

УДК 621.373 : 535

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ОПТИЧЕСКИХ ИСКАЖЕНИЙ В РУБИНОВЫХ ЭЛЕМЕНТАХ

*В. И. Васильева, С. В. Данилов, Б. О. Майер,
В. А. Сандуленко, Д. И. Стаселько, В. Л. Стригун
и Н. П. Тихонова*

Исследована динамика профиля оптических искажений, наводимых излучением накачки в кристаллах рубина, в зависимости от их дефектности и примесного поглощения кристаллов, а также от типа используемого осветителя. Показано, что при высоком уровне инверсии в рубиновом элементе динамика таких искажений определяется примесным поглощением кристалла в ультрафиолетовой области спектра.

Изменение оптической неоднородности активного элемента за время лазерного импульса оказывает существенное влияние на пространственную когерентность генерируемого излучения [1, 2]. Поэтому при отборе активных элементов для лазеров, применяемых в голографии, и выборе условий их работы наряду с требованием высокой исходной оптической однородности возникает задача снижения динамики оптических искажений, наводимых излучением накачки [2, 3].

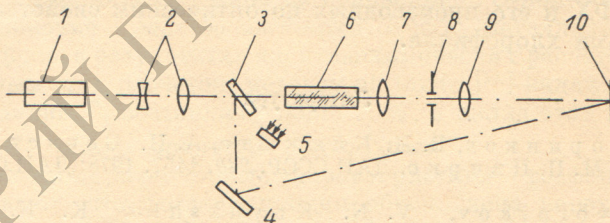


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

1 — одноимпульсный моноимпульсный рубиновый лазер, 2 — телескоп с увеличением $\Gamma=50\times$; 3 — светоделительный клин, 4 — зеркало, 5 — фотоэлемент, 6 — исследуемый рубиновый элемент, 7, 9 — однократный телескоп, 8 — диафрагма $\varnothing 0.5$ мм, 10 — голограмма.

В данной работе исследована динамика профиля оптических искажений, наводимых излучением накачки в кристаллах рубина после достижения инверсии, в зависимости от дефектности и примесного поглощения кристаллов, а также от типа используемого осветителя. Показано, что динамика таких искажений определяется поглощением ультрафиолетового излучения накачки центрами окраски, связанными с наличием примесей.

Динамика профиля оптических искажений в рубиновых элементах (РЭ) исследовалась голографическим методом двух экспозиций [4]. Схема установки приведена на рис. 1. В качестве источника излучения для записи голограмм использовался рубиновый моноимпульсный одноимпульсный лазер. В одно из плеч интерферометра помещался исследуемый РЭ и система его накачки, состоящая из осветителя (цилиндрические кварцевые моноблоки с зеркально или диффузно отражающими покрытиями) и импульсной лампы ИФП-1200. Изображение входного торца РЭ проецировалось с помощью однократной телескопической системы

7, 9 в плоскость голограммы 10. Диффрагма 8 диаметром 0,5 мм располагалась в фокальной плоскости объектива 7 и служила для отсечки излучения, переотраженного от торцов РЭ. Голограммы регистрировались на фотопленке ФП-ГВ2. Энергия накачки составляла 970 ± 15 Дж при длительности импульса накачки 900 мкс по основанию. Исследуемые РЭ и активный элемент одномодового лазера охлаждались проточной водой с одной и той же температурой, что обеспечивало генерацию лазера в центре спектрального контура усиления РЭ.

При исследовании динамики оптических искажений для каждого РЭ записывалась серия из 6—7 голографических интерферограмм, которые формировались за две экспозиции. В первой экспозиции голограмма записывалась при задержке зондирующего моноимпульса относительно

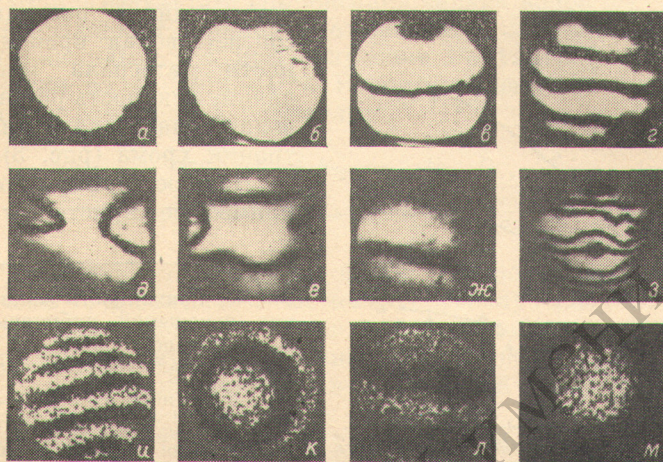


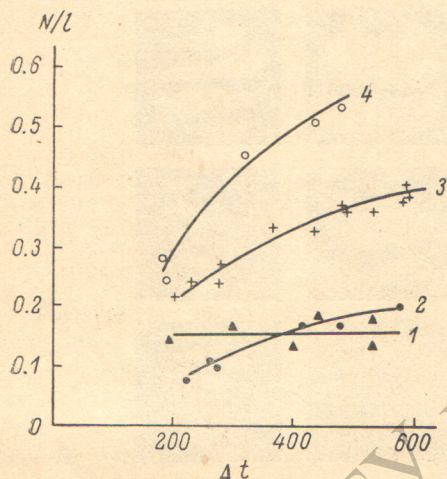
Рис. 2. Интерферограммы оптических неоднородностей в беспримесных (а, б, д, е) и окрашенных (в, г, ж, з, и—м) рубиновых элементах на различных стадиях процесса накачки.

а—г, и—м — осветитель с ДОП; д—з — осветитель с зеркально отражающим покрытием; а, в, д, ж — интервал между экспозициями $\Delta t = 200$ мкс; б, г, е, з, и—м — интервал $\Delta t = 600$ мкс; и—л — до и к, м — после фильтрации УФ части спектра излучения накачки; л — пример локальных искажений.

начала импульса накачки РЭ в 100—150 мкс, что соответствовало моменту просветления РЭ. Вторая экспозиция производилась в заданный момент времени с задержкой моноимпульса относительно первой экспозиции до 600 мкс. Дифференциальный характер использованной методики позволил исключить влияние на интерференционную картину как исходных оптических неоднородностей, так и наведенных в начале импульса накачки до момента просветления РЭ, и таким образом существенно повысить точность измерений динамики профиля оптических искажений в интервале времен, наиболее важном с практической точки зрения, когда коэффициент усиления РЭ превосходил единицу. В эксперименте коэффициент усиления достигал 10 для осветителя с зеркально отражающей поверхностью и 5 для осветителя с диффузно отражающей поверхностью (ДОП). Высокая чувствительность метода ($\sim 0.1 \lambda$) позволила зарегистрировать также наведенные локальные искажения оптической однородности РЭ.

РЭ были изготовлены из кристаллов, выращенных методами Вернейля и ГОИ [5, 6]. Концентрация хрома варьировалась от 0.011 до 0.034 вес. %. Часть РЭ, выращенных методом Вернейля, содержала примеси магния или титана с концентрацией до 0.005 вес. %. Исследуемые РЭ имели форму цилиндра с матированной боковой поверхностью, диаметром 8 мм и длиной от 85 до 120 мм.

На рис. 2 приведены примеры интерферограмм оптических искажений, возникавших в РЭ при использовании осветителей с зеркально и диффузно отражающими покрытиями. По характеру динамики наведенных оптических искажений при использовании обоих типов осветителей все исследуемые РЭ делились на две группы. В РЭ первой группы оптические искажения практически не менялись в течение исследованного интервала времени (рис. 2, а, б, д, е). При этом в осветителе с ДОП форма оптических искажений была близка к сферической (рис. 2, а, б), а в зеркальном осветителе для тех же РЭ наблюдалось типичное искривление интерференционных полос в наиболее прокачиваемых зонах (рис. 2, д, е). В РЭ второй группы наблюдалось нарастание со временем клинообразной составляющей искажений с ребром клина, перпендикулярным линии, соединяющей оси РЭ и лампы накачки (рис. 2, в, г, ж, з). Временной ход



искажений в последнем случае соответствовал временной зависимости интеграла мощности накачки, а скорость роста искажений возрастала с увеличением концентрации хрома (рис. 3).

Первую группу составляли беспримесные кристаллы, ко второй

Рис. 3. Зависимость величины оптических искажений рубиновых элементов в осветителе с ДОП от длительности интервала между экспозициями.

N — число интерференционных полос, l — длина элемента. 1 — беспримесные кристаллы; 2, 3, 4 — окрашенные рубиновые элементы. Концентрация хрома: 1 — 0.032, 2 — 0.011, 3 — 0.017, 4 — 0.030 вес. %.

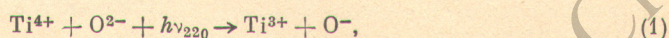
группе относились кристаллы, содержавшие примеси магния или титана и имевшие характерную рыжеватую окраску. Анализ спектров поглощения показал, что в РЭ второй группы наблюдаются полосы поглощения с максимумами около 220, 280, 370 и 470 нм, характерные для четырехвалентных ионов хрома Cr^{4+} [7], причем поглощение этих ионов в области длин волн от 200 до 300 нм было сравнимо с поглощением трехвалентного хрома в видимой области.

Клинообразный профиль искажений РЭ второй группы и ориентация ребра клина навели на мысль о преимущественном влиянии на динамику искажений поглощенной РЭ коротковолновой части излучения накачки, поскольку коэффициенты отражения покрытий обоих типов отражателей для длин волн короче 300 нм снижались примерно на порядок. В результате РЭ в этой области спектра облучались практически лишь прямым светом ламп накачки, что при наличии УФ поглощения естественным образом объясняло и наличие клина и его ориентацию. Для проверки этого предположения в ряде экспериментов ультрафиолетовое (УФ) излучение ламп накачки в области длин волн короче 270 нм отсекалось с помощью двухпроцентного раствора тиомочевины в воде. В этом случае клиновидная составляющая исчезала, а форма неоднородностей становилась такой же, как и в беспримесных кристаллах (рис. 2, и, к).

Поглощение РЭ излучения накачки в УФ области спектра в принципе могло быть связано не только с ионами Cr^{4+} , но и с возбужденными ионами Cr^{3+} [8] (в условиях нашего эксперимента населенность метастабильного уровня Cr^{3+} по оценке, основанной на измерении коэффициента усиления, составляла 60–90% ионов Cr^{3+} в исследованном интервале времени). Однако соответствие между наличием динамики оптических искажений в РЭ и присутствием в них центров окраски указывает на преимущественное влияние на этот процесс поглощения УФ излучения на-

качки центрами окраски. Это, по-нашему мнению, может быть связано с более высокими значениями коэффициента поглощения ионов Cr^{4+} по сравнению с возбужденными ионами Cr^{3+} в областях спектра 280—310 нм (коэффициент поглощения $\approx 0.2 \div 0.3 \text{ см}^{-1}$) и около 220 нм [9]. В области же спектра 240—270 нм коэффициент поглощения возбужденных ионов Cr^{3+} , напротив, значительно превосходит коэффициент поглощения ионов Cr^{4+} [8], достигая значений $\sim 100 \text{ см}^{-1}$. Однако это приводит к поглощению излучения данного спектрального состава в узкой (порядка долей миллиметра) периферийной зоне кристалла и не может объяснить появление искажений, наблюдаемых по всему сечению в кристалле.

Рассмотрим механизмы образования центров окраски в кристаллах с примесью металлов. Присутствие магния при выращивании рубина способствует появлению полос поглощения, типичных для ионов Cr^{4+} , которые образуются в результате компенсации заряда ионов Mg^{2+} [10]. В кристаллах, легированных титаном и отожженных в атмосфере кислорода, центры окраски наводятся при облучении РЭ ультрафиолетовым излучением накачки на $\lambda = 220 \text{ нм}$ [10]. Вероятный механизм их образования происходит по следующим реакциям:



Следует отметить, что в отличие от РЭ, легированных Mg, в кристаллах с примесью Ti наблюдалось частичное переизлучение в полосе с максимумом около 410 нм энергии накачки, поглощенной на $\lambda = 220 \text{ нм}$ по реакции (1). Это могло явиться следствием существования в рубине центров окраски в виде вакансий алюминия с захваченной дыркой по реакции



Рассмотренные выше наведенные оптические искажения были типичными для всех легированных кристаллов. Вместе с тем в ряде таких кристаллов наблюдались также локальные искажения, не связанные с неравномерностью освещения его излучением накачки и присущие лишь данному кристаллу. Их величина колебалась в пределах $0.1 \div 0.5 \lambda$ при длине образца 120 мм. После проведения вакуумного отжига при температуре 1980—2000° С или при отсечке УФ излучения накачки локальные искажения исчезали.

Наличие локальных искажений может быть связано с повышенной (в 5—10 раз по сравнению со средней по кристаллу) концентрацией примесей на границах блоков мозаики и полосах скольжения [11], что способствует более сильному нагреву кристалла в этих зонах. Исчезновение локальных искажений после вакуумного отжига связано с диффузионной очисткой границ блоков, а также, по-видимому, с понижением валентного состояния титана, снижающим вероятность образования Cr^{4+} . В безблочных кристаллах, выращенных по методу ГОИ, локальные искажения отсутствуют.

Таким образом, динамика профиля оптических искажений в РЭ при наличии инверсии определяется неравномерностью освещения РЭ в УФ области спектра, связанной с падением отражательной способности покрытий осветителей, и поглощением излучения накачки в этой области центрами окраски. Отсечка УФ излучения накачки позволяет реализовать режим работы РЭ, при котором профиль оптических искажений РЭ остается практически неизменным в течение интервала времени, когда коэффициент усиления превосходит единицу.

В заключение авторы выражают благодарность И. И. Афанасьеву за полезные обсуждения, М. М. Мусатову и Г. И. Романовой за предоставленные образцы рубиновых элементов.

Литература

- [1] Б. О. Майер, Д. И. Стаселько, В. Л. Стригун. Опт. и спектр., 48, № 3, 1980.
- [2] А. В. Аристов, Д. А. Козловский, Д. И. Стаселько, В. Л. Стригун. Опт. и спектр., 45, 766, 1978.
- [3] Г. В. Ананьева, В. И. Васильева, С. В. Данилов, Б. О. Майер, В. Л. Стригун. В сб.: Всесоюзная конференция по голографии. Тез. докл., 153. Л., 1978.
- [4] Ю. И. Островский, М. М. Бутусов, Г. В. Островская. Голографическая интерферометрия. «Наука», М., 1977.
- [5] М. И. Мусатов. Оптико-механич. промышл., № 8, 36, 1975.
- [6] В. Н. Иванов, В. С. Панков, В. Ф. Перов, Н. В. Гаврилов. Электронная техника, сер. «Материалы», вып. 5, 55, 1978.
- [7] Е. А. Сидорова, Ф. К. Волынец, Н. А. Сцепуро. Ж. прикл. спектр., 18, 829, 1973.
- [8] Т. К. Разумова. Автореф. канд. дисс., Л., 1968.
- [9] Е. А. Сидорова, Ф. К. Волынец, Е. А. Королев. Ж. прикл. спектр., 17, 781, 1972.
- [10] Н. А. Москвин, В. А. Сандуленко, Е. А. Сидорова. Ж. прикл. спектр., 32, 1022, 1980.
- [11] В. А. Kröger. J. Am. Ceram. Soc., 58, 335, 1975.

Поступило в Редакцию 3 января 1980 г.