

О ПОЛУЧЕНИИ И ВОЗМОЖНОСТЯХ ПРИМЕНЕНИЯ СПЕКТРОВ-ГОЛОГРАММ

А. Г. Жиглинский, Г. Г. Кунд и А. О. Морозов

Предложен метод спектроскопических исследований, отличающийся от традиционных спектроскопических методов тем, что излучение линейчатого спектра делится по амплитуде на два наклоненных друг относительно друга пучка (в один из которых помещается исследуемый объект), а затем направляется в спектрограф, в фокальной плоскости которого регистрируют спектр-голограмму. На этапе восстановления последней может быть получена информация обо всех макроскопических параметрах исследуемой волны. Обсуждаются источники света и схемы получения спектров-голограмм, а также возможности их применения.

В в е д е н и е

Предлагается метод спектроскопических исследований, в принципе позволяющий записывать информацию одновременно об амплитуде, фазе, поляризации световой волны, их пространственном распределении в разных частотах и восстанавливать эту информацию.

Метод отличается от традиционных спектроскопических методов тем, что излучение от источника линейчатого спектра делится по амплитуде на два наклоненных друг относительно друга пучка (в один из которых помещается исследуемый объект), а затем направляется в спектрограф. При этом в фокальной плоскости последнего регистрируют спектр-голограмму. На этапе ее восстановления может быть получена информация обо всех указанных макроскопических параметрах исследуемой волны. Таким образом, возможности чисто спектроскопических измерений могут быть дополнены возможностями, которые предоставляет голография. При этом достоинства традиционной спектроскопии и голографии реализуются одновременно.

Источники света для получения спектров-голограмм

К источникам света, применяемым для получения спектров-голограмм, предъявляются три основных требования. Кроме достаточной для регистрации спектра интенсивности, их излучение должно обладать достаточной длиной когерентности и пространственной когерентностью. Эти характеристики излучения не являются независимыми, поэтому необходимо получить удовлетворительную совокупность всех этих характеристик.

Для получения спектров-голограмм оказалось возможным применять довольно широкий набор газоразрядных источников света, работающих при не слишком высоких давлениях и плотностях разрядного тока. Так, в данной работе получены спектры-голограммы с источником света с полым катодом, положительным столбом тлеющего разряда и ртутной лампой ПРК. Особое внимание авторами было уделено источнику с полым катодом. Ширина спектральных линий такого источника составляет сотые

доли ангстрема, и соответствующая длина когерентности квазимонохроматических составляющих спектра достигает десятков сантиметров, что обеспечивает невысокие требования к выравниванию оптических путей интерферирующих пучков. Полый катод излучает богатый линейчатый спектр атомов и ионов и может служить источником спектров как газов, так и металлов, в том числе нескольких элементов одновременно. Основной трудностью при получении спектров-голограмм с газоразрядными источниками света является сравнительно невысокая яркость и ограниченная пространственная когерентность излучения последних. Однако проведенные измерения этих характеристик излучения разряда в полом катоде показали, что они могут быть достаточными для голографических целей [1], в том числе и для голографической спектроскопии. В экспериментах по записи спектров-голограмм со специально разработанным для этих целей источником с полым катодом, экспозиция пленки Изопанхром-18, например, составляла 1 мин при размере области когерентности световой волны 0.3 мм (область когерентности здесь — геометрическое место точек волнового фронта, степень взаимной когерентности в которых ≥ 0.7).

Запись и восстановление спектра-голограммы

В данной работе для получения опорного и предметного пучков применялось амплитудное деление волны и схема голографии сфокусированных изображений, которая, как известно, обладает наименьшими требованиями к пространственной когерентности излучения [2]. Последнее диктует ее выбор при работе с газоразрядными источниками света, имеющими невысокую пространственную когерентность. При получении спектров-голограмм в плоскости, где волновые фронты предметного и опорного пучков совмещены (при монохроматическом освещении здесь обычно расположена голограмма), помещали входную щель спектрографа. В выходной плоскости последнего образуются разложенные в спектр изображения входной щели, которые и образуют спектр-голограмму. Полученный спектр отличается от обычного тем, что каждая спектральная линия имеет внутреннюю интерференционную структуру, которая несет информацию об амплитуде и фазе исследуемой волны и их пространственном распределении, а положение такой линии в спектре — о частоте излучения. Существенными отличиями спектра-голограммы от обычного спектра является также наличие в структуре каждой линии достаточно высокой несущей пространственной частоты, позволяющей реализовать основное преимущество внеосевой голографической схемы — возможность разделения изображений на стадии восстановления, а также то, что излучение каждой длины волны регистрируется не в виде узкой линии, а в виде достаточно широкой полоски, чтобы иметь возможность исследовать пространственные характеристики объекта. Для получения (при восстановлении спектра-голограммы) информации в каждой длине волны без потери дифракционной эффективности достаточно, чтобы голограммы, образованные различными спектральными линиями, не перекрывались. Отметим, что в общем случае когерентность излучения при прохождении оптической системы (например, спектрографа) может изменяться. Однако известно [3], что при отсутствии aberrаций степень пространственной когерентности в любых двух точках выходного зрачка оптической системы равна степени когерентности в сопряженных точках входного зрачка. Поэтому, если осветить спектрограф так, чтобы его входным зрачком являлась входная щель, то в выходной плоскости степень пространственной когерентности квазимонохроматических компонент излучения сохранится такой же, как и на входе. Поэтому при построении схемы для голографической спектроскопии задача сводится к получению необходимой когерентности излучения на входной щели спектрографа.

При получении спектра-голограммы предметный и опорный пучки целесообразно расположить в плоскости, перпендикулярной направлению дисперсии спектрографа. При этом восстановленные одновременно в раз-

ных длинах волн изображения изучаемого объекта будут разделены по вертикали от недифрагировавшего излучения сразу по всему спектру. Для получения спектров-голограмм разумно использовать излучение, спектральная ширина линий которого не разрешается спектрографом. В этом случае некогерентность излучения не скажется на качестве голограмм. Применение результатов анализа, проведенного в [4] для голографических схем сфокусированных изображений, к схеме получения спектров-голограмм приводит к дополнительному требованию, а именно, чтобы область когерентности на входной щели спектрографа разрешалась им на выходе. Современные спектрографы и чувствительные фотопластинки имеют пространственное разрешение $\approx 10^{-2}$ мм, что позволяет получать спектры-голограммы при размерах области пространственной когерентности на входной щели $\geq 10^{-2}$ мм.

На стадии восстановления спектра-голограммы с целью извлечения информации об объекте в каждой длине волны линию-голограмму можно восстанавливать как в лазерном свете, так и в свете источника, который использовался при записи. В последнем случае спектр-голограмму возвращают в первоначальное положение (т. е. в фокальную плоскость спектрографа). Для получения цветного изображения необходимо совместить изображения, восстановленные в разных длинах волн. Для этой цели может быть использован второй спектрограф, задняя фокальная плоскость которого при восстановлении совмещается с фокальной плоскостью первого спектрографа, а цветное изображение наблюдается через входную щель второго спектрографа.

Экспериментальная установка и результаты

Одна из применявшихся схем получения спектров-голограмм представлена на рис. 1. Источником света S служили газоразрядные источники различных типов (лампа ПРК, положительный столб тлеющего разряда, разряд в полом катоде). Применялся также специально разработанный источник света с полым катодом [5] длиной 50 см с расположенным на оси анодом. Система зеркал Z_1, Z_2, Z_3 обеспечивала совмещение полученных амплитудным делением предметного и опорного пучков на входной щели D спектрографа Sp (использовался автоколлимационный спектрограф с дифракционной решеткой 600 штр/мм с линейной дисперсией в первом порядке 0.8 нм/мм). Голограммы регистрировались на пленке Изопанхром-18

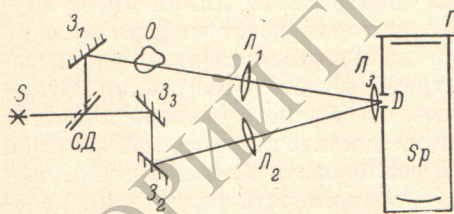


Рис. 1. Схема установки для получения спектров-голограмм.

S — источник света, CD — светоделитель, L_1, L_2, L_3 — линзы, Z_1, Z_2, Z_3 — зеркала, Sp — спектрограф, Γ — голограмма, O — объект.

в свете линий инертных газов (неон, аргон, гелий), а также металлов (медь, стронций, ртуть) в области спектра $430 \div 670$ нм. Спектрографом одновременно перекрывался спектральный диапазон около 90 нм. На рис. 2 представлена типичная спектр-голограмма, полученная в диапазоне 585—670 нм в излучении неона, наполнявшего полый катод. В этой области длин волн получалось 19 непереложенных голограмм размером 3×15 мм каждая, с которых восстанавливалось изображение исследуемого объекта. Следует отметить, что, когда линии спектра имеют разную интенсивность, дифракционные эффективности элементарных голограмм будут различны. Вид увеличенного участка голограммы с несущей пространственной частотой ≈ 40 мм $^{-1}$, полученной по схеме рис. 1 в отсутствие объекта, представлен на рис. 3, а. Интерференционные полосы несущей частоты расположены вдоль спектра, что обеспечивает возможность разделения восстановленных изображений по вертикали на всех линиях одновременно. В некоторых экспериментах перед входной щелью спектрографа устанавлива-

лась антивиньетирующая линза L_3 , позволяющая использовать более высокие входные щели спектрографа.

Одним из голографируемых объектов была система из двух штриховых мир (разнесенных по лучу зрения на 5 см), каждая из которых перекрывала половину предметного пучка. Штрихи обеих мир в плоскости голограммы были расфокусированы и визуально не разрешались. Увеличенное изоб-

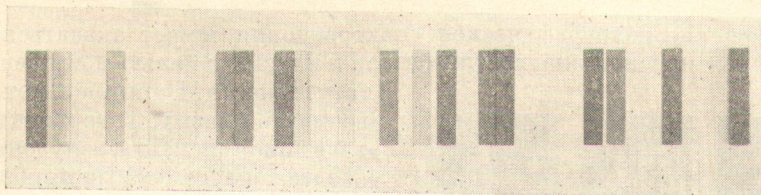


Рис. 2. Фотографии голограммы-спектра.

ражение участка такой голограммы представлено на рис. 3, б. Восстановление голограммы проводилось как с лазером, так и с полым катодом (при возвращении голограммы в фокальную плоскость спектрографа). На рис. 4, а представлен вид элементарной голограммы ($\lambda=585.2$ нм) и восстановленные с нее изображения мир при последовательной фокусировке на изображение каждой из них (рис. 4, б, в). Этот рисунок демонстрирует воз-

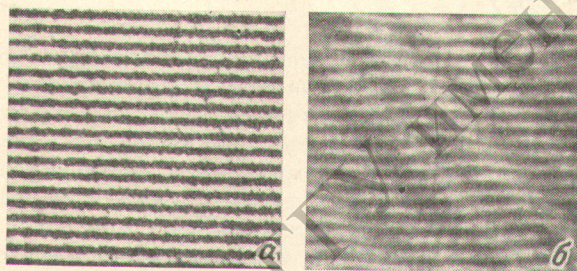


Рис. 3. Увеличенный участок голограммы, полученный без объекта а и с объектом б.

можность получения с помощью спектра-голограммы информации не только о распределении яркости по объекту, но и об объемных свойствах последнего, которые заключены в записанном волновом фронте. На рис. 5 показано отношение яркости восстановленного со спектра-голограммы изображения стеклянного фильтра КС-11 к яркости предметного пучка, прошедшего мимо фильтра, в зависимости от длины волны. На этом же рисунке приведен график спектрального пропускания фильтра, взятый из его паспорта. Результаты этого эксперимента подтверждают правильность передачи голограммой информации также и о спектральном составе экспонирующего ее излучения. Метод голографической спектроскопии был применен также для получения голографических интерферограмм фазовых объектов (плазмы) методом двух экспозиций.

З а к л ю ч е н и е

Итак, разработан метод голографической спектроскопии, позволяющий одновременно записывать информацию об амплитуде, фазе и спектральном составе световой волны. Метод может применяться как с газоразрядными, так и с лазерными источниками света. Достоинством метода является сохранение дифракционной эффективности при увеличении числа регистрируемых длин волн. При использовании газоразрядных источников света голограмма лишена спекл-структуры. Предлагаемый метод записи

спектра-голограммы может быть легко обобщен для записи всех четырех параметров световой волны, включая поляризацию (например, аналогично [6]). Поэтому можно считать, что предлагаемая схема открывает возможность осуществить полную запись и восстановление световой волны. Метод также может быть применен для целей хранения цветовой информации, для цветного кино и получения многоцветных объемных изображений, идентичных объекту по всем четырем макрохарактеристикам световых волн.

Применение голографической спектроскопии может оказаться полезным для резонансной диагностики газов и плазмы с целью повышения чувствительности. Например, можно просвечивать плазму, содержащую один из изотопов элемента, излучением другого изотопа, тем самым приближаясь к области максимальной рефракции. Следует отметить возможность голографирования многокомпонентной плазмы в нескольких длинах волн одновременно и, согласно [7], при этом разделять изучать отдельные компоненты этой плазмы или различные состояния атомов одного сорта. Пред-

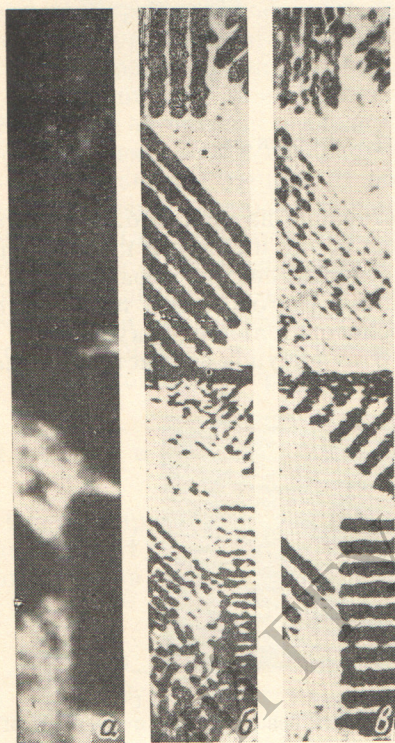


Рис. 4. Линия-голограмма (а) и восстановленные с нее изображения при фокусировке на верхнюю миду (б) и на нижнюю миду (с).

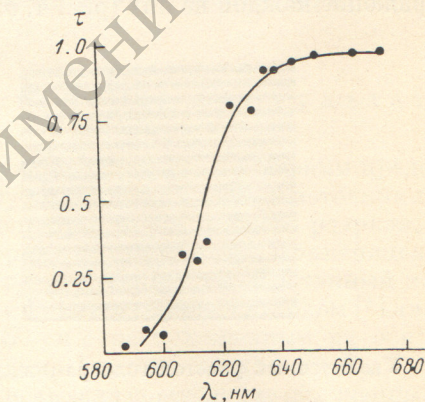


Рис. 5. Зависимость относительной яркости τ изображений стеклянного фильтра от длины волны.

Сплошная линия — паспортная кривая спектрального пропускания фильтра КС-11, точки — результаты эксперимента.

ставляет интерес также открывающаяся возможность получать голограммы в областях спектра, где отсутствует лазерная генерация, например в вакуумном ультрафиолете.

Литература

- [1] А. Г. Жиглинский, Г. Г. Кунд, А. О. Морозов. Опт. и спектр., 45, 995, 1978.
- [2] Н. Г. Власов, С. Н. Смирнов, А. Е. Штанько. В сб.: Передача информации и ее обработка (под ред. Н. Н. Евтихиева), 83. М., 1976.
- [3] М. Борн, Э. Вольф. Основы оптики. «Наука», М., 1973.
- [4] Н. Г. Власов, А. Н. Гордеев, Н. П. Пресняков, А. Е. Штанько. Матер. IX Всес. школы по голографии, 96, ЛИЯФ, Л., 1977.
- [5] В. В. Кучинский, А. О. Морозов. Опт. и спектр., 46, 130, 1979.
- [6] И. А. Дерюгин, В. Н. Курашов, Д. В. Поданчук, Ю. В. Хоршков. В сб.: Проблемы голографии, вып. 2, 227, М., 1973.
- [7] Ю. И. Островский. Авт. свид. № 268732, 1961. Бюлл. изобр. № 14, 1970.

Поступило в Редакцию 14 декабря 1978 г.