

# Конкуренция генерационных линий в газовых лазерах

А.А.Пикулев

Рассмотрена одновременная генерация на двух линиях, имеющих общий верхний рабочий уровень. В рамках двухуровневой модели получена формула для коэффициента усиления на каждой линии. Найдено, что конкуренция может быть двух типов: симбиоз и гашение. Показано, что конкуренция в режиме гашения может использоваться для исследования скоростей заселения нижних уровней. Полученные результаты проиллюстрированы диаграммами конкуренции линий с  $\lambda = 2.65$  и  $2.03$  мкм атома Хе для смеси Ar–Хе и линий с  $\lambda = 703.2$  и  $724.5$  нм атома Не для смеси Ne–Ar.

**Ключевые слова:** газовые лазеры, линии генерации, симбиоз, гашение линий.

## Введение

В ряде экспериментов по изучению генерации при возбуждении лазерно-активной среды газовым разрядом, электронным пучком или продуктами ядерных реакций наблюдается одновременная генерация на двух линиях, имеющих общий верхний уровень. При этом существуют два качественно различных случая взаимодействия двух конкурирующих линий: мощность генерации на обеих линиях монотонно возрастает с повышением мощности накачки или генерация на линии с более высоким порогом гасит (иногда полностью) первую линию, генерация на которой начинается раньше.

Иллюстрацией первого случая может служить эксперимент [1], в котором при возбуждении смеси Ne–Ar ( $p_{\text{Ne}} = 1$  атм,  $p_{\text{Ar}} = 28$  Тор) осколками деления урана наблюдалась генерация на двух линиях с  $\lambda = 724.5$  и  $703.2$  нм атома Не. Мощность генерации для обеих линий монотонно возрастала с повышением мощности накачки (рис.1,а). В эксперименте [2] при возбуждении смеси Ar–Хе ( $p_{\text{Ar}} = 0.5$  атм,  $p_{\text{Хе}} = 3.8$  Тор) осколками деления урана была получена генерация на линиях с  $\lambda = 2.03$  и  $1.73$  мкм, причем генерация на линии с  $\lambda = 2.03$  мкм, имеющей более низкий порог, полностью прекращалась после развития генерации на линии с  $\lambda = 1.73$  мкм.

Аналогичная картина наблюдалась для линий с  $\lambda = 2.03$  и  $2.65$  мкм атома Хе при возбуждении смеси Ar–Хе ( $p_{\text{Ar}} = 0.25$  атм,  $p_{\text{Хе}} = 1.9$  Тор), причем гасящей являлась линия с  $\lambda = 2.65$  мкм [3] (рис.1,б). Подобные результаты были получены также при накачке смеси Ar–Хе электронным пучком [4, 5].

Цель настоящей работы – классификация типов конкуренции двух генерационных линий в общем виде, без решения вопроса о механизмах заселения верхнего и нижних рабочих уровней. Такая классификация логично вытекает из выражения для коэффициента усиления при

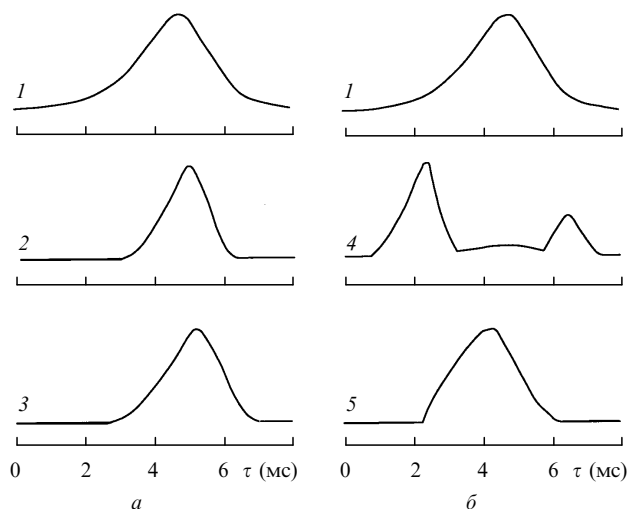


Рис.1. Осциллограммы импульсов накачки (1) и лазерной генерации на линиях с  $\lambda = 724.5$  (2) и  $703.2$  нм (3) атома Не в смеси Ne–Ar ( $p_{\text{Ne}} = 1$  атм,  $p_{\text{Ar}} = 28$  Тор) (а) и на линиях с  $\lambda = 2.03$  (4) и  $2.65$  мкм (5) атома Хе в смеси Ar–Хе ( $p_{\text{Ar}} = 0.25$  атм,  $p_{\text{Хе}} = 1.9$  Тор) (б).

одновременной генерации на двух линиях. Предложенный подход позволяет сделать выводы качественного характера и получить некоторые количественные оценки.

## 1. Кинетические уравнения

Рассмотрим  $N$  энергетических уровней: 1 – общий верхний рабочий уровень (ВРУ); 2, 3, ...,  $N$  – нижние рабочие уровни (НРУ). Расположение уровней показано на рис.2. Используем такие обозначения:  $g_1, g_2, \dots, g_N$  – кратности вырождения уровней;  $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_N$  – времена жизни уровней;  $A_{12}, A_{13}, \dots, A_{1N}$  – вероятности спонтанного перехода  $1 \rightarrow i$ ;  $R_1, R_2, \dots, R_N$  – скорости заселения рабочих уровней. В модели будем учитывать следующие процессы: заселение ВРУ и НРУ из континуума со скоростями  $R_i$ ; спонтанные переходы  $1 \rightarrow i$ ; вынужденные переходы  $1 \leftrightarrow i$ ; столкновительное тушение уровней. Предполагаем, что нижние уровни радиационно не связаны. В связи с симметричностью всех формул по индексам  $2 - N$

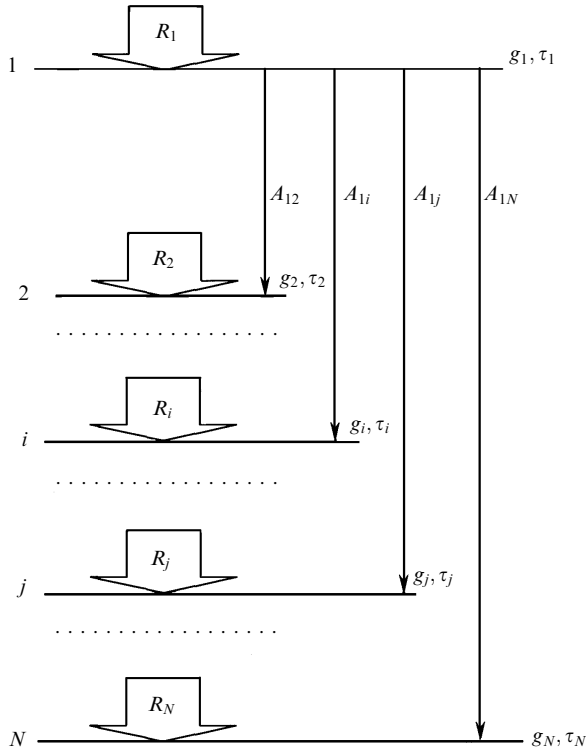


Рис.2. Схематическое расположение энергетических уровней.

можно производить замену  $i \leftrightarrow j$  ( $i \neq j = 2, 3, \dots, N$ ). При дальнейшем анализе все процессы, происходящие в плазме, будем считать стационарными. Это предположение довольно хорошо выполняется для лазеров с ядерной накачкой [1–3], поскольку характерные времена плазмохимических реакций ( $\tau_{pc} < 10$  мкс) значительно меньше длительности импульса накачки ( $\tau_p \sim 1$  мс).

Коэффициент усиления на переходе  $1 \rightarrow i$  можно определить по формуле [6]

$$\alpha_{1i} = \sigma_{1i} \left( n_1 - \frac{g_1}{g_i} n_i \right), \quad \sigma_{1i} = \frac{c^2 A_{1i}}{4\pi^2 v_{1i}^2 \Delta v_{1i}}, \quad (1)$$

где  $\sigma_{1i}$  – сечение вынужденного перехода  $1 \rightarrow i$ ;  $n_1, n_i$  – населенности ВРУ и НРУ;  $c$  – скорость света;  $v_{1i}, \Delta v_{1i}$  – частота и лоренцевская ширина линии излучения перехода  $1 \rightarrow i$ . Кинетические уравнения для населенностей уровней имеют следующий вид:

$$R_1 - \frac{n_1}{\tau_1} - \sum_{i=2}^N \gamma_{1i} I_{1i} \left( n_1 - \frac{g_1}{g_i} n_i \right) = 0, \quad \gamma_{1i} = \frac{\sigma_{1i}}{h\nu_{1i}}, \quad (2)$$

$$R_i - \frac{n_i}{\tau_i} + \gamma_{1i} I_{1i} \left( n_1 - \frac{g_1}{g_i} n_i \right) + A_{1i} n_1 = 0, \quad i = 2, 3, \dots, N,$$

где  $I_{1i}$  – интенсивность излучения;  $h$  – постоянная Планка.

Для коэффициента усиления на линии перехода  $1 \rightarrow i$  получаем формулу

$$\alpha_{1i} = \frac{\alpha_{1i}^0 + \sum_{j=2, j \neq i}^N \beta_{ij} I_{1j} + \dots + \mu_i \prod_{j=2, j \neq i}^N I_{1j}}{1 + \sum_{j=2}^N (I_{1j}^s)^{-1} I_{1j} + \sum_{j=2}^N \sum_{k>j}^N \delta_{jk} I_{1j} I_{1k} + \dots + \varepsilon \prod_{j=2}^N I_{1j}}, \quad (3)$$

где  $\alpha_{1i}^0$  – коэффициент начального усиления;  $I_{1j}^s$  – параметр насыщения. Эти и остальные параметры  $\beta_{ij}, \delta_{jk}, \mu_i, \dots, \varepsilon$

являются коэффициентами разложения соответствующих миноров расширенной матрицы системы (2) в ряд Маклорена по степеням  $I_{1j}$ . Заметим, что числитель выражения (3) не зависит от интенсивности  $I_{1i}$  излучения на переходе  $1 \rightarrow i$ . Коэффициенты знаменателя положительны и симметричны относительно перестановки любых двух двух индексов  $i \leftrightarrow j$  ( $i \neq j = 2, 3, \dots, N$ ). Для коэффициентов числителя такое утверждение несправедливо.

## 2. Коэффициент усиления

В связи с громоздкостью выражения (3) дальнейший анализ будем проводить для одновременной генерации на двух линиях:  $1 \rightarrow i$  и  $1 \rightarrow j$  ( $i \neq j$ ). Коэффициент усиления на переходе  $1 \rightarrow i$  при наличии излучения на конкурирующей линии  $1 \rightarrow j$  имеет вид

$$\alpha_{1i} = \frac{\alpha_{1i}^0 + \beta_{ij} I_{1j}}{1 + (I_{1i}^s)^{-1} I_{1i} + (I_{1j}^s)^{-1} I_{1j} + \delta_{ij} I_{1i} I_{1j}}, \quad (4)$$

где

$$\alpha_{1i}^0 = \sigma_{1i} \left[ \tau_1 R_1 \left( 1 - \tau_i A_{1i} \frac{g_1}{g_i} \right) - \tau_i R_i \frac{g_1}{g_i} \right];$$

$$\beta_{ij} = \sigma_{1i} \gamma_{1j} \frac{g_1}{g_j} \left\{ \tau_1 \tau_j (R_1 + R_j) \left( 1 - \tau_i A_{1i} \frac{g_1}{g_i} \right) - \tau_i R_i \left[ \tau_j \left( 1 - \tau_1 A_{1j} \right) \frac{g_1}{g_i} + \tau_1 \frac{g_j}{g_i} \right] \right\}; \quad (5)$$

$$\frac{1}{I_{1i}^s} = \gamma_{1i} \left[ \tau_i \left( 1 - \tau_1 A_{1i} \right) \frac{g_1}{g_i} + \tau_1 \right];$$

$$\delta_{ij} = \gamma_{1i} \gamma_{1j} \frac{g_1^2}{g_i g_j} \left[ \tau_i \tau_j \left( 1 - \tau_1 A_{1i} - \tau_1 A_{1j} \right) + \tau_1 \tau_i \frac{g_j}{g_1} + \tau_1 \tau_j \frac{g_i}{g_1} \right];$$

$\delta_{ij}$  и  $\beta_{ij}$  – взаимный коэффициент насыщения и параметр конкуренции, учитывающие влияние излучения на переходе  $1 \rightarrow j$ . При  $I_{1j} = 0$  из (4) получаем хорошо известную формулу для коэффициента усиления на одной линии [6]. Все остальные коэффициенты получаются из (5) подстановкой  $i \leftrightarrow j$ . Коэффициенты усиления  $\alpha_{1i}$  и  $\alpha_{1j}$  имеют одинаковые знаменатели, причем  $I_{1i}^s > 0, I_{1j}^s > 0, \delta_{ij} = \delta_{ji} > 0$ . Числитель выражения (4) пропорционален скоростям заселения рабочих уровней, а знаменатель от них не зависит и учитывает влияние насыщения.

В одномерном приближении генерация на обеих линиях возможна при  $\alpha_{1i}^0 > k_{1i}$  и  $\alpha_{1j}^0 > k_{1j}$ , где

$$k_{1i} = \rho_{1i} - \frac{\ln(r_{1i}^{(1)} r_{1i}^{(2)})}{2L} \quad (6)$$

– коэффициент полных потерь на переходе  $1 \rightarrow i$  [6];  $\rho_{1i}$  – коэффициент распределенных потерь;  $r_{1i}^{(1)}, r_{1i}^{(2)}$  – коэффициенты отражения зеркал резонатора (на частоте перехода  $1 \rightarrow i$ );  $L$  – активная длина оптического резонатора; для перехода  $1 \rightarrow j$  выражение (6) имеет аналогичный вид. При этом нужно различать четыре случая, которые определяются знаками параметров конкуренции: 1)  $\beta_{ij} > 0, \beta_{ji} > 0$ ; 2)  $\beta_{ij} < 0, \beta_{ji} > 0$ ; 3)  $\beta_{ij} > 0, \beta_{ji} < 0$ ; 4)  $\beta_{ij} < 0, \beta_{ji} < 0$ .

### 3. Варианты конкуренции линий

Обратимся к анализу вариантов конкуренции генерационных линий. Для упрощения рассуждений пренебрежем неоднородностью распределения суммарной интенсивности излучения по объему активной среды, т. е. будем считать, что локальная интенсивность излучения равна средней интенсивности:  $I_{li} = \bar{I}_{li}$ . В условиях стационарной генерации средний коэффициент усиления равен коэффициенту полных потерь [6]:  $\bar{\alpha}_{li} = k_{li}$ . При таких предположениях для генерации на двух линиях справедливо выражение

$$\frac{\bar{\alpha}_{li}}{\bar{\alpha}_{lj}} = \frac{\alpha_{li}^0 + \beta_{ij}I_{lj}}{\alpha_{lj}^0 + \beta_{ji}I_{li}} = \frac{k_{li}}{k_{lj}}. \quad (7)$$

В дальнейшем в качестве скоростей  $R$  заселения НРУ и ВРУ возьмем их средние по длине активной среды значения, а знак усреднения опустим. Кроме того, будем считать, что переход  $1 \rightarrow i$  обладает более низким порогом, чем переход  $1 \rightarrow j$ , т. е.  $k_{lj}\alpha_{li}^0 > k_{li}\alpha_{lj}^0$ . Тогда из (7) получаем

$$\frac{dI_{li}}{dI_{lj}} = \frac{k_{lj}\beta_{ij}}{k_{li}\beta_{ji}}. \quad (8)$$

Отсюда следует, что интенсивности генерации на линиях  $1 \rightarrow i$  и  $1 \rightarrow j$  не являются независимыми. Качественно характер конкуренции должен определяться соотношением между знаками параметров конкуренции  $\beta_{ij}$  и  $\beta_{ji}$ . Рассмотрим различные варианты.

1)  $\beta_{ij} > 0, \beta_{ji} > 0$ . Этот вариант включает в себя частный случай  $R_i = R_j = 0$  и соответствует своеобразному симбиозу генерационных линий: при достаточной мощности накачки генерация происходит одновременно на двух линиях. Следовательно, симбиоз – это режим конкуренции, при котором увеличение интенсивности генерации одной линии сопровождается увеличением интенсивности генерации второй линии; при этом максимумы интенсивностей генерации обеих линий совпадают. С ростом мощности накачки происходит монотонное увеличение интенсивности генерации на каждой линии. Например, одновременная генерация на линиях с  $\lambda = 724.5$  и  $703.2$  нм атома Ne в эксперименте [1] происходит в режиме симбиоза.

2)  $\beta_{ij} < 0, \beta_{ji} > 0$ . Это справедливо, например, при  $\tau_i > 0, \tau_j = 0$ . В этом случае линия  $1 \rightarrow j$  является гасящей по отношению к линии  $1 \rightarrow i$ , поскольку если интенсивность излучения на переходе  $1 \rightarrow j$  достигает критической величины

$$I_{lj}^{cr} = \frac{k_{li}\alpha_{lj}^0 - k_{lj}\alpha_{li}^0}{\beta_{ij}k_{lj}} = \frac{\alpha_{li}^0 - k_{li}}{k_{li} - \beta_{ij}I_{lj}^s} I_{lj}^s, \quad (9)$$

то генерация на линии  $1 \rightarrow i$  полностью прекращается. Точки, в которых  $I_{li} = 0$ , будем называть критическими (рис.1,б).

Таким образом, гашение – это режим конкуренции, при котором увеличение интенсивности генерации на одной линии вызывает уменьшение интенсивности генерации на другой линии и наоборот. С ростом мощности накачки происходит монотонное увеличение интенсивности генерации на линии  $1 \rightarrow j$  и падение интенсивности генерации на линии  $1 \rightarrow i$ . При дальнейшем увеличении

мощности накачки интенсивность  $I_{lj}$  достигает критического значения, и в критической точке генерация на переходе  $1 \rightarrow i$  полностью прекращается. Как следует из формулы (8), максимум интенсивности генерации на одной линии совпадает с минимумом интенсивности на другой линии, выпуклости кривой интенсивности генерации для одной линии соответствует вогнутость кривой для другой линии и т. д. Так, генерация на линиях с  $\lambda = 2.03$  и  $1.73$  мкм (2.65 мкм) атома Xe происходит в режиме гашения: линия с  $\lambda = 1.73$  мкм (2.65 мкм) гасит линию с  $\lambda = 2.03$  мкм [2, 3].

3)  $\beta_{ij} > 0, \beta_{ji} < 0$ . Гасящей является линия  $1 \rightarrow i$ , которая вдобавок имеет более низкий порог. Здесь возможен только один вариант: при достижении порога начинается генерация на переходе  $1 \rightarrow i$ , что делает невозможной генерацию на второй линии.

4)  $\beta_{ij} < 0, \beta_{ji} < 0$ . Обе линии являются гасящими, но результат не отличается от указанного в предыдущем пункте, поскольку генерация на линии  $1 \rightarrow i$  делает невозможной генерацию на второй линии. Отметим, что этот случай, как видно из (5), возможен только при  $g_i \neq g_j$  в очень узких пределах изменения скоростей заселения  $R_1, R_i, R_j$ .

Все вышеизложенное удобно представить на диаграмме конкуренции двух генерационных линий (рис.3). По осям координат отложены относительные скорости заселения НРУ:  $R_i/R_1$  и  $R_j/R_1$ . Если электронное перемешивание уровней незначительно и температура газа изменяется слабо, зависимостью пропорции  $R_j:R_i:R_1$  от мощности накачки можно пренебречь. Приблизительно можно считать, что каждой лазерной смеси, температуре газа и способу накачки соответствует точка на диаграмме конкуренции. Одновременная генерация на двух линиях возможна только в области внутри прямоугольника, ограниченного прямыми  $R_i/R_1 = 0, R_j/R_1 = 0$  и  $\alpha_{li}^0 = 0, \alpha_{lj}^0 = 0$ .

Прямые  $\alpha_{li}^0 = 0, \alpha_{lj}^0 = 0$  делят первый квадрант на четыре области, в пределах которых характер генерации качественно различен. В свою очередь внутренняя область прямоугольника разделяется прямыми  $\beta_{ij} = 0, \beta_{ji} = 0$  на несколько частей. Отметим, что прямая  $\beta_{ij} = 0$  обязательно проходит через точку  $\{-1, 0\}$ , а прямая  $\beta_{ji} = 0$  – через точку  $\{0, -1\}$ . В зависимости от расположения этих прямых прямоугольник делится на области, число которых может изменяться от одной до четырех.



Рис.3. Общий вид диаграммы конкуренции двух генерационных линий.

Единственная область, которая обязательно должна присутствовать на любой диаграмме, – область симбиоза. Одновременная генерация на двух линиях может происходить только в двух областях из четырех возможных. Так, для  $\alpha_{1j}^0 k_{1j} > \alpha_{1i}^0 k_{1i}$  (линия  $1 \rightarrow i$  обладает более низким порогом, чем линия  $1 \rightarrow j$ ) это область симбиоза и область, в которой линия  $1 \rightarrow j$  гасит линию  $1 \rightarrow i$ . В двух других областях генерация может иметь место только на линии  $1 \rightarrow i$ . Следовательно, построив для нужного перехода диаграмму конкуренции и зная, например, из эксперимента тип конкуренции, можно сразу определить область, ограничивающую возможные изменения относительных скоростей переходов на нижние уровни  $R_i/R_1$  и  $R_j/R_1$ . Дополнительная информация (например, мощность генерации на каждой линии) позволяет определить скорости заселения ВРУ и НРУ в зависимости от мощности накачки.

#### 4. Взаимное влияние конкурирующих линий

Из формулы (4) видно, что интенсивность излучения на переходе  $1 \rightarrow j$  оказывает влияние на коэффициент усиления на переходе  $1 \rightarrow i$ . Найдем знак производной  $\alpha_{1j}$  по интенсивности излучения на переходе  $1 \rightarrow i$ :

$$\text{sign} \left( \frac{d\alpha_{1j}}{dI_{1i}} \right) = -\text{sign} \alpha_{1i} = \text{sign} \beta_{ij} \text{sign} [I_{1j}^{\text{cr}}(0) - I_{1j}], \tag{10}$$

$$I_{1j}^{\text{cr}}(0) = I_{1j}^{\text{cr}}(k_{1i} = 0) = -\alpha_{1i}^0 (\beta_{ij})^{-1}.$$

Рассмотрим изменение коэффициента усиления линии  $1 \rightarrow j$  при увеличении интенсивности излучения  $I_{1j}$ . В случае симбиоза параметр конкуренции  $\beta_{ij} > 0$  и увеличение  $I_{1j}$  приводит к уменьшению  $\alpha_{1j}$ . Тот же эффект имеет место, если линия  $1 \rightarrow i$  гасит линию  $1 \rightarrow j$ . Если же линия  $1 \rightarrow j$  гасит линию  $1 \rightarrow i$ , то  $\beta_{ij} < 0$  и увеличение  $I_{1j}$  может привести как к увеличению, так и уменьшению  $\alpha_{1j}$ . В этом случае возможны следующие варианты конкуренции в режиме гашения в зависимости от  $I_{1j}$  (при  $\alpha_{1i}^0 > k_{1i}$ ,  $\alpha_{1j}^0 > k_{1j}$ ,  $\beta_{ij} < 0$ ,  $\beta_{ji} > 0$ ): 1)  $0 < I_{1j} < I_{1j}^{\text{cr}}$  – генерация возможна на обеих линиях; 2)  $I_{1j} = I_{1j}^{\text{cr}}$  – интенсивность генерации на линии  $1 \rightarrow i$  равна нулю; 3)  $I_{1j}^{\text{cr}} < I_{1j} < I_{1j}^{\text{cr}}(0)$  – генерация на линии  $1 \rightarrow i$  невозможна, но  $\alpha_{1i} > 0$ ; 4)  $I_{1j} = I_{1j}^{\text{cr}}(0)$  – коэффициент усиления на линии  $1 \rightarrow i$  равен нулю;  $\alpha_{1i} = 0$ ; 5)  $I_{1j}^{\text{cr}}(0) < I_{1j}$  – вынужденное поглощение на линии  $1 \rightarrow i$  превышает вынужденное усиление:  $\alpha_{1i} < 0$ .

Таким образом, в случае режима гашения при  $I_{1j}^{\text{cr}}(0) < I_{1j}$  вынужденное поглощение на переходе  $1 \rightarrow i$  превы-

шает вынужденное усиление, что приводит к увеличению коэффициента усиления перехода  $1 \rightarrow j$  за счет поглощения излучения на линии  $1 \rightarrow i$ . Этот эффект может быть использован в лазерах и усилителях для повышения эффективности генерации или увеличения интенсивности излучения на гасящей линии.

В качестве иллюстрации рассмотрим случай конкуренции линий, когда время жизни  $j$ -го уровня равно нулю:  $\tau_j = 0$ . Как легко видеть из (5), все коэффициенты не зависят от скорости заселения  $R_j$ :

$$\beta_{ij} = -\sigma_{1i} \gamma_{1j} \tau_1 \tau_i R_i g_1 g_i^{-1} < 0, \tag{11}$$

$$\beta_{ji} = \sigma_{1j} \gamma_{1i} \tau_1 \tau_i (R_1 + R_i) g_1 g_j^{-1} > 0.$$

В этом случае генерация происходит в режиме гашения: линия  $1 \rightarrow j$  гасит линию  $1 \rightarrow i$ . Оказывается, что, зная  $I_{1j}^{\text{cr}}$ , можно найти скорости заселения  $R_1^{\text{cr}}$  и  $R_j^{\text{cr}}$  в критической точке. Приведем соответствующие формулы:

$$R_1^{\text{cr}} = \frac{k_{1j}}{\sigma_{1j} \tau_1} \frac{1 + \tau_1 \gamma_{1j} I_{1j}^{\text{cr}}}{1 - \tau_i A_{1i} g_1 g_i^{-1}}, \tag{12}$$

$$R_i^{\text{cr}} = \frac{1}{\tau_i g_1} \left( \frac{k_{1j}}{\sigma_{1j}} - \frac{k_{1i}}{\sigma_{1i}} \right).$$

Получаем интересный результат: скорость заселения НРУ  $R_i$  в критической точке не зависит от критической интенсивности излучения, а определяется только параметрами оптического резонатора и характеристиками лазерных переходов. Этот факт можно использовать для определения зависимости  $R_i$  от мощности накачки, изменяя параметры резонатора, например путем постановки зеркал с другим коэффициентом отражения. Действительно, изменение коэффициента полезных потерь не влияет на плазмохимические процессы, но оказывает влияние на положение критической точки, которая будет соответствовать уже другой мощности накачки.

#### 5. Результаты расчетов

В качестве основы для расчетов была взята конкуренция линий с  $\lambda = 724.5$  и  $703.2$  нм атома Ne [1], а также линий с  $\lambda = 2.65$  и  $2.03$  мкм атома Xe [3]. Переходу  $1 \rightarrow i$  соответствуют линии с  $\lambda = 724.5$  или  $2.65$  мкм, переходу  $1 \rightarrow j$  – линии с  $\lambda = 703.2$  или  $2.03$  мкм. Характеристики уровней атома Ne  $3p[1/2]_1, 3s[3/2]_1^o, 3s[3/2]_2^o$  и переходов  $3p[1/2]_1 \rightarrow 3s[3/2]_1^o, 3p[1/2]_1 \rightarrow 3s[3/2]_2^o$  приведены в табл. 1 и 2. Использовалась смесь Ne – Ar ( $p_{\text{Ne}} = 1$  атм,  $p_{\text{Ar}} = 28$

Табл.1. Характеристики переходов атома Ne.

Обозначение перехода	Переход	$\lambda$ (нм)	$A$ ( $10^6 \text{ c}^{-1}$ )	$\Delta\nu$ ( $10^{10} \text{ c}^{-1}$ )	$\sigma$ ( $10^{-14} \text{ см}^2$ )
$1 \rightarrow i$	$3p[1/2]_1 \rightarrow 3s[3/2]_1^o$	724.5	9.4 [11]	4 [8]	3.13
$1 \rightarrow j$	$3p[1/2]_1 \rightarrow 3s[3/2]_2^o$	703.2	25 [11]	4 [8]	7.83

Табл.2. Характеристики уровней атома Ne.

Обозначение уровня	Уровень	Кратность вырождения	$\tau_{\text{rad}}$ (с)	$k_{\text{Ne}}$ ( $10^{-14} \text{ см}^3 \cdot \text{c}^{-1}$ )	$k_{\text{P}}$ ( $10^{-11} \text{ см}^3 \cdot \text{c}^{-1}$ )	$k_{2\text{Ne}}$ ( $10^{-34} \text{ см}^6 \cdot \text{c}^{-1}$ )	$\tau$ (нс)
1	$3p[3/2]_1$	3	$26.7 \cdot 10^{-9}$ [11]	$1.7 \cdot 10^3$ [14]	6.3 [15]	0	1.53
$i$	$3s[3/2]_1^o$	3	$51 \cdot 10^{-6}$ [12]	5.1 [12]	16 [16]	40 [12]	6.15
$j$	$3s[3/2]_2^o$	5	22.4 [13]	0	9.7 [16]	4.8 [15]	10.37

Табл.3. Характеристики переходов атома Хе.

Обозначение перехода	Переход	$\lambda$ (мкм)	$A$ ( $10^6 \text{ с}^{-1}$ )	$\Delta\nu$ ( $10^{10} \text{ с}^{-1}$ )	$\sigma$ ( $10^{-14} \text{ см}^2$ )
$1 \rightarrow i$	$5d[3/2]_1^0 \rightarrow 6p[1/2]_0$	2.65	1.3 [7]	1.5 [8]	14.23
$1 \rightarrow j$	$5d[3/2]_1^0 \rightarrow 6p[3/2]_1$	2.03	2.5 [7]	1.93 [8]	13.5

Табл.4. Характеристики уровней атома Хе.

Обозначение уровня	Уровень	Кратность вырождения	$\tau_{\text{rad}}$ (нс)	$k_{\text{Ar}}$ ( $10^{-13} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ )	$k_{\text{Xe}}$ ( $10^{-12} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ )	$\tau$ (нс)
1	$5d[3/2]_1^0$	3	200 [7]	1 [9]	200 [9]	52.3
$i$	$6p[1/2]_0$	1	22.4 [7]	140* [9] 200 [19]	5.8* [9] 5.9 [19]	1.02
$j$	$6p[3/2]_1$	3	30 [7]	20* [10] 17.6 [18]	115* [9] 113 [18]	18.3

\* Значения констант, использованные в расчетах.

Тор), коэффициенты пропускания зеркал в диапазоне 700 – 725 нм были равны 0.65 и 2.3% [1]. Характеристики уровней атома Хе  $5d[3/2]_1^0$ ,  $6p[1/2]_0$ ,  $6p[3/2]_1$  и переходов  $5d[3/2]_1^0 \rightarrow 6p[3/2]_1$ ,  $5d[3/2]_1^0 \rightarrow 6p[1/2]_0$  приведены в табл. 3 и 4. Использовалась смесь Аг–Хе ( $p_{\text{Аг}} = 0.25$  атм,  $p_{\text{Хе}} = 1.9$  Тор), коэффициенты пропускания зеркал на линии с  $\lambda = 2.03$  мкм были равны 0.5 и 1 %, на линии с  $\lambda = 2.65$  мкм – 50% [3]. В обоих случаях активная длина оптического резонатора  $L = 2$  м. Время жизни уровней атома Хе в смеси Аг – Хе находим по формуле

$$\tau^{-1} = \tau_{\text{rad}}^{-1} + k_{\text{Ar}}[\text{Аг}] + k_{\text{Хе}}[\text{Хе}], \quad (13)$$

где  $\tau_{\text{rad}}$  – радиационное время жизни;  $k_{\text{Ar}}$ ,  $k_{\text{Хе}}$  – константы столкновительного тушения вышеуказанных уровней атомами аргона и ксенона. Полное обратное время жизни уровней атома Ne в смеси Ne – Аг

$$\tau^{-1} = \tau_{\text{rad}}^{-1} + k_{\text{P}}[\text{Аг}] + k_{\text{Ne}}[\text{Ne}] + k_{2\text{Ne}}[\text{Ne}]^2, \quad (14)$$

где  $k_{\text{P}}$  – константа процесса Пеннинга;  $k_{2\text{Ne}}$  – константа скорости тройного процесса  $\text{Ne}^* + 2\text{Ne} \rightarrow \text{Ne}_2^* + \text{Ne}$ .

На рис.4 приведены диаграммы конкуренции линий с  $\lambda = 2.65$  и  $2.03$  мкм атома Хе и линий с  $\lambda = 724.5$  и  $703.2$  нм атома Ne. Области, надписи на которых сделаны полужирным курсивом, соответствуют результатам экспериментов [1, 3]. Обращает на себя внимание тот факт, что для Ne область симбиоза является преобладающей, поэтому генерация на линиях с  $\lambda = 734.5$  и  $703.2$  нм может происходить только в этом режиме, что и наблюдалось в экспериментах [1]. Из рис.4,б следует, что в неоне генерацию на двух линиях получить значительно сложнее, чем в ксеноне, поскольку относительные скорости заселения НРУ не должны превышать 0.2 и небольшие вариации концентрации тушащей НРУ добавки Аг могут приводить к изменению спектра генерации. Действительно, в эксперименте [1] при парциальном давлении аргона  $p_{\text{Аг}} = 19$  Тор генерация происходила на линии с  $\lambda = 724.5$  нм, при  $p_{\text{Аг}} = 61$  Тор – на линии с  $\lambda = 703.2$  нм и только при  $p_{\text{Аг}} = 28$  Тор – на двух линиях.

В связи с относительно малым временем жизни НРУ  $6p[1/2]_0$ ,  $6p[3/2]_1$  атома Хе по сравнению с временем жизни ВРУ  $5d[3/2]_1^0$  смесь Аг – Хе значительно менее чувстви-

тельна к изменению концентрации компонентов. Диаграмма конкуренции (рис.4,а) показывает, что одновременная генерация на двух линиях возможна, даже если относительные скорости заселения НРУ превышают еди-

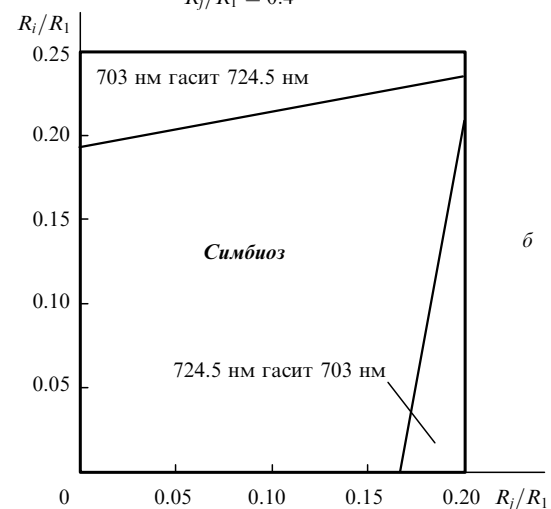
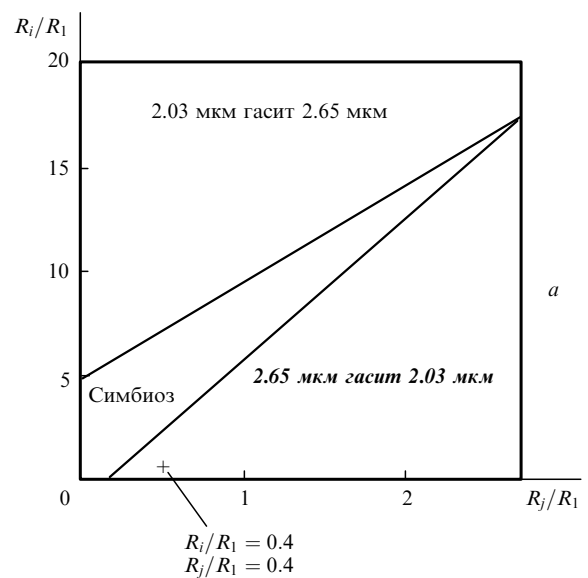


Рис.4. Диаграммы конкуренции двух генерационных линий с  $\lambda = 2.03$  и  $2.65$  мкм атома Хе в смеси Аг – Хе ( $p_{\text{Аг}} = 0.25$  атм,  $p_{\text{Хе}} = 1.9$  Тор) (а) и линий с  $\lambda = 724.5$  и  $703.2$  нм атома Ne в смеси Ne – Аг ( $p_{\text{Ne}} = 1$  атм,  $p_{\text{Аг}} = 28$  Тор) (б).

ницу. Отметим, что для атома ксенона время жизни уровня  $6p[1/2]_0$  приблизительно в 20 раз меньше времени жизни уровня  $6p[3/2]_1$ , в то время как скорости заселения данных уровней приблизительно равны. Это приводит к тому, что линия с  $\lambda = 2.65$  мкм гасит линию с  $\lambda = 2.03$  мкм.

Для оценки скорости заселения уровня  $6p[3/2]_1$  в критической точке примем  $\tau_i = 0$ . Полагая коэффициенты распределенных потерь  $\rho_{1i}$ ,  $\rho_{1j}$  равными нулю, по формуле (12) получаем, что скорость заселения уровня  $6p[3/2]_1$  в критических точках  $R_j^{cr} \approx 1.2 \cdot 10^{18} \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-3}$ . При этом потоки нейтронов в критических точках приблизительно одинаковы и составляют около  $10^{15} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  [3] (рис.1,б). Считая, что заселение уровня  $5d[3/2]_1^0$  атома Хе происходит селективно за счет диссоциативной рекомбинации молекулярных ионов  $\text{Xe}_2^+$  с электронами [17], скорость заселения уровня  $5d[3/2]_1^0$  в критических точках можно оценить как  $R_1^{cr} \approx 3 \cdot 10^{18} \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-3}$ . Полагая, что относительные скорости заселения НРУ приблизительно равны, получаем  $R_i/R_1 \approx R_j/R_1 \approx 0.4$ . Положение этой точки показано на рис.4,а крестом.

## Заключение

Проведенный анализ конкуренции двух генерационных линий, имеющих общий ВРУ, приводит к следующим основным результатам:

1. Существуют два качественно различных варианта конкуренции: симбиоз и гашение. Характер конкуренции определяется знаками параметров конкуренции.

2. Симбиоз возможен для переходов, характеристики НРУ которых не сильно различаются: близкие времена жизни, кратности вырождения, скорости заселения. Для симбиоза характерно параллельное изменение интенсивности генерации: увеличению интенсивности одной линии соответствует увеличение интенсивности другой, максимумы и минимумы интенсивностей генерации обеих линий совпадают и т. д.

3. Режим гашения характерен для «несимметричных» линий (сильно различаются времена жизни или скорости заселения НРУ). Генерация в режиме гашения характеризуется антипараллельным поведением: увеличению интенсивности одной линии соответствует уменьшение интенсивности другой, максимуму интенсивности одной линии соответствует минимум интенсивности другой и т. д.

4. Для каждых двух конкурирующих уровней можно построить диаграмму конкуренции. В зависимости от скоростей заселения ВРУ и НРУ характер генерации может быть различным. Каждому типу конкуренции соответствует определенная область изменения скоростей заселения ВРУ и НРУ на диаграмме.

5. При конкуренции в режиме гашения в критической точке можно получить два соотношения между скоростями заселения ВРУ и НРУ. Наиболее простой случай возникает, когда время жизни НРУ гасящей линии равно нулю. Тогда скорость заселения НРУ гасимой линии в критической точке может быть определена теоретически. Это обстоятельство можно использовать для определения зависимости скорости заселения НРУ гасимой линии от мощности накачки путем варьирования параметров оптического резонатора.

Автор выражает благодарность С.П.Мельникову за постановку задачи и полезные обсуждения.

1. Конак А.И., Мельников С.П., Порхаев В.В., Синянский А.А. *Квантовая электроника*, **22**, 225 (1995).
2. Воинов А.М., Зобнин В.Г., Конак А.И., Мельников С.П., Мочкаев И.Н., Синянский А.А. *Письма в ЖТФ*, **16**, № 8, 34 (1990).
3. Воинов А.М., Конак А.И., Мельников С.П., Синянский А.А. *Квантовая электроника*, **18**, 1297 (1991).
4. Заярный Д.А., Холин И.В. *Квантовая электроника*, **22**, 887 (1995).
5. Suda A., Wexler B.L., Feldman B.J., Riley K.J. *Appl.Phys.Letts*, **54**, 1305 (1989).
6. Степанов Б.И. *Методы расчета оптических квантовых генераторов* (Минск, Наука и техника, 1966, т.1).
7. Аумар М., Coulombe M. *Atom. Data and Nucl. Data Tables*, **63**, 2206 (1988).
8. Дудин А.Ю., Заярный Д.А., Семёнова Л.В., Устиновский Н.Н., Холин И.В., Чугунов А.Ю. *Квантовая электроника*, **20**, 669 (1993).
9. Ku J.K., Setser D.W. *J.Chem.Phys.*, **84**, 4304 (1986).
10. Horiguchi H., Chang R.S.F., Setser D.W. *J.Chem.Phys.*, **75**, 1207 (1981).
11. Inatsugu S., Holmes J.R. *Phys.Rev.A*, **11**, 26 (1975).
12. Leichner P.K., Cook J.D., Luerman S.J. *Phys.Rev.A*, **12**, 2501 (1975).
13. Small-Warren N.E., Chow Chiu Lue-Jung. *Phys.Rev.A*, **11**, 1777 (1975).
14. Chang R.S.F., Setser D.W. *J.Chem.Phys.*, **72**, 4099 (1980).
15. Полетаев Е.Д., Дорофеев Ю.Б., Дьяченко П.П. *Препринт ФЭИ № 2071* (Обнинск, 1990).
16. Yokoyama A., Hatano Y. *Chem.Phys.*, **63**, 59 (1981).
17. Воинов А.М., Мельников С.П., Синянский А.А. *ЖТФ*, **60**, № 10, 100 (1990).
18. Alford W.J. *IEEE J.Quantum Electron.*, **26**, 1633 (1990).
19. Bruce M.R., Layne W.B., Whitehead C.A., Keto J.W. *J.Chem.Phys.*, **92**, 2917 (1990).

### А.А.Пикulev. Line competition in gas lasers.

Simultaneous lasing on two lines having a common upper level is analysed. Within the framework of the two-level mode, a formula for the gain coefficient of each line is obtained. Two possible types of line competition are found, which are referred to as symbiosis and quenching. It is shown that competition in quenching regime can be used to study the rates of population of the lower levels. The results are illustrated by competition diagrams for the atomic Xe lines with  $\lambda = 2.65$  and  $2.03 \mu\text{m}$  in the Ar-Xe mixture and the atomic Ne lines with  $\lambda = 703.2$  and  $724.5 \text{ nm}$  in the Ne-Ar mixture.