

Импульсная генерация ТЕА CO₂-лазера в условиях развития оптической неоднородности активной среды при высоких удельных энергиях накачки

К.Н.Макаров, В.К.Рерих, Ю.А.Сатов, А.Е.Степанов, С.В.Хоменко

Предложена схема CO₂-лазера с самомодуляцией внутрирезонаторных потерь, позволяющая эффективно генерировать импульсы, свободные от типичного для CO₂-лазера «хвоста» излучения. В работе использована простая методика для регистрации оптической неоднородности среды газового разряда ТЕА модуля и приведены результаты измерений.

Ключевые слова: CO₂-лазер, оптические неоднородности, самомодуляция излучения.

Введение

Форма импульса генерации ТЕА CO₂-лазера атмосферного давления в типичных условиях представляет собой импульс длительностью от 40 до 200 нс с последующим медленно спадающим «хвостом» или с последующим импульсом с низкой интенсивностью длительностью 1–5 мкс. Характеристики импульса излучения зависят от энергии накачки среды, добротности резонатора и состава активной среды. Однако в режимах, близких к эффективной генерации пиковой мощности, энергия в первом пике не превышает 30–50 % от полной энергии импульса. Наличие длительного «хвоста» излучения является нежелательным в ряде практических приложений. В частности, при генерации многозарядных ионов в лазерной плазме низкоинтенсивный «хвост» излучения (помимо дополнительной лучевой нагрузки на оптические элементы) создает большое число низкозарядных ионов и интенсивно испаряет материал мишени. Использование таких импульсов в устройствах импульсно-периодического действия может значительно снизить ресурс работы лазерной системы.

Генерация «хвоста» импульса может быть подавлена применением низкодобротного резонатора или смесей, не содержащих азот, однако это приводит к значительному снижению выходных удельных характеристик излучения и увеличению длительности первого пика излучения. Применение активной или пассивной модуляции [1–3] значительно усложняет схему генератора. Из перечисленных наиболее эффективна схема, использующая электрооптический затвор, но имеющая низкий ресурс работы в импульсно-периодическом режиме при плотностях энергии ~ 100 мДж/см².

Цель работы – создание CO₂-лазера с самомодуляцией внутрирезонаторных потерь, эффективно генерирующего импульсы, свободные от типичного для CO₂-лазе-

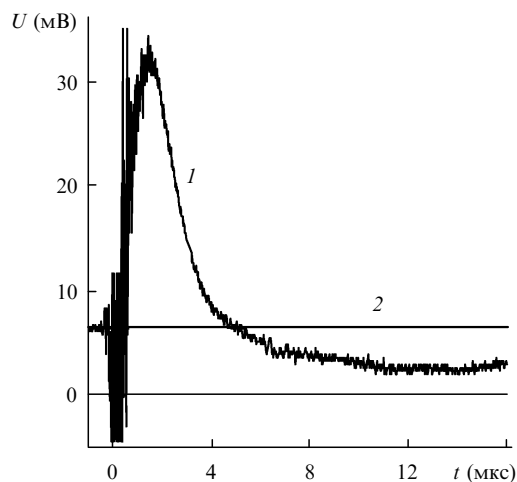


Рис.1. Типичные временные зависимости амплитуды пробного (1) и опорного (2) сигналов.

ров «хвоста». Дополнительной задачей являлось получение генерации на одной продольной моде для реализации гладкой временной формы выходного импульса.

В настоящей работе измерены оптические неоднородности, появляющиеся в активной среде ТЕА лазера после прохождения импульса разрядного тока при высоких удельных энерговкладах. Метод основан на измерениях коэффициента усиления слабого (зондирующего) сигнала в ТЕА модуле. Было обнаружено, что при высоких (не более 200 мДж/см³) удельных энерговкладах в разряд усиление имело «аномальное» поведение в течение ~ 0.5 –1.0 мкс после возникновения разрядного тока. Наблюдалось нетипично малое время спада усиления и появление «отрицательного» зондирующего сигнала, что соответствует появлению дополнительных потерь в среде (рис.1). Вероятное объяснение этого было связано с уходом зондирующего сигнала из окна фотодатчика, что подтверждалось данными по исследованию различных оптических неоднородностей в импульсном самостоятельном разряде [4–7].

Различные механизмы нарушения однородности среды сводятся в конечном итоге к нарушениям однородно-

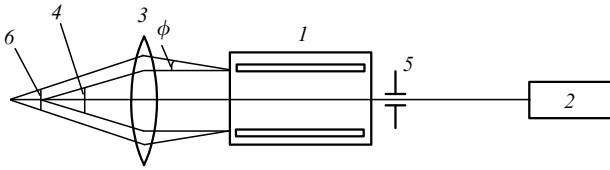


Рис.2. Схема эксперимента:

1 – ТЕА модуль; 2 – He – Ne-лазер; 3 – объектив; 4 – фотоприемник; 5 – диафрагма; 6 – кружок рассеяния диаметром $2\phi F$.

сти энерговклада в разряд или к неоднородностям поля излучения. Например, в [5] наблюдались объемные неоднородности показателя преломления, возникающие сразу после окончания разрядного импульса из-за регулярных неоднородностей распределения плотности фотоэлектронов предыонизации и неоднородностей энерговыделения в разрядном объеме.

В [4] теоретически и экспериментально исследовано влияние на излучение CO_2 -лазера неоднородности показателя преломления в направлении от оси к границе профиля разрядного тока (линзовый эффект). В рассматриваемом в настоящей работе разрядном ТЕА модуле возможными причинами неоднородностей энерговыделения, по мнению авторов, могут быть как процессы, описанные в [4, 5], так и эффекты, возникающие на стадии пробоя (например, влияние стримерных механизмов пробоя в условиях сильных перенапряжений), а также влияние различных механизмов контракции разряда (в первую очередь, тепловых неустойчивостей).

Детальное исследование причин возникновения оптических неоднородностей и локальных градиентов оптической плотности выходит за рамки данной работы, в которой измерялась усредненная по разрядному объему оптическая неоднородность и оценивалось ее влияние с точки зрения дифракционных потерь резонатора ТЕА CO_2 -лазера.

1. Экспериментальная установка и методика измерений

Экспериментальная установка состояла из ТЕА разрядного модуля с размером активной среды $17 \times 17 \times 450$ мм, He – Ne-лазера ($\lambda = 0.63$ мкм) и фотодетектора с объективом (рис.2). Особенностью электрической схемы в разрядном модуле было формирование первоначального пика в импульсе напряжения с крутым передним фронтом и амплитудой, значительно (более чем в два раза) превышающей пробивные напряжения для используемых смесей $\text{N}_2 - \text{CO}_2 - \text{He}$ [8]. Разряд при этом имел устойчивый объемный характер без перехода в искровую фазу в широком (до 300 мДж/см³) диапазоне энерговкладов при содержании молекулярных газов до 80 %.

Непрерывное излучение He – Ne-лазера проходило через зондируемый участок среды газоразрядного модуля и направлялось в объектив 3 с фокусным расстоянием $F = 200$ мм, который фокусировал излучение в фотодиодный датчик 4. Для согласования размера фотодиода (600×600 мкм) с диаметром пучка датчик помещался в соответствующую точку геометрически сходящегося пучка, как показано на рис.2. Схема измерения регистрировала изменение освещенности детектора с временем разрешения ~ 100 нс. Для калибровки максимального сигнала (сигнала, соответствующего 100 % потерь) в схеме использовался модулятор в виде вращающегося

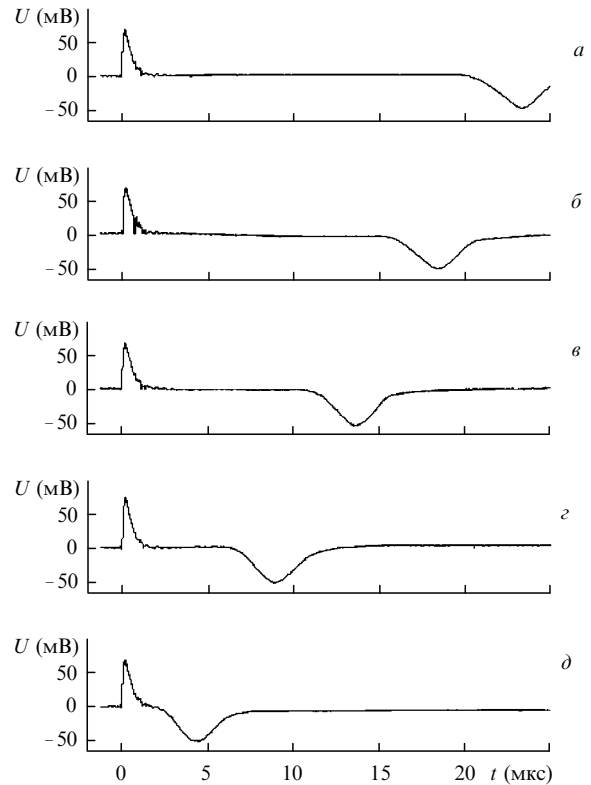


Рис.3. Временные зависимости сигнала фотодатчика при смещении зондирующего пучка от электродов $s = +6$ (а), $+3$ (б), 0 (в), -3 (г) и -6 мм (д) (пучок смещался от центральной плоскости сечения модуля в положительном (к аноду) и отрицательном (к катоду) направлениях).

диска с отверстиями. Линейность детектора в используемом динамическом диапазоне сигналов проверялась с помощью оптических фильтров известной плотности. Импульс напряжения на разрядном промежутке ТЕА модуля измерялся с помощью омического датчика с сопротивлением 5 кОм, ток в котором регистрировался посямом Роговского. Форма лазерного импульса, приведенная на рис.1, регистрировалась фотодетектором, имеющим временное разрешение не более 1 нс. Все представленные в работе осциллограммы записаны с помощью двухканального осциллографа LeCroy с дискретностью оцифровки 2.5 нс и полосой усилителя 400 МГц.

2. Результаты измерений и анализ полученных данных

На рис.3 приведена серия осциллограмм, демонстрирующих методику измерений на примере зондирования газового разряда в смеси состава $\text{N}_2:\text{He} = 1:1$ ($p = 1$ ата). Пучок He – Ne-лазера диаметром $d = 1.5$ мм пропускался через различные области разрядного объема вблизи центральной плоскости сечения электродов. Момент времени $t = 0$ совпадает с началом импульса тока разряда, нулевой сигнал указывает на постоянную первоначальную освещенность фотодиода. Рост сигнала в начале осциллограмм отражает дополнительное освещение датчика излучением разряда ТЕА модуля, а наступающее затем уменьшение освещенности вызвано возникновением различных потерь в исследуемой среде. Сигнал, соответствующий полному отсутствию излучения зондирующего пучка, равнялся в этом случае -70 мВ. Измерения по-

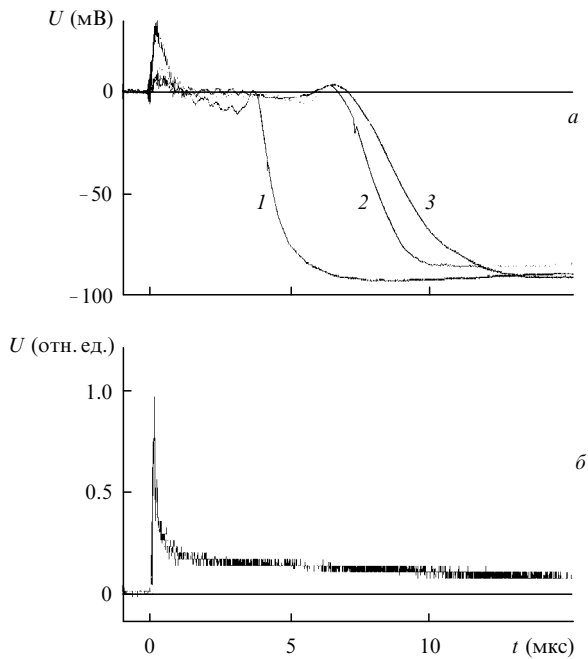


Рис.4. Временные зависимости сигнала фотодатчика при начальном положении зондирующего пучка диаметром 1.5 мм на оси разряда и давлении смеси $p = 1$ (1, 2) и 0.6 атм (3), удельном энергокладе $W = 300$ (1), 100 (2) и 60 мДж/см³ (3) (а), а также импульса генерации (б).

казали, что в указанной среде при вложенной в разряд удельной энергии около 100 мДж/см³ доминирующим фактором возмущения среды является хорошо известная ударная волна, распространяющаяся от катода к аноду. Приведенные осциллограммы позволяют, в частности, определить, что скорость распространения ударной волны составляла $7 \cdot 10^4$ см/с.

На рис.4 представлены аналогичные данные по зондированию приосевой области разряда в смеси состава CO₂:N₂:He = 4:1:5 при различных удельных энергокладах. В этих экспериментах наблюдалась ударная волна, распространяющаяся от катода к аноду, скорость которой увеличивалась с увеличением энергоклада. Характерным эффектом при этом является возникновение объемных потерь в активной среде, заметное нарастание которых наступает уже в конце импульса разрядного тока (задержка $\sim 0.6-0.7$ мкс) и не зависит в пределах чувствительности методики от области зондирования.

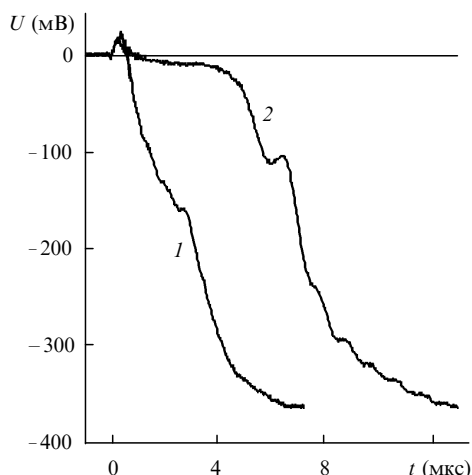


Рис.5. Временные зависимости сигналов фотодатчиков при $W = 100$ (1) и 300 мДж/см³ (2). Диаметр зондирующего пучка 10 мм.

Для измерения усредненной по объему активной среды оптической неоднородности проводились измерения с помощью пучка He-Ne-лазера, расширенного до пучка диаметром $d = 10$ мм и проходящего по оси межэлектродного промежутка. Результаты измерений приведены на рис.5. Для уменьшения подсветки датчика разрядом применялись оптические фильтры с полосой пропускания в красной области спектра.

Анализ экспериментальных данных основывался на том, что исчезновение сигнала на фотодетекторе являлось результатом рефракции излучения в газовом разряде на локальных оптических неоднородностях, связанных с наличием неоднородного энерговыделения и, как следствие, с неоднородностями плотности и температуры. В эксперименте регистрировалось усредненное по объему изменение оптической неоднородности, которое можно описать эффективным градиентом оптической плотности. При малых углах отклонения ϕ можно записать [9]

$$\phi = \frac{1}{n} \frac{dn}{dr} l, \quad (1)$$

где n – показатель преломления; dn/dr – поперечный градиент оптической плотности; l – длина среды.

Сигнал фотодиода $U(t)$, нормированный на единицу, как следует из простых геометрических соображений (см. рис.2), связан с площадью кружка рассеяния $\pi(\phi F)^2$ соотношением

$$U(t) = \frac{d_0^2}{\pi(\phi F)^2 + d_0^2}, \quad (2)$$

где d_0 – размер квадратного приемного окна.

Зависимость от времени угла рефракции ($\lambda = 0.63$ мкм), рассчитанная по формуле (1), и соответствующий сигнал фотодиода $U(t)$ показаны на рис.6. Эти результаты относятся к разряду в смеси состава CO₂:N₂:He = 4:1:5 с удельным энергокладом ~ 250 мДж/см³. Видно, что через 1 мкс после начала токового импульса неоднородность среды оказывается такой, что ее можно описать эффективным коэффициентом рефракции, равным ~ 0.9 мрад, и соответствующим градиентом плотности $(1/\rho) \times (d\rho/dx) = 2 \cdot 10^{-5}$ см⁻¹.

Для оценки влияния молекулярной рефракции на

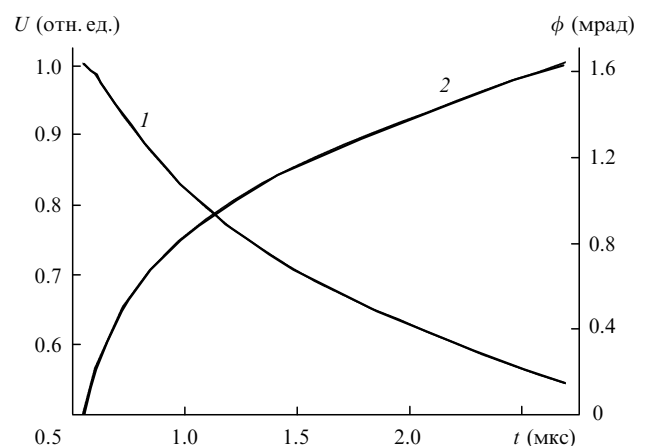


Рис.6. Рассчитанная по формуле (1) зависимость от времени угла рефракции ϕ ($\lambda = 0.63$ мкм) (1) и соответствующий сигнал фотодиода U (2).

излучение с $\lambda = 10.6$ мкм можно воспользоваться известной дисперсионной формулой Коши [10]:

$$n - 1 = A_1(1 + B_1/\lambda^2).$$

Поскольку коэффициенты A_1 , B_1 для различных газов различаются мало, можно воспользоваться табличными данными для воздуха: $A_1 = 28.8 \cdot 10^{-5}$, $B_1 = 5.7 \cdot 10^{-9}$ см². Видно, что оптическая неоднородность в воздухе в 2.4 раза меньше, чем в активной среде CO₂-лазера, однако она достигает величины, соответствующей углу рефракции ~ 0.3 мрад через 1 мкс после начала импульса разрядного тока. Такие неоднородности могут объяснить отсутствие «хвоста» генерации, поскольку они сравнимы с дифракционной расходимостью зондирующего пучка.

3. Временные и энергетические характеристики ТЕА CO₂-лазера

Описанные в предыдущей главе нарушения неоднородности активной среды для CO₂-лазера в большинстве практических случаев пренебрежимо малы, однако при некоторых параметрах лазера они могут влиять на временные характеристики CO₂-лазера, работающего в режиме свободной генерации. Такими параметрами, очевидно, являются энерговыход и газовый состав активной смеси, которые должны выбираться с точки зрения эффективности генерации в первом пике с минимальным остаточным «хвостом». Хорошо известно [11], что такой состав смеси близок к составу CO₂:N₂:He = 4:1:5. Дополнительно нужно оптимизировать добротность резонатора и его длину, чтобы обеспечить заметную задержку начала генерации относительно тока накачки. Конфигурация резонатора должна выбираться такой, чтобы обеспечить наименьшую расходимость фундаментальной поперечной моды.

Расчеты, проведенные для оценки исследуемого эффекта в случае полуконфокального резонатора с длиной 2.75 м и диаметром диафрагмы в перетяжке пучка 8 мм (число Френеля $N = 0.55$), показывают, что первоначальные дифракционные потери, равные 5%, для основной поперечной моды достигают 50% через 1 мкс после начала импульса тока разряда. При расчете использовались данные, взятые из [12]. Оценки позволяют надеяться на подавление генерации в ТЕА лазере после излучения первого пика импульса.

Экспериментальная проверка полученных оценок проводилась в гибридной схеме CO₂-лазера, работающего на основной поперечной и единственной продольной моде. Генератор состоял из описанного выше ТЕА модуля и разрядной трубки низкого давления ($p = 4$ Тор, смесь CO₂:N₂:He = 1:1:8) с активной длиной 40 см. Резонатор длиной 1.7 м был образован сферическим медным зеркалом с радиусом кривизны $R = -6$ м и плоской пластиной из ZnSe, просветленной на $\lambda = 10.6$ мкм с одной стороны (прозрачность $T = 83\%$). Вблизи плоского зеркала помещалась внутррезонаторная диафрагма диаметром 8 мм. Временная форма выходного импульса регистрировалась при различных энерговыходах в разряд. Было обнаружено, что при удельном энерговыходе, превышающем 250 мДж/см³, генерация «хвоста» импульса подавлялась со 100%-ной надежностью. Типичные формы импульсов излучения, иллюстрирующие качественное изменение характера генерации, приведены на рис.7.

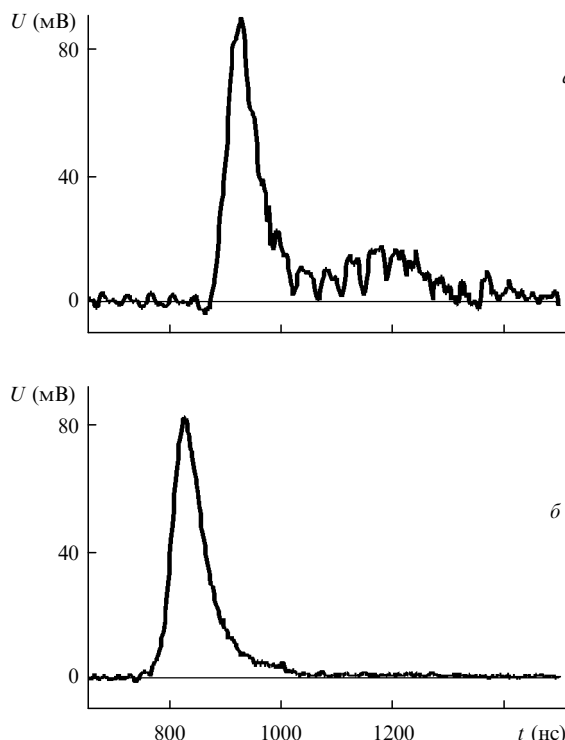


Рис.7. Типичные формы импульсов генерации при малом (а) и большом (б) энерговыходах.

Следует отметить, что рассмотренный эффект модуляции внутррезонаторных потерь не влиял на стабильность характеристик первого пика генерации. На основе описанного в данной работе прототипа ТЕА CO₂-лазера был изготовлен работающий на частоте 3 Гц задающий генератор для лазерного источника ионов в ЦЕРНе [13]. Генератор работает в одночастотном одномодовом режиме с выходной энергией до 200 мДж при длительности импульса 65–70 нс и полном отсутствии «хвоста» излучения. Существенно отметить, что снабженный схемой автоподстройки длины резонатора генератор имеет стабильность мощности по амплитуде не хуже 2%. Пространственное распределение излучения в дальней зоне близко к гауссову профилю.

Заключение

В работе проведена оптимизация параметров ТЕА CO₂-генератора, позволяющая эффективно генерировать импульсы, состоящие из одиночного гладкого пика излучения. Эффективное подавление «хвоста» генерации связывается с развитием оптической неоднородности в активной среде. Зарегистрированное в работе нарушение оптической однородности среды газового самостоятельного разряда подтверждает измерения, сделанные другими авторами с использованием отличающихся от нашей методик.

Авторы благодарят Д.Д.Малюту и А.П.Напартовича за полезные обсуждения, а также С.М.Савина за предоставленный для экспериментов фотодетектор.

1. Борисов В.М., Сатов Ю.А., Судаков В.В. *ИТЭ*, № 1, 201 (1977).
2. Carlson R.L., Carpenter J.P., Casperson D.E. et al. *IEEE J. Quantum Electron.*, 17, 1662 (1981).
3. Mathieu P., Otis G. *Proc. SPIE*, 663, 74 (1986).
4. Verreault M., Tremblay R. *Can. J. Phys.*, 55, 1289 (1977).
5. Бурцев В.А., Зеленов Л.А., Камарин И.Л. и др. *Квантовая*

- электроника*, **15**, 167 (1988).
6. Димаков С.А., Малахов Л.Н., Шерстобитов В.Е., Яшуков В.П. *Квантовая электроника*, **10**, 397 (1983).
 7. Ковалев И.О., Кораблев А.В., Кузмин Г.П., Прохоров А.М., Токер Г.Р. *Письма в ЖТФ*, **15**, № 9, 17, (1989).
 8. Сатов Ю.А., Смаковский Ю.Б., Хоменко С.В. *Патент РФ № 2096881. Изобретения*, № 32, 378 (1997).
 9. Хауф В., Григуль У. *Оптические методы в теплофизике (справочник)* (М., 1973).
 10. Борн М., Вольф Э. *Основы оптики* (М., Наука, 1973, с.103).
 11. Адамович В.А., Баранов В.Ю., Смаковский Ю.Б., Стрельцов А.П. *Квантовая электроника*, **5**, 918 (1978).
 12. Микаэлян А.Л., Тер-Микаэлян М.Л., Турков Ю.Г. *Оптические квантовые генераторы* (М., Сов.Радио, 1967, с.136).
 13. *Master-oscillator for LIS home page*: <http://cliswww.cern.ch/home.html>
- K.N.Makarov, V.K.Rerikh, Yu.A.Satov, A.E.Stepanov, S.V.Khomenko.**
Pulsed operation of a TEA CO₂ laser under the conditions of the growth of an optical inhomogeneity of the active medium at high specific pump energies.
- A CO₂ laser system with self-modulation of the intracavity losses was developed. This system was capable of generating efficiently pulses free of a radiation 'tail' typical for CO₂ lasers. A simple method was used to detect the optical inhomogeneity of the medium of a gas-discharge TEA module. The results of the measurements are presented.