

УДК 534.4; 535.8

А. РЕБАНЕ, О. ОЛЛИКАЙНЕН

ЗАПИСЬ ДВУХЭКСПОЗИЦИОННЫХ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ ИНТЕРФЕРОГРАММ СВЕРХКОРОТКИМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ В СРЕДАХ С ФОТОВЫЖИГАНИЕМ СПЕКТРАЛЬНЫХ ПРОВАЛОВ

(Представил К. К. Ребане)

Введение

В [1] теоретически предложен новый способ интерферометрического анализа быстро меняющихся во времени широкополосных световых импульсов на основе развитого в Институте физики АН ЭССР метода пространственно-временной голографии в средах с фотовыжиганием спектральных провалов (ФСП) [2].

В настоящей работе экспериментально показано, что путем записи двухэкспозиционных пространственно-временных голограмм и последующего считывания их с помощью непрерывно сканируемого по частоте узкополосного лазера можно исследовать спектрально-зависящую структуру интерференционных полос, которая отражает различие между двумя пространственно-временными сценами.

Новым аспектом по сравнению с обычными методами интерферометрии [3] в данной работе является то обстоятельство, что сканирование считывающего узкополосного лазера по частоте позволяет выявить спектральную зависимость интерферограммы. Другими словами, благодаря записи пространственно-временной голограммой всех спектральных компонентов широкополосных световых сигналов, интерферометрический подход к анализу амплитудно-фазовых характеристик распространяется не только на пространственные, но и на временные аспекты сцены.

Последнее особенно существенно при записи голограмм короткими широкополосными лазерными импульсами с малой длиной когерентности порядка 10^{-2} — 10^{-4} см, поскольку традиционный подход, использующий запись статических или квазистатических (стробоскопических) интерферограмм, в этом случае малоэффективен.

Описание экспериментальной установки

Для записи голограмм (см. рис. 1) использовали синхронно-накачиваемый квазинепрерывный (частота повторения импульсов 82 МГц) пикосекундный лазер на красителе Родамин 6Ж. Длительность импульсов лазера на красителе (измеряли с помощью ГВГ-автокоррелятора на нелинейном кристалле йодата лития) составляла 3—4 пс. Ширина спектра импульсов несколько превышала ширину соответствующих данной длительности спектрально-ограниченных импульсов и на длине волны 623 нм составляла 10 — 15 см $^{-1}$.

Для считывания интерферограмм применяли узкополосный перестраи-

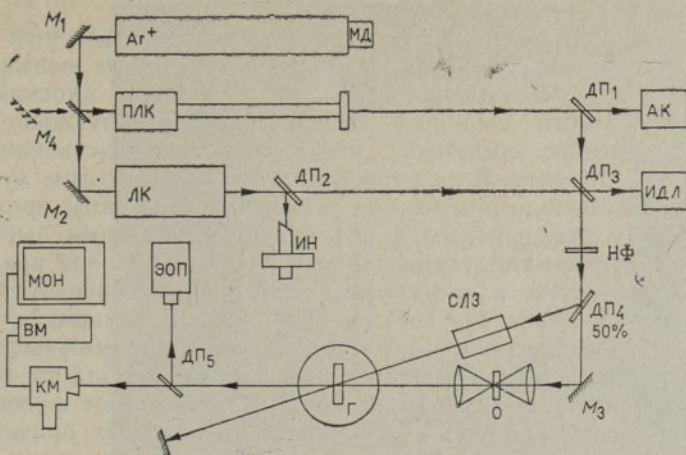


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: Ag^+ — аргонный ионный лазер; МД — акусто-оптический модулятор добротности; ПЛК — квазинепрерывный синхронно накачиваемый пикосекундный лазер на красителе; ЛК — узкополосный непрерывный лазер на красителе со сканированием длины волны; ДП₁—ДП₅ — делители пучка; М₁—М₄ — зеркала; ИН — анализатор спектра; АК — измеритель ГВГ автокорреляции пикосекундных импульсов; ИДЛ — измеритель длины волны; НФ — нейтральный фильтр; Г — пластинка-голограмма; О — объект (мира микроскопа); ЛЗ — стеклянная оптическая линия задержки; ЭОП — электронно-оптический преобразователь; КМ — видеокамера; ВМ — видеомagniтофон; МОН — видеомонитор.

ваемый по частоте непрерывный лазер «Coherent 490», работающий на красителе DCM. Ширина спектра узкополосного лазера составляла менее $0,1 \text{ см}^{-1}$ с областью непрерывной перестройки $4\text{--}5 \text{ см}^{-1}$ за счет поворота внутрирезонаторного кварцевого эталона. Ширину и частоту линий генерации лазера измеряли анализатором спектра «Coherent 240» (область измерения 1 см^{-1}), измерителем длины волны «Burleigh WA-10L» и монохроматором МДР-4.

Накачку обоих лазеров на красителе осуществляли общим аргонным ионным лазером «Spectra Physics 171», причем накачку пикосекундного лазера проводили в режиме синхронизации мод (включался акусто-оптический модулятор добротности), а накачку непрерывного лазера — в непрерывном режиме.

Голограммы записывались на пластинке толщиной 4 мм и с поперечным размером $20 \times 20 \text{ мм}$, которая была изготовлена из полистирола с примесью молекул протопорфирина (концентрация примеси 10^{-3} моль/литр). Как и ранее [2, 4], пластинку-голограмму погружали в иммерсионный гелиевый криостат с оптическими окнами, где она находилась при температуре 1,8 К.

Максимум рабочей неоднородно-уширенной полосы поглощения молекул протопорфирина находился при 621,5 нм. Пропускание образца в максимуме поглощения до экспозиции записи составляло 1,2%.

Временную структуру пикосекундных сигналов измеряли с помощью электронно-оптического преобразователя с синхронной разверткой (ЭОП) с временным разрешением 15—20 пс. Пространственные изображения голограмм и интерферограмм либо фотографировали, либо записывали с помощью видеокамеры и видеомagniтофона.

Результаты и обсуждение

Методика записи голограмм в данном эксперименте была аналогичной описанной ранее [2, 4, 5]. Выходной пучок квазинепрерывного пикосекундного лазера был ослаблен нейтральным фильтром и разде-

лен 50%-ным светоделителем на референтный и объектный лучи. Для записи изображения пластинку-голограмму облучали совместно референтным и объектным импульсами так, что почти плоский волновой фронт референтного импульса достигал регистрирующей пластинки раньше объектного импульса, несущего пространственно-временное изображение. Объектный луч пересекался с референтным лучом в плоскости пластинки-голограммы под углом 10° . При этом временную задержку между референтным и объектным импульсами выбирали так, чтобы она не превышала характерного времени фазовой релаксации T_2 (время T_2 составляет в данной ФСП-среде при температуре 1,8 К порядка 1 нс), но была бы все же значительно больше длительности самих импульсов. Поскольку в данных условиях прямой интерференции между референтным и объектным импульсами в области голограммы не возникало, запись голограммы проводилась за счет фазовой памяти возбужденных электронных состояний ФСП-активных примесных центров [2, 4, 5].

Для записи голограммы требовалась экспозиция порядка $100 \text{ мДж} \cdot \text{см}^{-2}$. При средней интенсивности записывающих лучей $0,5 \text{ мВт} \cdot \text{см}^{-2}$ длительность экспозиции записи голограммы составляла несколько минут, т. е. аккумулировалось ФСП-действие порядка 10^{10} пар импульсов.

В отличие от предыдущих работ, в которых записывались однократные пространственно-временные образы, в данном эксперименте была поставлена цель осуществить запись двухэкспозиционной голограммы-интерферограммы. В качестве записываемого модельного образа служила стеклянная пластинка с изображением шкалы (мира микроскопа), которую ставили на пути объектного луча. Шкала освещалась «на просвет» с помощью короткофокусной линзы (объектива микроскопа), а прошедший через стеклянную пластинку расходящийся пучок вновь коллимировался второй фокусирующей линзой.

В результате первой экспозиции на голограмме был записан образ, пространственная структура которого соответствовала изображению шкалы, а временная (спектральная) структура — одиночному импульсу длительностью 3 пс и с временной задержкой относительно референтного импульса 187 пс.

По окончании первой экспозиции ход записывающих референтного и объектного лучей несколько изменяли, после чего эта же пластинка-голограмма экспонировалась еще раз. Вариация хода лучей заключа-

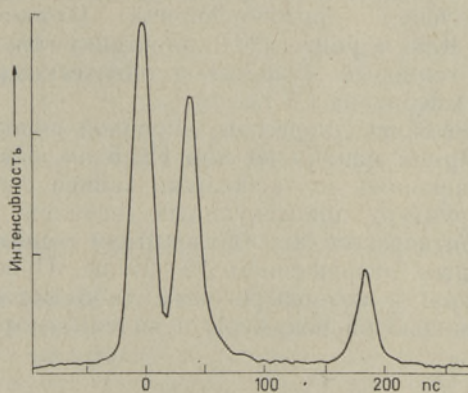


Рис. 2. Временная развертка воспроизведенного с двухэкспозиционной голограммы сигнала при считывании пикосекундными лазерными импульсами. Импульсы при задержках 188 и 44 пс — сигнальные импульсы, записанные соответственно при первой и второй экспозициях. Импульс при нулевой задержке — рассеянный на оптических элементах считывающий референтный импульс.

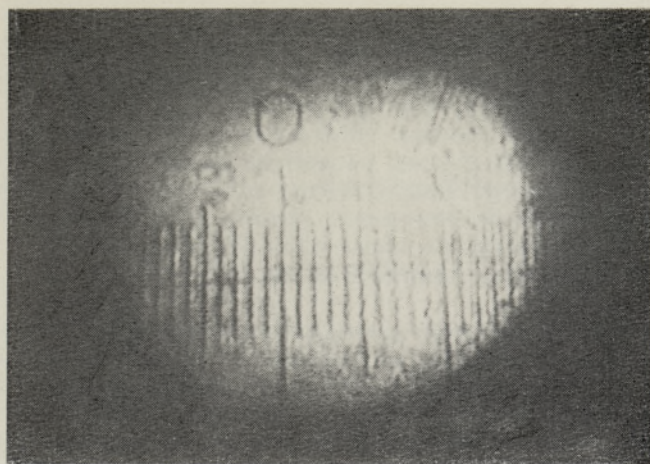


Рис. 3. Сфотографированное с видеомонитора изображение шкалы мира, воспроизведенное с двухэкспозиционной голограммы в процессе считывания широкополосным пикосекундным лазером.

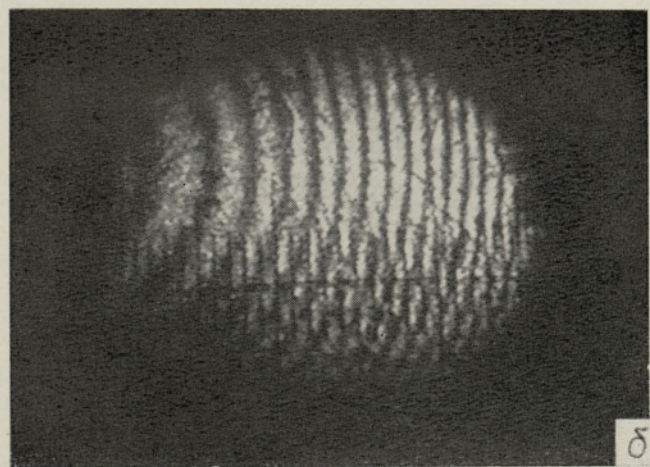
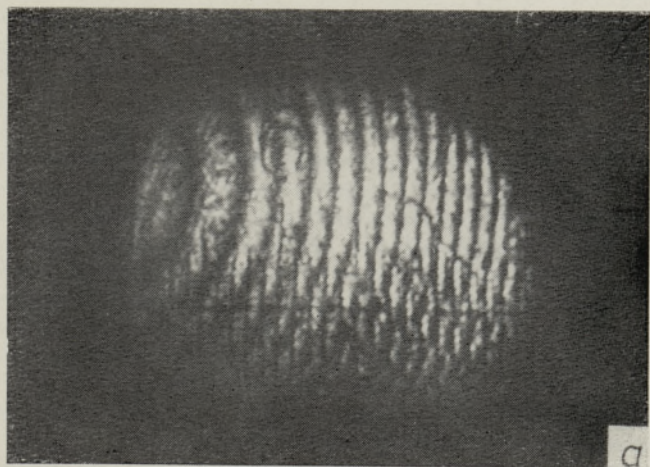


Рис. 4. Сфотографированные с видеомонитора голографические изображения, которые наблюдались в процессе считывания двухэкспозиционной голограммы с помощью перестраиваемого по частоте узкополосного лазера: *а* — частота считывающего лазера $\nu_1 = 16051.30 \text{ см}^{-1}$; *б* — частота считывающего лазера $\nu_2 = 16051.45 \text{ см}^{-1}$.

лась, во-первых, в повороте зеркала M_3 с целью изменения на $0,5^\circ$ носительного угла наклона объектного луча в горизонтальном направлении и, во-вторых, во введении в оптический путь референтного луча толстого стеклянного блока. Стеклянный блок длиной 70 мм вызывал дополнительное малое искривление волнового фронта и одновременно служил оптической линией задержки, уменьшающей временной интервал между записывающими голограмму референтным и объектным импульсами. При второй экспозиции задержка объектного импульса составляла 47 пс, т. е. стеклянный блок задерживал референтный импульс на 140 пс.

Считывание двухэкспозиционной голограммы традиционным способом с помощью ослабленных по интенсивности референтных пикосекундных импульсов воспроизводило одновременно оба записанных пространственно-временных образа примерно с равной интенсивностью. Результат измерения временной структуры воспроизведенного с голограммы сигнала приведен на рис. 2. При нулевой задержке изображен считывающий референтный импульс, который попадал на входную щель ЭОП из-за частичного рассеяния на оптических элементах экспериментальной схемы. Второй импульс, следующий за референтным, соответствует воспроизведению образа, записанному при второй экспозиции, а третий — воспроизведению образа, записанному при первой экспозиции. Подчеркнем, что записанные при первой и второй экспозициях образы воспроизводились в данном случае с голограммы в разные моменты времени (с задержками 187 и 47 пс соответственно), что исключало возможность их прямой интерференции. Невозможность наблюдать интерференцию между двумя образами при считывании голограммы пикосекундным лазером иллюстрируется так же и на рис. 3, где воспроизведено пространственное изображение двухэкспозиционной голограммы, сфотографированной с экрана ТВ-монитора.

Далее считывание голограмм осуществлялось узкой спектральной линией перестраиваемого по частоте непрерывного лазера на красителе DCM. Длина волны генерации непрерывного лазера была совмещена с длиной волны 623 нм записи голограммы, а направление лазерного луча было совмещено с исходным направлением луча пикосекундного лазера. Интенсивность считывающего референтного луча на голограмме была понижена до уровня $5 \text{ мВт} \cdot \text{см}^{-2}$ с целью предупредить чрезмерное просветление и стирание голограммы.

Согласно [1], освещение пластинки-голограммы узкополосным лазером (ширина спектра $0,1 \text{ см}^{-1}$) воспроизводило определенный узкий спектральный участок записанной спектрально-селективной голограммы, т. е. воспроизводилась лишь та часть образов, частота которых соответствовала оптической частоте считывающего лазера. Таким образом, воспроизведенное с голограммы «монохроматизированное» двойное изображение имело четкую структуру интерференционных полос, которая была скрыта от наблюдения при считывании голограммы широкополосным источником (пикосекундным лазером). На рис. 4 приведены изображения, которые наблюдались в случае узкополосного считывания голограммы при двух разных фиксированных частотах лазера. Наблюдаемая пространственная структура интерференционных полос была обусловлена различием между двумя записанными на голограмме пространственными образами, т. е. небольшим расхождением угла наклона, а также искривлением волнового фронта одного из изображений из-за неровности торцевых поверхностей использованного стеклянного блока.

В принципе, применяя хорошо развитые в области традиционной оптической интерферометрии методы анализа интерферограмм [3], данным способом можно, например, исследовать форму и степень искажений волновых фронтов сверхкоротких лазерных импульсов, не ис-

пытывая при этом ограничения на запись голограмм из-за малой степени временной когерентности широкополосных импульсов.

Однако, на наш взгляд, наибольший интерес в данном эксперименте представляет уникальная возможность исследовать спектральную зависимость (дисперсию) интерферограмм. Чтобы продемонстрировать эту новую возможность частота считывающего лазера плавно изменялась в пределах 4 см^{-1} . Направленное равномерное сканирование частоты считывающего лазера приводило к направленному сдвигу интерференционных полос по полю изображения. При прохождении области сканирования лазера 4 см^{-1} через каждую фиксированную точку изображения проходило примерно 16,5 интерференционных максимумов. Определенный данным образом период спектральных интерференционных полос имел величину $0,24 \text{ см}^{-1}$. В пределах точности измерения это соответствует величине $(\tau \cdot c)^{-1}$, где τ — значение относительной временной задержки между записанными на голограмме двумя образами (140 пс) и c — скорость света.

Отметим, что хотя в данном первом эксперименте нарушения периодичности спектральных интерференционных полос не наблюдалось, в принципе [1], описанный метод является весьма чувствительным для обнаружения и измерения разнообразных спектральных амплитудно-фазовых аномалий и искажений широкополосных световых сигналов. Действительно, по аналогии с известным методом анализа дисперсии Рождественского [6] аномальная спектральная зависимость разницы длины оптического пути (например, из-за наличия узкой линии поглощения или узкого провала в спектре) должна обнаруживаться как отклонение от строгой периодичности спектральных интерференционных полос. По спектральной зависимости этих деформаций можно непосредственно определить дисперсию исследуемого объекта.

Принципиальное преимущество данного способа перед известным методом Рождественского заключается, на наш взгляд, в возможности точной пространственной локализации спектральных аномалий, что в случае использования традиционных спектральных приборов реализовать нельзя. Отметим, что в данном эксперименте дисперсия, вводимая стеклянным блоком, была равномерной по всему полю изображения и составляла величину порядка 10^{-4} нм^{-1} . Для определения частотной зависимости показателя преломления стекла в данном эксперименте следует увеличить число измеряемых спектральных интерференционных полос, что можно осуществить, во-первых, за счет введения дополнительной временной задержки между сравниваемыми образами (возможно увеличение задержки вплоть до 1 нс) и, во-вторых, за счет применения фемтосекундных лазерных импульсов с более широким спектром до $100\text{—}200 \text{ см}^{-1}$ [7].

В заключение отметим, что используя запись пространственно-временных голограмм в ФСП-средах, по аналогии с традиционной голографической интерферометрией можно осуществить и разнообразные другие пространственно-временные интерферометрические схемы, например, с однократной экспозицией [8], обладающие определенными дополнительными преимуществами в зависимости от характера поставленной задачи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ребане А., Аавиксоо Я. // Изв. АН ЭССР. Физ. Матем., 1988, 37, № 3, 346—348.
2. Saari, P., Kaarli, R., Rebane A. // J. Opt. Soc. Amer., 1986, B3, 527—537.
3. Островский Ю. И., Бутосов М. М., Островская Г. В. Голографическая интерферометрия М., Наука, 1980.
4. Ребане А., Каарли Р., Саари П. // Изв. АН ЭССР. Физ. Матем., 1985, 34, № 3, 328—330.
5. Саари П., Ребане А. // Изв. АН ЭССР. Физ. Матем., 1984, 33, № 3, 322—332.
6. Ландсберг Г. С. Оптика. М., Наука, 1976.
7. Rebane, A., Aaviksoo, J., Kuhl, J. // Appl. Phys. Lett. (в печати).
8. Rebane, A. Aaviksoo, J. // Optics Lett. (в печати).

Институт физики
Академии наук Эстонской ССР

Поступила в редакцию
27/1 1989

A. REBANE, O. OLLIKAINEN

KAHESÄRITUSELISTE HOLOINTERFEROGRAMMIDE SALVESTAMINE ÜLILÜHIKESTE LASERIMPULSSIDEGA SPEKTRAALSÄLKAMISEGA KESKKONDADES

Eksperimentaalselt on realiseeritud uudne meetod kahesärituseliste holointerferogrammide saamiseks, kasutades aegruumiliste hologrammide salvestamist spektraalsälgatud keskkondades. On näidatud, et kui kasutada interferogrammide taasesitamiseks skaneeritavat kitsajoonelist laserit, võimaldab kõnealune meetod uurida pikosekundiliste signaalide ruumilist ja ka ajalis-spektraalset struktuuri.

A. REBANE and O. OLLIKAINEN

DOUBLE EXPOSURE HOLOGRAPHIC INTERFEROMETRY OF ULTRASHORT OPTICAL TRANSIENTS VIA PHOTOCHEMICAL HOLE BURNING

A new method of storage and investigation of double-exposure holographic interferograms is demonstrated experimentally. Feasibility of interferometric analysis of both spatial and temporal-spectral characteristics of ultrashort light signals is demonstrated by performing the read-out of the stored in time-space images via a scanning narrow-bandwidth CW laser.