

УДК 621.373 : 535

ИССЛЕДОВАНИЕ КОГЕРЕНТНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРА НА РАСТВОРАХ РОДАМИНА 6Ж ПРИ ИНТЕНСИВНОЙ ЛАЗЕРНОЙ НАКАЧКЕ

Р. Б. Андреев, С. С. Гулидов, А. Г. Калинин, Д. И. Стаселько
и В. Л. Стригун

Исследованы термооптические искажения в поглощающих растворах, наводимые интенсивным лазерным излучением. Определены $(\partial n / \partial T)_\rho$ для ряда жидкостей. Измерена пространственная когерентность излучения лазера на растворах родамина 6Ж в различных растворителях. Определены условия генерации пространственно-когерентного излучения в лазерах на растворах красителей с интенсивной лазерной накачкой.

За последнее время лазеры на красителях с интенсивной лазерной накачкой привлекли внимание исследователей как источники мощного излучения с плавноперестраиваемой длиной волны [1]. Однако когерентность излучения таких лазеров изучена недостаточно, что не позволяет оценить перспективы их использования в ряде практических приложений, например в цветной изобразительной голографии, где возможность перестройки длины волны является весьма ценной с точки зрения регулировки цветопередачи восстановленных изображений. Согласно [2, 3], одной из наиболее важных причин, определяющих пространственную когерентность излучения лазеров на растворах красителей, являются термооптические искажения (ТОИ) среды, наводимые излучением накачки. Поэтому в данной работе наряду с исследованием пространственной когерентности (ПК) лазерного излучения значительное внимание уделялось изучению оптических искажений, наводимых в растворителях.

Исследование оптических искажений в растворах

Схема экспериментальной установки для исследования ТОИ показана на рис. 1. Часть излучения одномодового неодимового лазера с модулируемой добротностью 1 [4] направлялась с помощью линзы 5 с фокусным расстоянием 725 см в кювету 11 с исследуемыми растворами. Другая часть излучения, преобразованная во вторую гармонику кристаллом *KDP* 10, использовалась для записи голографических интерферограмм ТОИ. Угол между осями объектного пучка с $\lambda = 530$ нм и греющего излучения с $\lambda = 1060$ нм составлял около 10° . Изображение кюветы переносилось с помощью линзы 12 в плоскость голограммы 13, что позволяло непосредственно по интерферограммам измерять площадь нагреваемой области. Импульсы второй гармоники излучения были сдвинуты относительно «греющего» импульса на 30 нс с помощью линии задержки, образованной зеркалами 3, 6, 14, что обеспечивало регистрацию оптических искажений в растворах к концу действия импульса накачки. Использование для нагрева сред излучения основной гармоники неодимового лазера позволило проводить измерения ТОИ в более широком интервале плотностей излучения и изменений наводимых искажений, а использование излучения второй гармоники для записи голограмм ТОИ методом двухэкспозиционной голографической интерферометрии позволяло максимально использовать чувствительность интерференционных измерений.

Объектом исследования являлись растворы CuSO_4 в обычной и тяжелой воде, этаноле, глицерине и этиленгликоле. Коэффициент поглощения растворов на $\lambda=1.06$ мкм поддерживался одинаковым и составлял 1 см^{-1} , толщина кюветы была равна 1 см, плотность излучения накачки достигала 6 Дж/см^2 . Использование растворов CuSO_4 обеспечивало переход в тепло всей поглощенной средой энергии излучения, что позволяло количественно интерпретировать результаты экспериментов.

На рис. 2 представлены примеры интерферограмм ТОИ в тяжелой воде, этаноле и глицерине. Как видно из рисунков, общий характер картины полос был сходным для всех исследованных растворов. В зоне нагрева наблюдался сдвиг полос ΔN примерно одинаковый по всему сечению зоны и мелкомасштабные искривления полос δN , обусловленные соответственно общим нагревом

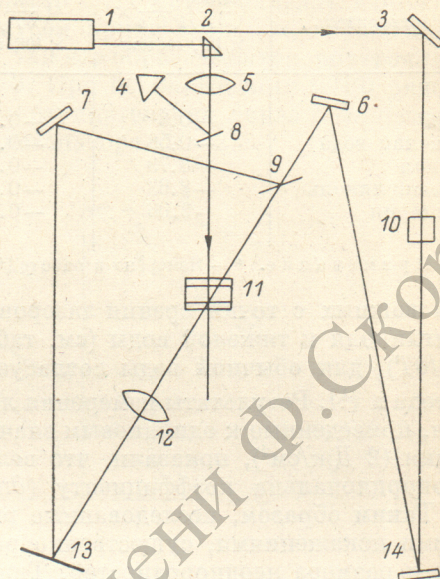


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

1 — лазер на неодимовом стекле, 2 — призма, 3, 6 — зеркала, 4 — калориметр, 5, 12 — линзы, 10 — кристаллы KDP, 11 — кювета с растворами, 13 — голограмма.

облучаемой области, а также локальными неоднородностями интенсивности греющего излучения. Оценки показывают, что указанные типы сдвигов полос соответствуют существенно различным условиям изменения показателя преломления среды. В пределах всей зоны нагрева давление жидкости, вызванное неравномерным выделением тепла, не успевало выровняться в течение времени

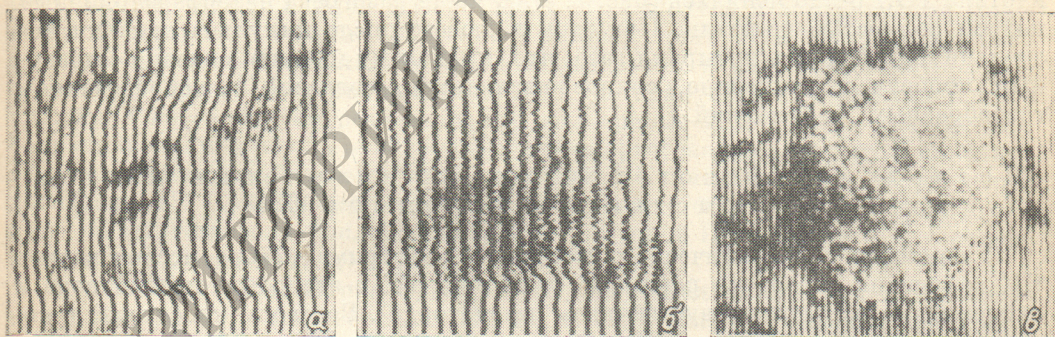


Рис. 2. Интерферограммы оптических искажений.

а — в тяжелой воде, б — этаноле, в — глицерине. Плотность накачки соответственно: 3.3, 1.3 и 2.5 Дж/см².

импульса, так как время пробега звука по сечению облучаемой области $t_{зв} = l/v_{зв}$ составляло для исследованных жидкостей $\sim 2 \div 5$ мкс, что на два порядка превосходило длительность импульса. Таким образом, общий сдвиг полос по сечению облучаемой области характеризовался температурным изменением показателя преломления при постоянной плотности $\rho - (\partial n / \partial T)_\rho (1/c_{vp})$. В то же время по отношению к мелкомасштабным неоднородностям, средний размер которых составлял 10 мкм, а время пробега по ним звука $t_{зв} \sim 10$ нс, реализовывалась противоположная ситуация — показатель преломления изменялся уже при постоянном давлении и изменение его определялось величиной $(\partial n / \partial t)_p (1/C_{pp})$, c_v и c_p — удельные теплоемкости при постоянном объеме и давлении.

Интерферометрические измерения проводились с точностью до 0.1 полосы и показали, что величина сдвигов интерференционных полос увеличивалась с ростом плотности энергии падающего излучения линейно. Обработка результатов измерений общего сдвига полос позволила найти величины $(\partial n / \partial T)_p$.

Растворитель	$\left(\frac{\partial n}{\partial T}\right)_p \frac{1}{C_{pp}} \times 10^4, \text{ см/кал}$	$\left(\frac{\partial n}{\partial T}\right)_p \times 10^4, \text{ град}^{-1}$	$ \gamma _{\text{плоск}}$	$ \gamma _{\text{неуст}}$	δN	ΔN
Вода	-0.8	-0.19	—	—	~ 0.07	0.2
Тяжелая вода	-0.58	-0.77	0.75	0.57	< 0.05	0.7
Этанол	-8.73	-0.25	0.3	0.53	0.6	0.5
Этиленгликоль	-8.63	-0.45	—	—	0.6	0.65
Глицерин	-3.06	-0.06 *	0.47	0.92	0.2	< 0.1

Примечание. * — Измерено в работе [4].

для важных с точки зрения лазеров на красителях, жидкостей: этанола, этиленгликоля и тяжелой воды (см. таблицу). Отметим, что измеренное значение $(\partial n / \partial T)_p$ для обычной воды согласуется с найденным при помощи подобного метода в [4]. Результаты измерения локальных изменений показателя преломления, приведенные к одинаковым значениям плотности энергии падающего излучения (2 Дж/см^2), показали, что величина мелкомасштабных неоднородностей пропорциональна коэффициенту $(\partial n / \partial T)_p (1/C_{pp})$ (см. таблицу).

Таким образом, исследованные растворители характеризовались динамическими искажениями, существенно различными как с точки зрения величины, так и размера неоднородностей. Тяжелая вода отличалась наибольшим значением общей неоднородности ($\delta N \approx 0.7$ полосы) и наименьшими локальными искажениями ($\delta N < 0.05$ полосы). Наименьшая величина общей неоднородности ($\delta N < 0.1$ полосы) была характерна для глицерина, а наибольшие локальные изменения δN наблюдались в этиловом спирте и этиленгликоле ($\delta N \approx 0.6$ полосы).

Следует отметить, что в глицерине начиная с плотности накачки $\geq 2 \text{ Дж/см}^2$ картина ТОИ резко менялась (рис. 2, в). В месте разогрева интерференционные полосы полностью исчезали. При этом в кювете после импульса накачки визуально наблюдались пузырьки газа, что, по нашему мнению, связано с лазерным пробоем в глицерине, сопровождающимся, согласно [5], образованием газообразных разложений.

Исследование когерентности излучения лазера на растворах родамина 6Ж

С помощью голографического метода [6] экспериментально исследовалась ПК излучения лазера на растворах родамина 6Ж в этаноле, тяжелой воде и глицерине (в плоском и неустойчивом резонаторах). Растворы красителей с коэффициентами поглощения $\sim 10 \text{ см}^{-1}$ на длине волны 530 нм заливались в кювету толщиной 1 см со скошенными под углом 3° входными гранями. В тяжелую воду для предотвращения димеризации добавлялся додецилсульфат натрия с концентрацией $5 \cdot 10^{-3} \text{ г/см}^3$. Накачка кюветы с красителями осуществлялась по квазипродольной схеме поляризованным излучением второй гармоники моноимпульсного лазера на неодимовом стекле с энергией около 2 Дж и длительностью $\tau_{\text{имп}} \approx 25 \text{ нс}$ [1]. Пучок излучения накачки диаметром 40 мм направлялся в кювету с красителем линзой с $f=350 \text{ мм}$; диаметр пятна накачки на кювете $\sim 12 \text{ мм}$. Угол между осью пучка накачки и осью резонатора лазера 7° . Длина резонатора составляла 1 м , выходное зеркало имело коэффициент отражения 30% .

Селекция продольных типов колебаний осуществлялась двумя способами: в первом случае в качестве «глухого» зеркала использовалась металлизированная нарезная дифракционная решетка (ДР) 1200 штр/мм , во втором случае устанавливалось плоское зеркало с $R \approx 99.5\%$, а между ним и кюветой с кра-

сителем помещался под углом Брюстера к оси многоступенчатый интерференционно-поляризационный фильтр (ИПФ) [1]. Энергия генерации и ширина линии излучения при этом составляли соответственно 0.5 Дж, 0.4 нм и 0.3 Дж, 0.22 нм.

Для управления пространственными характеристиками излучения использовались неустойчивые резонаторы. В резонатор с ДР устанавливалось (между ДР и кюветой) сферическое зеркало с радиусом кривизны 1.6 м, обращенное выпуклой стороной к выходному зеркалу, так что образовывался внутренний неустойчивый резонатор с увеличением $M=3$. При использовании ИПФ рядом с «глухим» зеркалом резонатора помещалась отрицательная линза с фокусным расстоянием 3 м, что давало увеличение резонатора $M=2.5$.

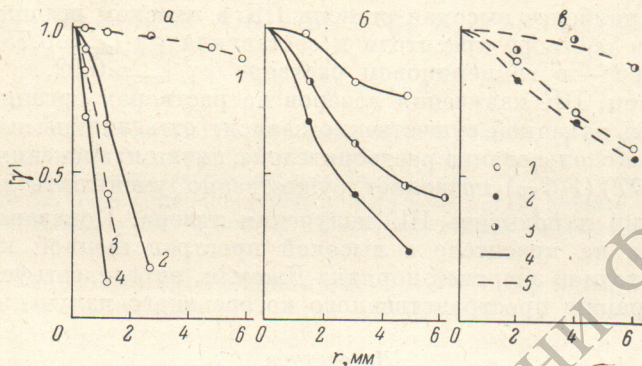


Рис. 3. Графики нормированной функции пространственной когерентности излучения лазера.

а — селектор ДР; б, в — селектор ИПФ; 1 — тяжелая вода, 2 — этанол, 3 — глицерин, 4 — плоский резонатор, 5 — неустойчивый резонатор, r — координата на торце лазера.

На рис. 3, а приведены графики нормированной функции ПК излучения лазера на растворе родамина 6Ж в тяжелой воде, построенные относительно центральной точки на торце лазера вдоль его радиусов в вертикальном (кривые 1, 2) и горизонтальном (кривые 3, 4) направлениях. Как видно из рисунка, функция ПК излучения лазера при использовании в качестве селектора ДР отличается пространственной асимметрией, которая особенно отчетливо проявилась в неустойчивом резонаторе (сравни кривые 1, 3 и 2, 4). Асимметрия сохранялась и при повороте штрихов решетки ортогонально вектору Е накачки, причем минимальный размер зон с высокой ПК наблюдался в направлении дисперсии ДР. При использовании для селекции частот ИПФ асимметрия функции ПК отсутствовала, а площадь области с высокой ПК ($|\gamma| \geq 0.7$) увеличилась приблизительно в 5 раз.

Наблюдаемая асимметрия функции ПК излучения лазера при использовании в качестве глухого зеркала ДР, по нашему мнению, связана с высокой угловой дисперсией ДР, приводящей к генерации в направлении дисперсии несвязанных между собой спектрально-угловых компонент излучения, снижающих ПК излучения. Число N таких несвязанных компонент можно оценить как отношение ширины спектра генерации $\Delta\lambda_{\text{ген}}$ к ширине спектрального элемента разрешения решетки $\Delta\lambda_p = \lambda d/b$, где d — период решетки, b — ширина используемого участка решетки (диаметр пучка в ближней зоне)

$$N = \frac{\Delta\lambda_{\text{ген}}}{\lambda} \frac{b}{d}. \quad (1)$$

В нашем случае $\lambda_{\text{ген}} = 0.4$ нм, $\lambda = 572$ нм, $b = 12$ мм, $d = 8.3 \cdot 10^{-4}$ мм, тогда $N \approx 10.1$, что позволяет оценить значение размера зоны когерентности в направлении дисперсии ДР как $b_{\text{ког}} = b/N \approx 1.2$ мм, которое хорошо согласуется с экспериментальными данными (кривая 3 на рис. 3, а).

В лазере на родамине 6Ж с ламповой накачкой, исследованном в работе [3], ширина спектра генерации при использовании в качестве селектора аналогич-

ной ДР составляла 0.05 нм, значение N , согласно (1), было близким к 1, и асимметрия функции ПК в соответствии с данной оценкой не наблюдалась [3].

В дальнейших исследованиях ПК излучения лазера для селекции продольных типов колебаний использовался ИПФ. Результаты экспериментов представлены на рис. 3, б, в и в таблице, в которой указаны значения степени ПК для точек на краю диаметра торца лазера относительно его центра в плоском и неустойчивом резонаторах. При анализе полученных данных обнаруживается наличие определенной корреляции между ПК излучения и величинами ТОИ, причем характер этой корреляции был различен для плоского и неустойчивого резонаторов. В плоском резонаторе степень ПК возрастала по мере уменьшения величины мелкомасштабных неоднородностей, тогда как в неустойчивом резонаторе ПК коррелировала с величиной плавного искажения среды. Соответственно наиболее высокая степень ПК в плоском резонаторе была получена в водном растворе красителя и составляла $|\gamma|_{\max} \approx 0.75$, а в неустойчивом резонаторе — в глицериновом растворе $|\gamma|_{\max} \approx 0.92$.

Таким образом, ПК излучения лазеров на растворах органических красителей с лазерной накачкой существенно зависит от величины и характера наводимых ТОИ. Использование растворителей с низкими значениями $(\partial n / \partial T)_p \times \times (1/C_{pp})$ и $(\partial n / \partial T)_p (1/C_{vp})$ позволяет существенно уменьшить величину наводимых искажений и повысить ПК излучения лазера. Показана возможность создания лазера на красителе с высокой пространственной когерентностью излучения и выходной энергией порядка Джоуля, определены условия, обеспечивающие генерацию пространственного когерентного излучения.

Литература

- [1] С. Б. Иоффе, Б. В. Кузнецов, А. Г. Калинин, Р. Б. Андреев. ЖТФ, 49, 4571, 1979.
- [2] А. В. Аристов, Д. А. Козловский, Д. И. Стаселько, В. Л. Стригун. Опт. и спектр., 45, 766, 1978.
- [3] А. В. Аристов, Д. А. Козловский, Д. И. Стаселько, В. Л. Стригун, А. С. Черкасов. Опт. и спектр., 41, 674, 1976.
- [4] А. И. Ерохин, Н. В. Морачевский, В. С. Файзуллов. Препринт ФИАН СССР, № 122. М., 1977.
- [5] В. С. Тесленко. Квант. электрон., 4, 1732, 1977.
- [6] Д. И. Стаселько. В сб.: Оптическая голография, 4. Наука, Л., 1975.

Поступило в Редакцию 19 мая 1982 г.