

*А.А. ЗАРУДНЫЙ, В.Г. ПЛЕТЕНЕВ,
А.Л. ВЕРХОРОБИН, канд. техн. наук*

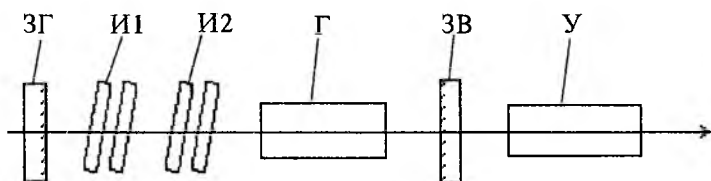
ЛАЗЕР ПОВЫШЕННОЙ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЯРКОСТИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ

Рассмотрим возможность использования усилителя бегущей волны для повышения энергетических характеристик излучения при сохранении стабильности и ширины спектральной линии генератора. Это позволит повысить эффективность излучателя резонансного лидара. Преимущество усилителя бегущей волны заключается в том, что он, в отличие от других типов усилителей, практически не изменяет спектральных и пространственных характеристик излучения генератора. В работе представлены результаты экспериментальных исследований системы генератор — усилитель при различной длине усилителя.

Оптическая схема излучателя

Оптическая схема излучателя лидара показана на рисунке. На нем обозначены: ЗГ — "глухое" зеркало; И1, И2 — внутрирезонаторные интерферометры; Г — генератор; ЗВ — выходное зеркало; У — усилитель. При выборе оптической схемы лазера учитывалось, что одной из наиболее сложных задач, возникающих в процессе лидарных исследований, является проблема совмещения осей приемного и передающего трактов. В частности, при создании "искусственной звезды" в мезосфере требуемое значение углового рассогласования может достигать нескольких секунд.

В связи с этим в излучателях лидаров зачастую отдается предпочтение плоскопараллельному резонатору, в котором простота юстировки сочетается с нечувствительностью к смене растворителя и с возможностью применения любых элементов частотной селекции. Улучшение пространственных характеристик излучения при необходимости достигается посредством увеличения длины резонатора.



Дисперсионные элементы лазера с ламповой накачкой испытывают значительную энергетическую нагрузку при достаточно высокой исходной расходимости пучка (несколько миллирадиан). В этой связи наибольшее распространение получили методы амплитудной селекции с использованием внутрирезонаторных эталонов Фабри—Перо. Требования, предъявляемые к полосе излучения передатчика при резонансном зондировании атмосферы, могут весьма существенно различаться в зависимости от задач исследований. Применение в резонаторе нескольких эталонов позволяет получать практически любые требуемые спектральные параметры излучения. К недостаткам данного способа перестройки можно отнести нелинейность перестроенной характеристики и рост потерь на "сбегание" с увеличением угла наклона и базы эталона, что приводит к существенному падению энергии излучения. Необходимо отметить также, что увеличение флуктуаций спектра излучения при больших углах наклона снижает потенциальную точность лидарных измерений. В связи с этим представляется целесообразным использовать вместо эталонов юстируемые интерферометры с регулируемым зазором. Нами применялись разборные конструкции интерферометров с прокладками из вольфрамовой проволоки. Долговременная стабильность спектральных характеристик достигалась термостабилизацией, обеспечивающей поддержания температуры в зазоре с погрешностью около $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Юстировка интерферометров производилась через 2 ч после начала термостабилизации и таким образом, чтобы при настройке лазера на требуемую длину волны угол наклона был в пределах $0,5 \dots 1,0^{\circ}$. Оптимальный коэффициент отражения пластин интерферометров, определяемый качеством подложек и точностью юстировки, был равен 50% [1].

Исследованиями, проведенными с использованием различных красителей, были определены размеры зазоров, которые для первого, второго и третьего интерферометров в мультиплексной системе равнялись 8 мкм , 150 мкм и 2 мм . Приведенные размеры зазоров и вычисляемые исходя из них соотношения между размерами являются предельными и могут при необходимости меняться лишь в сторону меньших значений баз и их кратности. Для улучшения частотно-селективных характеристик интерферометров в генераторе использовался телескоп с трехкратным увеличением по схеме Галилея. Дальнейшее повышение кратности телескопа при сравнительно невысоком качестве подложек было малоэффективно из-за роста неселективных потерь вследствие увеличения неравномерности зазора с возрастанием диаметра пучка. Чтобы предотвратить нежелательную модуляцию спектральной линии, на внешние поверхности интерферометров, зеркал резонатора и окна кювет наносились просветляющие покрытия с коэффициентом отражения не более $0,5\%$.

Проблема получения высокой спектральной яркости решалась путем применения усилителей бегущей волны. В зависимости от задач исследований в излучателе лидара могут использоваться усилители различной длины. Оптическая развязка достигалась разнесением усилителя и задающего генератора на расстояние около 0,7 м. Диаметры кювет усилителей (9 мм) были согласованы с диаметром выходного пучка генератора (7 мм).

Результаты исследований

В табл. 1 представлены сравнительные энергетические характеристики для двух режимов включения ламп четырехламповой лазерной головки в неселективном резонаторе длиной 500 мм при энергии накачки 360 Дж. Нетрудно убедиться, что усложнение схемы подключения ламп и дополнительные энергетические затраты цепей предионизации [5] компенсируются заметным увеличением энергии излучения и КПД. Следует отметить также, что увеличение эффективности накачки на 30 % наблюдалось при более чем четырехкратном превышении порога. Учитывая экспоненциальную зависимость ресурса работы ламп от подводимой энергии, можно значительно увеличить время непрерывной работы лазера.

Таблица 1

Режим	Ресурс работы, вспышек	Параметры импульса		
		Длительность, мкс	Энергия, Дж	Мощность, кВт
Без пред-ионизации	$3 \cdot 10^4$	5,7	1,1	190
С пред-ионизацией	$5 \cdot 10^4$	4,6	1,5	320

Известно, что в лазерах на красителях с ламповой накачкой (с широкополосным или дисперсионным резонатором) наращивание длины активного элемента с целью увеличить выходную энергию целесообразно до некоторого порога, определяемого в каждом конкретном случае геометрией активного элемента, условиями накачки, физическими характеристиками растворителя и т. д. [2]. Такое поведение энергетических зависимостей обусловлено влиянием усиленного радиационного шума и потерь на неоднородностях среды. В этой связи проводились экспериментальные исследования излучателей различной протяженности для спиртового раствора красителя R6G в дисперсионном резонаторе с двумя интерферометрами. Результаты представлены в табл. 2. Оптимальное значение концентрации красителя было несколько ниже, чем для неселективного резонатора, и выбиралось исходя из максимума энергии генерации за вычетом вклада суперлюминесценции. Угловое распределение интенсивности излучения иссле-

довалось с помощью объектива с фокусным расстоянием $F = 780$ мм, в фокальной плоскости которого располагалась ПЗС-линейка, сопряженная с ЭВМ. Спектральные и энергетические параметры излучения регистрировались измерителем энергии ИМО-2, спектрографом на базе камеры УФ-89 с $F = 800$ мм, дифракционной решетки, имеющей 1200 штрихов на 1 мм, и измерительного эталона ИТ-51. Видно, что в отличие от результатов, полученных в [3], возрастание общей энергии излучения и КПД сопровождается уменьшением доли остроуправленного излучения. Исследования проводились при постоянном превышении базы резонатора над длиной активного элемента.

Таблица 2

Длина генератора, мм	Количество ламп, шт.	Энергия накачки, Дж	Расходимость, мрад	Энергия излучения, Дж		Ширина спектральной линии, нм	КПД, %	
				общего	остроуправленного		общий	остроуправленного излучения
240	4	360	0,5	0,55	0,55	12,0	0,15	0,15
360	6	540	0,4	0,95	0,90	14,5	0,18	0,17
480	8	720	0,4	1,35	1,20	16,5	0,19	0,18
600	10	900	0,3	1,80	1,45	19,0	0,20	0,16

Результаты исследований лазера на базе шестилампной головки в дисперсионном резонаторе представлены в табл. 3 (первый цикл). Энергия накачки составляла 540 Дж (90 Дж на лампу). Значения энергии излучения здесь и далее приведены при настройке на длину волны 589 нм дублета натрия. Во всех случаях резонатор длиной 1100 мм образован плоскими зеркалами с коэффициентами отражения 99 % и 40 %. Пороговое значение энергии накачки изменялось от 80 Дж для неселективного резонатора до 150 Дж для резонатора с тремя интерферометрами. Следует отметить значительное снижение энергии генерации с уменьшением ширины спектральной линии. Это обусловлено тем, что в оптически искаженном резонаторе лазера на красителе интерферометр является одновременно частотным и угловым селектором излучения. Для наглядности приведены и результаты, полученные в отсутствие телескопа.

В табл. 3 (второй цикл) представлены результаты, полученные без внутрирезонаторного телескопа при использовании водно-спиртового раствора (соотношение воды и этилового спирта 2:1) родамина 6Ж с оптимальной концентрацией 40 мкмоль/л. Длина резонатора была увеличена до 1500 мм. Улучшение спектральных характеристик излучения связано с уменьшением исходной расходимости пучка (0,6 мрад в неселективном резонаторе). Несмотря на заметное снижение энергии, достигнутая спектральная яркость оказалась выше, чем для спиртовых растворов.

Таблица 3

Селектор	База селектора, мкм	Энергия, Дж	Ширина спектральной линии, нм	Расходимость, мрад
<i>Первый цикл</i>				
—	—	1,45	—	2,5
ИТ	10	1,10	250	2,5
ИТ	10 + 250	0,80	14	2,0
ИТ	10 + 250 + 2000	0,35	8	1,2 × 2
ИТ с теле- скопом (×3)	10 + 250 + 2000	0,55	5	1,8
<i>Второй цикл</i>				
—	—	0,55	—	0,6
ИТ	10 + 250	0,38	10	0,6
ИТ	10 + 250 + 2000	0,18	2	0,5

Нестабильность спектральных параметров излучения от вспышки к вспышке непосредственно влияет на точность лидарных измерений, в то время как амплитудными флуктуациями можно пренебречь при калибровке по молекулярному рассеянию [4]. Для получения высотного профиля концентрации требуется, как правило, не менее нескольких сотен вспышек, поэтому влияние нестабильности спектральной линии может быть учтено при обработке сигнала, если спектр излучения заменить эквивалентной спектральной линией, полученной путем наложения друг на друга спектров отдельных импульсов. Результаты исследований, проведенных с использованием ПЗС-линейки, сопряженной с ЭВМ, показали, что нестабильность длины волны излучения не превышает 0,15 от ширины спектральной линии. Во время измерений производилась термостабилизация внутррезонаторных эталонов и поддерживалась постоянная температура 20 °С: красителя — с погрешностью 0,2 °С, дистиллированной воды в контуре охлаждения и воздуха в помещении — с погрешностью 0,5 °С. Следует отметить рост относительной нестабильности спектральных характеристик с уменьшением ширины спектральной линии. Последнее вызывает необходимость контроля спектра излучения от вспышки к вспышке. При исследовании системы генератор — усилитель в качестве усилителей использовались лазерные головки, аналогичные описанным ранее [5]. Количество ламп в усилительных каскадах могло быть различным. Результаты исследований системы генератор — усилитель представлены в табл. 4, где приведены значения энергии остронаправленного излучения. Усилитель накачивался восьмью лампами и имел длину 480 мм. Спектр излучения на выходе усилительных каскадов практически не отличался от спектра генератора. Фон суперлюминесценции во всех случаях не превышал 10 % энергии полезного излучения.

Таблица 4

Схема излучателя	Энергия, Дж	Ширина спектральной линии, нм	Расходимость, мрад	Общий КПД, %
Генератор	0,55	—	0,6	0,10
То же с усилителем	0,38	10	0,6	0,14

Исследования частотного режима работы четырехлампового генератора показали, что при частоте до 4 Гц энергия и спектр излучения почти не изменялись по сравнению с режимом одиночных импульсов. К сожалению, мощность источника питания не позволила провести исследования спектрально-энергетических характеристик при дальнейшем повышении частоты повторения импульсов и с использованием усилителей.

Конструкция лазерной головки позволяет изменять длину генератора и усилителя с дискретностью, определяемой длиной разрядного промежутка ламп. Доказано, что увеличение длины активного элемента свыше 500 мм в дисперсионном резонаторе является нецелесообразным из-за уменьшения КПД остронаправленного излучения. Использование в задающем генераторе водно-спиртовых и водных растворов красителя позволяет достичь более высоких значений спектральной яркости, чем в лазерах на спиртовых растворах. Исследованы возможности повышения спектральной яркости излучения при построении излучателя лидара по схеме генератор — усилитель с учетом специфики использования его для зондирования атмосферы. Получены значения энергии излучения около нескольких джоулей при ширине спектральной линии около 1 нм и ресурсе работы ламп 10^5 вспышек, что энергетически эквивалентно ресурсу 10^7 для излучателей с монохроматической накачкой. По сравнению с лазерами малой энергии в импульсе и высокой частотой повторения описанный излучатель в составе лидара обеспечивает существенное преимущество исходя из соотношения сигнал-шум при работе в условиях сильной фоновой засветки. Представленные результаты исследований системы генератор — усилитель с прямолинейными лампами накачки позволяют увеличить энергию излучения в импульсе при сохранении длительного ресурса работы излучателя в составе резонансного лидара.

Список литературы: 1. Михайлов Л.К., Словьев А.Л. Расчет и оптимизация параметров внутррезонаторного интерферометра Фабри—Перо // ЖПС. 1981. Т. 34, № 5. С. 899—907. 2. Николаев С.В., Коробов А.М. Исследование зависимости генерационных характеристик лазеров на красителях с ламповой накачкой от длины активного элемента // Квантовая электрон. 1987. № 32. С. 25—32. 3. Allain J. Y. High energy pulsed lasers for atmospheric sounding // Appl. optics. 1979. Vol. 18, N 3. P. 287—289. 4. Зарудный А.А., Мегель Ю.Е., Лагутин М.Ф. Лидар для исследования мезосферной примеси // Оптика атмосферы. 1988. Т. 1, № 6. С. 83—89. 5. Лазеры на красителях с ламповой накачкой для исследования атмосферы / М.Ф. Лагутин, А.А. Зарудный, В.Л. Басецкий, В.Г. Плетенев // Радиотехника. 1997. Вып. 102. С.104—114.

Харьковский государственный технический университет радиозлектроники

Поступила в редколлегию 26.02.98