

В.И. Сердюков, Л.Н. Синица

ВНУТРИРЕЗОНАТОРНЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ СПЕКТРОМЕТР НА ФОСФАТНОМ НЕОДИМОВОМ СТЕКЛЕ В ОБЛАСТИ 1,3 МКМ

Исследована линейчатая структура спектра генерации неодимового лазера на фосфатном стекле в области 1,3 мкм. Показано, что структура определяется наличием в резонаторе лазера атмосферного воздуха, ее устранение позволило создать внутрирезонаторный лазерный спектрометр с пороговой чувствительностью $3 \cdot 10^{-8} \text{ см}^{-1}$.

Регистрация спектра проводилась вакуумным спектрографом методом нелинейного преобразования частоты (удвоение и смешение частот), а также путем непосредственной регистрации его на инфракрасную фотопленку.

1. Введение

Перспективной активной средой для создания высокочувствительного внутрирезонаторного (ВР) лазерного спектрометра является стекло с неодимом, именно на основе неодимового лазера был создан первый ВР-спектрометр [1]. Лазеры на стекле с неодимом могут генерировать излучение в областях 0,9; 1,06; 1,3 и 1,8 мкм. В настоящее время наиболее изучена область генерации на длине волны 1,06 мкм, в других диапазонах генерация реализуется в специфических условиях – при низкой температуре, при подавлении генерации на основной полосе. Важную роль играет и состав стекла. Если в силикатных стеклах генерация в области 1,3 мкм затруднена из-за существенного тушения люминесценции за счет процессов многофотонной релаксации [2], то в фосфатных неодимовых стеклах, где процессы безызлучательной релаксации ослаблены, получение генерации существенно облегчается.

Ранее в [3] было показано, что спектр генерации лазера на фосфатном стекле ($\lambda = 1,3 \text{ мкм}$) представляет собой несколько узких линий излучения, появление которых объяснено неоднородным уширением спектра люминесценции. Такой характер спектра был описан и в [4], однако здесь дискретность спектра объяснялась присутствием сильных линий поглощения водяного пара. Наличие структуры в спектре генерации не позволяет использовать лазер в полосе 1,3 мкм для ВР-спектроскопии.

В настоящей статье приведены результаты исследования неодимового лазера с целью выяснения причин линейчатой структуры спектра генерации фосфатного стекла с неодимом и создания внутрирезонаторного спектрометра-газоанализатора в области 1,3 мкм.

2. Экспериментальная установка

Существует несколько возможных причин образования линейчатого спектра генерации многомодового лазера:

- а) внутрирезонаторное поглощение атмосферного воздуха,
- б) «паразитная» селекция, связанная с интерференцией отраженного или рассеянного излучения внутрь резонатора лазера,
- в) конденсация спектра излучения [5],
- г) флуктуационный характер спонтанного излучения,
- д) неоднородный характер уширения полосы люминесценции активной среды лазера.

Для выяснения причин, вызывающих дискретность спектра излучения лазера, нами была собрана экспериментальная установка, схема которой приведена на рис. 1. Использовались активные элементы на основе фосфатных стекол марок ГТСС-1621, ГЛС-22П $\varnothing = 6 \text{ мм}$, $L = 10 \text{ см}$ с торцами, скошенными на угол 3° . Накачка осуществлялась одной лампой ИФП-800. Недисперсионный резонатор был образован сферическим зеркалом L радиусом кривизны 100 мм, с коэффи-

циентом отражения 100% и плоским зеркалом 3 с коэффициентом отражения 95%. Система накачки обеспечивала 2-кратное превышение накачки над порогом ($E_{\text{пор}} = 350$ Дж).

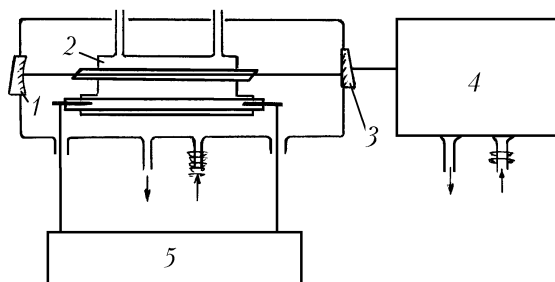


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1, 3 – зеркала резонатора; 2 – лазерная осветительная головка с активным элементом и лампой-вспышкой; 4 – вакуумный дифракционный спектрограф; 5 – блок питания лазера

Излучение лазера направлялось на дифракционный спектрограф с фокусным расстоянием 900 мм. В спектрографе использовалась дифракционная решетка 300 штр/мм, работающая в 6-м порядке.

Важной проблемой при разработке ВР-спектрометра в области 1,3–1,4 мкм является регистрация спектра излучения лазера. Выпускаемые отечественной промышленностью кремниевые фотодиодные и ПЗС-линейки имеют область работы 0,2–1 мкм и не позволяют регистрировать ИК-излучение в области 1,3 мкм. Нами использовалась фотопленка И-3, выпускаемая отечественной промышленностью, имеющая максимальную чувствительность в области 1,06 мкм. Благодаря высокой спектральной мощности лазерного излучения, оказывается возможным регистрация лазерного излучения за 1–3 импульса далеко за краем паспортной спектральной чувствительности фотопленки.

3. Результаты исследований

1. При регистрации спектра излучения лазера в присутствии атмосферного воздуха при влажности 50% и $T \sim 295$ К наблюдался, как и в [3, 4], линейчатый спектр излучения (рис. 2, а) при длине воздушного промежутка внутри резонатора $l_{\text{возд}} = 20$ см. Уменьшение $l_{\text{возд}}$ до 0,05 см (рис. 2, б) качественно изменяет спектр излучения лазера: наблюдался спектр, типичный для ВР-спектрометра – относительно гладкий, с резко выраженными провалами (конструкция резонатора позволила устранить обычную «паразитную» селекцию). Образование ВР-спектра не носит характера автозахвата частоты (конденсация спектра около сильных линий поглощения, как это имеет место в работе [5], в ВР-спектре около линий поглощения Na). Величина спектрального коэффициента поглощения водяного пара еще не достаточна для проявления конденсации спектра.

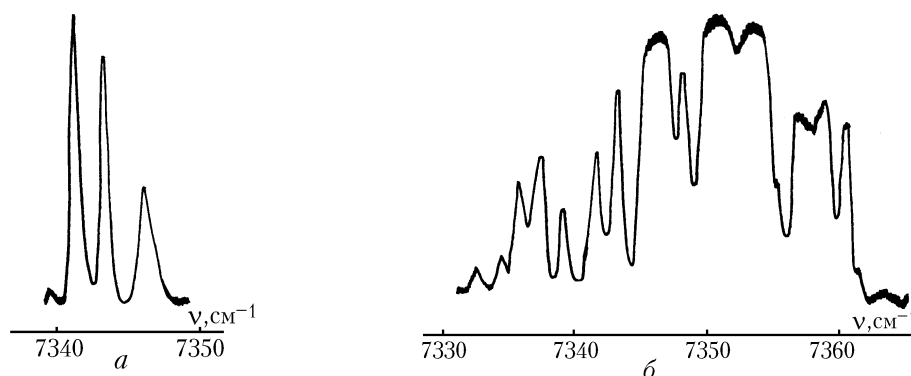


Рис. 2. Спектр излучения лазера на фосфатном неодимовом стекле с длиной воздушного промежутка в резонаторе 20 см – а, 0,05 см – б

2. В дальнейшем нами проводилась регистрация спектра излучения лазера, резонатор которого вакуумировался до давления 10^{-5} мм рт.ст., а затем заполнялся через азотную ловушку осушенным воздухом. И в этом случае наблюдался спектр излучения со структурой, аналогичной показанной на рис. 2, б.

Сравнение полученного нами спектра со спектром поглощения паров H_2O [6] показало, что провалы в спектре излучения лазера определяются линиями поглощения водяного пара, находящегося вне резонатора лазера, причем спектр излучения лазера значительно сдвигается в длинноволновую область по сравнению со спектром [3] и попадает практически на центр полосы $\nu_1 + \nu_3 H_2O$, где расположены наиболее сильные линии поглощения этой полосы.

3. Применение для регистрации спектра вакуумного спектрографа, откачанного до давления 10^{-3} мм рт.ст., позволило нам избавиться от влияния поглощения вне резонатора. Однако в спектре генерации сохранилась слабая структура, меняющаяся от импульса к импульсу. При накоплении импульсов излучения на фотопленку структура замывалась. Мы полагаем, что эта структура в спектре связана с флуктуациями мод, которые при переходе к неодимовому лазеру со сферическими зеркалами существенно увеличиваются [7]. Принудительное сглаживание пространственной неоднородности инверсии активной среды с помощью вращающейся плоскопараллельной пластины внутри резонатора привело к полному устранению модуляции интенсивности.

4. Использование нелинейного преобразования частоты для регистрации ВР-спектра

Применение методов нелинейного преобразования частоты (удвоение или смешивание частот) позволяет проводить регистрацию излучения в видимой области спектра – области максимальной чувствительности фотопленок, фотодиодных и ПЗС-линеек.

Удвоение частоты

Удвоение частоты излучения обычно используют для преобразования мощного импульса с узкой спектральной линией излучения наносекундной длительности. При удвоении частоты излучения с широким спектром в каждый единичный спектральный интервал $\Delta 2\omega_i$ преобразованного спектра вклад вносят излучения как с частотой ω_2 , так и с симметричными относительно ω_i частотами ($\omega_i \pm \delta$), попадающими в область синхронизма. В этом случае преобразованный спектр является результатом суммирования всех частот исходного спектрального контура излучения. Поэтому в спектре второй гармоники появятся не только уширенные линии на удвоенных частотах, но и линии на суммарных частотах (рис. 3, а, б).

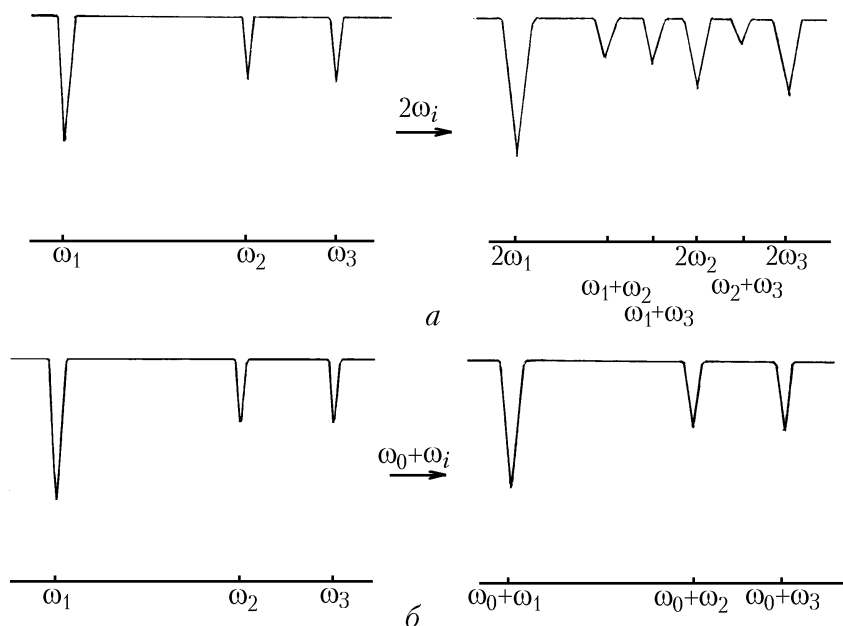


Рис. 3. Преобразование широкополосного излучения при удвоении частоты (а) и смещении частот (б)

Следовательно, если мы имеем ВР-спектр (спектр излучения лазера ВР-спектрометра) с провалами из-за линий поглощения, то в преобразованном спектре произойдет сильное искажение исходного спектра.

Смещение частот

В случае смещения частот широкополосного ВР-спектра и одночастотного лазера с частотой излучения ω_0 при использовании параллельных пучков преобразованный спектр будет обладать всеми особенностями исходного ВР-спектра, так как в этом случае происходит свертка излучения ВР-спектра с одночастотным излучением.

Экспериментальное изучение возможности регистрации ВР-спектра методами нелинейного преобразования частоты нами проводилось на кристалле LiIO_3 , что позволило настраиваться на режимы как удвоения, так и смещения частот. При удвоении частоты широкополосного лазера преобразованное излучение регистрировалось в области 0,68 мкм и имело спектр, структура которого показана на рис. 4, а. Сравнение полученного спектра с исходным спектром (рис. 4, б) показывает, что сильные провалы в исходном спектре полностью не замяются, хотя и сильно искажаются, а также появляются дополнительные провалы, которые трудно идентифицировать.

При использовании режима смещения частот смешивались частоты узкополосного неодимового лазера ($\nu = 9434 \text{ см}^{-1}$, $\gamma = 0,05 \text{ см}^{-1}$, $\tau = 40 \text{ нс}$) и ВР-спектра ($\nu = 7353 \text{ см}^{-1}$, $\gamma = 20 \text{ см}^{-1}$, $\tau = 500 \text{ мкс}$) и получался спектр излучения с частотой $\nu = 16787 \text{ см}^{-1}$ ($\lambda = 0,595 \text{ мкм}$) (рис. 4, в). В течение импульса генерации многомодового лазера происходит изменение спектрального состава генерации и наблюдается сужение спектра, поэтому при использовании одночастотного лазера наносекундной длительности нелинейные преобразования излучения осуществляются только для мгновенного ВР-спектра в момент генерации одночастотного лазера и регистрируемый ВР-спектр оказывается сильно зауженным.

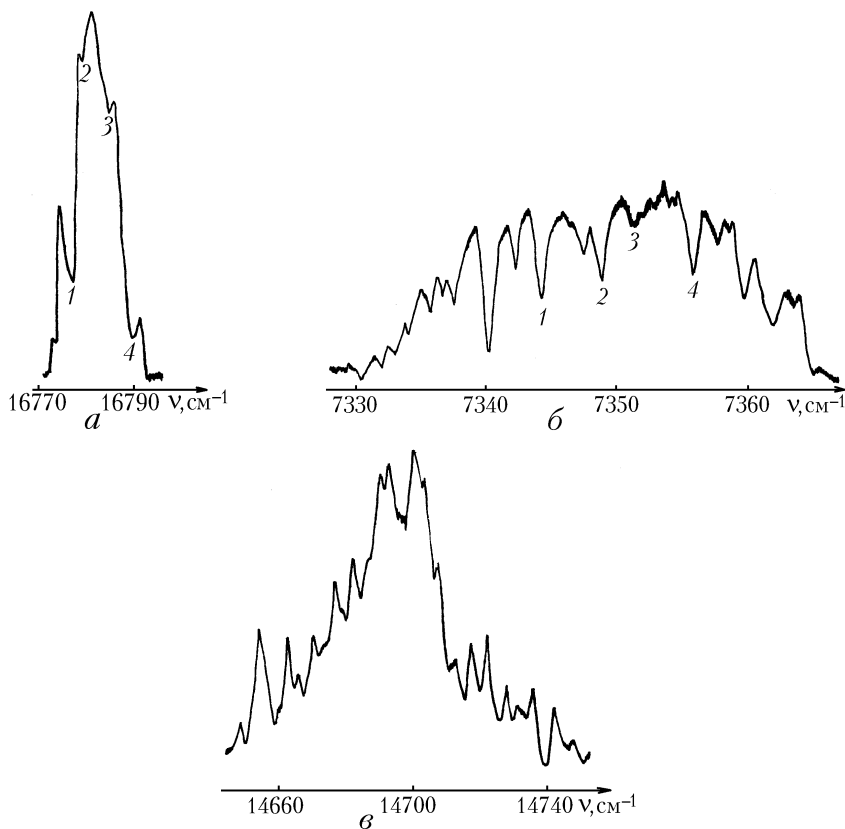


Рис. 4. Спектры излучения лазера на фосфатном стекле при смещении с одночастотным излучением (а), на основной частоте (б) и при преобразовании удвоением частоты (в)

Поскольку глубина провалов в ВР-спектре увеличивается по экспоненциальному закону, использование смещения частот ВР-спектра с узкополосным лазером наносекундной длительности позволяет варьировать чувствительность ВР-спектрометра при реализации преобразования частот в различные моменты генерации длительного импульса, увеличивая тем самым чувствительность и динамический диапазон ВР-спектрометра.

5. Заключение

В результате проведенных исследований создан ВР-спектрометр в области 1,36 мкм на фосфатном неодимовом стекле и зарегистрированы линии поглощения водяного пара. ВР-спектрометр может использоваться для контроля паров воды в газовой среде.

Ниже дадим оценку концентрационной чувствительности спектрометра-газоанализатора.

Надежно регистрируемая глубина провала в ВР-спектроскопии имеет величину $J(v, t)/J(v, 0) = 0,8$ ($J(v, 0)$ и $J(v, t)$ – спектр излучения лазера в начале и в конце генерации соответственно). Отсюда легко получить значение регистрируемого коэффициента поглощения

$$K_n(v) = [\ln J(v, t)/J(v, 0)] / (ct \mu),$$

где c – скорость света; t – длительность генерации; μ – коэффициент заполнения резонатора. Полагая $t = 0,5 \cdot 10^{-3}$ с, $\mu = 0,5$, получим $K_n(v) < 2,9 \cdot 10^{-8}$ см⁻¹.

В области генерации лазера на фосфатном стекле линия H₂O 7339,846 см⁻¹ полосы $\nu_1 + \nu_3$ имеет интенсивность 0,422 см⁻²·атм⁻¹ [8]. С учетом того, что в атмосферных условиях полуширина линий H₂O составляет величину порядка 0,1 см⁻¹, концентрация водяного пара, которая может быть зарегистрирована данным спектрометром, равна $2,2 \cdot 10^{-8}$.

Авторы выражают благодарность М.М. Макогону за полезные обсуждения и консультации.

1. Пахомычева Л.А., Свириденков Э.А., Сучков А.Ф. и др. // Письма в ЖТФ. 1970. Т. 12. N 2. С. 60–63.
2. Лазерные фосфатные стекла / Под ред. М.Е. Жаботинского. М.: Наука, 1980. 352 с.
3. Забкрицкий Б.Я., Мануильский А.Д., Одулов С.Г. и др. // Укр.физ.ж. 1972. Т. 17. N 3. С. 501–504.
4. Картановский В.А., Надейкин А.А., Никитин А.Н. // Квантовая электроника. 1978. Т. 5. N 11. С. 2468–2470.
5. Колеров А.Н. // Квантовая электроника. 1986. Т. 13. N 6. С. 1645–1651.
6. Toth R.A., Margolis J.S. // JMS. 1975. V. 55. N 13. P. 229–251.
7. Фомин К.Г., Гайнер А.В. Динамика свободной генерации твердотельных лазеров. Новосибирск: Наука, 1979. 246 с.
8. Chadiin A., Husson N., Scott N.A. et al. The GEISA data bank 1984 version. Laboratoire de Meteorologie Dynamique du CNRS, 1986.

Институт оптики атмосферы СО РАН,
Томск

Поступила в редакцию
2 июня 1995 г.

V.I. Serdukov, L.N. Sinitza. Intracavity Phosphate Neodymium Glass Laser Spectrometer within 1,3 μm Region.

A ruled structure of the phosphate neodymium glass laser generation spectrum is investigated within 1,3 μm region. It is shown that the structure is determined by presence of atmospheric air inside the cavity. Its elimination allowed us to design the intracavity laser spectrometer with threshold sensitivity of $3 \cdot 10^{-8}$ cm⁻¹.

The spectrum registration was conducted by vacuum spectrograph using the frequency nonlinear transformation methods (doubling and mixing the frequency) as well as direct recording it on IR film.