

О возможности контроля волнового фронта широкоапертурного HF(DF)-лазера методом тальбот-интерферометрии

А.Б.Игнатъев, С.Ю.Казанцев, И.Г.Кононов, В.М.Марченко, В.А.Феофилактов, К.Н.Фирсов

Экспериментально исследована возможность применения метода тальбот-интерферометрии для контроля волновых фронтов широкоапертурных импульсных HF(DF)-лазеров. Проведен поиск чувствительных экранов для визуализации излучения HF(DF)-лазера и других импульсных лазеров ИК диапазона. Наиболее удобными для регистрации тальбот-интерферограмм (тальбограмм) оказались экраны на основе мелкодисперсного графитового порошка, наносимого на жесткую основу. Свечение экранов под действием лазерного импульса регистрировалось цифровым фотоаппаратом, и изображение вводилось в компьютер для оперативной обработки. Получены контрастные тальбограммы многочастотного излучения HF-лазера, что указывает на возможность контроля волновых фронтов HF(DF)-лазеров методом тальбот-интерферометрии без выделения отдельной линии генерации.

Ключевые слова: HF(DF)-лазер, контроль волновых фронтов, тальбот-интерферометрия, визуализация излучения среднего ИК диапазона.

1. Введение

Электрохимические нецепные HF(DF)-лазеры являются мощными и удобными источниками излучения среднего ИК диапазона спектра ($\lambda = 2.6 - 3.1$ мкм (HF-лазер) и $\lambda = 3.6 - 4.2$ мкм (DF-лазер)). Излучение DF-лазера попадает в окно прозрачности атмосферы, что при наличии большого числа линий в спектре генерации создает уникальные предпосылки применения этих лазеров для контроля загрязнений атмосферы с помощью лидаров [1]. Лазеры на нецепной химической реакции экологически безопасны, исходные компоненты их рабочих смесей (SF_6 , H_2 , D_2 , углеводороды, углейдегидриды) нетоксичны, а сами рабочие смеси взрывобезопасны. Высокие энергия и импульсная мощность, достигнутые при использовании данного класса лазеров (~ 400 Дж и ~ 2 ГВт [2]), позволяют проводить измерения концентрации различных веществ в атмосфере на длинных трассах [3]. В настоящее время разрабатываются HF(DF)-лидары бортового (вертолетного) базирования на основе метода дифференциального поглощения, с помощью которых можно осуществлять дистанционные измерения с использованием топографического отражателя на расстояниях до 15 км [4–6]. Для формирования пространственного распределения интенсивности излучения мощных HF(DF)-лазеров методами адаптивной оптики [7] необходим контроль формы волновых фронтов (ВФ).

Из множества методов оптического контроля ВФ (см. работы [8–10] и ссылки в них) для измерения формы ВФ широкоапертурных мощных лазеров представляется при-

влекательной интерферометрия на основе эффекта Тальбота [10], оптическая схема которой аналогична схеме теневого метода Гартмана [8]. Отличительной особенностью тальбот-интерферометрии является возможность исследования формы ВФ по тальбот-интерферограмме (тальбограмме) – контрастному распределению интенсивности когерентного излучения, формируемому двумерной решеткой с одинаковыми периодически расположенными отверстиями. В отличие от гартманогаммы, тальбограмма служит индикатором когерентности поля по всей апертуре ВФ. Искажение формы ВФ вычисляется по смещению контрастных световых пятен, совпадающих по форме с отверстиями. При измерении смещений световых пятен требования к фотометрированию распределения интенсивности излучения на тальбограммах ниже, чем на гартманогаммах, а чувствительность к фазовым искажениям и пространственное разрешение датчика ВФ на основе эффекта Тальбота выше, чем у гартмановского [10].

Обычно контрастные тальбограммы получают при пропускании через двумерную решетку монохроматического излучения [10]. Спектр каждого импульса излучения HF(DF)-лазера содержит много линий, и целью настоящей работы являлось исследование возможности применения тальбот-интерферометрии для регистрации формы ВФ таких лазеров без выделения отдельной линии генерации.

2. Экспериментальная установка и методика экспериментов

2.1. Контроль ВФ методом тальбот-интерферометрии

Подробное изложение методики тальбот-интерферометрии и ее применения для анализа ВФ широкоапертурных лазерных пучков содержится в работе [10] (там же приведен обзор других методов анализа ВФ).

В методе тальбот-интерферометрии плоские волны разлагаются на двумерной решетке с произвольными по

А.Б.Игнатъев, В.А.Феофилактов. НПО «Алмаз» им. А.А.Расплетина, Россия, 125190 Москва, Ленинградский просп., 80
С.Ю.Казанцев, И.Г.Кононов, В.М.Марченко, К.Н.Фирсов. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: kazan@kapella.gpi.ru

Поступила в редакцию 26 февраля 2007 г., после доработки – 16 апреля 2007 г.

форме, но одинаковыми периодически расположенными отверстиями на распространяющиеся под кратными углами пространственные гармоники, в результате интерференции которых в ближней зоне Френеля воспроизводится распределение интенсивности на решетке на расстояниях

$$L_n = 2p^2n/\lambda, \quad (1)$$

где L_n – расстояние от решетки до плоскости воспроизведения; p – период решетки; λ – длина волны излучения; $p \gg \lambda$; $n = 1, 2, 3 \dots$

Распределение интенсивности в плоскостях воспроизведения в случае плоского или сферического ВФ имеет подобную решетке периодическую структуру. При плоском ВФ периоды распределения совпадают с периодами решетки. При выпуклом ВФ периоды увеличиваются, при вогнутом – уменьшаются. Если ВФ не является плоским или сферическим, в плоскости воспроизведения происходит нарушение периодичности распределения интенсивности. Увеличение периода в некоторой области апертуры пучка свидетельствует о появлении в этой области оптической неоднородности типа рассеивающей линзы, а его уменьшение – о появлении фокусирующей линзы.

Световые пятна тальбограмм на приемном экране в отличие от распределений интенсивности в гартманограммах контрастны, потому что ширина границ пятен определяется дифракцией ВФ не на отдельном отверстии, как в методе Гартмана, а на апертуре решетки. Работа датчика ВФ основана на измерении смещения координат контрастных световых пятен на тальбограммах искаженных ВФ в плоскостях воспроизведения. Локальные углы наклона ВФ $\Delta\gamma$ измеряются в плоскостях воспроизведения. В приближении оптического клина $\Delta\gamma = \Delta r/L_n$, где $\Delta r = [(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2]^{1/2}$, а $\Delta x, \Delta y$ – смещения координат пятен из-за искажения ВФ (в прямоугольной системе координат). Нормальное уклонение ВФ $\Delta z = p\Delta\gamma$. Радиус кривизны ВФ R определяется в параболическом приближении по изменению периодов Δp в плоскости воспроизведения: $R = pL_n/\Delta p$. Для получения информации о форме ВФ достаточно измерить координаты центров контрастных пятен излучения на тальбограммах.

2.2. Выбор экранов для визуализации излучения нецепного HF(DF)-лазера

Основным критерием при выборе материала экранов являлась возможность получения обрабатываемой интерферограммы в несфокусированном лазерном пучке после его прохождения через периодическую решетку. В соответствии с этим требованием экраны должны обладать достаточно высокой чувствительностью к воздействию лазерного излучения. Исследовались экраны на основе термочувствительной бумаги и металлизированной полиэтиленовой пленки, а также экраны на основе бумаги или пленки из винипроса, покрытых мелкодисперсным графитовым порошком (графитизированные экраны). Интерферограммы на экранах двух первых типов, получаемые в результате разрушения покрытий лазерным излучением, сканировались и вводились в компьютер для дальнейшей обработки. Свечение графитизированных экранов под действием лазерного излучения фотографировалось цифровым фотоаппаратом, и изображение также вводилось в компьютер для дальнейшей обработки.

2.3. Схема эксперимента по регистрации тальбограмм

В экспериментах использовался разработанный в ИОФ РАН нецепной электрохимический HF(DF)-лазер ТН-15 с разрядным объемом ~ 3 л, максимальная энергия HF-лазера составляла 15 Дж, а DF-лазера – 12 Дж при длительности импульса по полувысоте ~ 140 нс. Лазер работал в моноимпульсном режиме, промежуток времени между выстрелами составлял не менее 3 мин. Рабочая смесь SF_6 с донорами водорода или дейтерия готовилась непосредственно в разрядной камере. Отношение объема камеры к разрядному объему составляло ~ 80 , что позволяло производить до 50 выстрелов без смены рабочей смеси. Камера герметизировалась окнами из BaF_2 . Внешний резонатор длиной 1.8 м был образован плоскими алюминиевым и диэлектрическим зеркалами, коэффициент отражения выходного диэлектрического зеркала в диапазоне длин волн $\lambda = 2.7 - 3.1$ мкм составлял 30%. Для уменьшения расходимости излучения и улучшения качества лазерного пучка в разрядной камере перед выходными окнами были установлены две круглые диафрагмы диаметром 5 см, вырезавшие центральную часть пучка. В этой геометрии резонатора максимальная энергия HF-лазера составляла 3.5 Дж. Спектральной селекции излучения не проводилось. В таком режиме в спектре генерации HF-лазера, как известно, присутствует более 15 линий [11].

Общая схема эксперимента по исследованию возможности визуализации тальбограмм на длинах волн излучения нецепного HF(DF)-лазера с помощью различных экранов представлена на рис.1. Лазерный пучок проходит через периодическую решетку (толщина 0.1 мм, период $p = 1$ мм) и падает на поверхность экрана, установленного на расстоянии $L_n = 2np^2/\lambda$ от решетки (плоский ВФ). В большей части экспериментов использовался HF-лазер, при этом $n = 1$. Величина L_1 варьировалась в диапазоне 65–77 см. Для наиболее интенсивной линии в спектре HF-лазера с длиной волны $\lambda = 2.7$ мкм, расстояние $L_1 = 74$ см. Изображение на поверхности графитизированных экранов, излучающих в видимой области спектра при воздействии на их поверхность лазерного импульса, регистрировалось цифровым фотоаппаратом. Съемка, как видно из рис.1, проводилась либо под углом к оптической оси (непрозрачный экран), либо с обратной стороны полупрозрачного экрана на основе винипросовой пленки.

Плотность энергии лазерного излучения на поверхности периодической решетки W изменялась в диапазоне 0.1–0.3 Дж/см² в зависимости от чувствительности экрана.

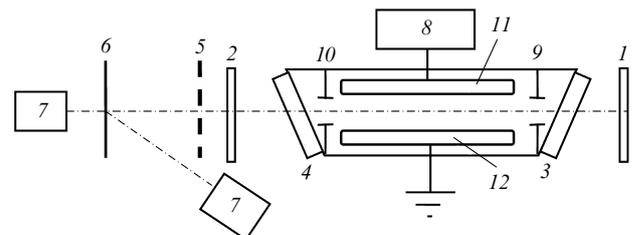


Рис.1. Схема эксперимента:

1, 2 – зеркала HF(DF)-лазера; 3, 4 – окна из BaF_2 ; 5 – периодическая решетка; 6 – экран; 7 – цифровой фотоаппарат; 8 – генератор импульсных напряжений; 9, 10 – круглые диафрагмы диаметром 5 см; 11, 12 – электроды лазера.

3. Результаты экспериментов

Чувствительность экранов на основе термобумаги к воздействию несфокусированного пучка лазерного излучения оказалась недостаточной для регистрации интерференционной картины. Использование в качестве экрана металлизированной пленки позволило получать контрастные тальбограммы. Для надежной регистрации тальбограмм в этом случае плотность энергии лазерного излучения W на поверхности периодической решетки должна была превышать 0.18 Дж/см^2 . Полученное в результате сканирования изображение отпечатка лазерного пучка на экране из металлизированной пленки, установленном на расстоянии $L_1 = 74 \text{ см}$ от периодической решетки, представлено на рис.2. Как видно из этого рисунка, несмотря на большое число линий в спектре генерации лазера изображение контрастно, что позволяет определить координаты центров пятен на тальбограмме и построить двумерную картину ВФ лазерного пучка. Однако недостатками экрана на основе металлизированной пленки являются довольно высокий порог оптического разрушения металлического слоя и «одноразовость» использования.

Более удобными оказались графитизированные экраны, свечение которых могло быть надежно зарегистрировано цифровым фотоаппаратом при плотности падающей на периодическую решетку энергии $W \approx 0.12 \text{ Дж/см}^2$. На рис.3 представлены интерферограммы, полученные на экране из бумаги, покрытой графитовым порошком, при $L_1 = 74 \text{ см}$. Они отражают влияние юстировки резонатора на ВФ излучения (рис.3,а – резонатор разъюстирован, рис.3,б – съюстирован). Из рис.3,а видно, что разъюстировка резонатора приводит к «смазыванию» интерференционной картины. При правильной установке зеркал резонатора интерферограмма становится яркой и контрастной. На рис.4 представлены интерферограммы, полученные на том же экране при том же $L_1 = 74 \text{ см}$. Они иллюстрируют влияние возмущений атмосферы на ВФ лазерного излучения (рис.4,а – атмосфера на пути прохождения лазерного пучка не возмущена, рис.4,б – атмосфера возмущена тепловым потоком от пламени свечи, расположенной за выходным зеркалом на расстоянии $\sim 1 \text{ м}$ до периодической решетки и на 20 см

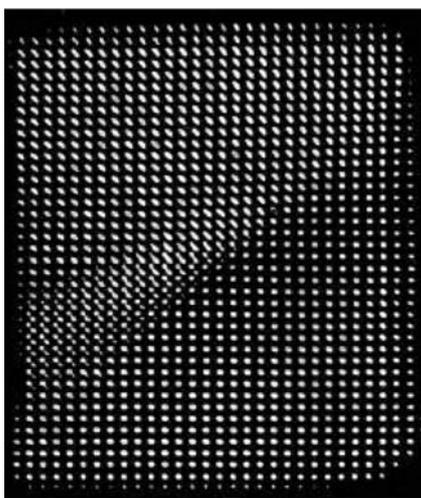


Рис.2. Полученное в результате сканирования изображение тальбограммы на металлизированной пленке при $L_1 = 74 \text{ см}$.

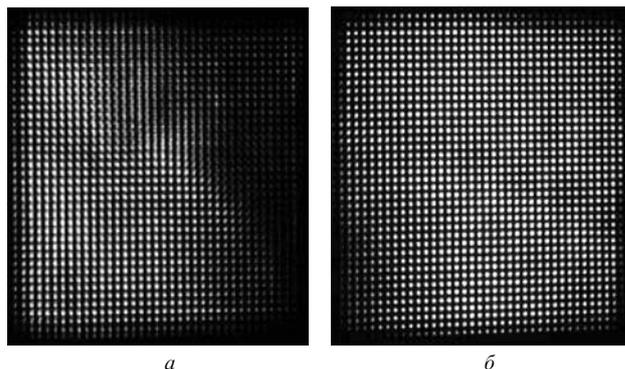


Рис.3. Тальбограммы, полученные на экране из бумаги, покрытой графитовым порошком, при разъюстированном (а) и съюстированном (б) резонаторе лазера; $L_1 = 74 \text{ см}$.

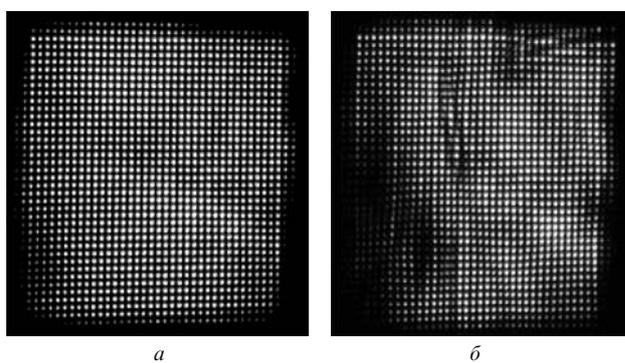


Рис.4. Тальбограммы, полученные на экране из бумаги, покрытой графитовым порошком, когда атмосфера на пути прохождения лазерного пучка не возмущена (а) и когда она возмущена тепловым потоком (б); $L_1 = 74 \text{ см}$.

ниже оптической оси системы). Из рис.4,б видно, что тепловой поток заметно искажает ВФ.

Предпочтительными для визуализации интерферограмм оказались экраны на основе пленки из винипроса, покрытой графитовым порошком. Эти экраны прозрачны для видимого света. Поэтому свечение графита под действием лазерного излучения могло регистрироваться цифровым фотоаппаратом, установленным за экраном на оптической оси системы (см. рис.1), что позволяло избежать искажений картины, обусловленных углом съемки в случае использования непрозрачных экранов. На

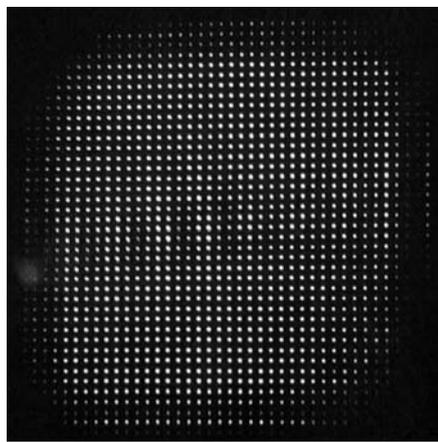


Рис.5. Тальбограмма, полученная на полупрозрачном графитовом экране при $L_2 = 148 \text{ см}$.

рис.5 приведена тальбограмма, полученная при расстоянии между полупрозрачным экраном и периодической решеткой $L_2 = 148$ см. Из сравнения рис.3, 4 и 5 видно, что увеличение n приводит к уменьшению площади контрастной интерференционной картины. На интерферограмме исчезают крайние ряды светящихся точек, т.е. уменьшается в целом объем информации о ВФ. Поэтому целесообразно регистрировать тальбограммы при $n = 1$. Заметим, что интерферограммы были контрастны во всем спектральном диапазоне генерации HF-лазера. Не вызывает сомнений, что этот метод интерферометрии может использоваться и для контроля волновых фронтов DF-лазеров.

4. Заключение

Таким образом, в настоящей работе показана возможность применения метода тальбот-интерферометрии для контроля ВФ широкоапертурных импульсных HF(DF)-лазеров. Исследованы различные экраны для визуализации интерферограмм. По совокупности характеристик наиболее удобными для применений являются графитизированные экраны (бумага и пленка из винипроса, покрытые графитовым порошком), имеющие высокую чувствительность к воздействию лазерного излучения. Использование этих экранов и современной цифровой фототехники позволяет оперативно вводить регистрируемые интерферограммы в компьютер для дальнейшей обработки. Достоинством графитизированных экранов является также практическое отсутствие апертурных ограничений, что дает возможность их применения для контроля ВФ мощных широкоапертурных HF(DF)-лазеров и других лазеров ИК диапазона.

Следует отметить высокое качество лазерного пучка использовавшегося в экспериментах HF(DF)-лазера, о чем свидетельствует сама возможность получения контрастных и неискаженных тальбограмм на расстояниях L_2 , соответствующих второй плоскости воспроизведения.

Работа частично поддержана РФФИ (гранты № 06-02-08032-офи и 05-08-33704) и Фондом содействия отечественной науке.

1. Agroskin V.Y., Bravy B.G., Chernyshev Y.A., Kashtanov S.A., Kirianov V.I., Makarov E.F., Papin V.G., Sotnichenko S.A., Vasiliev G.K. *Appl. Phys. B*, **81**, 1149 (2005).
2. Белевцев А.А., Фирсов К.Н. *Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Том XI-4. Газовые и плазменные лазеры* (М.: Физматлит, 2005, с. 761).
3. Межерис Р. *Лазерное дистанционное зондирование* (М.: Мир, 1987).
4. Матвиенко Г.Г., Пташник И.В., Романовский О.А., Харченко О.В., Шаманаев В.С. *Прикладная физика*, № 1, 129 (2002).
5. Великанов С.Д., Елутин А.С., Кудряшов Е.А., Пегоев И.Н., Синьков С.Н., Фролов Ю.Н. *Квантовая электроника*, **24**, 279 (1997).
6. Васильев Б.И., Маннун У.М. *Квантовая электроника*, **36**, 801 (2006).
7. Беспалов В.И., Пасманик Г.А. *Нелинейная оптика и адаптивные лазерные системы* (М.: Наука, 1986).
8. Васильев Л.А. *Теневые методы* (М.: Наука, 1968).
9. *Оптический производственный контроль*. Под ред. Д.Малакары (М.: Машиностроение, 1985).
10. Коряковский А.С., Марченко В.М., Прохоров А.М. *Труды ИОФАН*, **7**, 33 (1987).
11. Баранов В.Ю., Выхайло Ф.И., Демьянов А.В., Кочетов И.В., Малюта Д.Д., Толстов В.Ф. *Квантовая электроника*, **10**, 2075 (1983).