а коэффициент отражения пластин менялся. На рис.2 показаны результаты расчетов $E_{эф}$, сделанные по результатам измерений энергии и ширины спектра излучения для пластин с коэффициентами отражения 30, 60 и 70 %. Наилучшие результаты получены для интерферометра с пластинами $R = 60\%$.

Зависимость ширины спектра излучения для этого варианта представлена на рис. 3. На рисунках также пунктирными линиями представлены результаты теоретического расчета при исходных данных, соответствующих условиям эксперимента, и пластинах $R = 60\%$. Экспериментально полученные значения близки к расчетным оценкам. Некоторые различия в характере зависимостей, по-видимому, объясняются заметным отличием реального углового распределения от гауссова, особенно в области больших длин АЭ. По этой причине потери, вносимые селекторами, оказались выше расчетных, а ширина спектра излучения также больше расчетной и с увеличением длины АЭ монотонно растет. Кроме того, при выводе формулы для ширины спектральной линии [5] предполагалось, что длина резонатора совпадает с длиной АЭ, поэтому при постоянном превышении длины резонатора над длиной АЭ использование указанной формулы дает завышенную оценку ширины спектра, возрастающую по мере уменьшения протяженности кюветы. Из рис. 2 видно, что во всех случаях рост $E_{эф}$ прекращается при достижении некоторой характерной длины кюветы.

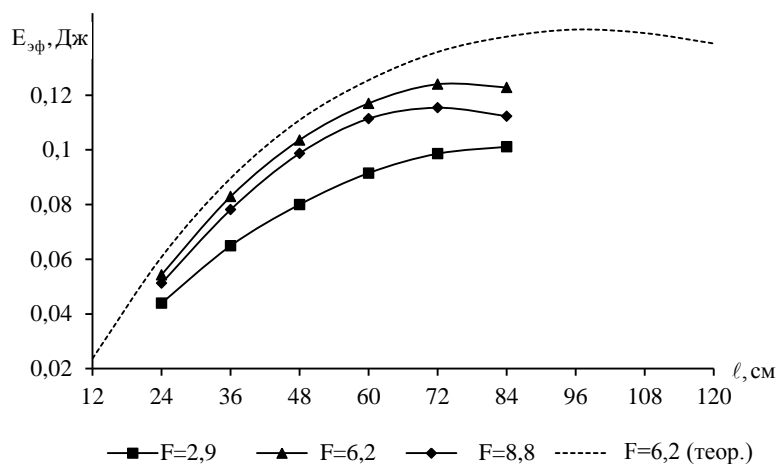


Рис. 2

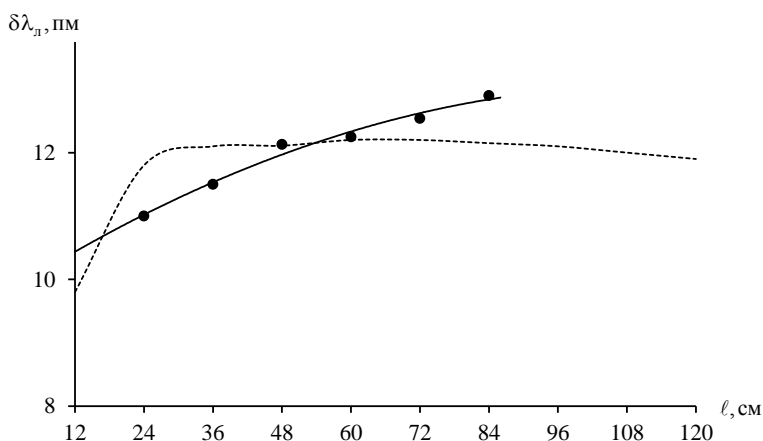


Рис. 3

На рис. 4 представлены результаты экспериментальных исследований варианта лазера с тремя внутрирезонаторными интерферометрами. База основного селектора равнялась 2 мм, базы первого и второго предселекторов были равны 8 мкм и 0,3 мм, а коэффициенты отражения зеркал соответственно 0,7 и 0,6. Резкость F основного селектора варьировалась.

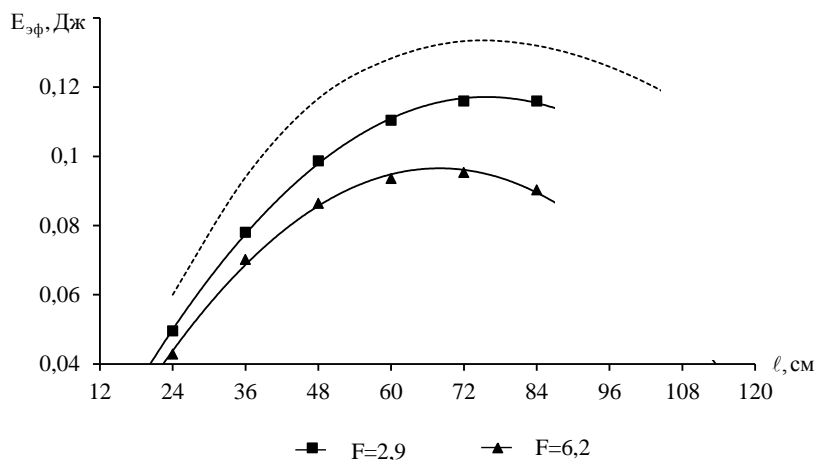


Рис. 4

Из рисунка видно, что более выгодно использование в резонаторе низкодобротного интерферометра. Для этого варианта сделан теоретический расчет (пунктирная линия). К сожалению, отсутствие достаточного набора пластин с разными коэффициентами отражения препятствовало экспериментальному установлению оптимального варианта резкости. Сравнение полученных результатов с вариантом двух интерферометров показывает, что расхождение между теоретическими оценками и экспериментальными зависимостями растет по мере увеличения базы интерферометра. На рис. 5 показаны расчетные и экспериментальные зависимости ширины спектра и энергии излучения от протяженности кюветы ($t = 2\text{мм}$, $F = 2,9$), на основании которых построены зависимости на рис. 4.

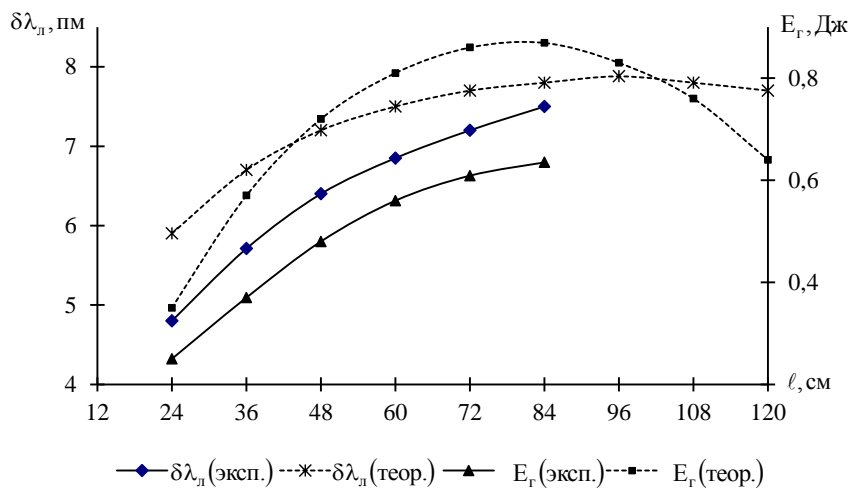


Рис. 5

Можно отметить, что энергия излучения и ширина спектральной линии несколько отличаются от расчетных значений. Это объясняется, во-первых тем, что точность расчета ширины спектра ухудшается по мере сужения полосы пропускания резонатора и, во-вторых, потери, вносимые селектором в большей степени зависят от неравномерности в зазоре с увеличением базы. Тем не менее, ход экспериментальной зависимости для низкодобротного селектора $E_{\text{эф}}$ хорошо согласуется с теоретической кривой.

Более существенные различия между расчетом и экспериментом имели место для варианта селектора с $F=6,2$. В частности, ширина спектра оказалась примерно на 30 % уже расчетной, а энергия излучения примерно в полтора раза ниже.

Исследование пространственных характеристик излучения показало, что расходимость излучения в плоскости угла наклона интерферометра в последнем случае уменьшалась более чем в полтора раза по сравнению с широкополосным резонатором, т.е. интерферометр, являясь угловым селектором колебаний, вносил заметные возмущения в структуру генерируемого пучка. Резкое снижение энергии излучения свидетельствует о слабой конкуренции мод в условиях термических искажений резонатора. Тем не менее, вследствие одновременного уменьшения энергии излучения и ширины спектра различие экспериментальной и теоретической зависимостей $E_{эф}$ даже в этом варианте селектора невелико и не превышает 30 %.

Сравнение зависимостей на рис. 2 и 4 показывает, что вариант с тремя внутрирезонаторными юстируемыми интерферометрами не обеспечивает преимущества по сравнению с вариантом резонатора, в котором используются два селектора-интерферометра, поэтому ввиду существенного упрощения процедуры настройки последний вариант более предпочтителен. Кроме того, в этом случае согласно требованиям к спектральной стабильности генерируемого излучения оказываются менее жесткими.

Анализ полученных экспериментальных результатов подтвердил выводы теоретического анализа и показал, что для лазера с дисперсионным резонатором существуют оптимальные значения длин кюветы, при которых реализуются максимальные значения спектральной яркости и КПД. Эти значения длин приблизительно соответствуют оптимальным значениям по энергии излучения и КПД, полученным для широкополосного резонатора. Экспериментально получены значения энергии излучения порядка десятых долей – единиц Джоуля, ширины спектра единиц пикометров при ресурсе лазера до сотен тысяч вспышек.

Выводы

Экспериментальные исследования показали качественное согласие с результатами расчетов, представленных в [4, 5]. В частности, экспериментально подтвержден факт уменьшения предельной кратности баз интерферометров при увеличении их числа в резонаторе; на основании численных расчетов и экспериментальных результатов сделан вывод о преимуществе использования схемы резонатора с двумя юстируемыми внутрирезонаторными интерферометрами; полученные экспериментальные результаты показывают, что для лазера с дисперсионным резонатором существуют оптимальное значение протяженности активного элемента, при которых реализуются максимальные значения спектральной яркости и КПД и которые приблизительно соответствуют оптимальным значениям по энергии излучения и КПД, полученным для широкополосного резонатора.

Список литературы:

1. Гарднер Ч.С. Применение лидара на резонансной флюоресценции натрия в атмосферных исследованиях и астрономии // ТИИЭР. 1989. Т.77, №3. С.44-56.
2. Зарудный А.А., Мегель Ю.Е., Лагутин М.Ф. Лидар для исследования мезосферной примеси // Оптика атмосферы. 1988. Т.1, №6. С.83-89.
3. Зарудный А.А., Лагутин М.Ф., Кузьменко В.Н., Тулинов Г.Ф. Резонансные лидары в глобальном мониторинге примесей верхней атмосферы // Прикладная радиоэлектроника. 2004. №1. С.16-28.
4. Басецкий В.А., Зарудный А.А. Модель генерационных характеристик излучателя резонансного лидара // Радиотехника. 2010. Вып 160. С.124-129.
5. Басецкий В.А., Зарудный А.А. Спектральные характеристики передатчика резонансного лидара на основе лазера на красителях с дисперсионным резонатором // Радиотехника. 2012. Вып.169. С.359-364.

*Харьковский национальный
университет радиоэлектроники*

Поступила в редколлегию 21.03.2018