

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОЦЕНКИ ЧАСТОТЫ ЛАЗЕРА НА КРАСИТЕЛЯХ С ЛАМПОВОЙ НАКАЧКОЙ В НЕСЕЛЕКТИВНОМ РЕЗОНАТОРЕ

### Введение

Известно, что в качестве излучателей резонансных лидаров, предназначенных для зондирования верхней атмосферы чаще всего используются перестраиваемые по частоте лазеры на красителях с ламповой накачкой, обладающие большой энергией в импульсе и значительным ресурсом непрерывной работы [1].

Лазеры на красителях обладают высоким коэффициентом усиления, поэтому при рассмотрении процессов, происходящих в АЭ, необходимо учитывать плотность усиленного шума, поскольку последняя может достигать значений, сравнимых с плотностью излучения генерации [2]. Как показывает анализ теоретических и экспериментальных работ, посвященных данной проблеме, именно усиленный радиационный шум наиболее существенно влияет на энергетические характеристики лазеров на красителях с ламповой накачкой.

Под термином “усиленный радиационный шум” принято считать неаксиальное излучение, совершающее не более одного прохода в АЭ, поэтому селективные элементы резонатора практически не участвуют в формировании его спектральных характеристик. Интенсивность радиационного шума зависит от коэффициента усиления активной среды и его средней частоты, которая соответствует частоте излучения лазера с неселективным резонатором.

Разработка эффективных лазерных излучателей, оптимизированных по различным качественным критериям, требует удобных для практического использования формул. Основными задачами работы являлись уточнение физической модели процессов определяющих частоту усиленного радиационного шума и получение аналитических соотношений для расчетов.

### Теоретические оценки частоты излучения лазера с неселективным резонатором

Известно, что частота излучения лазера на красителе с резонатором, не обладающим дисперсией, определяется положением максимума спектрального коэффициента усиления  $\alpha(\nu)$  [3]

$$\alpha(\nu) = \sigma_{10}(\nu) \cdot n_1 - \sigma_t \cdot n_t - \sigma_{01}(\nu) \cdot n_0, \quad (1)$$

где  $\nu$  – частота излучения;  $\sigma_{10}(\nu), \sigma_{01}(\nu)$  – соответственно сечения вынужденного излучения и поглощения на частоте излучения;  $\sigma_t$  – сечение триплет- триплетного поглощения;  $n_0, n_1, n_t$  – населенности соответственно основного, возбужденного и триплетного уровней.

Поглощение в триплетном канале для простоты предполагаем не зависящем от частоты, поскольку скорость изменения  $\sigma_t$  от частоты примерно на порядок ниже, чем  $\sigma_{10}$  и  $\sigma_{01}$ .

При изменении потерь в резонаторе или концентрации красителя частота генерации меняется, т. е. происходит самонастройка генератора. Значение частоты настройки очевидно можно определить из условия

$$\frac{\partial \alpha}{\partial \nu} = 0. \quad (2)$$

Уравнение, позволяющее определить частоту генерации, получено в неявном виде в работе [2] и имеет вид

$$\frac{q(\nu) \cdot \exp \left[ -4 \cdot \ln(2) \cdot \left( \frac{\nu - \nu_f}{\Delta \nu} \right)^2 \right] - \mu \cdot (1 + q(\nu)) \cdot \frac{\sigma_t}{\sigma_{10}^{\max}}}{\exp \left[ \frac{h \cdot (\nu_{эл} - \nu)}{kT} \right] + (1 + \nu) \cdot (1 + q(\nu))} = \frac{k_n}{n \cdot \sigma_{10}^{\max}}, \quad (3)$$

где  $q(\nu)$  определяется выражением

$$q(\nu) = h \cdot (\Delta \nu)^2 / [8 \cdot kT \cdot \ln(2) \cdot (\nu_f - \nu)], \quad (4)$$

где  $h$  – постоянная планка;  $\nu_f$  – частота максимума зависимости  $\sigma_{10}(\nu)$ ;  $\Delta \nu$  – полуширина контура  $\sigma_{10}(\nu)$ ;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – температура

При выводе уравнения (3) использовались следующие приближенные соотношения для частотных зависимостей сечений поглощения  $\sigma_{01}(\nu)$  и вынужденного излучения  $\sigma_{10}(\nu)$ :

$$\sigma_{10}(\nu) = \sigma_{10}^{\max} \cdot \exp \left[ -4 \cdot \ln(2) \cdot \left( \frac{\nu - \nu_f}{\Delta \nu} \right)^2 \right], \quad (5)$$

$$\sigma_{01}(\nu) = \sigma_{10}(\nu) \cdot \exp [h \cdot (\nu - \nu_{эл}) / kT], \quad (6)$$

где  $\nu_{эл}$  – частота электронного перехода.

Расчеты проводились в широком интервале изменений  $k_n/n$  ( $k_n$  – коэффициент потерь резонатора,  $n$  – концентрация красителя). Было установлено, что частота меняется почти линейно от  $\ln(k_n/n)$  в диапазоне изменения  $k_n/n$  по крайней мере от  $10^{-16} \text{ см}^2$  до  $10^{-20} \text{ см}^2$ . Необходимо отметить, что точность аппроксимации зависимости  $\sigma_{10}(\nu)$  можно повысить, если уменьшить частотный диапазон. Расчеты, проведенные с использованием уравнения (3), показывают, что при невысоких значениях концентрации красителя возможный диапазон изменения  $k_n/n$  лежит в пределах  $10^{-17} \div 10^{-19} \text{ см}^2$ , что соответствует изменению частоты “самонастройки” для красителя родамин 6Ж в пределах  $(4,95 \div 5,1) \cdot 10^{14} \text{ Гц}$ . В этом случае большая точность аппроксимации достигается при несколько иных значениях параметров функции Гаусса, чем тех, которые использовались авторами работы [2] для расширенного частотного диапазона. Аппроксимация частотной зависимости  $\sigma_{10}(\nu)$ , представленной в работе [4] по методу наименьших квадратов в указанном частотном диапазоне минимизирует ошибку при  $\Delta \nu = 0,69 \cdot 10^{14} \text{ Гц}$  и  $\sigma_{10}^{\max} = 1,88 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$ .

Для получения зависимости частоты генерации в явном виде от  $k_n/n \sigma_{10}^{\max}$  воспользуемся разложением функции (5) в ряд Тейлора вблизи некоторой средней частоты генерации  $\nu_0$ . Тогда ограничиваясь двумя членами разложения функцию  $\sigma_{01}(\nu)$  можно представить в виде

$$\sigma_{10}(\nu) = \sigma_{10}^{\max} \cdot [a + b \cdot (\nu - \nu_0)], \quad (7)$$

где введены обозначения

$$a = \exp \left[ -4 \cdot \ln(2) \cdot \left( \frac{\nu_0 - \nu_f}{\Delta \nu} \right)^2 \right], \quad (8)$$

$$b = 8 \cdot \ln(2) \cdot \frac{v_f - v_0}{(\Delta v)^2} \cdot \exp \left[ -4 \cdot \ln(2) \cdot \left( \frac{v_0 - v_f}{\Delta v} \right)^2 \right] \quad (9)$$

Принимая во внимание, что  $q(v) \gg 1$  и с учетом (7), выражение (3) можно переписать в виде

$$\exp \left[ \frac{h \cdot (v_{эл} - v)}{kT} \right] = \frac{q(v) \cdot \sigma_{10}^{\max}}{(k_n/n)} \cdot \left[ a + b \cdot (v - v_0) - \mu \cdot \frac{\sigma_t}{\sigma_{10}^{\max}} - \frac{k_n \cdot (1 + \mu)}{\sigma_{10}^{\max} \cdot n} \right]. \quad (10)$$

Пренебрегая последним членом в квадратных скобках правой части последнего выражения и подставляя (4), получим

$$\begin{aligned} \frac{h \cdot (v_{эл} - v)}{kT} = & \ln \left[ \frac{c \cdot h \cdot \Delta v \cdot 10^2}{d \cdot 8 \cdot kT \cdot \ln(2)} \right] + \ln \left\{ d \cdot \left[ a + b \cdot (v - v_0) - \frac{\mu \cdot \sigma_t}{\sigma_{10}^{\max}} \right] \right\} - \\ & - \ln \left[ \frac{c \cdot (v_f - v)}{\Delta v} \right] - \ln \left( \frac{k_n}{n \cdot \sigma_{10}^{\max}} \cdot 10^2 \right), \end{aligned} \quad (11)$$

где обозначены

$$d = \left( a - \frac{\mu \cdot \sigma_t}{\sigma_{10}^{\max}} \right)^{-1}, \quad c = \left( \frac{v_f - v_0}{\Delta v} \right)^{-1}. \quad (12)$$

Используя разложение вида  $\ln(x) = x - 1$  вблизи единичного значения аргумента (для выражений под знаком  $\ln$ , содержащих  $v$ ), решаем уравнение (11) относительно частоты

$$v = \frac{\Delta v \cdot \left[ A + \ln \left( \frac{k_n}{n \cdot \sigma_{10}^{\max}} \cdot 10^2 \right) \right]}{\frac{h \cdot \Delta v}{kT} + b \cdot d \cdot \Delta v + c}, \quad (13)$$

где введено обозначение

$$A = \frac{h \cdot v_{эл}}{kT} + d \cdot b \cdot v_0 + \frac{c \cdot v_f}{\Delta v} + \frac{d \cdot \mu \cdot \sigma_t}{\sigma_{10}^{\max}} - a \cdot d - \ln \left( \frac{c \cdot h \cdot \Delta v \cdot 10^2}{8 \cdot d \cdot kT \cdot \ln 2} \right). \quad (14)$$

Выражение (13) можно преобразовать к виду

$$v = v_c + f \cdot \ln \left( \frac{k_n}{n \cdot \sigma_{10}^{\max}} \cdot 10^2 \right), \quad (15)$$

где введены обозначения

$$f = \frac{\partial v}{\partial \left[ \ln \left( \frac{k_n}{n} \right) \right]} = \frac{\Delta v}{\frac{h \cdot \Delta v}{kT} + b \cdot d \cdot \Delta v + c}, \quad v_c = \frac{A \cdot \Delta v}{\frac{h \cdot \Delta v}{kT} + b \cdot d \cdot \Delta v + c} \quad (16)$$

Значение частоты  $v_c$  соответствует условию  $k_n/n \sigma_{10}^{\max} = 10^{-2}$ .

В качестве примера получим численные оценки частоты излучения для лазера на красителе родамин 6Ж, используемого в лидарных исследованиях примесей натрия в верхней атмосфере. Для этого подставим в выражения (8), (9), (12), (14) и (16) спектральные параметры красителя:  $\nu_{эл} = 5,45 \cdot 10^{14} \text{ Гц}$ ;  $\nu_f = 5,26 \cdot 10^{14} \text{ Гц}$ ;  $\nu_0 = 5,04 \cdot 10^{14} \text{ Гц}$ ;  $\sigma_t = 0,4 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$ ;  $\mu = k_{st} \cdot \tau_t = 0,85$ ;  $\sigma_{10}^{\max} = 1,88 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$ ;  $\Delta\nu = 0,69 \cdot 10^{14} \text{ Гц}$ .

В результате, используя (15), получим относительно простое выражение для расчета частоты излучения лазера на красителе родамин 6Ж

$$\nu = \left[ 5,073 + 0,041 \cdot \ln \left( \frac{k_{\bullet}}{n \cdot \sigma_{10}^{\max}} \cdot 10^2 \right) \right] \cdot 10^{14} \text{ Гц}, \quad (17)$$

или в длинах волн

$$\lambda = \left[ 591 - 4,8 \cdot \ln \left( \frac{k_n}{n \cdot \sigma_{10}^{\max}} \cdot 10^2 \right) \right] \text{ нм}. \quad (18)$$

Различия в значениях частоты, рассчитанной по формуле (17), и численными методами с использованием выражения (3) составляют доли процента в практически важном диапазоне частот  $(4,95 \div 5,1) \cdot 10^{14} \text{ Гц}$ . Полученные результаты удовлетворительно согласуются с экспериментальными измерениями.

### Выводы

Получены аналитические соотношения для оценки частоты излучения лазера с неселективным резонатором. Численные оценки, полученные для красителя родамин 6Ж, показывают незначительное отличие результатов расчета частоты с помощью полученных соотношений от аналогичных расчетов, полученных более точными численными методами. Результаты работы могут быть использованы для расчета интенсивности усиленного шума и энергетического расчета лазера [5].

**Список литературы:** 1. Гарднер, Ч.С. Применение лидара на резонансной флюоресценции натрия в атмосферных исследованиях и астрономии // ТИИЭР. – 1989. – Т.77, №3. – С.44-56. 2. Николаев, С.В., Коробов, А.М. Влияние усиленного радиационного шума на энергетические характеристики перестраиваемых лазеров на красителях. – Харьков, 1987. – 20с. (Препринт / АН УССР.-ИРЭ.-№356). 3. Анохов, С.П., Марусий, Т.Я., Соскин, М.С. Перестраиваемые лазеры. – М. : Радио и связь, 1982. – 360с. 4. Лазеры на красителях / Под ред. Ф.П. Шеффера ; пер. с англ. под ред. Л.Д. Деркачевой. – М. : Мир, 1976. – 329с. 5. Басецкий, В.А., Зарудный, А.А. Модель генерационных характеристик излучателя резонансного лидара // Радиотехника. – 2010. Вып 160. – С.124 – 129.

Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 11.08.2014