

В.В. Дембовецкий

ДИНАМИКА ГЕНЕРАЦИИ СО₂-ЛАЗЕРА В РЕЖИМЕ ПАССИВНОЙ МОДУЛЯЦИИ ДОБРОТНОСТИ

Экспериментально и теоретически исследовался режим пассивной модуляции добротности в СО₂-лазере с внутрирезонаторным нелинейным поглотителем. Предложена модель, позволяющая качественное и количественное описание границ возникновения режима, частоты, амплитуды, длительности и формы импульсов при изменении параметров активной и пассивной сред.

Излучение СО₂-лазера с нелинейным поглотителем в режиме пассивной модуляции добротности (РПМД) представляет собой периодическую последовательность импульсов весьма разнообразной формы — от гладких импульсов с почти симметричными фронтами до сильно асимметричных с крутым передним и растянутым задним фронтом, сильно промодулированным. Характерная длительности импульсов меняется от нескольких микросекунд до десятых долей миллисекунды. РПМД возникает как следствие неустойчивости стационарного режима генерации, когда поглощение достигает критического значения [1]. Все более заметный интерес к исследованию РПМД в лазерах инфракрасного диапазона связан с реальными перспективами его использования в лидарах [2, 3], для накачки инфракрасных лазеров дальнего ИК диапазона [4], с возможностью создания технологических импульсно-периодических лазеров с большой частотой повторения импульсов и средней мощностью излучения 1...1,5 кВт. Для спектроскопических применений и в системах обнаружения особенно важным может оказаться свойство сохранения когерентности излучения отдельных импульсов.

Настоящая работа посвящена экспериментальному и теоретическому исследованию РПМД в СО₂-лазере с внутрирезонаторным нелинейным поглотителем, в частности влиянию параметров активной и пассивной сред на форму импульса излучения. Проведено качественное и количественное сравнение теории и эксперимента.

Известно, что для описания динамики генерации СО₂-лазеров различного типа без внутрирезонаторного поглотителя необходимо учитывать многоуровневость среды. Поэтому для активной среды выберем известный простейший вариант многоуровневой модели [5], являющейся упрощением хорошо известной пятитемпературной модели СО₂-лазера [6], которая описывает форму импульсов при активной модуляции в СО₂-лазерах различного типа. Что же касается пассивной среды, то для нее использовалась многоуровневая модель [7]. Такое «объединение» [8] двух известных моделей оказалось достаточным для описания всех экспериментально наблюдаемых характеристик РПМД. Подчеркнем, что эта объединенная модель является, по-видимому, простейшей, поскольку все попытки ее упрощения, например в рамках двухуровневой модели пассивной среды, сразу же лишают нас возможности получить удовлетворительное согласие с экспериментом.

Итак, запишем теперь систему уравнений, эффективно учитывающую многоуровневую структуру обеих сред, в виде

$$\begin{aligned}
 \dot{q} &= S_1 q (P_1 - P_2) + S_2 q (P_4 - P_5) - vq + S_{sp} P_1; \\
 \dot{P}_1 &= S_2 q (P_1 - P_2) - \gamma_1 P_1 + a_1 n_e P_c^0 + \gamma_0 (P_n P_c P_1 P_n^0); \\
 \dot{P}_2 &= S_1 q (P_1 - P_2) - \gamma_2 (P_2 - P_2^{CT}); \\
 \dot{P}_3 &= a_2 n_e P_c^0 + \gamma_2 (P_2 - P_2^{CT}) - \gamma_3 (P_3 - P_3^{CT}); \\
 \dot{P}_n &= a_3 n_e P_n^0 - \gamma_0 (P_n P_c^0 - P_1 P_n^0); \\
 \dot{P}_4 &= -S_2 q (P_4 - P_5) - \gamma_r P_4 + \gamma_r' P_6; \\
 \dot{P}_5 &= S_2 q (P_4 - P_5) - \gamma_r P_5 + \gamma_r' P_7; \\
 \dot{P}_6 &= \gamma_r P_4 - \gamma_r' P_6 - \gamma_{21} (P_6 - P_6^{CT}); \\
 \dot{P}_7 &= \gamma_r P_5 - \gamma_r' P_7 - \gamma_{22} (P_7 - P_7^{CT}),
 \end{aligned} \tag{1}$$

где q — плотность числа фотонов в резонаторе; S_{sp} — скорость спонтанных переходов; $S_1 = cl_1\sigma_1/L$, $S_2 = cl_2\sigma_2/L$, l_1 , l_2 — длины активной и пассивной среды, L — длина резонатора, σ_1 и σ_2 — сечения поглощения активной и пассивной среды; c — скорость света; a_1 , a_2 , a_3 — скорости возбуждения уровней СО₂ и N₂; n_e — плотность электронов; γ_0 , γ_1 , γ_2 , γ_3 — константы релаксации активной сре-

ды; P_1, P_2, P_3, P_n — населенности уровней 001, 100, 010 CO_2 и первого возбужденного уровня азота; верхний индекс (ст) означает стационарное значение в отсутствие поля. P_c^0 и P_n^0 — населенности основного уровня CO_2 и N_2 ; P_4 и P_5 — населенности вращательных уровней поглотителя, непосредственно взаимодействующих с полем; P_6 и P_7 — населенности остальных вращательных уровней колебательного перехода. $P_1 + P_2 + P_3 + P_c^0 = P_{ctot}^0$, $P_n + P_n^0 = P_{ntot}^0$, где P_{ctot}^0 и P_{ntot}^0 плотность CO_2 и N_2 . На фронтах импульса при РПМД возможное отличие от болцмановского распределения учитывалось зависимостью сечения σ_1 от интенсивности поля в виде $\sigma_1^* = \sigma_1 / (1 + \sigma_1 \tau_r q)$, как это предложено в [9]. Здесь τ_r — время вращательной релаксации CO_2 .

Очевидно, что обыкновенные дифференциальные уравнения, моделирующие исследуемые процессы, являются жесткими. Поэтому численные расчеты системы (1) проводились с помощью неявных многошаговых методов Гира на базе стандартной программы Stiff [10], особенно удобной для решения задач Коши для жестких систем обыкновенных дифференциальных уравнений. Вычисления проводились на MicroVAX-II.

Эксперименты по исследованию РПМД проводились, в основном, на CO_2 -лазере низкого давления с продольным тлеющим разрядом и диффузионным охлаждением. Внутри резонатора лазера помещались одна или две поглощающих ячейки. В качестве нелинейных поглотителей использовались SF_6 , HCOOH , CF_2Cl_2 , горячий CO_2 в чистом виде или в смеси с буферными газами (N_2 , He , H_2). Вакуумная система позволяла составлять различные смеси как для лазера, так и для поглощающих ячеек. Характерный рабочий диапазон давлений для активной среды 5...25 Торр, для пассивной среды 10 м Торр...5 Торр. Сменой поглощающих ячеек и активных элементов можно было варьировать длину поглощения и разряда. Максимальная длина разряда достигала 2,6 м, а поглощающей ячейки — 2 м. Резонатор лазера был образован глухим сферическим зеркалом и эшелеттом 100 штр/мм. Используя зеркала различной кривизны, можно было изменять эффективные сечения поля в активной и пассивной частях лазера, т.е. степени насыщения сред. В качестве герметизирующих окон использовались плоскопараллельные пластины из ZnSe , расположенные под углом Брюстера. Изменяя ориентацию штрихов решетки относительно вектора поляризации излучения, можно было варьировать коэффициент отражения решетки, т.е. добротность резонатора. Для идентификации линии генерации использовался монохроматор SPM-2. Средняя мощность излучения регистрировалась измерителем мощности, динамические характеристики — фотоспротивлением на основе $\text{Ge}-\text{Au}$. Экспериментально определялись области существования РПМД, частота следования импульсов, их форма в зависимости от параметров активной и пассивной частей лазера.

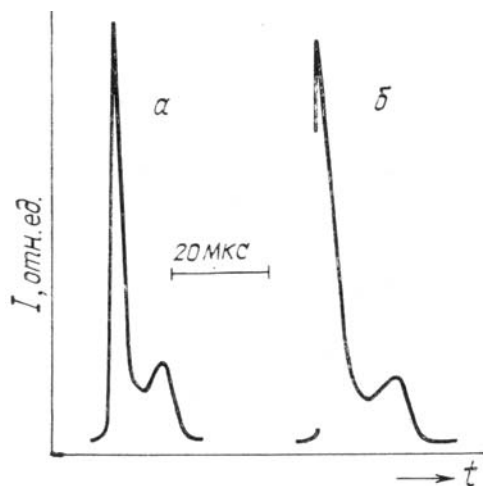


Рис. 1. Форма импульса: *a* — расчетная форма в модели (1). Значения констант взяты из [5–7] для давления SF_6 — 210 м Торр, $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:2:8$, полное давление смеси 15 Торр, ток разряда 15 мА; *b* — эксперимент при тех же параметрах

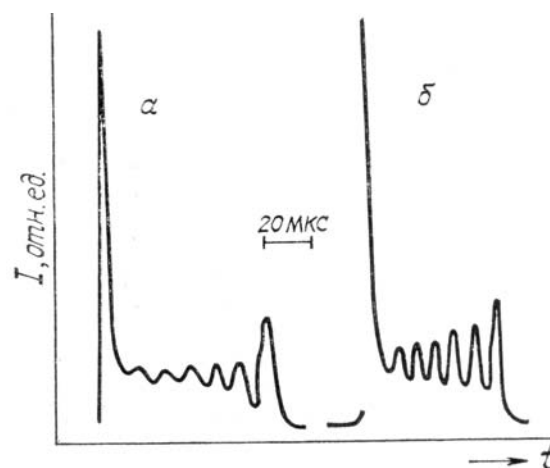


Рис. 2. Форма импульса; *a* — расчетная форма, давление SF_6 — 130 м Торр, *b* — эксперимент; остальные условия как на рис. 1

Характерный вид импульсов, рассчитанных в рамках модели (1), с использованием значений констант релаксаций, взятых из работ [5–7], приведен на рис. 1, *a* и 2, *a*. Характерная экспериментально зарегистрированная форма импульсов показана на рис. 1, *b* и 2, *b*.

Таким образом, модель (1) дает не только качественное, но и количественное описание всех характеристик РПМД в CO_2 -лазере с нелинейным поглощением: границ возникновения РПМД, частоты, амплитуды, длительности и формы импульсов при изменении параметров активной и пассивной сред.

1. Дембовецкий В.В., Сурдутович Г.И. //В кн.: Лазерные пучки. Хабаровск. 1975. С. 119.
2. Пат. 4512020 США. МКИ H 01 S 3/10.
3. Пат. 4521109 США. МКИ G 01 B 9/02.
4. Коерф Г.А. //Appl. Phys. Lett., 1977. V. 31. № 272.
5. Andrews K.J., Dyer R.E., James D.J. //Phys. E Sci. Inst. 1975. V. 8. № 493.
6. Смит К., Томпсон Р. Численное моделирование газовых лазеров. М.: Мир, 1981.
7. Dupre T., Meyer P., Meyer C. //Rev. Phys. Appl. 1975. V. 10. № 21.
8. Дембовецкий В.В. Шатура. 1987. (Препринт/НИЦТЛ АН СССР. № 24).
9. Велихов Е.П., Баранов В.Ю., Летохов В.С., Рябов Е.А., Старостин А.Н. Импульсные CO₂-лазеры и их применение для разделения изотопов. М.: Наука. 1983. С. 29.
10. Захаров А.Ю., Турчанинов В.И. Stiff – программа для решения жестких систем обыкновенных дифференциальных уравнений. М. 1977. (Препринт/Ин-т прикладной математики АН СССР. № 7).

Научно-исследовательский центр
по технологическим лазерам, Москва

Поступило в редакцию
21 ноября 1988 г.

V. V. Dembovetski. Dynamics of CO₂-Laser Generation in a Passive Q-Switch Mode of Operation.

The paper presents the results of experimental and theoretical studies of passive Q-switching in a CO₂-laser using an intracavity nonlinear absorber. The model is suggested in the paper which allows qualitative and quantitative description of the regime limits as well as of pulse frequency, amplitude, duration and shape as functions of passive and active media parameters.