

Исследование параметров одновременной генерации на двух линиях, имеющих общий верхний уровень

А.А.Пикулев

Исследована стационарная генерация на двух конкурирующих линиях, имеющих общий верхний уровень. На основе выражений для коэффициентов усиления, полученных ранее, рассмотрены возможные режимы генерации (на одной или двух линиях) и построены приближённые формулы для определения мощности генерации на каждой линии. Показано, что полученные формулы являются обобщением формулы Ригрода на случай одновременной генерации на нескольких линиях.

Ключевые слова: конкуренция линий генерации, коэффициент усиления, стационарная генерация, формула Ригрода.

1. Введение

Явление конкуренции двух и более генерационных линий, имеющих общий верхний уровень, хорошо известно и достаточно широко описано в литературе, посвящённой экспериментальным исследованиям генерации на переходах инертных газов при накачке среды как осколками деления урана, так и электронным пучком [1–4]. Несмотря на это, явление конкуренции до настоящего времени было недостаточно изучено теоретически. В работе [5] на основе трёхуровневой модели плазменного лазера было получено выражение для коэффициентов усиления при одновременной генерации на нескольких линиях. Исследование, проведённое в [5], показало, что при стационарной генерации существуют два качественно различных случая взаимодействия двух конкурирующих линий – симбиоз и гашение. В случае симбиоза мощность генерации на обеих линиях монотонно возрастает с повышением мощности накачки. Режим гашения характеризуется тем, что генерация на линии с более высоким порогом гасит (иногда полностью) первую линию, генерация на которой начинается раньше.

Хотя в настоящее время широкое распространение получили численные методы исследования, которые позволяют рассчитать параметры одновременной генерации на любом количестве лазерных переходов, такой подход не всегда применим. Это связано с тем, что для большинства газовых смесей константы плазмохимических процессов, а также радиационные параметры многих уровней и лазерных переходов неизвестны или известны лишь приблизительно, и произвести достаточно достоверные расчёты параметров генерации во многих случаях не представляется возможным. Поэтому весьма актуальным является решение обратной задачи: найти характеристики активной среды при известных параметрах генерации, полученных в эксперименте.

Для этого желательно иметь приближённые формулы, связывающие параметры резонатора, активной среды и мощности генерации на каждой линии. В случае одной генерационной линии такие формулы предложены в работах [6, 7]. Эти формулы (особенно формула Ригрода [6]) широко используются для определения параметров активной среды по результатам измерений мощности генерации.

Настоящая работа посвящена исследованию вопроса определения параметров стационарной генерации на двух конкурирующих линиях, имеющих общий верхний уровень. Основное внимание уделено вопросу определения режима генерации (на одной или двух линиях) и построению приближённых формул для мощности генерации.

2. Основные соотношения

Рассмотрим стационарную генерацию на двух конкурирующих линиях, имеющих общий верхний уровень. Верхний рабочий уровень обозначим цифрой 1, а нижние – буквами i и j . В работе [5] показано, что коэффициент усиления на переходе $1 \rightarrow i$ можно найти по формуле

$$\alpha_i = \frac{\alpha_i^0 + \beta_{ij} I_j}{1 + (I_i^s)^{-1} I_i + (I_j^s)^{-1} I_j + \delta I_i I_j}, \quad (1)$$

где α_i^0 – коэффициент начального усиления; I_i^s, I_j^s – параметры насыщения; δ – взаимный коэффициент насыщения; β_{ij} – параметр конкуренции. Для получения выражения для коэффициента усиления на переходе $1 \rightarrow j$ в формуле (1) нужно произвести замену $i \leftrightarrow j$. Введём следующие обозначения:

$$I_j^0 = -\alpha_i^0 (\beta_{ij})^{-1}, \quad I_i^0 = -\alpha_j^0 (\beta_{ji})^{-1}. \quad (2)$$

Из (1) и (2) следует, что при $I_j = I_j^0$ коэффициент усиления $\alpha_i = 0$, поэтому I_i^0 и I_j^0 можно назвать «интенсивностями нулевого усиления».

Для случая стационарной генерации в одномерном приближении интенсивность излучения I_i во внутренней

Российский федеральный ядерный центр – ВНИИЭФ, 607190 Саров, Нижегород. обл., просп. Мира, 37; e-mail: pikulev@expd.vniief.ru

Поступила в редакцию 8 ноября 2001 г., после доработки – 10 июля 2002 г.

области резонатора описывается следующими уравнениями [6–9] (излучение распространяется вдоль оси z):

$$\frac{dI_i^+}{dz} = (\alpha_i - \rho_i)I_i^+, \quad \frac{dI_i^-}{dz} = -(\alpha_i - \rho_i)I_i^-, \quad I_i = I_i^+ + I_i^-, \quad (3)$$

где ρ_i – коэффициент распределённых потерь; I_i^+ – интенсивность электромагнитной волны, бегущей слева направо, а I_i^- – справа налево. Обозначим коэффициенты отражения левого и правого зеркал резонатора для излучения на переходе $1 \rightarrow i$ через r_{1i} и r_{2i} соответственно. Будем считать, что левый конец резонатора расположен в точке $z = 0$, а правому соответствует точка $z = L$, где L – длина резонатора. Уравнения (3) интегрируются при стандартных граничных условиях.

Для случая стационарной генерации выполняются соотношения [7]

$$\langle \alpha_i \rangle = \langle \rho_i \rangle + \frac{1}{2L} \ln \frac{1}{r_{1i}r_{2i}} = k_i, \quad \langle \alpha_j \rangle = \langle \rho_j \rangle + \frac{1}{2L} \ln \frac{1}{r_{1j}r_{2j}} = k_j, \quad (4)$$

где k_i, k_j – коэффициенты полных потерь; $\langle \dots \rangle$ – усреднение по длине оптического резонатора. Можно показать, что внутри резонатора существуют две точки z_i^*, z_j^* , такие, что система (4) с учётом соотношений (1), (2) принимает вид

$$\frac{\langle \alpha_i^0 \rangle [1 - I_j^*(I_j^0)^{-1}]}{1 + I_i^*(I_i^0)^{-1} + I_j^*(I_j^0)^{-1} + \delta I_i^* I_j^*} = k_i, \quad \frac{\langle \alpha_j^0 \rangle [1 - I_i^*(I_i^0)^{-1}]}{1 + I_i^*(I_i^0)^{-1} + I_j^*(I_j^0)^{-1} + \delta I_i^* I_j^*} = k_j, \quad (5)$$

где $I_i^* = I_i(z_i^*), I_j^* = I_j(z_j^*)$ – «действующие интенсивности». Для того чтобы представление (5) имело место, необходимо, чтобы в пределах резонатора знак начальных коэффициентов усиления был постоянным. При наличии накачки это условие выполняется.

Из системы (5) получаем следующее соотношение:

$$I_j^* = I_j^0 \left(1 - \frac{\langle \alpha_j^0 \rangle k_i}{\langle \alpha_i^0 \rangle k_j} \right) + \frac{\langle \alpha_j^0 \rangle k_i I_j^0}{\langle \alpha_i^0 \rangle k_j I_i^0} I_i^*. \quad (6)$$

Ниже будем считать, что линия $1 \rightarrow i$ обладает более низким порогом, чем $1 \rightarrow j$, т.е. $\langle \alpha_i^0 \rangle k_j > \langle \alpha_j^0 \rangle k_i$. При выполнении этого условия выражение в круглых скобках в формуле (6) положительно. Введём обозначения

$$I_j^{cr} = I_j^0 \left(1 - \frac{\langle \alpha_j^0 \rangle k_i}{\langle \alpha_i^0 \rangle k_j} \right), \quad \varepsilon_{ij} = \frac{1}{\varepsilon_{ij}} = \frac{\langle \alpha_j^0 \rangle k_i I_j^0}{\langle \alpha_i^0 \rangle k_j I_i^0} = \frac{\langle \beta_{ji} \rangle k_i}{\langle \beta_{ij} \rangle k_j}, \quad (7)$$

где I_j^{cr} – критическая интенсивность линии $1 \rightarrow j$, при достижении которой генерация на линии $1 \rightarrow i$ прекращается [5]. Выражение для I_i^{cr} получается перестановкой в (7) индексов $i \leftrightarrow j$.

Обратимся к задаче вычисления интенсивностей I_i^* и I_j^* . Для случая генерации на одной линии получаем

$$I_i^{*(1)} = I_i^0 \frac{\langle \alpha_i^0 \rangle - k_i}{k_i}, \quad I_j^{*(1)} = I_j^0 \frac{\langle \alpha_j^0 \rangle - k_j}{k_j}, \quad (8)$$

где $I_i^{*(1)}, I_j^{*(1)}$ – «действующие интенсивности» при генерации на одной линии.

В случае генерации на двух линиях для вычисления интенсивностей I_i^*, I_j^* нужно решить систему (5). Подставив соотношение (6) во второе уравнение системы (5), получим квадратное уравнение

$$A_{ij}(I_i^*)^2 + B_{ij}I_i^* + C_{ij} = 0, \quad (9)$$

где

$$A_{ij} = \delta k_j \varepsilon_{ji}; \quad B_{ij} = k_j \left(\frac{1}{I_i^0} + \frac{\varepsilon_{ji}}{I_j^0} + \delta I_j^{cr} \right) - \langle \beta_{ji} \rangle; \quad C_{ij} = k_j \left(1 + \frac{I_j^{cr}}{I_j^0} \right) - \langle \alpha_j^0 \rangle. \quad (10)$$

Если $(B_{ij})^2 \geq 4A_{ij}C_{ij}$, решения уравнения (10) имеют вид

$$I_i^* = \frac{-B_{ij} \pm [(B_{ij})^2 - 4A_{ij}C_{ij}]^{1/2}}{2A_{ij}}, \quad I_j^* = I_j^{cr} + \varepsilon_{ji}I_i^*. \quad (11)$$

При $\langle \alpha_i^0 \rangle k_j > \langle \alpha_j^0 \rangle k_i$ возможны только два варианта, когда может наблюдаться генерация на двух линиях одновременно [5]:

1. Линия $1 \rightarrow j$ гасит линию $1 \rightarrow i$, т.е. $I_j^0 > 0, I_i^0 < 0$. В этом случае при превышении порога $\langle \alpha_i^0 \rangle > k_i$ возникает генерация на линии $1 \rightarrow i$, затем, при $I_i^* > I_i^{cr}$, – генерация на линии $1 \rightarrow j$, которая приводит к снижению интенсивности генерации линии $1 \rightarrow i$, и для $I_j^* > I_j^{cr}$ генерация на линии $1 \rightarrow i$ полностью прекращается. В формуле (11) берём знак минус.

2. Линии $1 \rightarrow i$ и $1 \rightarrow j$ находятся в симбиозе, т.е. $I_i^0 < 0, I_j^0 < 0$. Если $\langle \alpha_i^0 \rangle > k_i$, возникает генерация на линии $1 \rightarrow i$, затем, при $I_i^* > I_i^{cr}$, – генерация на линии $1 \rightarrow j$; далее наблюдается пропорциональный рост интенсивности генерации на обеих линиях. В формуле (11) берём знак плюс.

Эти два случая изображены на рис.1. На основе рис.1 построены табл.1, 2, в которых отмечены участки, где ге-

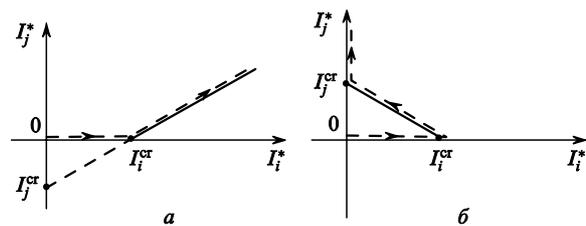


Рис.1. Диаграммы генерации на двух линиях в случае симбиоза (а) и гашения (б) (стрелками показано изменение действующих значений интенсивности генерации при параметрическом увеличении мощности накачки).

Табл.1. Области генерационной диаграммы при симбиозе.

Линия	$0 < I_i^* < I_i^{cr}$	$I_i^* > I_i^{cr}$
$1 \rightarrow i$	генерация	генерация
$1 \rightarrow j$	нет генерации	генерация

Табл.2. Области генерационной диаграммы в случае гашения (линия $1 \rightarrow j$ гасит линию $1 \rightarrow i$).

Линия	$0 < I_i^* < I_i^{cr}$	$I_i^* > I_i^{cr}, I_j^* < I_j^{cr}$	$I_i^* > I_i^{cr}, I_j^* > I_j^{cr}$
$1 \rightarrow i$	генерация	генерация	нет генерации
$1 \rightarrow j$	нет генерации	генерация	генерация

нерация происходит на одной линии или на двух линиях одновременно.

3. Приближённые формулы для интенсивности генерации

Для построения приближённых формул с целью определения интенсивности генерации используем два следующих приближения:

1. Распределение интенсивности излучения во внутренней области резонатора аппроксимируем цепной линией, для чего в уравнениях (3) полагаем $\alpha_i \simeq \langle \alpha_i \rangle$, $\alpha_j \simeq \langle \alpha_j \rangle$; после этого выражаем интенсивность генерации через среднюю интенсивность излучения на каждой линии.

2. В полученных формулах производим замену $\langle I_i \rangle \simeq I_i^*$, $\langle I_j \rangle \simeq I_j^*$.

В соответствии с первым приближением в формулах (3) положим $\alpha_i \simeq \langle \alpha_i \rangle$, $\rho_i \simeq \langle \rho_i \rangle$; тогда для интенсивности излучения на линии $1 \rightarrow i$ получим

$$I_i(z) \simeq I_i^+(0) \left[\exp(\langle \alpha_i \rangle z - \langle \rho_i \rangle z) + \frac{\exp(-\langle \alpha_i \rangle z - \langle \rho_i \rangle z)}{r_{1i}} \right]. \quad (12)$$

Для усреднённой по длине резонатора интенсивности излучения найдем

$$\langle I_i \rangle \simeq -\frac{I_i^+(0)}{\ln(r_{1i}r_{2i})^{1/2}} \frac{1 - (r_{1i}r_{2i})^{1/2}}{(r_{1i}r_{2i})^{1/2}} \left[1 + \left(\frac{r_{2i}}{r_{1i}} \right)^{1/2} \right]. \quad (13)$$

Используя второе приближение, для суммарной интенсивности генерации на выходе из резонатора получим следующее выражение:

$$I_i^{\text{out}} \simeq -I_i^* \ln(r_{1i}r_{2i})^{1/2}. \quad (14)$$

Интенсивность излучения, выходящего из левого и правого концов генератора, есть соответственно

$$I_{1i}^{\text{out}} \simeq -\frac{I_i^* \ln(r_{1i}r_{2i})^{1/2}}{1 - (r_{1i}r_{2i})^{1/2}} \frac{(r_{1i}r_{2i})^{1/2}(1 - r_{1i})}{r_{1i} + (r_{1i}r_{2i})^{1/2}}, \quad (15)$$

$$I_{2i}^{\text{out}} \simeq -\frac{I_i^* \ln(r_{1i}r_{2i})^{1/2}}{1 - (r_{1i}r_{2i})^{1/2}} \frac{r_{1i}(1 - r_{2i})}{r_{1i} + (r_{1i}r_{2i})^{1/2}},$$

где нижние индексы 1 и 2 относятся к излучению, выходящему из левого и правого зеркал резонатора соответственно. При подстановке в формулы (15) интенсивности $I_i^{*(1)}$ (8) получим известные формулы Ригрода для

случая генерации на одной линии [6]. Отметим, что Ригрод получил свои формулы, используя точное решение системы дифференциальных уравнений (3). Для линии $1 \rightarrow j$ следует провести ту же процедуру (перестановка индексов $i \leftrightarrow j$) с формулами (8) и (15).

4. Заключение

Данная работа посвящена определению мощности стационарной генерации на двух конкурирующих линиях, имеющих общий верхний уровень. Основой исследования являются выражения для коэффициентов усиления при одновременной генерации на двух линиях, полученные в [5]. Основное внимание уделено вопросу определения режима генерации (на одной или двух линиях) и построению приближённых формул для мощности генерации на каждой линии.

Показано, что введение понятия «действующей интенсивности» позволяет обобщить результаты работ, посвящённых построению приближённых формул для определения параметров генерации на одной линии, на случай одновременной генерации на двух и более линиях. Рассмотрены различные случаи генерации для конкуренции двух линий в режиме симбиоза и гашения. Построены формулы для нахождения «действующих интенсивностей» и разработана методика определения типа генерации (одновременная генерация на двух линиях или на одной линии). Анализ показывает, что в качестве границ диапазонов типов генерации выступают введённые в работе [5] критические интенсивности излучения.

Построены формулы для определения интенсивности генерации на двух линиях, которые являются обобщением формулы Ригрода для случая генерации на одной линии.

Автор выражает благодарность С.П.Мельникову за полезные обсуждения и помощь, оказанную в работе.

1. Конак А.И., Мельников С.П., Порхаев В.В., Синянский А.А. *Квантовая электроника*, **22**, 225 (1995).
2. Воинов А.М., Конак А.И., Мельников С.П., Синянский А.А. *Квантовая электроника*, **18**, 1297 (1991).
3. Заярный Д.А., Холин И.В. *Квантовая электроника*, **22**, 887 (1995).
4. Suda A., Wexler B.L., Feldman B.J., Riley K.J. *Appl. Phys. Lett.*, **54**, 1305 (1989).
5. Пикулев А.А. *Квантовая электроника*, **30**, 675 (2000).
6. Rigrod W.W. *IEEE J. Quantum Electron.*, **14**, 377 (1978).
7. Степанов Б.И. *Методы расчёта оптических квантовых генераторов* (Минск: Наука и техника, 1966, т.1).
8. Schindler G.M. *IEEE J. Quantum Electron.*, **16**, 546 (1980).
9. Eimerl D.J. *Appl. Phys.*, **51**, 3008 (1980).