

## ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ ФУРЬЕ-СПЕКТРОМЕТР НА БАЗЕ МИКРОИНТЕРФЕРОМЕТРА ЛИННИКА

к.т.н. Штанько А.Е.  
МГТУ «СТАНКИН»

Любой двухлучевой интерферометр, работающий в режиме полос конечной ширины, в принципе может быть использован как пространственный Фурье-спектрометр. Убывание контраста интерференционной картины на выходе такого интерферометра по мере удаления от полосы нулевого порядка, определяется шириной спектра используемого излучения. Регистрация интерференционной картины с последующим ее Фурье преобразованием позволяет определить спектр излучения.

В связи с широким распространением, которое получил микроинтерферометр Линника в оптических лабораториях разного профиля, представляется целесообразным рассмотреть возможность расширения его функций путем его использования в качестве пространственного Фурье-спектрометра. Ниже описана предлагаемая нами соответствующая методика.

Микроинтерферометр Линника по своей схеме представляет собой интерферометр Майкельсона, перед зеркалами которого установлены идентичные друг другу микрообъективы, сфокусированные на поверхность этих зеркал (рис. 1). Роль одного из зеркал играет поверхность исследуемого объекта, содержащая микронеровности. Пучок лучей от источника света 1 (лампа накаливания) направляется конденсором 2 через светофильтр 3 в плоскость апертурной диафрагмы 4. В фокальной плоскости проекционного объектива 6 помещена полевая диафрагма 5. Параллельный пучок лучей по выходе из объектива 6 падает на полупрозрачную разделительную пластинку 7. Отраженная часть пучка лучей от пластинки 7, образующая первую ветвь

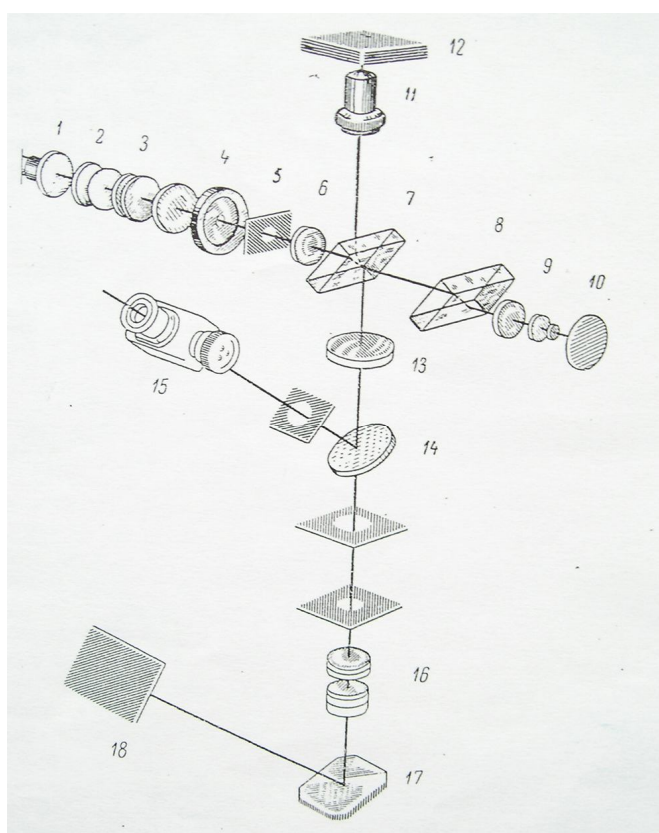


Рис.1

интерферометра, собирается в фокальной плоскости объектива 11, на проверяемой поверхности детали 12, после отражения от которой снова проходит через объектив 11 и пластинку 7 и собирается в фокусе объектива 13. Зеркало 14 направляет пучки лучей в окуляр 15 визирного тубуса, при помощи которого наблюдается изображение проверяемой поверхности.

Прошедшая часть пучка лучей (вторая ветвь микроинтерферометра) через пластинку 7 падает на компенсатор 8 и собирается в фокусе объектива 9. После отражения от эталонного зеркала 10 пучок лучей снова проходит через объектив 9, компенсатор 8 и падает на пластинку 7, которая одну часть лучей также пропускает, а другую отражает. Компенсатор 8 служит для компенсации хода лучей в пластинке 7, образуемой первой ветвью интерферометра. Первая часть лучей в дальнейшем не участвует в образовании изображения, вторая же часть интерферирует с лучами другой ветви интерферометра, образует изображение интерференционных полос в бесконечности, передаваемое объективом 13 в фокальную плоскость окуляра 15.

Таким образом, в фокальной плоскости окуляра можно одновременно наблюдать изображение интерференционных полос и изображение проверяемой поверхности.

Светофильтр 3 применяется, для наблюдения интерференционной картины в монохроматическом свете. При наблюдении в белом свете светофильтр выключается.

Осветительная часть смонтирована в едином корпусе с прибором.

Ветвь, идущая через элементы 14 – 16 – 17 – 18 предназначена для фотографирования интерферограмм.

Описанный прибор позволяет наблюдать качественную интерференционную картину в свете полихроматического источника. На рис. 2 приведена полученная с его помощью картина интерференции в белом свете.

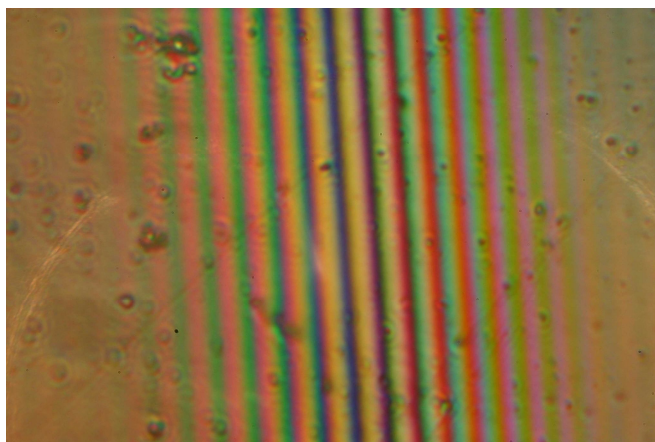


Рис. 2

Источником излучения служила лампа накаливания. В принципе такая картина содержит в себе необходимую информацию для вычисления спектра излучения. Однако при использовании прибора с целью изучения спектра излучения возникают некоторые трудности. Они состоят в следующем.

1. Интерферометр Линника настроен на режим полос конечной ширины. При нормальной настройке в поле зрения окуляра может уместиться порядка тридцати интерференционных полос. В соответствии с этим максимальная разность хода  $L_{\max}$  интерферирующих волн не превышает тридцати длин волн. Поскольку разрешение Фурье-спектрометра определяется величиной  $L_{\max}$ , то указанная сравнительно небольшая разность хода существенно ограничивает разрешающую способность Фурье-спектрометра.

2. Информация о спектре исследуемого излучения заключена в пространственном распределении контраста интерференционных полос. Величина контраста определяется не только временной когерентностью излучения, определяемой его спектральным составом, но также и пространственной когерентностью, зависящей от размеров источника. Влияние пространственной когерентности на контраст полос может вносить заметную погрешность при вычислении спектра.
3. Прибор содержит встроенный источник излучения. Возможность ввода излучения от какого-либо иного источника не предусмотрена. Нет также возможности установки на входе интерферометра кювет с исследуемым веществом или фильтров с целью исследования спектров их пропускания.
4. Оптическая ветвь прибора, предназначенная для фоторегистрации интерферограмм, рассчитана на формат кадра узкой пленки с диагональю 43 мм. Современные зеркальные цифровые фотокамеры имеют регистрирующую матрицу существенно меньших размеров (10 – 20 мм), в результате на цифровую камеру регистрируется только часть всей интерференционной картины.

Для устранения указанных недостатков была проведена модификация прибора.

Без существенных изменений конструкции интерферометра в несколько раз была увеличена пространственная частота интерференционных полос и, соответственно, разность хода  $L_{\max}$ , определяющая разрешение Фурье-спектрометра. Это было достигнуто введением некоторого угла между нормалью к поверхности объекта, роль которого выполняло плоское зеркало, и осью падающего на это зеркало пучка. Достигнутая величина  $L_{\max}$  составила 50 мкм.

Пространственная когерентность излучения была существенно повышена путем диафрагмирования светового потока в фокусе конденсора. При этом снижение освещенности интерференционной картины на выходе было скомпенсировано использованием высокочувствительной приемной матрицы при регистрации интерферограммы.

Встроенный источник излучения 1 (лампа накаливания) был отделен от конденсора и вынесен на отдельный рейтер (см. рис. 3).

**Общий вид модифицированного микроинтерферометра Линника**

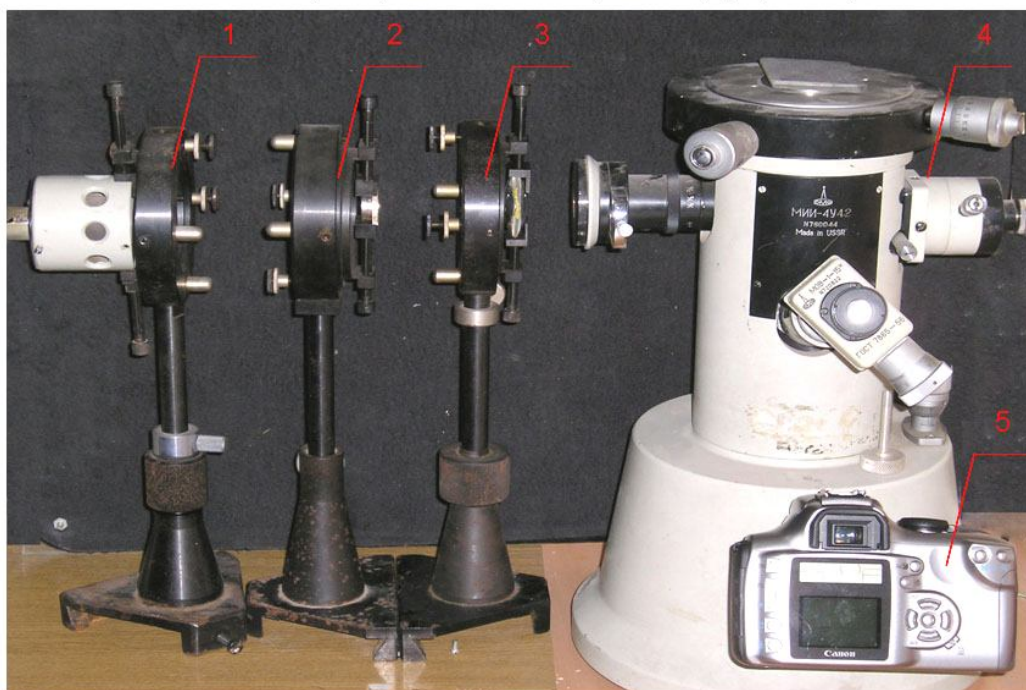


Рис. 3

Это обеспечило возможность установки исследуемого объекта 2 в промежуток между источником и конденсором для определения его спектра пропускания. Кроме того, появилась возможность замены штатной лампы накаливания прибора на исследуемый источник излучения. Чтобы источник, удаленный от конденсора, по-прежнему отображался в плоскость апертурной диафрагмы, в промежуток между источником и конденсором была введена дополнительная линза 3, переотображающая источник в плоскость, расположенную вблизи конденсора.

Оптическая ветвь прибора, предназначенная для фоторегистрации интерферограмм, была также модифицирована. С целью согласования размеров изображения, проецируемого на приемную матрицу, с размерами самой матрицы в промежуток между зеркалом 17 и матрицей 18 (рис. 1) была введена положительная линза, коллимирующая расходящийся пучок. В результате его сечение было уменьшено вдвое, что позволило предотвратить нежелательную потерю информации.

Работа микроинтерферометра Линника в режиме пространственного Фурье-спектрометра проиллюстрирована приведенными ниже экспериментальными данными.

В первом эксперименте в качестве источника исследуемого излучения был установлен светодиод, излучающий в синей области спектра со средней длиной волны излучения  $\lambda_{\text{ср}} = 465$  нм. Интерферограмма, полученная в излучении диода с помощью цифровой камеры Canon EOS 300D, показана на рис. 4.

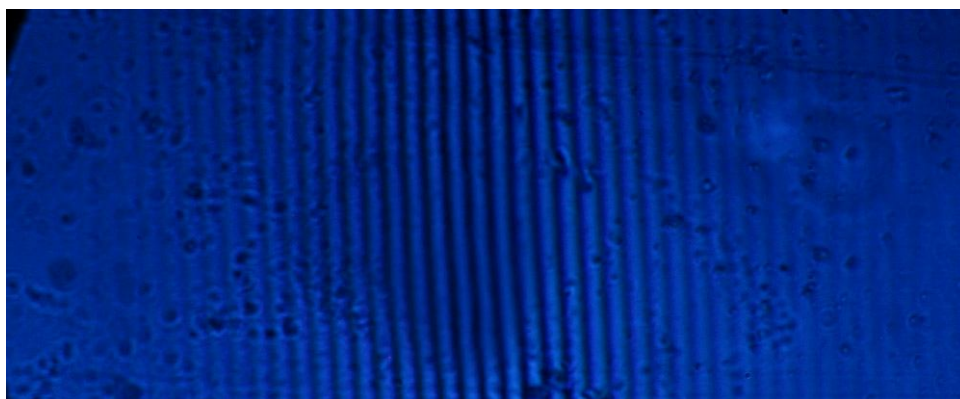


Рис. 4

В принципе, для получения спектра излучения было бы достаточно выполнить одномерное Фурье-преобразование от распределения интенсивности по любой строке этого кадра (фотокамера была сориентирована так, что направление интерференционных полос было перпендикулярным направлению строк). Однако с целью усреднения шумов целесообразно воспользоваться избыточной информацией, содержащейся во всем кадре. Для этого было использовано двумерное Фурье-преобразование от распределения интенсивности по всему кадру. Двумерный Фурье-образ интерферограммы, показанный на рис. 5, содержит три ярко выраженных максимума: центральный, отображающий нулевую пространственную частоту, (среднее значение интенсивности и низкочастотные шумы, присутствующие в интерферограмме) и два симметрично расположенных максимума, соответствующих пространственной частоте интерференционных полос.

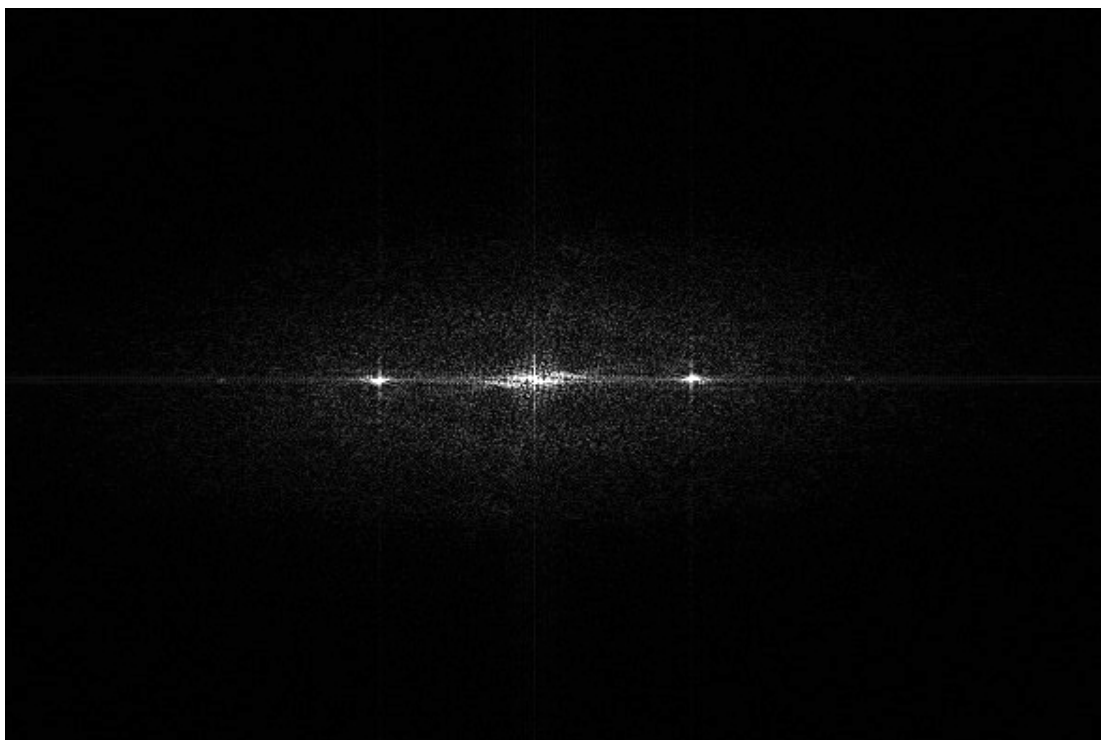


Рис. 5

Ширина и форма этих максимумов отображает спектр исследуемого излучения. Количественную информацию о спектре излучения следует считывать со срединной строки, проходящей через все три максимума на двумерном Фурье-образе. Фрагмент распределения интенсивности вдоль этой срединной строки, содержащий нулевой и плюс первый максимум, приведен на графике рис. 6.

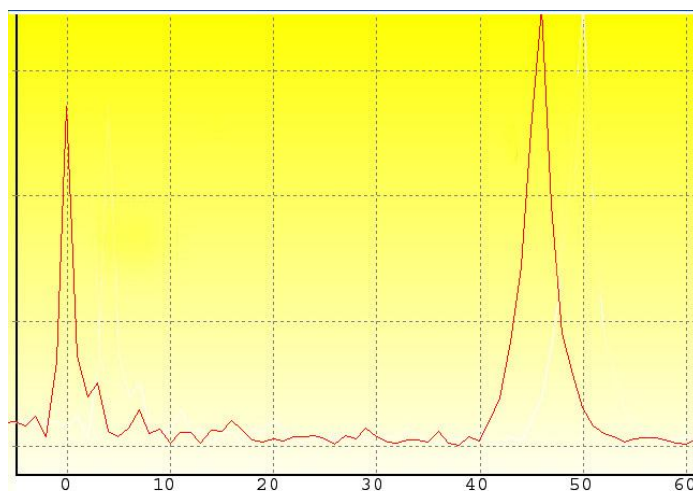


Рис. 6

Ось абсцисс на этом графике является осью пространственных частот интерферограммы (частоты указаны в условных единицах). Каждой пространственной частоте  $\nu$  соответствует определенная длина волны  $\lambda$ . Они связаны соотношением

$$\nu = \alpha/\lambda,$$

где  $\alpha$  – угол между направлениями интерферирующих волн. Таким образом, в определенном масштабе ось абсцисс является осью волновых векторов спектра излучения. Можно

показать, что если ширина  $\Delta\lambda$  спектра излучения сравнительно невелика и выполняется условие  $\lambda_{\text{cp}} \gg \Delta\lambda$ , то величина  $\Delta\lambda$  приближенно может быть найдена из соотношения  $\Delta\lambda = \lambda_{\text{cp}} \Delta\nu/\nu_{\text{max}}$ ,

где  $\nu_{\text{max}}$  – пространственная частота первого максимума,  $\Delta\nu$  – ширина первого максимума. По графику рис. 6 для уровня в половину высоты максимума эта формула дает оценку ширины  $\Delta\lambda$  спектра излучения светодиода – 28 нм, что соответствует паспортным данным светодиода.

Во втором эксперименте исследовался спектр пропускания интерференционного светофильтра со средней длиной волны пропускания  $\lambda_{\text{cp}} = 500$  нм. При этом в качестве источника освещающего излучения была использована лампа накаливания. Интерферограмма, полученная в прошедшем через фильтр излучении приведена на рис. 7.

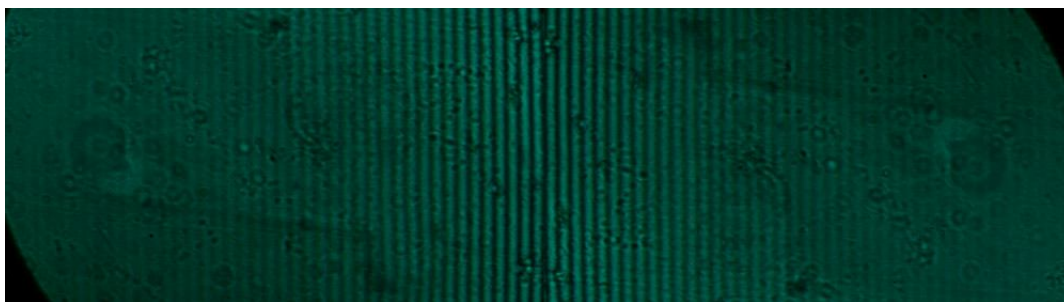


Рис. 7

Контраст полос на этой интерферограмме убывает медленнее, чем на приведенной выше интерферограмме, полученной в излучении светодиода. Это указывает на то, что спектр пропускания интерференционного фильтра уже спектра светодиода. Фурье-образ, полученный по тому же алгоритму, как и в предыдущем эксперименте, показан на графике рис. 8.



Рис. 8

Оценка ширины  $\Delta\lambda$  спектра пропускания дает в данном случае значение в 15 нм.

Приведенные результаты экспериментов иллюстрируют возможность использования микроинтерферометра Линника в качестве пространственного Фурье-спектрометра.

Ввиду сравнительно небольшой максимальной разности хода  $L_{\text{max}}$  интерферирующих волн, достигаемой в данном приборе, разрешение по длинам волн оказывается ограниченным величиной  $\Delta\lambda$  порядка 5 нм. Это делает возможным использование прибора

для исследования спектров тепловых источников излучения или измерения полосы пропускания интерференционных фильтров. При исследовании источников с широким спектром следует принять во внимание неравномерность чувствительности приемной матрицы цифровой фотокамеры в пределах ее рабочего диапазона излучения. Она будет вносить искажения в получаемые результаты. В этом случае полученную спектральную кривую исследуемого излучения следует корректировать, путем деления на кривую спектральной чувствительности приемной матрицы.

В заключении отметим, что, благодаря простоте эксплуатации микроинтерферометра Линника, пространственный Фурье-спектрометр на его базе может с успехом использоваться в современном лабораторном практикуме в рамках курса общей физики или спецкурсов по оптике и оптоэлектронике.