

Конденсация спектра генерации широкополосного лазера при внутрирезонаторном рассеянии излучения на аэрозоле

Ю.П.Подмарьков, М.П.Фролов

Обнаружено, что внесение аэрозоля в резонатор многомодового (широкополосного) $MgF_2:Co$ -лазера может оказывать сильное влияние на его спектр генерации, если характерные размеры частиц аэрозоля сравнимы с длиной волны генерации (~ 2 мкм). В присутствии аэрозоля на начальном этапе генерации в спектре возникают выбросы, развивающиеся со временем. При временах ~ 100 мкс наблюдалась конденсация спектра – резкое (более чем на два порядка) уменьшение ширины спектра генерации до значения, определяемого разрешением спектральной аппаратуры (не более 0.04 см $^{-1}$), при незначительном снижении выходной энергии.

Ключевые слова: внутрирезонаторная лазерная спектроскопия, аэрозоль, рассеяние света, конденсация спектра.

Как известно, спектр генерации многомодовых (широкополосных) лазеров с большой однородной шириной контура усиления обладает чрезвычайно высокой чувствительностью к узкополосным частотно-зависимым потерям в резонаторе, что послужило основой для разработки метода внутрирезонаторной лазерной спектроскопии (ВРЛС) [1]. Помещая вещество с линейчатым спектром поглощения, например, в резонатор лазера на красителе, можно зарегистрировать линии поглощения с коэффициентами до $\sim 10^{-11}$ см $^{-1}$ [2], что совершенно недоступно для традиционных методов абсорбционной спектроскопии. Успешное применение в методе ВРЛС лазера на кристалле $MgF_2:Co$ [3, 4] позволило продвинуть спектральную область метода в ближний ИК диапазон, что дало возможность значительно расширить класс веществ, которые можно зарегистрировать методом ВРЛС.

В ходе проведения экспериментов, связанных с методом ВРЛС, ранее было обнаружено явление, которое получило название конденсации спектра генерации вблизи линий поглощения [5–9]. Его суть заключается в том, что наличие в резонаторе поглощающего вещества не только приводит к обычному внутрирезонаторному поглощению на длине волны исследуемой линии, проявляющемуся в виде провала в спектре генерации широкополосного лазера, но и при определенных условиях может вызывать возникновение резких пиков спектральной интенсивности вблизи частоты поглощающего перехода. Эффект бывает настолько сильным, что спектр генерации лазера сужается и оказывается полностью сосредоточенным в указанном пике. Хотя в настоящий момент не существует единой точки зрения на механизм этого явления, несомненно то, что описанная конденсация спектра происходит вблизи сильных линий поглощения.

В настоящей работе обнаружено, что внесение аэрозоля в резонатор широкополосного $MgF_2:Co$ -лазера может оказывать очень сильное влияние на его спектр ге-

нерации, в частности приводить к конденсации спектра, не связанной с наличием линий поглощения.

Схема экспериментальной установки представлена на рис.1. Лазер на $YAlO_3:Nd$ 1, работавший в режиме свободной генерации на длине волны 1.34 мкм, использовался для продольной накачки кристалла $MgF_2:Co$ 2 длиной 32 мм. Длительность импульсов накачки была равна 150 мкс, частота следования импульсов – до 1 Гц. Излучение накачки фокусировалось линзой 3 в центр кристалла. Длительность импульсов генерации $MgF_2:Co$ -лазера составляла 130 мкс. Лазер работал при комнатной температуре. Резонатор $MgF_2:Co$ -лазера был образован сферическими зеркалами 6 ($R = 20$ см) и 7 ($R = 30$ см) и имел длину 40 см. Выходное зеркало 7 имело пропускание 2 % на длине волны генерации (2.25 мкм). Чтобы свести к минимуму влияние на форму спектра генерации $MgF_2:Co$ -лазера интерференционных эффектов на оптических элементах резонатора, зеркала резонатора были нанесены на подложки со скошенными под углом 5° задними поверхностями, а торцы активного элемента были срезаны

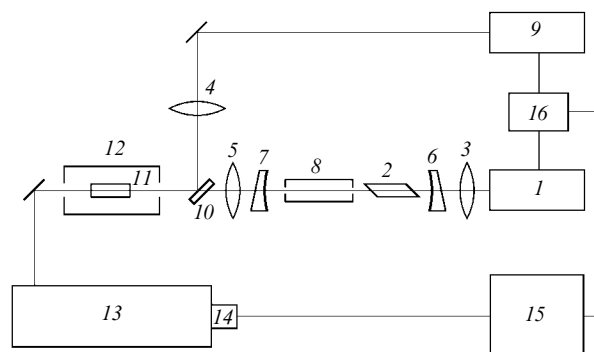


Рис.1. Схема экспериментальной установки: 1 – лазер накачки на $YAlO_3:Nd$; 2 – кристалл $MgF_2:Co$; 3 – 5 – фокусирующие линзы; 6, 7 – зеркала резонатора $MgF_2:Co$ -лазера; 8 – кювета с аэрозолем; 9 – узкополосный $YAG:Nd$ -лазер; 10 – дихроичное зеркало; 11 – нелинейный кристалл $LiNbO_3$; 12 – печь; 13 – дифракционный спектрограф; 14 – оптический многоканальный анализатор на ПЗС-линейке; 15 – персональный компьютер; 16 – схема синхронизации.

под углом Брюстера. В принципе, $\text{MgF}_2\text{:Co}$ -лазер позволяет получать генерацию в области 1.6–2.5 мкм. В нашей установке спектр генерации лазера определялся спектральными характеристиками зеркал и имел ширину ~ 10 нм с центром на длине волны 2.25 мкм.

Для регистрации спектрального распределения излучения лазера использовался дифракционный спектрограф 13 с разрешением 0.04 см^{-1} и оптический многоканальный анализатор на базе ПЗС-линейки 14 (прибор МОРС-1/3648 фирмы «Многоканальные оптические регистрирующие системы»), сигнал с которой поступал в персональный компьютер 15. Так как область спектральной чувствительности линейки была ограничена длиной волны 1.1 мкм, широкополосное ИК излучение $\text{MgF}_2\text{:Co}$ -лазера предварительно переводилось в видимый диапазон. Для этого ИК излучение смешивалось с узкополосным излучением YAG:Nd -лазера 9 ($\lambda = 1.064$ мкм, ширина линии не более 0.02 см^{-1} , длительность импульса 5 мкс, энергия 1 мДж) в нелинейном кристалле ниобата лития 11, нагреваемом с помощью печи 12 для достижения 90-градусного синхронизма.

Дихроичное зеркало 10 и линзы 4, 5 использовались для совмещения и фокусировки двух лазерных пучков внутри нелинейного кристалла. Излучение с суммарной частотой попадало на входную щель спектрографа 13 и регистрировалось. Схема синхронизации 16 позволяла задерживать импульс YAG:Nd -лазера на любое заданное время относительно переднего фронта импульса генерации $\text{MgF}_2\text{:Co}$ -лазера, что давало возможность регистрировать спектральное распределение излучения последнего в любой интересующий нас момент времени без использования какой-либо дополнительной аппаратуры.

Формирование аэрозолей проводилось в кювете 8, которая была установлена в резонаторе $\text{MgF}_2\text{:Co}$ -лазера. Кювета представляла собой кварцевую трубку с длиной 80 мм и внутренним диаметром 32 мм, закрытую с обеих сторон крышками из фторопласта. В центрах крышек были просверлены отверстия диаметром 4 мм, через которые проходил пучок $\text{MgF}_2\text{:Co}$ -лазера. В кювету в небольших количествах помещались различные вещества, нагревая которые можно было создавать аэрозоли. Появление аэрозоля контролировалось визуально по возникновению рассеяния пучка юстировочного He-Ne -лазера. Описанная конструкция кюветы позволяла удерживать аэрозоль в резонаторе лазера в течение нескольких минут после прекращения нагрева.

На рис.2 показаны спектральные распределения излучения генерации $\text{MgF}_2\text{:Co}$ -лазера, соответствующие моменту времени 100 мкс относительно переднего фронта генерации, полученные в отсутствие аэрозоля и при наличии в резонаторе аэрозоля, образованного при нагревании канифоли. Приведенный на рис.2,а спектр получен при усреднении по 100 импульсам. В спектре наблюдаются линии поглощения, обусловленные атмосферным метаном и парами воды [10]. На рис.2,б представлено типичное спектральное распределение одиночного лазерного импульса. В отличие от усредненного спектра в нем присутствуют шумы, обусловленные квантовыми флуктуациями интенсивности излучения в отдельных модах лазера [11, 12], однако огибающая спектрального распределения одиночного импульса аналогична усредненному спектру и не имеет каких-либо выбросов.

Картина спектрального распределения радикально меняется, когда в резонаторе присутствует аэрозоль (рис.2,

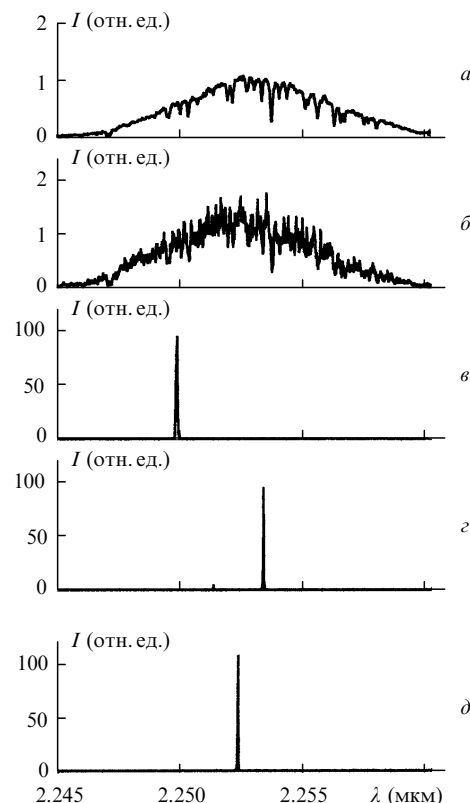


Рис.2. Спектральные распределения генерации $\text{MgF}_2\text{:Co}$ -лазера через 100 мкс после возникновения переднего фронта в отсутствие аэрозоля при усреднении по 100 импульсам (а) и для отдельного импульса (б), а также при наличии аэрозоля (в–д).

в–д). На рис.2, в–д показаны типичные спектральные распределения отдельных лазерных импульсов при наличии в резонаторе аэрозоля, полученного при нагревании канифоли. Видно, что аэрозоль вызывает резкое сужение спектра генерации. В некоторых случаях ширина спектра не превышала 0.04 см^{-1} (разрешение нашей спектральной аппаратуры), при этом спектральная интенсивность возрастала приблизительно на два порядка. Подчеркнем, что влияние паров, образующихся при нагревании канифоли, до момента появления аэрозоля не оказывало заметного влияния на спектр лазера, т. е. спектра поглощения паров мы не наблюдали. Положение сконденсированного спектра не было связано с положением линий поглощения атмосферного воздуха и изменялось от импульса к импульсу.

Для оценки потерь, вносимых в резонатор аэрозолем, мы сравнили энергии генерации $\text{MgF}_2\text{:Co}$ -лазера в отсутствие и при наличии аэрозоля. При приблизительно трехкратном превышении порога выходная энергия лазера снижалась в 1.2 раза при внесении в резонатор аэрозоля. Принимая во внимание пропускание выходного зеркала (2%) и внутренние потери резонатора (рассеяние на зеркалах, в кристалле и на торцах кристалла) (1.6%), можно оценить, что аэрозоль вносит дополнительные потери, не превышающие 0.8% за двойной обход резонатора.

Подобная конденсация спектра также наблюдалась при наличии аэрозолей, образованных при нагреве глицерина, стеариновой кислоты и масла ВМ-1 для вакуумного диффузионного насоса. Аэрозоли, образованные при нагреве воды и этиленгликоля, не давали описанного эффекта, что может быть обусловлено различием характерных размеров частиц этих двух групп аэрозолей.

Для оценки размеров частиц, образующих аэрозоль, мы наблюдали угловое распределение интенсивности дифракционной картины в случае дифракции Фраунгофера излучения He–Ne-лазера, распространяющегося через облако аэрозоля. Поскольку конструкция установки не позволяла проводить эти измерения непосредственно в резонаторе MgF₂:Co-лазера, описанная кварцевая кювета без крышек помещалась в параллельный пучок He–Ne-лазера и в ней создавался аэрозоль. На выходе кюветы устанавливалась положительная линза с фокусным расстоянием 330 мм. В фокусе линзы был расположен экран, на котором наблюдалась дифракционная картина.

Используя известное для дифракции на круглом экране соотношение $\sin \varphi = 0.61\lambda/r$, связывающее угловой размер φ первого дифракционного минимума с радиусом экрана r , можно было оценивать размеры частиц аэрозоля. Оказалось, что во всех случаях дифракционная картина не имела четко выраженных минимумов и максимумов, что свидетельствует о полидисперсности рассматриваемых аэрозолей. В связи с этим для оценок использовался угловой размер наблюдавшегося при дифракции пятна. Таким образом было определено, что частицы воды и этиленгликоля имели характерный радиус 5–10 мкм, тогда как радиус частиц, вызывающих конденсацию спектра, составлял 1–2 мкм.

Регистрируя спектральное распределение интенсивности излучения MgF₂:Co-лазера в различные моменты времени генерации, мы проследили динамику развития спектра лазера при наличии аэрозоля в резонаторе. К сожалению, наша аппаратура не позволяла записать временную развертку спектра отдельного лазерного импульса. Мы регистрировали спектральные распределения излучения в разные моменты времени для разных лазерных импульсов, что позволяет качественно описать развитие конденсации спектра.

Примеры характерных спектральных распределений показаны на рис.3. Представленные данные получены в одинаковых условиях, т. е. при увеличении спектральной интенсивности генерации за счет конденсации мы не ослабляли излучение, поступающее на входную щель спектрографа. Из рис.3 видно, что уже на ранней стадии генерации в спектре излучения проявляются выбросы интенсивности, которые с течением времени усиливаются до такой степени, что весь спектр оказывается сосредоточенным в узкой спектральной области, о чем свидетельствует наблюдающееся насыщение многоканального фотоприемника.

В случаях рис.3, в–д резкий рост интенсивности в результате конденсации спектра приводит к насыщению ПЗС-линейки. Фактически наблюдается развитие спектрального распределения интенсивности излучения многомодового лазера, характерное для лазера с резонатором, в котором имеются частотно-зависимые особенности (такие как, например, линии поглощения при регистрации спектров поглощения методом ВРЛС). Малая спектральная ширина выбросов на начальной стадии генерации свидетельствует о том, что масштаб этих особенностей достаточно мал по сравнению с шириной невозмущенного спектра генерации лазера.

На наш взгляд, возможное объяснение описанной спектральной конденсации состоит в следующем. Известно [13, 14], что сечение рассеяния излучения с длиной волны λ на сферических частицах имеет довольно сильную зависимость от параметра $2\pi a/\lambda$, где a – радиус рассеиваю-

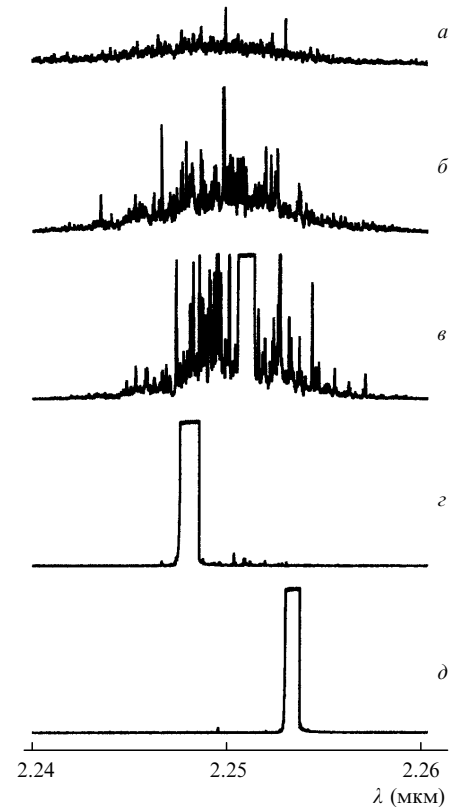


Рис.3. Спектральные распределения генерации MgF₂:Co-лазера, полученные при наличии аэрозоля в резонаторе в моменты времени 25 (а), 50 (б), 75 (е), 100 (z) и 125 мкс (д) относительно переднего фронта импульса.

щих сфер. Это означает, что аэрозоль, образованный такими частицами, может служить своеобразным частотным селектором. Даже при весьма слабой селективности роль подобного селектора в резонаторе многомодового лазера может быть очень существенной. Это обусловлено экспоненциальным развитием спектральных особенностей в течение импульса генерации такого лазера. Например, в резонаторе, полностью заполненном поглощающим веществом, интенсивности линий внутррезонаторного поглощения возрастают в соответствии с модифицированным законом Бугера – Ламберта – Бера [15]

$$\frac{I(t)}{I_0(t)} = \exp(-kct),$$

где $I(t)$ – интенсивность генерации в центре линии поглощения в момент времени t ; $I_0(t)$ – интенсивность генерации вблизи линии поглощения; k – коэффициент поглощения в центре линии.

Это означает, что спектральные особенности будут заметны в спектре при $k \sim (ct)^{-1}$, которое при $t = 100$ мкс составляет $\sim 3 \cdot 10^{-7}$ см⁻¹. Такой коэффициент поглощения за один проход резонатора вызывает ослабление сигнала, равное kL , при длине резонатора $L = 40$ см составляющее $\sim 10^{-5}$. Следовательно, если в резонаторе за счет аэрозоля возникает частотная селективность, превышающая 10^{-5} , она приведет к заметным изменениям спектра генерации. Вероятно, это условие удовлетворялось при радиусах частиц 1–2 мкм и не достигалось для частиц больших размеров. Невоспроизводимость спектрального положения максимума, возникающего в результате конденсации, может объясняться, с одной стороны, нестационарностью аэрозольного облака, а с дру-

гой – полидисперсностью аэрозоля. По-видимому, при использовании аэрозоля, состоящего из одинаковых частиц, картина конденсации будет иметь более воспроизводимый вид.

Нами была предпринята попытка получить в аналогичных условиях конденсацию спектра импульсного лазера на красителе родамин 6Ж (полоса генерации 594–599 нм, $t = 10$ нс), однако ни с одним из перечисленных аэрозолей эффект не был обнаружен. Это может быть обусловлено как увеличением параметра $2\pi a/\lambda$, так и меньшим временем генерации, возможно, недостаточным для развития конденсации.

В заключение отметим, что описанные особенности спектральной динамики многомодовых лазеров при наличии рассеивающих частиц в резонаторе необходимо иметь в виду при проведении измерений методом ВРЛС, в особенности в ИК диапазоне. Кроме того, на наш взгляд, представляется возможным использовать наблюдавшееся явление для сужения, перестройки и стабилизации частоты лазерного излучения.

Работа была поддержана программой «Университеты России – фундаментальные исследования» (грант № 2517).

1. Пахомычева Л.А., Свириденков Э.А., Сучков А.Ф., Титова Л.В., Чурилов С.С. *Письма в ЖЭТФ*, **12**, 60 (1970).
2. Виноградов С.Е., Качанов А.А., Коваленко С.А., Свириденков Э.А. *Письма в ЖЭТФ*, **55**, 560 (1992).
3. Frolov M.P., Podmar'kov Yu.P. *Optics Comms*, **155**, 313 (1998).
4. Подмарьков Ю.П., Распопов Н.А., Савченко А.Н., Фролов М.П. *Квантовая электроника*, **28**, 186 (1999).
5. Shank S.V., Klein M.B. *Appl. Phys. Letts*, **23**, 156 (1973).
6. Рубинов А.Н., Белоконов М.В., Адамушко А.В. *Квантовая электроника*, **6**, 723 (1979).
7. Khanin Y.I., Kagan A.G., Novikov V.P., Vovikov M.A., Polushkin I.N., Shcherbakov A.J. *Optics Comms*, **32**, 456 (1980).
8. Захарьин В.И., Надточено В.А., Саркисов О.М. *Квантовая электроника*, **8**, 2036 (1981).
9. Данилейко М.В., Негрийко А.М., Яценко А.П. *Квантовая электроника*, **10**, 1660 (1983).
10. *Database HITRAN 1996* (North Adover, Ontar Corp., MA 01845-2000, USA).
11. Коваленко С.А. *Квантовая электроника*, **8**, 1271 (1981).
12. Baev V.M., Gaida G., Schroder H., Toschek P.F. *Optics Comms*, **38**, 309 (1981).
13. Ван де Хюлст Г. *Рассеяние света малыми частицами* (М., ИЛ, 1961).
14. Дейрменджан Д. *Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами* (М., Мир, 1971).
15. Беликова Т.П., Свириденков Э.А., Сучков А.Ф. *Квантовая электроника*, **1**, 830 (1974).

Yu.P.Podmar'kov, M.P.Frolov. Condensation of the emission spectrum of a wide-band laser in the case of intracavity emission scattering by an aerosol.

It is found that inserting aerosol in a cavity of a multimode (wide-band) Co:MgF₂ laser can strongly affect its emission spectrum, provided the typical size of aerosol particles is comparable to the laser wavelength ($\sim 2 \mu\text{m}$). In the presence of aerosol, intensity spikes are formed in the spectrum at the initial lasing stage, which develop in time. At moments of time $\sim 100 \mu\text{s}$, condensation of the spectrum was observed, which manifested itself as a sharp (more than two orders of magnitude) narrowing of the laser emission spectrum down to the value determined by the spectral resolution of a spectrograph (not better than 0.04 cm^{-1}), with an insignificant decrease in the output energy.