

НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА МНОГОМОДОВОГО ЛАЗЕРА НА КРАСИТЕЛЕ С ИЗМЕНЯЕМОЙ ДИСПЕРСИЕЙ РЕЗОНАТОРА И ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ВНУТРИРЕЗОНАТОРНОЙ ЛАЗЕРНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

С.Е.Виноградов, А.А.Качанов, С.А.Коваленко, Э.А.Свириденков

Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН

117924, Москва

Поступила в редакцию 9 апреля 1992 г.

При компенсации дисперсии резонатора кольцевого широкополосного лазера устранено влияние нелинейного взаимодействия мод и получена чувствительность внутриврезонаторной лазерной спектроскопии выше чем 10^{-10} см $^{-1}$.

Динамика генерации многомодовых лазеров с однородно уширенным контуром усиления в последнее время является объектом интенсивных исследований. С одной стороны, такие лазеры представляют собой интересную модель многомерной динамической системы с жесткими интегральными параметрами (полная мощность излучения, ширина спектра, коэффициент усиления) и слабыми внутренними связями. Нелинейная динамика такой системы позволяет изучать различные режимы движения, такие как регулярные автоколебания, динамический хаос, стохастический режим. С другой стороны, эти исследования важны для практических применений таких лазеров в методе внутриврезонаторной спектроскопии (ВРЛС), для генерации пико и фемтосекундных импульсов света и так далее.

Динамика излучения в отдельных модах определяется полным усилением и потерями в модах, квантовыми шумами и нелинейным взаимодействием мод 1 .

Для амплитуды поля b_q в моде q можно написать следующее уравнение

$$\frac{db_q}{dt} = -\frac{1}{2}(\gamma + k_q c)b_q + \frac{1}{2}\beta_q b_q + \Phi_q + F_q(t). \quad (1)$$

Здесь b_q - безразмерная амплитуда в q -моде, нормированная так, что $|b_q|^2 = M_q$ - число фотонов в моде. Первый член описывает потери со скоростью γ для всех мод и исследуемое внутриврезонаторное поглощение k_q в данной моде, второй член определяет усиление в активной среде с насыщенным коэффициентом поглощения β_q . Так как ширина полосы усиления Γ много больше межмодового интервала Δ ($\Gamma/\Delta > 10^4$), то вблизи центра полосы усиления ее можно аппроксимировать параболой.

$$\beta_q = \frac{\eta\gamma}{1 + \frac{J}{J_s}} \left[1 - \frac{\Delta^2 q^2}{\Gamma^2} \right], \quad (2)$$

где η - превышение накачки над порогом, $J = \sum M_q$ - полная интенсивность генерации, J_s - интенсивность, насыщающая лазерный переход, q - отсчитывается от центра полосы усиления.

В уравнении (1) $\Phi_q(b_1 \dots b_q)$ - член, описывающий нелинейное взаимодействие мод, F_q - случайная сила. Если F_q обусловлена квантовым характером излучения, то ее нормировка $\langle F_q(t) F_{q'}(t') \rangle = \gamma \delta_{qq'} \delta_{tt'}$. В момент начала генерации спектральное распределение определяется спонтанным излучением, а полная интенсивность устанавливается за время порядка $1/\gamma \sim 10^{-7}$ с, и определяется насыщением коэффициента усиления. В то же время для интенсивности отдельных мод нет такого стабилизирующего фактора как насыщение,

и под действием случайной силы интенсивность в моде испытывает медленные флуктуации с характерным временем корреляции $t = Mg/\gamma$. Именно это время определяет максимальное эффективное число проходов в исследуемом веществе, то есть предельную чувствительность метода ВРЛС ^{1,2}. Оно должно возрасти с превышением накачки над порогом и при $M \sim 10^7$ составлять величину ~ 1 с, регистрируемый коэффициент поглощения при этом может быть $K = 1/c\tau = 10^{-11} \text{ см}^{-1}$.

Однако экспериментальные исследования показали, что чувствительность ВРЛС с использованием непрерывных лазеров при увеличении накачки над порогом выше нескольких единиц процентов падает ³. Также было показано ¹, что при увеличении накачки над порогом характер генерации из стохастического переходит в режим динамического хаоса, определяемого нелинейным взаимодействием мод. Численный анализ уравнений (1) с учетом в качестве нелинейного взаимодействия рассеяния Манделъштама-Бриллюэна показал хорошее соответствие с экспериментальными результатами. Это взаимодействие хаотизировало кинетику генерации и уменьшало длительность флуктуаций, а следовательно, и чувствительность ВРЛС.

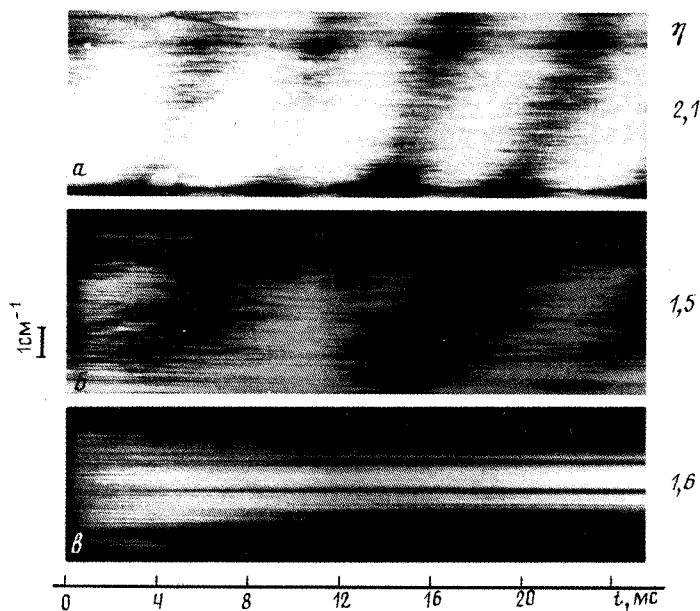


Рис.1. Развертка спектра генерации кольцевого широкополосного лазера: *a* и *б* – дисперсия не скомпенсирована, $\delta < 0$, превышение накачки над порогом $\eta = 2,1$ (*a*), $\eta = 1,5$ (*б*); *в* – дисперсия скомпенсирована $\delta = 0$, $\eta = 1,6$

Для устранения влияния рассеяния Манделъштама-Бриллюэна нами был создан кольцевой однонаправленный лазер бегущей волны. Резонатор кольцевого непрерывного лазера был образован двумя сферическими и двумя плоскими зеркалами, задние поверхности которых для устранения селективирующих эффектов скошены под углом 10° . Однонаправленную генерацию обеспечивал невзаимный элемент из стекла МОС-13 с брюстеровскими гранями длиной $1,9$ см, помещенный внутри постоянного магнита с полем на оси ~ 1 кГс.

В таком лазере режим динамического хаоса переходил в режим регулярных автоколебаний интенсивности отдельных мод. На рис.1а и б представлены развертки спектров генерации однонаправленного кольцевого лазера. Видно, что интенсивность в каждой моде осциллирует с периодом порядка миллисекунды, зависящим от превышения накачки над порогом. Фаза модуляции интенсивности в каждой моде смещается со временем в длинноволновую сторону, а полная интенсивность генерации остается постоянной. Чувствительность внутрирезонаторной спектроскопии определялась в этом случае характерным периодом автоколебаний (следует отметить, что выключение магнитного поля на невзаимном элементе - ячейке Фарадея - приводило к хаотизации кинетики и уширению спектральной полосы генерации).

Анализ других механизмов нелинейного взаимодействия мод позволил предположить, что причиной таких медленных автоколебаний интенсивности является параметрическое взаимодействие набора неэквидистантных мод в активной среде. Период таких автоколебаний должен быть пропорционален параметру неэквидистантности мод δ .

$$\delta = -\left(\frac{\lambda}{L}\right)^3 2\pi c \frac{d^2}{d\lambda^2} \left(\sum n_i l_i\right), \quad (3)$$

где L - длина резонатора, $\sum n_i l_i$ - сумма оптических длин элементов резонатора, λ - длина волны генерации, оценки дисперсии элементов резонатора (струя красителя, стекло фарадеевского вращателя и т.д.) дают для δ величину порядка 10^{-2}с^{-1} . В случае эквидистантных мод, отстоящих на расстоянии $K\Delta$ их параметрическое взаимодействие должно затухать за время $\sim \frac{K\Delta}{\gamma}^4$.

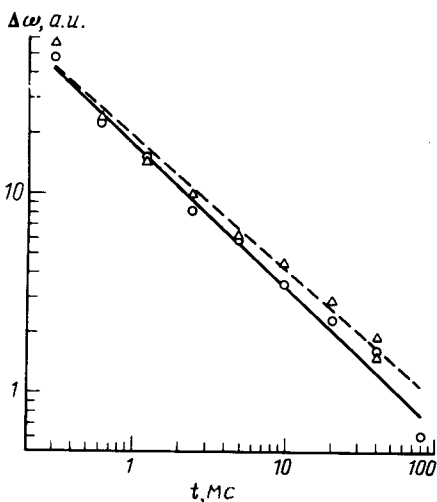


Рис.2.

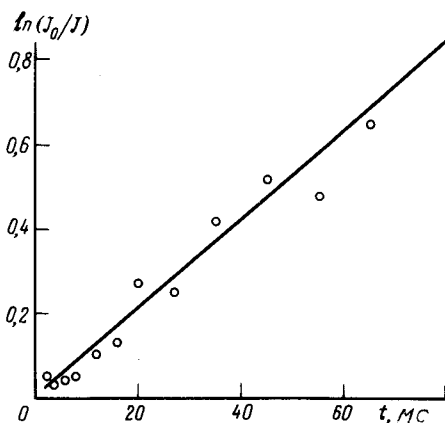


Рис.3.

Рис.2. Зависимость ширины спектра генерации лазера со скомпенсированной дисперсией (— — $\eta = 2$; - - - $\eta = 1, 2$)

Рис.3. Зависимость глубины провала в линии поглощения от времени для лазера со скомпенсированной дисперсией

Для проверки высказанной гипотезы о влиянии параметрического взаимодействия с учетом их неэквидистантности в резонатор была введена система компенсации дисперсии, состоящая из четырех призм, аналогичная применяемой в фемтосекундной технике ⁵. Установка призм в положение, соответствующее

щее компенсации дисперсии, вносимой членом (3), и обеспечивающее эквидистантность мод, приводила к стабилизации режима генерации (см. рис.1а). Из рисунка видно, что автоколебания интенсивности прекращаются, спектр генерации сужается со временем и в течение всей длительности импульса генерации увеличиваются провалы, соответствующие линиям поглощения атмосферного воздуха в резонаторе. Сужение спектра обусловлено параболической зависимостью коэффициента усиления (2) и происходит пропорционально $t^{-1/2}$. На рис.2 представлена зависимость ширины спектра генерации от времени. Видно, что сужение спектра продолжается до 80 мс. Фотометрирование разверток спектра генерации показало, что глубина провала в линиях также растет экспоненциально со временем по крайней мере до 60 мс. На рис. 3 представлена зависимость глубины провала в спектре генерации для линии поглощения с $k = 4 \cdot 10^{-10} \text{ см}^{-1}$, полученная фотометрированием развертки спектра. Видно, что при $t = 60 \text{ мс}$ глубина провала составляет 50%. Таким образом, в результате подавления процессов нелинейного взаимодействия мод нам удалось получить стабильный режим генерации отдельных мод и повысить чувствительность внутррезонаторной спектроскопии по крайней мере на порядок, то есть с помощью такого стабилизированного лазера можно измерять линии поглощения с коэффициентом поглощения 10^{-10} см^{-1} и регистрировать линии с коэффициентом 10^{-11} см^{-1} .

-
1. Yu.M.Aivazjan, V.V.Ivanov, S.A.Kovalenko et. al., Appl. Phys. B **46**, 175 (1988).
 2. В.М.Баев, Т.П.Беликова, Э.А.Свириденков, А.Ф.Сучков, ЖЭТФ, **74**, 43 (1978).
 3. S.J.Harris, J. Chem. Phys. **71**, 4001 (1979).
 4. С.А.Коваленко, С.П.Семин, Д.Д.Топтыгин, Квантовая электроника **18**, 451 (1991).
 5. R.L.Fork, O.E.Martinez, and J.P.Gordon, Opt. Lett., **9**, 150 (1984).