

В.Т. Карпухин, И.И. Климовский, М.М. Маликов, В.В. Марковец

ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ГЕНЕРАТОРА НА ПАРАХ МЕДИ И СИСТЕМЫ «ГЕНЕРАТОР НА ПАРАХ МЕДИ – УФ-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ» В РЕЖИМЕ ЛАЗЕРНОГО МОНИТОРА

Институт высоких температур РАН, г. Москва

Поступила в редакцию 02.09.99 г.

Приводятся результаты исследования возможности и особенностей работы в режиме лазерного монитора системы, состоящей из генератора на парах меди (ГПМ) с неустойчивым резонатором, призмы Глана, обеспечивающей линейную поляризацию излучения лазера, нелинейного кристалла DKDP, преобразующего видимое излучение лазера в ультрафиолетовое, и проекционной оптической части лазерного монитора. Излучение ГПМ и УФ-излучение фокусировались на тест-мишень. Проводились наблюдения увеличенного изображения мишени на экране монитора.

Полученные результаты свидетельствуют о возможности работы ГПМ и системы «ГПМ–УФ-преобразователь» в режиме лазерного монитора. Выявлены основные факторы, затрудняющие использование ГПМ и системы «ГПМ–УФ-преобразователь» в качестве лазерного монитора, предложены способы устранения некоторых из этих факторов.

Импульсно-периодические лазеры на самоограниченных переходах атомов металлов [1] и прежде всего лазеры на парах меди (ЛПМ) обладают уникальным сочетанием двух качеств. Во-первых, высокой пиковой мощностью излучения, обеспечивающей возможность получения интенсивностей сфокусированного излучения на уровне 10^8 Вт/см² и более, необходимых для реализации сублимационного режима обработки различных материалов. Во-вторых, высокими коэффициентами усиления лазерного излучения в активной среде. Эти качества ЛПМ позволяют реализовать на их основе системы, выполняющие одновременно две функции: функцию источника рабочего лазерного луча, воздействующего на мишень, и функцию лазерного монитора, обеспечивающего контроль обрабатываемой поверхности непосредственно во время этого воздействия. Впервые возможность создания на основе системы «генератор – усилитель на парах меди» ($\lambda = 510,5$ нм) устройств для обработки микрообъектов и визуального контроля их поверхности была изучена в [2]. Однако результаты, опубликованные в [2], а также более поздние [3, 4] показали, что в понимании работы таких устройств нет полной ясности и необходимо их дальнейшее исследование. Кроме того, разработанные в недавнее время источники ультрафиолетового (УФ) излучения на базе генераторов или на базе системы «генератор – усилитель на парах меди» и нелинейных кристаллов (см., например, [5, 6]) делают актуальным вопрос о возможности работы таких источников в режиме лазерных мониторов.

В данной работе рассмотрены возможности и особенности работы генератора на парах меди (ГПМ) и системы «ГПМ–УФ-преобразователь» в режиме лазерного монитора.

Схема эксперимента по исследованию возможности использования ГПМ с неустойчивым резонатором в качестве лазерного монитора представлена на рис. 1,а. В экспериментах использовался серийный активный элемент (ГЛ-201) 1 с разрядным каналом диаметром 2 см и длиной 80 см. Частота следования импульсов возбуждения равнялась 10 кГц. Телескопический неустойчивый резонатор с коэффициентом увеличения $M = 200$ состоял из зеркал 2 (диаметр 28 мм), 3 (диаметр 1,5 мм) и призмы Глана 4.

Расстояние между зеркалами резонатора – 1,5 м. Диаметр луча на выходе из ГПМ составлял 20 мм. Излучение ГПМ фокусировалось линзой f_1 с фокусным расстоянием 150 мм на тест-мишень 5, которая представляла собой металлическую линейку с миллиметровой шкалой. Линейка располагалась вблизи фокуса линзы f_1 . Расстояние от выходного зеркала 3 резонатора ГПМ до мишени 5 выбиралось минимально возможным и составляло 470–510 мм.

Проекционная часть схемы, представленной на рис. 1,а, состояла из поворотного зеркала 6, телескопического объектива 7 (линзы f_3 и f_4), диафрагмы 8, ограничивающей изображение тест-мишень, и экрана 9, на который проецировалось увеличенное изображение мишени 5. Регистрация изображения мишени осуществлялась с помощью фотоаппарата. Цветные фотографии обрабатывались на персональном компьютере с целью выявления деталей изображения и анализа распределения цвета. Использовались графические программы типа «Ulead Credia Studio».

Призма Глана 4 выполняла двойную функцию. Во-первых, она поляризовала излучение генератора, что необходимо для целей его нелинейного преобразования в УФ-излучение в системе «ГПМ–УФ-преобразователь». В дальнейшем излучение с вектором электрического поля E_y , лежащим в горизонтальной плоскости (в плоскости рис. 1,а), будет называться E_y -излучением, а излучение с вертикальной ориентацией вектора электрического поля E_x (см. рис. 1,а) – E_x -излучением. Соответственно средние по времени мощности этих излучений будут обозначаться как W_y и W_x . Во-вторых, за счет своих поляризационных свойств призма Глана осуществляла развязку E_y -излучения, циркулирующего внутри резонатора, от отраженного от тест-мишени и усиленного в активном элементе E_x -излучения, несущего изображение предмета.

При постановке эксперимента предполагалось, что E_x -излучение, образующееся в результате частичной деполаризации падающего на мишень 5 лазерного E_y -излучения, будет возвращаться в направлении призмы Глана 4 через оптические элементы и активный объем лазера, выделяться этой призмой и направляться ею в сторону зеркала 6, обеспечивая тем самым возможность формирова-

ния на экране 9 увеличенного изображения мишени. Предполагалось также, что другая часть излучения, которая при отражении от мишени сохранит ориентацию E_y , пройдет через призму Глана в сторону зеркала 2 и, отразившись от него, поступит обратно в резонатор, где может в той или иной мере оказать влияние на распределение светового поля внутри резонатора и на его зеркалах.

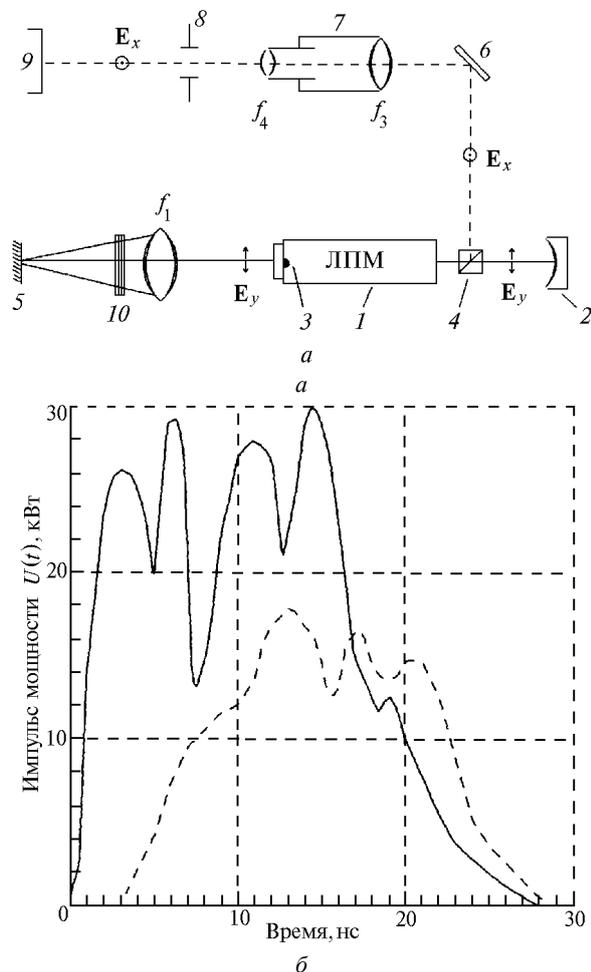


Рис. 1. Оптическая схема эксперимента по изучению возможности использования ГПМ в качестве монитора (а) и осциллограммы импульсов мощности генерации (б)

Средняя мощность генерации W на выходе ГПМ (на обеих линиях $\lambda_1 = 510,5$ нм, $\lambda_2 = 578,2$ нм и поляризациях) в рассматриваемых экспериментах составила 12–14 Вт. При этом отношение W на зеленой линии к W на желтой линии равнялось двум. Средняя мощность излучения W , идущего от призмы Глана в сторону зеркала 6 в отсутствие тест-мишени 5, равнялась 57 – 60 мВт. При наличии мишени эта мощность возрастала на 2–3%. На рис. 1,б представлены осциллограммы импульсов мощности излучения с длинами волн λ_1 и λ_2 , измеренные с помощью коаксиальных фотоэлементов в месте расположения мишени 5 для схемы эксперимента, представленной на рис. 1,а. В этом случае линза f_1 собирала и посылала на фотоэлемент весь поток излучения ГПМ, включая и суперлюминесценцию с большой расходимостью. Обращает на себя внимание то, что, начиная с 17-й наносекунды после начала генерации, мощность излучения на желтой линии λ_2 превосходит

мощность излучения на зеленой линии λ_1 и импульс генерации на желтой линии заканчивается позднее.

Для измерения степени поляризации W_y/W_x и выделения отдельных составляющих W_y и W_x использовался пленочный поляризатор. В зоне мишени 5 величина W_x/W_y составила примерно 0,01 как на зеленой, так и на желтой линиях излучения ГПМ. Величина отношения W_y на зеленой к W_y на желтой линиях равнялась 2. Такая же величина получалась и для отношения W_x на зеленой к W_x на желтой линиях. Аналогичные измерения показали, что излучение, идущее от призмы Глана в сторону зеркала 6, в основном является E_x -излучением. Величина W_y оказалась ниже уровня электрических наводок на измеритель мощности, и установить ее точное значение не удалось.

На рис. 2 представлено изображение тест-мишени на экране, полученное в эксперименте, оптическая схема которого приведена на рис. 1,а. На этом изображении выделяются следующие воспринимаемые глазом характерные детали (см. рис. 2): 1 – граница изображения тест-мишени, формирующаяся в результате ограничения луча диафрагмой 8 (см. рис. 1,а); 2 – светлая область, обусловленная достаточно сильным отражением лазерного излучения поверхностью линейки; 3 – темные штрихи линейки; 4 – светлый круг, лишенный сегмента в верхней его части (отсутствие сегмента обусловлено тем, что оправка призмы Глана перекрывает верхнюю часть лазерного луча, распространяющегося между малым и большим зеркалами резонатора); 5 – слабо различимый светлый круг, расположенный внутри круга 4 и внешне напоминающий поверхность сферического зеркала; 6 – яркие пятна (блики) внутри круга 5.

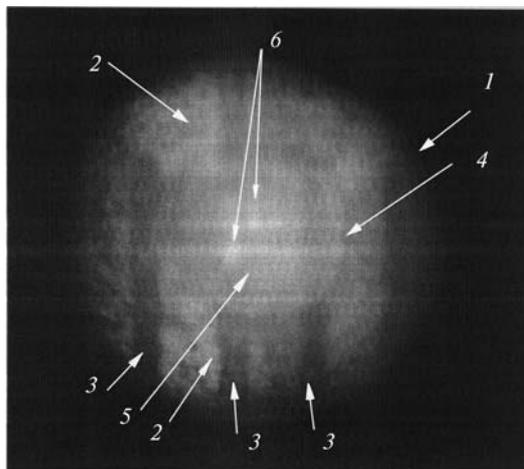


Рис. 2. Изображение тест-мишени, полученное с помощью ГПМ по схеме на рис. 1,а

Учитывая, что средняя мощность генерации на зеленой линии превышает среднюю мощность генерации на желтой линии, можно предположить, что при равных для обеих линий генерации условиях облучения мишени и отражения излучения от ее поверхности цвет изображения мишени должен быть преимущественно зеленым. Однако цвет изображения тест-мишени различен в различных его частях. Более того, преобладающим цветом является желтый. Между границей 1 и светлой областью 2 (см. рис. 2) в изображении тест-мишени преобладает зеленый цвет. На рис. 2 (в черно-белом изображении) областям, окрашенным в зеленый цвет, соответствуют наиболее темные участки изображения. Светлая область 2 окрашена в желтый

цвет за исключением небольших темных включений, окрашенных на цветном изображении тест-мишени в зеленый цвет. В области 2 отчетливо наблюдаются штрихи на линейке, причем цвет этих штрихов преимущественно зеленый. Внутри круга 3, окрашенного в желтый цвет, зеленые риски на линейке просматриваются, но гораздо менее отчетливо. Наконец, внутри круга 4, похожего на поверхность зеркала и также окрашенного в желтый цвет, зеленые штрихи на линейке различаются с большим трудом.

Учитывая форму импульсов генерации на зеленой и желтой линиях (см. рис. 1,б), наличие в излучении ГПМ E_x -излучения, отражательные и деполаризационные свойства поверхностей тест-мишени и малого зеркала, а также практически нулевую отражательную способность призмы Глана для E_y -излучения, можно сделать несколько предварительных выводов о механизмах формирования изображения тест-мишени при работе ГПМ в режиме лазерного монитора. Приграничные зеленые части изображения формируются в то время, когда генерация имеет место преимущественно на зеленой линии. Светлая (желтая) область 2 в изображении тест-мишени формируется за счет отражения от нее с малой расходимостью и высокой степенью поляризации. Полированная поверхность линейки не вызывает при отражении деполаризацию падающего на нее излучения. Учитывая, что призма Глана в направлении зеркала 6 (см. рис. 1,а) отражает E_x -излучение, желтый цвет зеркально отражающей лазерное излучение тест-мишени может быть обусловлен тем, что на выходе ЛПМ, во время генерации излучения с малой расходимостью, мощность E_x -излучения на желтой линии больше, чем мощность E_x -излучения на зеленой. По этой же причине зеркально отражающая поверхность малого зеркала также имеет желтый цвет. В пределах темных рисок на линейке наблюдаются слабое отражение и заметная, возможно различная для зеленой и желтой линий, деполаризация отраженного E_y -излучения, в результате чего в формировании изображения рисок основную роль играет образовавшееся при отражении и усиленное активной средой лазера E_x -излучение на зеленой линии. Даже при одинаковых коэффициентах отражения и деполаризации E_y -излучения на зеленой и желтой линиях в изображении рисок, по видимому, должен преобладать зеленый цвет, поскольку мощность генерации и коэффициент усиления на зеленой линии превышают мощность генерации и коэффициент усиления на желтой линии.

Характерные особенности кругов 4 и 5 указывают на то, что они не являются кругами, существующими на поверхности тест-мишени. Причина возникновения кругов 4, 5 до конца не ясна. Вероятно, они формируются в результате отражения от призмы Глана E_x -излучения на желтой линии, циркулирующего внутри резонатора. Круг 5, по видимому, представляет собой изображение поверхности малого зеркала. Дело в том, что положение изображения тест-объекта, формируемого линзой f_1 , примерно совпадает с положением малого зеркала резонатора, что и приводит к совмещению двух изображений – линейки и зеркала. И круг 4, и круг 5 возникают в результате того, что часть E_x -излучения, распространяющегося внутри резонатора от малого зеркала к большому, отражается от призмы Глана в направлении экрана 9 (см. рис. 1,а). При этом изображение малого зеркала накладывается на изображение тест-мишени. Желтый цвет кругов 4 и 5 обусловлен теми же причинами, что и желтый цвет полированной поверхности линейки.

Наличие бликов 6 внутри круга 5, имеющих также желтый цвет, может иметь по меньшей мере две причины. Во-первых, блики 6 могут возникать из-за существования на поверхности тест-мишени областей, зеркально отражающих лазерное излучение в резонатор ГПМ. Во-вторых, при зеркальном отражении излучения от поверхности тест-мишени оно слабо деполаризуется и, войдя обратно в резонатор, может привести к пространственному перераспределению светового поля в резонаторе, т.е. к появлению на зеркале 3 (см. рис. 1,а) областей повышенной интенсивности лазерного излучения, наблюдаемых в виде бликов 6.

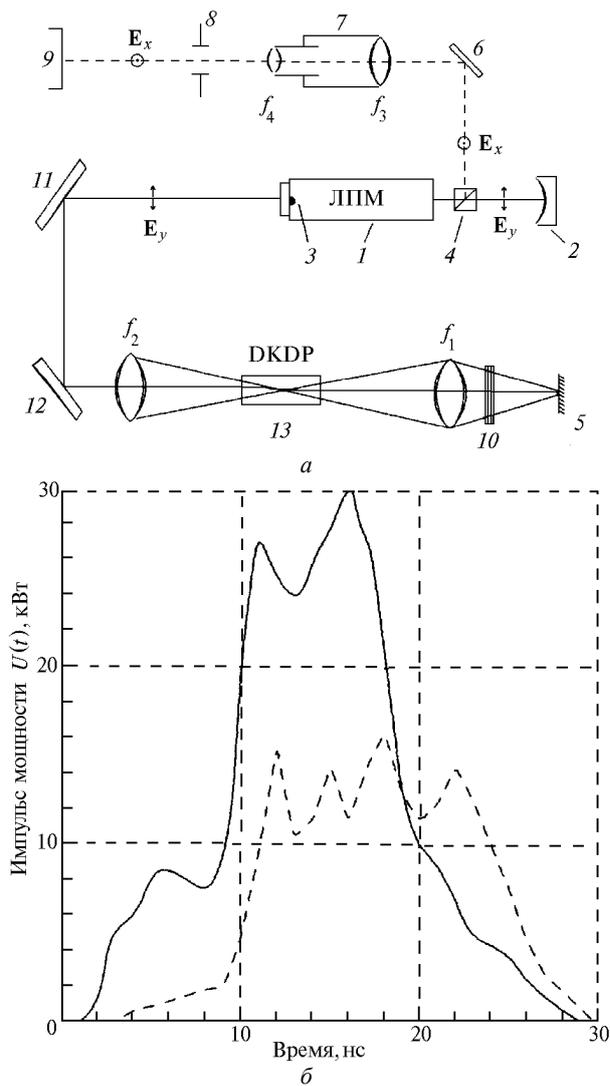


Рис. 3. Схема эксперимента по исследованию возможности работы системы «ГПМ – УФ-преобразователь» в режиме лазерного монитора (а) и осциллограммы импульсов мощности генерации (б): сплошная линия – λ_1 , штриховая – λ_2

Схема эксперимента с системой «ГПМ–УФ-преобразователь» представлена на рис. 3,а. В этой схеме излучение ГПМ с помощью плоских зеркал 11, 12 и линзы f_2 направлялось и фокусировалось в кристалл 13. Фокусное расстояние линзы f_2 составляло 550 мм. Осуществлялась генерация суммарной частоты. Излучение ГПМ преобразовывалось в УФ-излучение с длиной волны $\lambda_3 = 271$ нм.

Использовался кристалл DKDP (без просветляющих покрытий на гранях) длиной 40 мм и диаметром 10 мм, расположенный на юстировочном столике, что позволяло подстраиваться под угол синхронизма. На выходе из кристалла 13 лучи $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ фокусировались с помощью линзы f_1 из CaF₂ на мишень 5. Фокусное расстояние линзы f_1 (расстояние между линзой f_1 и мишенью 5) и светофильтр 10 – такие же, как и в предыдущем эксперименте. Расстояние от выходного зеркала 3 до мишени 5 составляло от 1630 до 1670 мм. Средняя мощность излучения ГПМ на обеих линиях проходящего через апертуру кристалла в 10 мм равнялась 6,4 Вт. Мощность УФ-излучения при оптимальной настройке кристалла по углу синхронизма достигала 0,3 Вт.

На рис. 3,б даны осциллограммы импульсов лазерного излучения для схемы, показанной на рис. 3,а. При регистрации этих импульсов вместо кристалла 13 устанавливалась диафрагма диаметром 10 мм, ограничивающая часть луча с большой расходимостью (в основном луч суперлюминесценции) и пропускающая лучи с меньшей расходимостью (~1 мрад в дальней волновой зоне), которые формируются в неустойчивом оптическом резонаторе на следующих после суперлюминесценции проходах луча. По этой причине на рис. 3,б импульсы излучения задержаны

по времени и несколько короче по длительности по сравнению с импульсами, представленными на рис. 1,б.

Для ответа на вопрос о том, оказывает ли влияние на качество изображения тест-мишени диафрагмирование лазерного излучения апертурой кристалла, было получено изображение тест-мишени (рис. 4,а) по схеме эксперимента, приведенной на рис. 3,а, но без кристалла, при использовании диафрагмы диаметром 10 мм, расположенной на месте передней грани кристалла (рис. 4,б). Изображения тест-мишени, представленной на рис. 4, практически не отличаются друг от друга, что свидетельствует об отсутствии влияния диафрагмирования апертурой кристалла лазерного излучения на качество изображения тест-мишени. Эти изображения обладают большей частью особенностями изображения тест-мишени, представленной на рис. 2. Поэтому отметим только отличительные черты изображений (рис. 4). Во-первых, область изображения, расположенная между границей 1 и светлой областью 2 и имеющая зеленый цвет, гораздо шире, чем на рис. 2. Это, по-видимому, объясняется тем, что мощность генерации на зеленой линии значительно больше, чем на желтой, в течение первых 9 нс (см. рис. 3,б), а в условиях предыдущего эксперимента – в течение первых 5 нс.

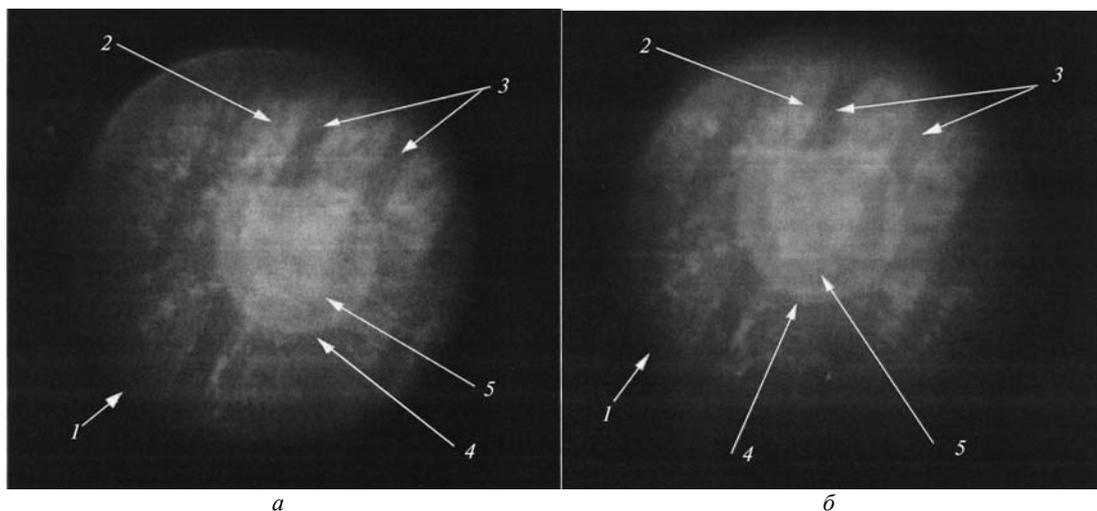


Рис. 4. Изображения тест-мишени, полученные в схеме эксперимента на рис. 3, а в отсутствие кристалла (а) и при наличии диафрагмы, имитирующей его апертуру (б)

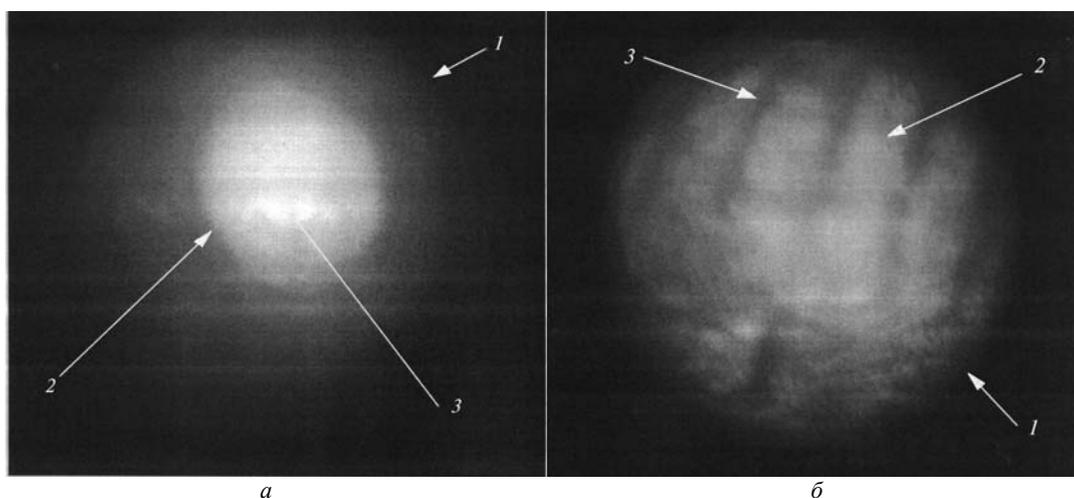


Рис. 5. Изображения тест-мишени, полученные с помощью системы «ГПМ–УФ-преобразователь» при съюстированном (а) и разъюстированном (б) кристалле

Во-вторых, светлая область 2 выражена менее отчетливо, чем на рис. 2, имеет меньший размер и расположена ближе к правому верхнему углу изображения тест-мишени.

В-третьих, светлый круг 5 не напоминает собой изображение поверхности малого зеркала резонатора. Связано это, по-видимому, с тем, что в рассматриваемом эксперименте положение изображения тест-мишени, формируемого линзой f_1 , и положение малого зеркала резонатора сильно не совпадали, что и привело к формированию на достаточно четком изображении тест-мишени размытого изображения зеркала.

В-четвертых, на изображении поверхности малого зеркала отсутствуют яркие пятна 6 (см. рис. 2). Это может быть обусловлено следующими причинами: а) изображение поверхности малого зеркала на рис. 4 расфокусировано (смазано); б) на наблюдаемой поверхности линейки отсутствуют области, зеркально возвращающие лазерное излучение в резонатор ГПМ; в) тест-мишень удалена на такое расстояние от ГПМ, что отраженное от нее излучение не оказывает влияния на распределение светового поля в резонаторе.

На рис. 5 показаны изображения тест-мишени, полученные по схеме, приведенной на рис. 3,а. На рис. 5,а представлен результат попытки получить изображение тест-мишени в случае, когда мощность УФ-излучения была максимальна (0,3 Вт) и угол падения лазерного луча на входную грань кристалла был близок к нулю. Видно, что вместо изображения тест-мишени в пределах границы изображения 1 наблюдался яркий желтый блик 2 отраженного от грани кристалла света. Внутри этого блика наблюдаются еще более яркие желтые блики 3, что, скорее всего, свидетельствует о влиянии на работу ГПМ отраженного от передней грани кристалла лазерного излучения. При небольшой отстройке оси кристалла по углу, предотвращающей попадание отраженного луча в резонатор, в пределах границы изображения 1 (рис. 5,б) блик 2 сильно уменьшался и появлялось искаженное изображение штрихов линейки 3. При этом нарушался синхронизм и мощность УФ-излучения резко падала. Отметим, что устранение

блика 2 возможно (без изменения угла оси кристалла и падения мощности УФ-излучения) за счет просветления граней или их среза под углом Брюстера.

Выводы

1. Призма Глана в резонаторе ГПМ выделяет E_x -излучение, отраженное от поверхности тест-мишени, обеспечивая тем самым возможность ее наблюдения.

2. На изображение мишени накладываются яркий желтый круг, природа образования которого непонятна, и желтое изображение малого зеркала резонатора.

3. Зависимость цвета изображения поверхности мишени от степени ее зеркальности показывает, что ГПМ, работающий в режиме монитора, позволяет по окраске изображения судить о степени шероховатости поверхности мишени.

4. Система «ГПМ–УФ-преобразователь» может работать в режиме лазерного монитора. Повышение качества изображения возможно как за счет улучшения оптических свойств различных элементов этой системы, так и за счет коррекции изображения с помощью использования персональных компьютеров и соответствующих программ.

1. Батенин В.М., Бучанов В.В., Казарян М.А., Климовский И.И., Молодых Э.И. Лазеры на самоограниченных переходах атомов металлов. М.: Научная книга, 1988.
2. Земсков К.И., Казарян М.А., Матвеев В.М., Петраш Г.Г., Самсонова М.П., Скрипниченко А.С. // Квантовая электроника. 1984. Т. 11. № 2. С. 418–421.
3. Опачко И.И., Шевера В.С. Исследование взаимодействия излучения лазера на парах меди с поверхностью твердого тела // Процессы элементарных взаимодействий в атомах. Ужгород: УжГУ, 1985. С. 189–198.
4. Опачко И.И. // Теплофиз. высоких температур. 1989. Т. 27. № 5. С. 1020–1023.
5. Piper J.A. Frequency extension of metal vapour lasers // Pulsed metal vapor lasers. NATO ASI Series (Dordrecht; London: Kluwer Academic Publishers, 1996. P. 277–287).
6. Карпухин В.Т., Конев Ю.Б., Маликов М.М. // Квантовая электроника. 1998. Т. 25. № 9. С. 809–813.

V.T. Karpukhin, I.I. Klimovskii, M.M. Malikov, V.V. Markowets. Peculiarities of CVL and System «CVL–UV-converter» in Regime of Lasers Monitor.

The possibility and peculiarities of operation of system consisting of the ultraviolet (UV) light generator (copper vapor laser (CVL)-non-linear crystal DKDP) and CVL monitor have been investigated. The CVL has an unstable resonator with coefficient of magnification $M = 200$ and radiation polarised by a Glan prism. The light of CVL and UV-generator were focused on the test-target and analysed by CVL monitor. The main factors of this system efficient operation are discussed.