УДК 535.8

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ВОЗБУЖДЕНИЯ МОД ОПТИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРОВ ПЕРЕСТРАИВАЕМЫМ ЛАЗЕРНЫМ ПУЧКОМ

© 2022 г. О. М. Вохник¹, П. В. Короленко^{1, 2, *}, Р. Т. Кубанов¹

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова", Москва, Россия ²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия *E-mail: pvkorolenko@rambler.ru Поступила в редакцию 24.08.2021 г.

После доработки 06.09.2021 г. Принята к публикации 22.09.2021 г.

Рассмотрен механизм взаимодействия мод в аналитическом резонаторе спектрометра слабого поглощения при быстрой перестройке частоты задающего лазера. Показано, что при высокой скорости изменения частоты и наложении полей продольных мод улучшение разрешающей способности сочетается с определенным снижением чувствительности спектральных измерений.

DOI: 10.31857/S0367676522010276

ВВЕДЕНИЕ

Сохраняют актуальность исследования световых полей в оптических резонаторах [1]. Широкое освещение получили в литературе процессы возбуждения открытых резонаторов внешним лазерным пучком. Они используются в разнообразных оптических устройствах, например, в сканирующих интерферометрах Фабри-Перо [2], в связанных лазерных системах [3], в регенеративных усилителях [4]. Несмотря на многочисленные публикации по этой теме, практически неизученной осталась проблема возбуждения резонатора быстро перестраиваемым по частоте лазерным пучком. Вместе с тем, эта проблема является весьма значимой, в связи с созданием и широким использованием диодных лазеров с быстрой перестройкой частоты излучения. В частности, такие лазеры используются в спектрометрах слабого поглощения для возбуждения аналитических резонаторов, в которых размещается исследуемое вещество [5, 6]. Цель данной работы состоит в нахождении закономерностей, определяющих формирование внутрирезонаторного светового поля в условиях, когда временной интервал между возбуждаемыми модами оказывается сопоставимым со временем затухания излучения в резонаторе. Особое внимание уделяется оценке влияния межмодовой оптической связи, возникающей при быстром сканировании частоты, на чувствительность спектральных измерений. Используемый в

данной работе подход основан на методе сложения на выходе резонатора амплитуд парциальных пучков, получающихся в результате многократных отражений входного излучения от зеркал резонатора [7]. В отличие от многих работ, где этот метод использовался для определения характеристик интерферометров и резонаторов, в данной работе при проведении расчетов учитывается взаимодействие в аналитическом резонаторе возбуждаемых мод.

РАСЧЕТНАЯ СХЕМА

При проведении расчетов считалось, что ширина линии излучения лазера имеет величину пренебрежимо малую по сравнению с шириной линий поглощения и полосой пропускания резонатора. Фазовый набег лучей на проход θ определялся выражением

$$\theta = 2\pi L (f_0 + vt), \tag{1}$$

где частота $f_0 = 1/\lambda_0$, L – длина резонатора, λ_0 – стартовая длина волны лазера, v = df/dt – скорость изменения во времени t частоты лазера f. Полагалось, что $2\pi L f_0 = 2\pi N$, где N – целое большое число. Введем величину $\delta = 2\pi L v$, которая обозначает скорость приращения фазы световых пучков в расчете на проход и имеет размерность [рад/время]. Считая скорость приращения фазы пропорциональной времени (обычно частота ме-

1.0

0.5

0

 $2\cdot 10^4$

 $4 \cdot 10^{4}$

|S(k)|



 $6 \cdot 10^4$

 $8 \cdot 10^{4}$

 $1 \cdot 10^{5}$

k



k

 $1 \cdot 10^{5}$

няется по закону близкому к линейному), можно записать, что $\delta = xk$, где k – номер значащей точки на шкале времени, связанный со степенью ее дискретизации; x – коэффициент пропорциональности с размерностью [рад/время]. Величина этого коэффициента влияет на скорость изменения частоты. Процедуру суммирования парциальных пучков с целью определения суммарной амплитуды S выходного излучения будем проводить согласно формуле убывающей геометрической прогрессии. С ее помощью временную зависимость амплитуды от времени для симметричного резонатора можно представить в виде

 $4 \cdot 10^4$

 $6\cdot 10^4$

 $8 \cdot 10^{4}$

а

|S(k)|

 $2 \cdot 10^{4}$

1.0

0.5

0

$$S(k) = \frac{a(1-R^2)e^{i[\delta(k)d+\Phi]}p(k)}{1-R^2e^{2i[\delta(k)d+\Phi]}p(k)^2},$$
(2)

где R — коэффициент отражения зеркал резонатора по амплитуде; a — амплитуда падающей волны, Φ — ее фаза; k = 0, 1, 2...K; d — интервал дискретизации шкалы времени; p(k) — коэффициент передачи излучения внутрирезонаторной средой (потери в зеркалах считаются пренебрежимо малыми). Заметим, что диапазон изменения значащих точек k может характеризовать как время T одного скана изменения частоты лазера, так и диапазон F перестройки частоты за это время.

Анализ изменений пространственно-временной структуры выходного излучения в зависимости от скорости сканирования частоты лазера, проведенный с помощью формулы (2), показывает, что увеличение скорости приводит к возникновению некоторых специфических эффектов, требующих дополнительного изучения и учета. С точки зрения практической значимости к ним в первую очередь следует отнести уменьшение временных и частотных интервалов между формируемыми на выходе резонатора резонансными пиками с одновременным их сужением и возможное усложнение структуры выходного излучения при произвольной степени дискретизации сигнала. Наконец, следует выделить эффект усиления межмодовой связи, приводящий, начиная с некоторой скорости сканирования частоты, к наложению полей соседних мод резонатора. Расчеты показывают, что этот эффект начинает заметным образом проявляться, когда временной межмодовый интервал оказывается сопоставимым с временем затухания излучения в резонаторе.

Общее представление о распределение резонансных пиков, соответствующих возбуждаемым продольным модам резонатора, дает рис. 1*a*, 1*б*. Графики зависимости модуля S(k) на рис. 1*a* построены для параметров a = 1, $\Phi = 0$, R = 0.99, $K = 10^5$, $x = 10^{-3}$, p(k) = 1, т.е. для резонатора без поглощающего вещества. Пики на рис. 1*б* соответствуют случаю, когда в резонаторе присутствует среда, обладающая поглощением. Ее коэффициент передачи задавался с помощью следующего соотношения: $p(k) = \exp[-p'(k)\alpha - i\phi_n(k)]$, $p'(k) = \frac{(k-k_0)^2}{2}$

 $e^{-\Delta^2}$ – форм-фактор линии поглощения, α – коэффициент поглощения в центре линии, k_0 – определяет момент прохождения частоты лазера через центр линии, Δ – характеризует ее ширину, $\varphi_n(k)$ – дополнительный фазовый набег, обусловленный изменением показателя преломления в области линии поглощения. На рис. 1*б* показана последовательность резонансов, соответствующая значениям a = 1, $\Phi = 0$, $k_0 = 5 \cdot 10^4$, $\Delta = K/20$, $K = 10^5$, $\alpha = 0.075$, $x = 10^{-3}$. Выполненные оценки показали, что для приведенных параметров величина $\varphi_n(k)$ – не играет заметной роли. В силу этого при последующем рассмотрении она будет исключена. О наличии линии поглощения



Рис. 2. Распределение амплитуды и фазы в выходном пучке резонатора. Сплошные линии – амплитуда поля, пунктирные – фаза ($x = 10^{-3}$, $\Phi = -\pi/10$).

можно судить по снижению амплитуд резонансных пиков в центре рисунка в области ее расположения.

Увеличение скорости сканирования частоты приводит к соответствующему уменьшению межмодового интервала. Имеет значение также величина начальной фазы Ф, которая вызывает временные сдвиги последовательности резонансов в целом. Когда параметр x, характеризующий скорость изменения частоты, превышает 10^{-2} , при неизменной процедуре дискретизации сигнала наблюдается значительный разброс пиковых значений резонансов. Этот разброс обусловлен изменившимся распределением фаз интерферирующих парциальных пучков и, как следствие, иным условием формирования временных интерференционных максимумов.

Из общей тенденции усложнения выходной структуры излучения с ростом x, как показывает расчет, выпадают точки, при которых значения x оказываются кратными величине π . При таких значениях x с увеличением скорости перестройки частоты амплитуды резонансных пиков на выходе из резонатора не претерпевают никаких изменений, оставаясь равными 1, за исключением провала, обусловленного поглощением в среде. Форма провала качественно повторяет форм-фактор линии поглощения.

МЕХАНИЗМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МОД

При анализе внутрирезонаторного поля следует учитывать и тот факт, что из-за сужения резонансных пиков в их окрестности происходят резкие изменения фазы световых колебаний. Это видно из рис. 2, где амплитудно-фазовая структура выходного пучка показана в увеличенном масштабе. Для лучшего сопоставления графиков изменения амплитуды поля и фазы их графики построены для R = 0.9. Особенно значительны резкие изменения фазы в окрестностях резонансов. При анализе поведения фазы у левого показанного на рисунке резонанса надо учитывать особенности представления фазы в используемой расчетной программе (она уменьшает на 2π значения фазы, если они превосходят величину π). Наличие быстрых изменений фазы световых колебаний вблизи точек резонанса на масштабах π , может при наложении соседних мод приводить к снижению амплитуды резонансных пиков.

Рассмотрим этот эффект подробнее. Предположим, для определенности, что добротность резонатора обеспечивает такое время затухания излучения в резонаторе τ , что оно оказывается сопоставимым с временным интервалом *m* между возбуждаемыми модами. Время затухания, как известно, непосредственно связано с параметрами резонатора и обычно определяется из соотношения

$$t = 2L/c(1 - R_1 R_2), \qquad (3)$$

где L – длина резонатора, R_1 , R_2 – коэффициенты отражения зеркал (по мощности). При указанном выше соотношениями между величинами τ и *m* происходит частичное наложение поля каждого резонанса на поле последующего. Учесть этот эффект можно заменой выражения (2) на сумму, описывающую влияние предшествующих резонансов на выбранный резонанс с порядковым номером *k*:

$$S(k) = \sum_{s=0}^{Q} \frac{a(1-R^2)e^{i\delta(k+sm)d}p(k+sm)}{1-R^2e^{2i\delta(k+sm)d}p^2(k+sm)}e^{-\frac{sm}{\tau}}.$$
 (4)

Экспоненты, на которые умножаются амплитуды пиков, характеризуют интенсивность взаимодействия соседних мод. Учет релаксации воз-



Рис. 3. Влияние межмодового взаимодействия на структуру выходного излучения при $m = \tau$. Сплошные линии – амплитуда резонансных пиков, пунктирные – исходная форма линии поглощения (*a*). Уменьшение амплитуды пиков в центральной области линии поглощения при изменении коэффициента поглощения, сплошная линия – Q = 0, пунктирная – Q = 1, штрих-пунктирная – Q = 2 (*b*).

буждения продольных мод вносит определенные изменения в структуру выходного излучения. Это видно из рис. 3a, где показано нарушение из-за взаимодействия мод симметрии в изменении величины резонансных пиков в центральной спектральной области при Q = 1, $m = \tau$, $\alpha = 0.075$. Подобное структурное преобразование продольных мод резонатора может приводить к деформации измеряемого контура линии поглощения, изначальная форма которого также приведена на рис. 3a. Расчеты показывают, что при примерном равенстве величин m и τ в выражении (4) достаточно ограничиться количеством слагаемых, определяемым величиной Q = 2.

На рис. Зб показана зависимость величины снижения пика в области центра линии поглощения от величины коэффициента поглощения α. Снижение оценивается относительно максимальных значений в гребенке частот для разных значений Q. Для этого используется величина $Y(\alpha) = S(0) - S(k_0)$, которая характеризует чувствительность трансформации поля выходного излучения к влиянию поглощения внутрирезонаторной среды. Обращает на себя внимание, что минимальное снижение для фиксированного значения α наблюдается, когда учитывается взаимодействие двух соседних мод (Q = 1) с соответствующим фазовым соотношением между ними. Это говорит о том, что при таком взаимодействие снижается чувствительность системы к изменению величины поглощения в резонаторе. Несколько улучшает ситуацию учет влияния еще одной моды (Q = 2), поскольку часть ее поля накладывается на поле выбранной моды в фазе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения исследования установлено, что при быстром сканировании частоты задающего лазера следует считаться с обнаруженном в данной работе эффектом, связанным с наложением полей соседних продольных мод аналитического резонатора спектрометра. При анализе этого эффекта с точки зрения его влияния на чувствительность спектральных измерений необходимо учитывать специфику фазовых соотношений между возбуждаемыми резонансами. Поскольку взаимодействие мод может снижать чувствительность спектрометра, при оптимизации его параметров нужно предусмотреть возможность ограничения скорости сканирования частоты, чтобы временной интервал между модами превосходил время затухания излучения в резонаторе.

Работа выполнена при содействии Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-02-00540).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Курапцев А.С., Соколов И.М., Баранцев К.А. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2019. Т. 83. № 3. С. 297; Kuraptsev A.S., Sokolov I.M., Barantsev К.А. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2019. V. 83. No. 3. P. 242.
- Fang Hui-Mei, Wang Shing-Chung, Shy Jow-Tsong et al. // Appl. Opt. 2006. V. 45. No. 13. P. 3173.
- Лиханский В.В., Напартович А.П. // УФН. 1990.
 Т. 160. № 3. С. 10; Likhanskii V.V., Napartovich А.Р. // Phys. Usp. 1990. V. 33. No. 3. P. 228.
- Храмов В.Н., Холманов Э.И., Диасамидзе И.А. // Вест. ВолГУ. Сер. 10. 2012. № 6. С. 5.

- Короленко П.В., Николаев И.В., Очкин В.Н. и др. // Квант. электрон. 2014. Т. 44. № 4. С. 353; Korolenko P.V., Nikolaev I.V., Ochkin V.N. // Quant. Electron. 2014. V. 44. No. 4. Р. 353.
- 6. Lagunov V.V., Nikolaev I.V., Ochkin V.N. // Spectrochim. Acta A. 2021. V. 246. Art. No. 119060.
- 7. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973.

Specific features of modes excitation in optical resonators by a tunable laser beam

O. M. Vokhnik^a, P. V. Korolenko^{a, b, *}, R. T. Kubanov^a

^a Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia ^b Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991 Russia *e-mail: pvkorolenko@rambler.ru

The mechanism of modes interaction in the analytical cavity of the spectrometer with fast tuning of the master laser frequency is considered. It is shown that at a high rate of frequency change and superposition of longitudinal modes fields an improvement in the resolution is combined with a certain decrease in the sensitivity of spectral measurements.