

## ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

УДК 621.373.826.038

АВТОМОДУЛЯЦИОННЫЕ РЕЖИМЫ ГЕНЕРАЦИИ  
В БЫСТРОПРОТОЧНОМ CO<sub>2</sub>-ЛАЗЕРЕ

А. А. Ануфриева, Л. С. Кузьминский, А. И. Федосеев

(кафедра оптики и спектроскопии)

E-mail: spekl@phys.msu.ru

**Выполнено численное моделирование автомодуляционных режимов генерации CO<sub>2</sub>-лазера с поперечным потоком активной среды через неустойчивый резонатор с неоднородной внутренней накачкой. Наблюдались установившиеся автомодуляционные колебания двух типов, отличающихся механизмом обратной связи. Тип режима и условия его осуществления определяются как профилем накачки, так и составом и давлением рабочей смеси, что создает принципиальную возможность управления временными характеристиками генерации.**

Условия возникновения автоколебаний в быстропоточном лазере (БПЛ) с неустойчивым резонатором (НР) изучались в работах [1–3]. Во всех случаях неустойчивость стационарной генерации связана с неоднородностью лазерной системы в направлении потока среды. Насыщенные автоколебательные режимы генерации исследовались только на крайне упрощенных моделях активной среды [4]. В настоящей работе использована более полная кинетическая модель CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub> БПЛ, которая позволяет выявить влияние параметров среды на характеристики автомодулированной генерации. Основные результаты приводятся для БПЛ с неустойчивым резонатором. Отмечаются особенности возбуждения автоколебаний в оптической системе НР-многоходовая усилительная кювета.

Кинетическая модель активной среды в общих чертах повторяла модель, использовавшуюся для неподвижной среды [5]; населенность нижнего рабочего уровня описывалась отдельным уравнением. Система уравнений для чисел колебательных квантов азота ( $N_4$ ), антисимметричной ( $N_3$ ) и связанных ( $N_2$ ) мод CO<sub>2</sub>, а также населенности нижнего рабочего уровня ( $n_2$ ) имела вид

$$\frac{\partial N_4}{\partial t} - v \frac{\partial N_4}{\partial x} = \frac{N_3}{\tau_{34}} - \frac{N_4}{\tau_{43}} + S_4, \quad (1)$$

$$\frac{\partial N_3}{\partial t} - v \frac{\partial N_3}{\partial x} = -\frac{N_3}{\tau_{34}} + \frac{N_4}{\tau_{43}} - \frac{N_3}{\tau_{32}} - GW + S_3, \quad (2)$$

$$\frac{\partial N_2}{\partial t} - v \frac{\partial N_2}{\partial x} = 2GW + \frac{3N_3}{\tau_{32}} - \frac{N_2 - \bar{N}_2}{\tau_2} + S_2, \quad (3)$$

$$\frac{\partial n_2}{\partial t} - v \frac{\partial n_2}{\partial x} = GW - \frac{n_2 - \bar{n}_2}{\tau_1}, \quad (4)$$

где  $v$  — скорость потока;  $G = \sigma(n_3 - n_2)$  — коэффициент усиления;  $\sigma$  — сечение перехода;  $W$  —

интенсивность по числу квантов;  $S_i$  — скорости накачки;  $\tau_{ik}$ ,  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  — времена колебательного обмена и релаксации;  $\bar{N}_2$  и  $\bar{n}_2$  — равновесные значения величин. Ось  $x$  направлена навстречу потоку. Значения констант соответствуют температуре газа  $T \sim 400$  К. Интенсивность поля в НР цилиндрической геометрии с увеличением  $M$  описывает уравнение

$$x \frac{\partial W}{\partial x} + \tau_c \frac{\partial W}{\partial t} = \left[ \frac{G}{\theta} - 1 \right] W, \quad (5)$$

где  $\tau_c = 2L/(c \ln M)$  — время затухания поля в НР,  $\theta = \ln M/(2L)$  — потери на увеличение. Распределение накачки внутри НР моделировалось экспоненциальным спадом  $S_i(x)$  к оси НР ( $x=0$ ) в зоне шириной  $h_0 < h$  ( $h$  — апертура НР).

Полученные в расчетах насыщенные режимы автомодулированной генерации классифицируются по тем же типам, что и соответствующие им механизмы неустойчивости [3], т. е. как краевые пролетные колебания (КПК) и внутренние пролетные колебания (ВПК). Наблюдаются также хаотические режимы, обусловленные взаимодействием различных механизмов. В отличие от однокомпонентной среды колебания релаксационного типа [3] не были получены, что говорит о том, что обмен возбуждениями между компонентами в условиях расчетов приводит к их гашению.

Примеры автоколебательных режимов генерации представлены на рис. 1 для краевых (а) и внутренних (б) пролетных колебаний. На рис. 2 показаны пространственные распределения параметров в потоке среды. Для обоих видов автоколебаний импульсы имеют характерную для CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>-лазера форму с затянутым спадом, обусловленным передачей энергии от N<sub>2</sub>. По длительности спада можно оценить время  $\tau_{43} \sim 0.03\tau_f$  ( $\tau_f$  — время пролета).

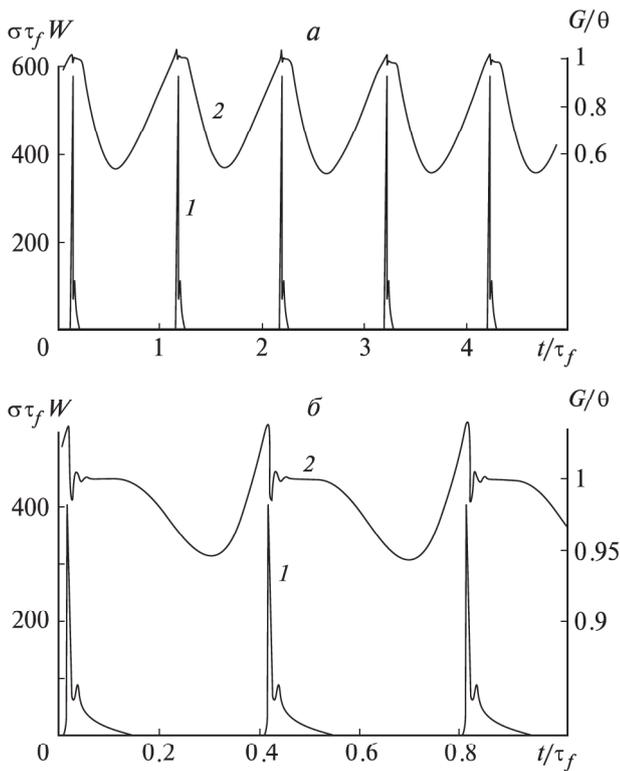


Рис. 1. Примеры автомодуляционных режимов в БПЛ с неустойчивым резонатором:  $W$  — выходная интенсивность (1),  $G$  — коэффициент усиления на оси НР (2); (а) — краевые пролетные колебания (рабочая смесь  $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He} = 15 : 35 : 50$ , давление  $p = 60$  торр, скорость потока  $v = 150$  м/с,  $M = 1.5$ ,  $h_0 = 0.4h$ , коэффициент усиления на входе потока в резонатор  $G_0 = 0.9 \text{ м}^{-1}$ ); (б) — внутренние пролетные колебания ( $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He} = 15 : 30 : 55$ ,  $p = 70$  торр,  $v = 150$  м/с,  $M = 1.7$ ,  $h_0 = 0.25h$ ,  $G_0 = 1.2 \text{ м}^{-1}$ )

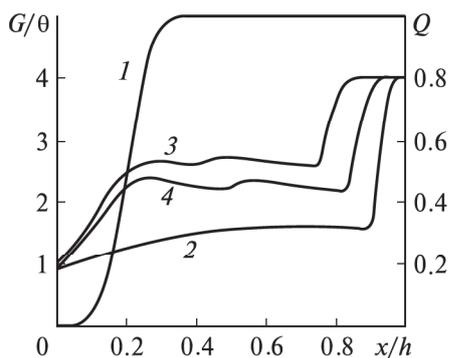


Рис. 2. Пространственные распределения параметров в неустойчивом резонаторе БПЛ вдоль потока: 1 — накачка  $Q$  (отн. ед.) с зоной неоднородности  $h_0 = 0.22h$ ; 2 — нормированный на потери коэффициент усиления  $G/\theta$  в момент времени сразу после импульса краевых пролетных колебаний, 3 и 4 — коэффициенты усиления в моменты времени до и сразу после импульса внутренних пролетных колебаний соответственно

Структура импульсов на заднем фронте вызвана затухающими релаксационными колебаниями. Для КПК (рис. 1, а) частота следования импульсов  $\Omega_p$  практически совпадает с пролетной частотой  $\Omega_f = 1/\tau_f$ . В случае ВПК (рис. 1, б) частота  $\Omega_p = 2.5\Omega_f$  не кратна  $\Omega_f$ .

В основе механизма обратной связи (ОС) КПК лежит пространственная модуляция коэффициента усиления (КУ), возникающая на скачке поля на краю зеркала при входе потока в резонатор. Для узких импульсов генерации такая краевая модуляция (КМ) имеет вид «ступеньки» (кривая 2 на рис. 2), которая вместе с потоком перемещается к оси НР, уменьшаясь по высоте под действием накачки и релаксации. Достигнув оси, она порождает новый импульс генерации. Для данного вида автоколебаний условие неустойчивости стационарной генерации в смеси с быстрым колебательным обменом имеет вид [2]

$$\ln[W_s(h)/W_s(0)] > (\xi_{\text{CO}_2} \sigma \tau_f / h) \int_0^h [(S_3 + S_4)/G] dx, \quad (6)$$

где  $W_s$  — интенсивности стационарного поля,  $\xi_{\text{CO}_2}$  — доля молекул  $\text{CO}_2$ . Из (6) видно, что КПК могут развиваться в БПЛ с не слишком высоким уровнем внутренней накачки и при наличии спада интенсивности к оси резонатора.

Механизм ОС ВПК обусловлен модуляцией КУ при движении среды через область неоднородности, в которой имеются значительные градиенты накачки или изменяются потери (например, в НР с центральным отверстием связи). Если область неоднородности расположена вблизи оси НР, то возникающие возмущения КУ достигают оси и обеспечивают ОС даже в быстрорелаксирующих средах. Кривыми 3 и 4 на рис. 2 показаны профили КУ в моменты времени  $t'$  перед импульсом генерации и  $t''$  сразу после его окончания. Поскольку внутренние градиенты не столь велики, как краевой градиент поля, пространственная модуляция усиления по сравнению с КМ оказывается более слабой и на рис. 2 трудно различима. Из сравнения кривых на рис. 1 и 2 можно видеть, что минимум КУ (рис. 1, б) достигается в момент, когда к оси НР подходят частицы среды, находившиеся в момент  $t''$  на крае спада профиля накачки ( $x \approx 0.3h$ ), в то время как максимум усиления, дающий начало следующему импульсу, создают частицы, которые в момент  $t''$  были удалены от края спада накачки ( $x \approx 0.4h$ ). Это означает, что величина  $\Omega_p$  определяется размером  $h_0$ , изменяя который можно управлять частотой следования импульсов. При невысоких скоростях колебательного обмена в области градиента накачки может происходить запаздывание в передаче колебательной энергии от  $\text{N}_2$  к  $\text{CO}_2$ . Это приводит к уменьшению модуляции КУ и ослаблению ОС.

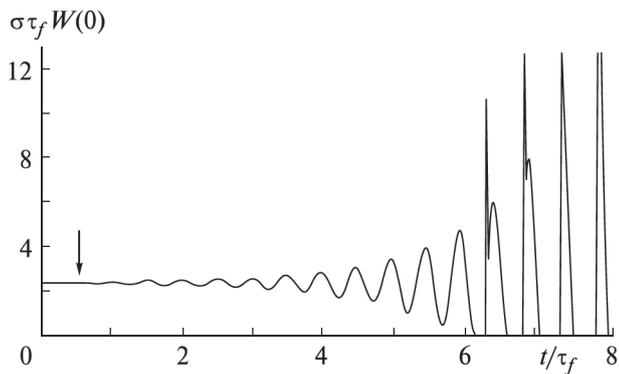


Рис. 3. Переход к режиму краевых пролетных колебаний при снижении концентрации  $\text{CO}_2$  в рабочей смеси с 15 до 10%.  $W(0)$  — интенсивность на оси НР. Момент достижения концентрации 10% показан стрелкой. Итоговая рабочая смесь  $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He} = 10 : 40 : 50$  ( $p = 60$  торр,  $v = 100$  м/с,  $M = 2.2$ ,  $h_0 = 0.2h$ ,  $G_0 = 1.3 \text{ м}^{-1}$ )

Расчеты показывают, что ВПК могут возбуждаться в условиях, когда время передачи энергии от  $\text{N}_2$  к  $\text{CO}_2$   $\tau_{43}$ , зависящее от парциального давления  $p_{\text{CO}_2}$ , значительно меньше времени пролета зоны неоднородности  $h_0/v$ . По оценке в НР с неоднородной накачкой в типичных условиях работы БПЛ с  $\tau_f \approx 10^{-3}$  с и  $h_0 = 0.2h$  возбуждение ВПК происходит при  $p_{\text{CO}_2} > 10$  торр. Численное моделирование динамики БПЛ с различными рабочими смесями подтверждает данную оценку. В то же время расчеты показывают, что КПК лучше возбуждаются в «бедных» смесях с уменьшенным содержанием  $\text{CO}_2$ . Этот результат находится в качественном согласии с (6). В принципе параметры рабочей смеси могут также использоваться в качестве управляющих параметров, изменяя которые можно переключать режимы генерации. На рис. 3

показан переход от стационарного режима генерации к импульсно-периодическому, с возбуждением КПК при снижении концентрации  $\text{CO}_2$  в смеси с 15 до 10%. Другим управляющим параметром может служить концентрация газа-релаксатора, уменьшение которой стабилизирует генерацию.

В БПЛ с оптической системой НР–многоходовая усилительная кювета при определенных условиях также возможны автоколебательные режимы, аналогичные рассмотренным выше. Механизм автоколебаний обусловлен действием ОС между генератором и кюветой, осуществляемой потоком среды. Особенности динамики данной системы состоят в том, что условия возбуждения автоколебаний и характеристики насыщенных режимов в сильной степени зависят от фазового согласования колебаний усиления в НР и кювете. Менять режим генерации в такой системе можно путем изменения соотношения размеров ее частей.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант ОФИ-А 05-02-08-244).

#### Литература

1. Дрейзин Ю.А., Дыхне А.М. // Письма в ЖЭТФ. 1974. **19**, № 12. С. 718.
2. Лиханский В.В., Напартович А.П. // Квантовая электроника. 1980. **7**, № 2. С. 237.
3. Одинцов А.И., Саркаров Н.Э., Федосеев А.И. // Квантовая электроника. 2006. **36**, № 9. С. 853.
4. Николаева О.Ю., Одинцов А.И., Федосеев А.И., Федянович А.В. // Оптика и спектроскопия. 1995. **78**, № 5. С. 837.
5. Lachambre J.-L., Lavigne P., Verreault M., Otis G. // IEEE J. Quant. Electronics. 1978. **QE-14**, N 3. P. 170.

Поступила в редакцию  
20.12.06