

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ  
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**Физический факультет  
Кафедра общей физики  
Лаборатория оптики**

**СТАТИЧЕСКИЙ ФУРЬЕ-СПЕКТРОМЕТР  
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА ПО ФИЗИЧЕСКОЙ ОПТИКЕ  
(методическое пособие)**

Новосибирск  
2015

Лабораторная работа «Статический фурье-спектрометр» является частью Практикума по физической оптике. Она сопровождает курс «Электродинамика, часть 2», читаемый студентам 2 курса физического факультета НГУ. Работа предназначена для изучения теоретических основ современной фурье-спектроскопии и их практического освоения в экспериментах на статическом фурье-спектрометре. Прибор спроектирован и изготовлен на кафедре общей физики. В качестве приемного элемента использована ПЗС-матрица с большим числом разрешаемых элементов, сигналы с которой записываются в файлы. Для калибровки прибора используется полупроводниковый лазер. В комплекте имеется набор источников излучения, спектр которых предлагается определить. Студент, по желанию, может исследовать любой другой источник излучения. Для калибровки прибора и восстановления спектров из записанных интерферограмм написаны две программы в среде Mathcad, загруженные на входящий в комплект прибора персональный компьютер. Перед началом работы студент может ознакомиться с работой подробнее, просмотрев на сайте лаборатории видеофильм «Фурье-оптика на примере статического фурье-спектрометра» (Б. А. Князев, В. С Черкасский, НГУ 2013).

#### Авторы

докт. физ.-мат. наук, проф. Б. А. Князев, ст. преп. А. А. Дорошкин

Методическое пособие подготовлено в рамках реализации Программы развития НИУ-НГУ на 2009–2018 гг.

© Б. А. Князев, А. А. Дорошкин, 2015

© Новосибирский государственный  
университет, 2015

## **ПРЕДИСЛОВИЕ. Как появилась эта лабораторная работа**

Сразу после появления первых, еще не очень совершенных позиционно-чувствительных элементов, началось интенсивное создание спектральных приборов на их основе. В НГУ совместно с ИЯФ СО РАН был разработан и запущен один из первых таких приборов [1, 2]. Очень скоро стало понятно, что статический фурье-спектрометр является прибором, на котором очень легко и наглядно можно продемонстрировать студентам принципы фурье-спектроскопии. Был создан первый вариант лабораторной работы [3]. Затем, в процессе работы с прибором были исследованы его основные характеристики и разработаны методы численной обработки, позволявшие существенно улучшить его характеристики [4]. В 2000 году в Корнельском университете (Итака, США) одним из авторов работы был создан и использован в экспериментах на плазменной установке “с обращенным магнитным полем” новый вариант прибора, позволявший регистрировать спектры за время порядка 10 нс [5]. В данной лабораторной работе использованы все улучшения, выполненные за прошедшие годы, для регистрации спектра использована современная ПЗС-матрица (ПЗС означает Прибор с Зарядовой Связью), обработка данных выполняется с помощью программы, написанной на языке Mathcad. В существенно переработанном описании работы частично использован текст предыдущего издания [3]. В качестве примера приведены экспериментальные результаты, полученные в процессе выполнения курсовой работы весной 2010 года студентами И. Э. Жаксылыковой и Д. А. Максютковым.

## **ЧТО ТАКОЕ ОПТИЧЕСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ**

Спектроскопией называют область физики, целью которой является исследование спектров электромагнитного излучения. Датой ее возникновения как науки принято считать 1666 год, когда Исаак Ньютон открыл, что белый свет, проходя через призму, разлагается на цветные составляющие. Дальнейшие исследования показали, что многие вещества испускают свет, содержащий характерные спектральные линии или полосы, а поглощение света веществом в различных агрегатных состояниях (твердые тела, жидкости, газы, плазма) тоже спектрально селективно. Благодаря исследованиям спектров была открыта структура атомов и молекул, а позднее появилась квантовая теория. Главное практическое назначение спектроскопии – измерительная техника, а измерение спектров излучения – ключевая задача спектроскопии. Излучение испускаемое, отражаемое, рассеиваемое, поглощаемое или преломляемое исследуемым объектом содержит в закодированном виде богатую информацию. Обработывая результаты спектральных измерений можно узнать о самых тонких свойствах изучаемого объекта.

Спектральный анализ давно применяется в химии и материаловедении для идентификации состава веществ. Имеется богатый набор баз данных, содержащих информацию о спектральных линиях атомов и молекул, в том числе в Интернете. Спектроскопия широко используется в астрофизике, собирая информацию об элементном составе звезд, галактик, туманностей. Она играет важную роль в исследовании космологических процессов.

## **ПРИБОРЫ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ СПЕКТРОВ**

Приборы, которые регистрируют спектры, называются спектрометрами [6]. Их можно разделить на два класса

- Приборы с пространственным разложением излучения в спектр (дисперсионные спектрометры)
- Интерференционные спектрометры

В дисперсионных спектрометрах свет разлагается в спектр призмой или дифракционной решеткой, и непосредственно измеряемой величиной является распределение интенсивности по спектру. Измерения этого распределения в современных спектрографах производится с помощью матриц или линеек светочувствительных элементов, а результат выводится на экран дисплея в виде графика или картинки.

Интерференционные спектрометры могут быть двухлучевыми или многолучевыми. В них регистрируется не спектр, а интерференция между двумя или более пучками света, задержанными (или смещенными) друг относительно друга. Интерференционная картина содержит в закодированном виде информацию о спектральном составе излучения. Обработывая интерференционную картину, можно восстановить спектр падающего излучения. Многолучевые спектрометры, одним из которых является интерферометр Фабри-Перо, называют часто приборами высокой разрешающей силы. Их принцип работы описан в соответствующих лабораторных работах практикума по физической оптике. В двухлучевых спектрометрах спектр излучения восстанавливается по зарегистрированной интерферограмме численно, используя преобразование Фурье, поэтому они называются фурье-спектрометрами. Далее мы кратко изложим принципы работы фурье-спектрометров.

## **СРАВНЕНИЕ ДИСПЕРСИОННЫХ СПЕКТРОМЕТРОВ И ФУРЬЕ-СПЕКТРОМЕТРОВ**

Принцип фурье-спектроскопии [7, 8] и ее преимущества по сравнению с дисперсионной спектроскопией легко понять из рис. 1. Упрощенная схема дисперсионного спектрометра показана на рис. 1, а. Свет источника, содержащий много спектральных составляющих, разлагается в спектр

призмой или дифракционной решеткой. Каждая спектральная компонента регистрируется детектором на выходе отдельно от другой.

В фурье-спектрометре (рис. 1, б) свет от источника проходит через широкую щель и расщепляется светоделителем на два пучка. После отражения от зеркал пучки вновь собираются вместе и попадают на приемник без спектральной селекции. Каждая спектральная компонента одного пучка при этом интерферирует с соответствующей компонентой другого пучка, а приемник регистрирует результирующую интенсивность всех компонент спектра. Перемещая одно из зеркал, мы изменяем разность фаз всех компонент интерферирующих пучков, что отражается на их суммарной интенсивности.

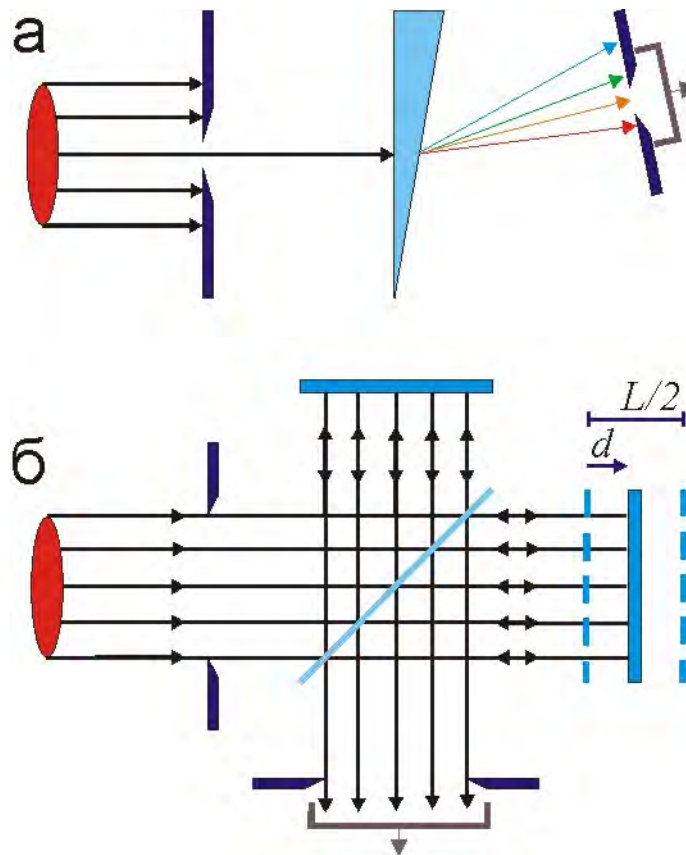


Рис. 1. а) Схема дисперсионного спектрометра (изображенный на рисунке прибор, имеющий входную и выходную щели, называется “монокроматором”); б) фурье-спектрометр, собранный по схеме интерферометра Майкельсона. При перемещении зеркала между крайними положениями, указанными пунктиром, оптическая разность хода между интерферирующими лучами равна  $L$

Как из результирующей сложной интерференционной картины восстанавливается спектр исходного излучения, мы обсудим ниже, а здесь только отметим две важных преимущества фурье-спектрометров над дисперсионными. Во-первых, если дисперсионные спектрометры по принципу своей работы требуют наличия узкой щели на входе, то фурье-

спектрометры допускают широкое входное отверстие. Этот факт называется *выигрышем Жакино*. Второй выигрыш (*выигрыш Фелжетта*) состоит в том, что в дисперсионных спектрометрах каждый интервал регистрируется поочередно, тогда как в Фурье-спектрометрах в течение времени регистрации записывается сигнал от всего спектра источника сразу. После появления линеек детекторов стало возможным и в дисперсионных спектрометрах регистрировать весь спектр одновременно (на рис. 1, а следует убрать выходную щель, а детектор заменить ПЗС-линейкой).

## СКАНИРУЮЩИЙ ФУРЬЕ-СПЕКТРОМЕТР

### Монохроматическое излучение

Первыми фурье-спектрометрами (ФС) были спектрометры с движущимся зеркалом, подобные интерферометру Майкельсона, изображенному на рис. 1, б. Поскольку, в конечном счете, основы теории для сканирующего и статического спектрометров одинаковы, мы продолжим анализ принципов Фурье-спектроскопии на примере интерферометра Майкельсона.

Пусть на вход интерферометра вдоль оси  $z$  падает плоская электромагнитная волна

$$\mathbf{E}(z, t) = \mathbf{A} \exp[i(kz - \omega t)], \quad (1)$$

где  $k = |\mathbf{k}| = 2\pi / \lambda = 2\pi\sigma$  – волновое число, являющееся модулем *волнового вектора*,  $\omega$  – частота излучения, а  $\mathbf{A}$  – амплитуда электрического поля, лежащая в плоскости волнового фронта. Формула (1) описывает *монохроматическое излучение с бесконечной длиной когерентности*. Таких волн в природе не существует, но любая реальная волна может быть разложена на совокупность плоских волн. Распространение таких волн мы умеем вычислять, используя уравнения Максвелла, а затем, используя принцип суперпозиции, путем суммирования векторов электрического поля получим характеристики прошедшей волны. Введенная здесь величина  $\sigma = 1 / \lambda$  также называется *волновым числом* и традиционно используется в спектроскопии в качестве спектральной координаты. Большая часть спектров излучения и поглощения в инфракрасном диапазоне приводится в таблицах и графиках как функция  $\sigma$  с размерностью  $\text{см}^{-1}$ .

Используемые в спектроскопии детекторы излучения не могут измерять электрическое поле волны, а регистрируют ее *интенсивность*  $I$ . Интенсивность в спектроскопии не является количественной величиной с определенной размерностью. Она имеет смысл мощности или энергии излучения, падающего на единицу площади. Если мы хотим охарактеризовать поток излучения количественно, то мы должны использовать величины типа плотности мощности  $[\text{Вт}/\text{см}^2]$  или плотности потока фотонов  $[\text{см}^{-2} \text{ с}^{-1}]$ . Однако при получении функциональных зависимостей мы будем использовать термин интенсивность, понимая ее как величину, пропорциональную квадрату усредненной по времени амплитуды электрического поля

$$I \sim |\langle \mathbf{E} \rangle|^2 \sim \mathbf{A} \cdot \mathbf{A}^*, \quad (2)$$

Если, при определенном положении зеркала, одна из волн задержана по отношению к другой на фазу  $\delta$ , то электрическое поле на детекторе будет представлять собой сумму двух волн:

$$\mathbf{E}(t) = \mathbf{A}_1 \exp(kz - \omega t) + \mathbf{A}_2 \exp(kz - \omega(t + \delta)). \quad (3)$$

Интерференция двух волн даст в результате (рис. 2)

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos \delta. \quad (4)$$

Или, переходя к интенсивностям,

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1I_2} \cos \delta. \quad (5)$$

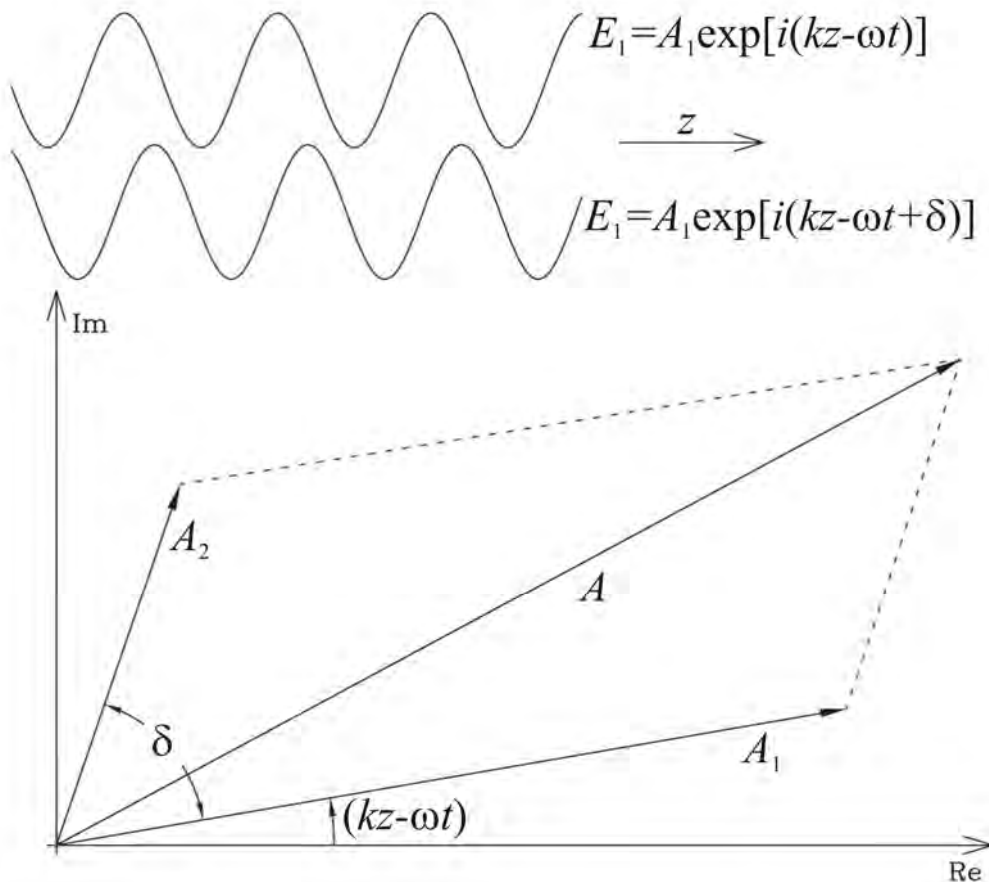


Рис. 2. Фазовая диаграмма интерференции двух плоских волн

Если интенсивности лучей равны  $I_1 = I_2 = I_0$ , то

$$I = 2I_0(1 + \cos \delta). \quad (6)$$

Разность фаз между лучами в интерферометре Майкельсона определяется двойной разностью хода лучей в плечах интерферометра

$$\delta = \frac{2\pi \Delta z}{\lambda} = \frac{2\pi}{\lambda} 2d, \quad (7)$$

Где  $d$  – смещение подвижного зеркала.

Фурье-спектрометры, в которых оптическая длина одного из плеч интерферометра изменяется механическим способом путем перемещения

зеркала, а регистрируемая фотоэлектрическим методом интерферограмма представляет собой зависящий от времени электрический сигнал, называются *сканирующими фурье-спектрометрами*. При равномерном перемещении зеркала детектор будет регистрировать гармонические изменения интенсивности (рис. 3)

$$I = 2I_0[1 + \cos(2\pi\sigma \cdot 2d)], \quad (8)$$

Далее для удобства будем использовать координату  $D = 2d$ , соответствующую изменению оптической разности хода.

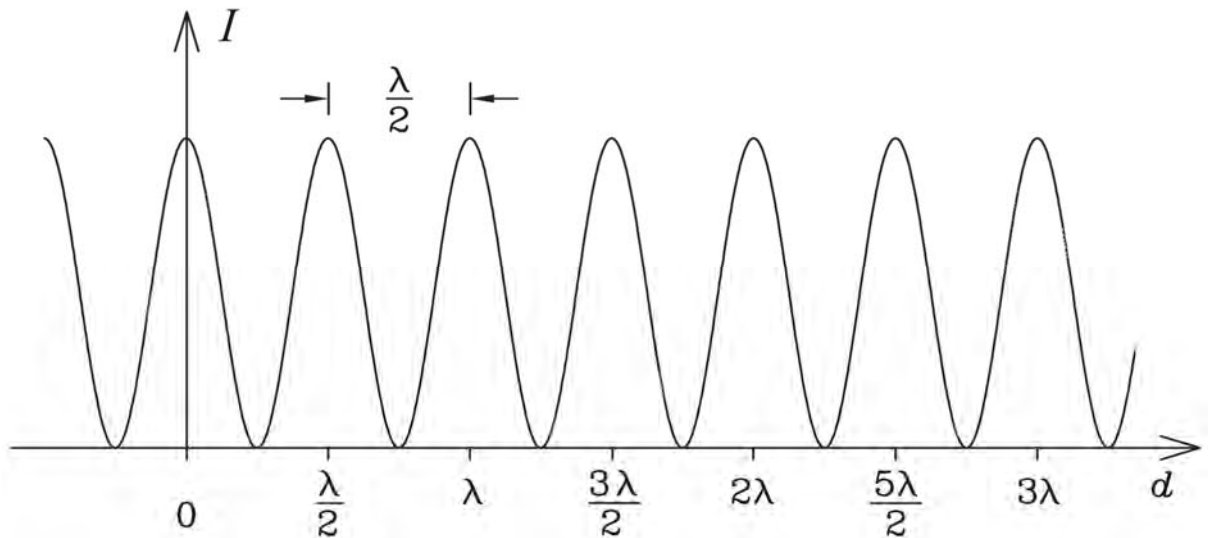


Рис. 3. Гармоническое изменение интенсивности излучения на выходе интерферометра Майкельсона при равномерном перемещении зеркала

### Полихроматическое излучение

Теперь рассмотрим интерференцию излучения, имеющего широкий спектр  $I(\sigma)$ . В этом случае для каждого бесконечно малого интервала волновых чисел  $d\sigma$  можно записать интерференционный член

$$dI(D, \sigma) = 2I(\sigma)[1 + \cos(2\pi\sigma D)]d\sigma, \quad (9)$$

а для всего спектра получим суммарный *интерференционный сигнал*

$$I(D) = 2 \int_0^\infty I(\sigma)[1 + \cos(2\pi\sigma D)]d\sigma, \quad (10)$$

Если ввести суммарную интенсивность излучения, проинтегрированную по всем частотам,

$$I_\Sigma = \int_0^\infty I(\sigma)d\sigma, \quad (11)$$

то мы увидим, что при  $D = 0$  для всех частот одновременно косинус будет равен единице, и интенсивность интерференционного сигнала в максимуме равна  $I(0) = 4I_\Sigma$ . Теперь, перейдя в выражении (10) к пределу  $D \rightarrow \infty$ , мы увидим, что при широком спектре сигнала в разных интервалах  $d\sigma$  члены, содержащие косинус, будут компенсировать друг друга, и на краях интерферограммы мы получим интенсивность, равную  $2I_\Sigma \equiv I(0)/2$ .



Типичный интерференционный сигнал для достаточно широкого спектра излучения показан на рис. 4. После вычитания из  $I(D)$  постоянного члена, мы получим величину, которую далее будем называть *интерферограммой*

$$J(D) = I(D) - \frac{1}{2}I(0) = 2 \int_0^{\infty} I(\sigma) \cos(2\pi\sigma D) d\sigma. \quad (12)$$

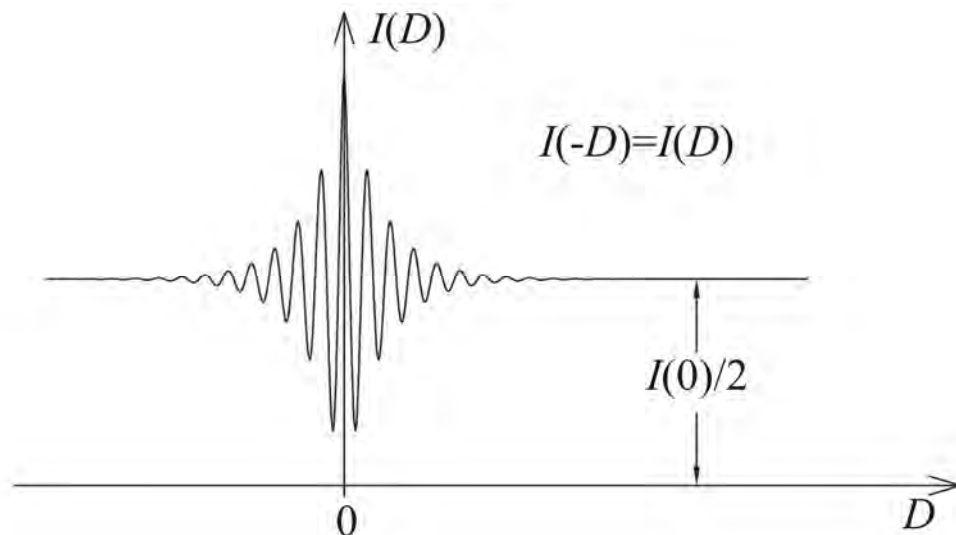


Рис. 4. Возможный вид интерференционного сигнала при широком спектре излучения

Для упрощения вычислений удобно шкалу волновых чисел формально дополнить отрицательной ветвью и ввести значения  $I(-\sigma) = I(\sigma)$ . Тогда получим выражение

$$J(D) = \int_{-\infty}^{\infty} I(\sigma) \cos(2\pi\sigma D) d\sigma = \int_{-\infty}^{\infty} I(\sigma) e^{i2\pi\sigma D} d\sigma = F\{I(\sigma)\}, \quad (13)$$

где  $F$  – символ преобразования Фурье. Следовательно,  $J(D)$  и  $I(\sigma)$  – представляют собой пару интегральных преобразований Фурье<sup>[9<sup>1</sup>, 10<sup>2</sup>]</sup>:

$$\begin{aligned} J(D) &= \int_{-\infty}^{\infty} I(\sigma) e^{i2\pi\sigma D} d\sigma = F\{I(\sigma)\}, \\ I(\sigma) &= \int_{-\infty}^{\infty} J(D) e^{-i2\pi\sigma D} dD = F^{-1}\{J(D)\}. \end{aligned} \quad (14)$$

Благодаря введению отрицательной ветви  $-\sigma$  в уравнении (13) мы избежали появления двойки перед интегралом. Главным выводом из этого параграфа является утверждение, что интерферограмма несет информацию о спектре излучения, и, используя обратное преобразование Фурье, можно однозначно восстановить этот спектр  $I(\sigma) = F^{-1}\{J(D)\}$ .

<sup>1</sup> [http://www.phys.nsu.ru/cherk/Eldin/ElectromagneticField\(Meshkov\)1.pdf](http://www.phys.nsu.ru/cherk/Eldin/ElectromagneticField(Meshkov)1.pdf), стр.2149.

<sup>2</sup> <http://www.phys.nsu.ru/cherk/Eldin/Yakovlev2.pdf>, стр.49.

Дискретное фурье-преобразование сигнала конечной длины

При восстановлении спектра мы не можем непосредственно пользоваться выведенными в предыдущем параграфе выражениями, поскольку в экспериментах записанная интерферограмма состоит из точечных отсчетов, выполненных с интервалом  $\Delta D$ :

$$D_j = j\Delta D, \quad j = -N, -N+1, -N+2, \dots, -1, 0, 1, \dots, N-1, N \quad (15)$$

а длина записи ограничена интервалом от  $D = -L$  до  $D = L$ , где  $L = N\Delta D$ . Заменяя интеграл на сумму

$$\int_{-\infty}^{\infty} d\sigma = \Delta D \sum_{-N}^{N-1}, \quad (16)$$

мы приходим к дискретному преобразованию Фурье. Практическое руководство по использованию дискретного преобразования Фурье можно найти в [11<sup>3</sup>].

Теперь восстановление спектра производится с помощью выражения

$$I_L^{\Delta D}(\sigma) = \Delta D \sum_{-N}^{N-1} J_j e^{-i2\pi\sigma j\Delta D}, \quad (17)$$

а интерферограмма ограничена по длине

$$J_L(D) = \text{rect}_{2L}(D)J(D), \quad (18)$$

где

$$\text{rect}_{2L}(D) = \begin{cases} 0, & |D| > L, \\ 1, & |D| \leq L. \end{cases} \quad (19)$$

К чему приводит ограничение длины интерферограммы можно понять, вычислив форму восстановленного спектра непрерывной (не дискретной!) интерферограммы для монохроматического источника. Из математики вам известно, что для *волнового пакета* ограниченной длительности с гармонической наполняющей, имеющей волновое число  $\sigma_0$ , фурье-преобразование дает (рис. 5)

$$I(\sigma) \sim \frac{\sin[2\pi(\sigma - \sigma_0)L]}{2\pi(\sigma - \sigma_0)L} = \text{sinc}[2\pi(\sigma - \sigma_0)L]. \quad (20)$$

Мы видим, что *вычисленное* из интерферограммы конечной длины распределение интенсивности линии по частоте имеет отрицательные значения. Конечно, это погрешность расчетов.

Чем больше интервал перемещения зеркала, тем уже контур (20) восстановленной линии. Этот контур называют *аппаратной функцией* спектрометра. Если спектр падающего излучения содержит много спектральных компонент, то интерферограмма будет наблюдаться, в основном, вблизи разности хода, равной нулю. Далее, в экспериментальной части, мы приведем наблюдаемые интерферограммы для разных спектров излучения.

<sup>3</sup> [http://www.phys.nsu.ru/lpe/TextBooks/Vestnik\\_Fourier\\_my\\_13\\_09.pdf](http://www.phys.nsu.ru/lpe/TextBooks/Vestnik_Fourier_my_13_09.pdf)

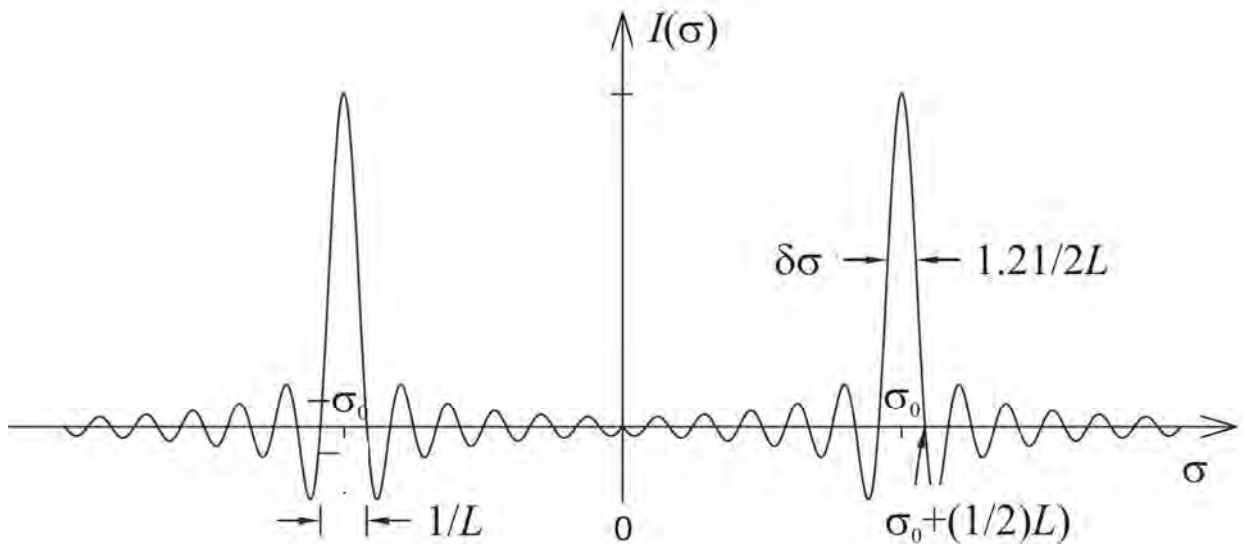


Рис. 5. Спектр  $I(\sigma)$  в виде функции sinc, полученный при восстановлении интерферограммы конечной длины в случае монохроматического источника излучения.

Учитывая конечность и дискретность интерферограммы, можно показать (доказательство мы опускаем), что восстановленный, согласно выражению (17) спектр, представляет собой свертку<sup>4</sup> истинного спектра с аппаратной функцией интерферометра (в фигурных скобках)

$$I_L^{\Delta D}(\sigma) = \left\{ \sum_{k=-\infty}^{\infty} 2L \operatorname{sinc} \left[ 2\pi \left( \sigma - \frac{k}{\Delta x} \right) L \right] \right\} * I(\sigma). \quad (21)$$

Аппаратная функция определяет *спектральное разрешение* интерферометра. По определению, она равна полной ширине функции sinc на половине ее высоты (FWHM)

$$\delta\sigma \approx \frac{1.207}{2L}. \quad (22)$$

#### Частота Найквиста и разрешающая сила

Дискретизация интерферограммы вносит ограничения на предельную частоту излучения, которая может быть восстановлена из интерферограмм. Это легко понять качественно, если заметить, что гармонический сигнал можно еще обнаружить на пределе, если число выборок составляет не менее двух на одном периоде. Отсюда определяется предельная частота, называемая *частотой Найквиста*,

$$\sigma_{\max} = \frac{1}{2\Delta D}. \quad (23)$$

<sup>4</sup>Наглядное объяснение операции свертки с анимацией см. в Википедии по ссылке [https://ru.wikipedia.org/wiki/Свертка\\_\(математический\\_анализ\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Свертка_(математический_анализ))

Из выражений (22) и (23) можно найти параметр, называемый в спектроскопии *разрешающей силой* спектрального прибора

$$R = \frac{\sigma_{\max}}{\delta\sigma} \approx N. \quad (24)$$

Вспомнив, что полное число элементов линейки равно  $2N$ , приходим к выводу, что для фурье-спектрометра с линейкой детекторов разрешающая сила равна просто половине числа элементов линейки.

### Временная когерентность

*Ширина спектра*  $\Delta\sigma$  исследуемого излучения определяет в соответствии с *соотношением неопределенности* длину когерентности излучения

$$\Delta l \approx 1 / \Delta\sigma. \quad (25)$$

Там, где оптическая разность хода превышает  $\Delta l$ , интерференционная картина исчезает. В физике часто используют два термина *длина когерентности*  $\Delta l$  и *временная когерентность*  $\Delta t$ . В действительности эти величины – разные термины для одного и того же понятия, что ясно из соотношения  $\Delta l = c\Delta t$ , где  $c$  – скорость света.

### Аподизация

Из уравнения (20) и рис. 5 мы видим, что спектральное разрешение фурье-спектрометра ограничено дистанцией, на которое перемещается зеркало. Функция  $\text{sinc}$ , описывающая разрешение, математически связана с прямоугольной формой «окна», ограничивающей длину интерферограммы монохроматического источника. При этом амплитуда побочных экстремумов функции  $\text{sinc}$  достаточно велика. Мы можем допустить, что главный максимум конечной ширины является приближением бесконечно узкой линии, однако вторичные экстремумы у ее подножия проявляются как ложные источники излучения с близкими к основной длинами волн. Эти экстремумы можно существенно уменьшить, применив искусственный прием плавного уменьшения интенсивности на границах интерферограммы. Эта процедура называется *аподизацией*.

Аподизация может осуществляться как во время получения интерферограммы (например, с помощью полупрозрачных диафрагм, пропускание которых спадает по краям), так и в процессе ее математической обработки. В последнем случае подынтегральное выражение в (4) умножают на сглаживающую функцию, наиболее простой из которых является треугольная функция (рис. 6, а)

$$\Lambda_L(D) = \begin{cases} 1 - \frac{|D|}{L}, & |D| \leq L, \\ 0, & |D| > L. \end{cases} \quad (26)$$

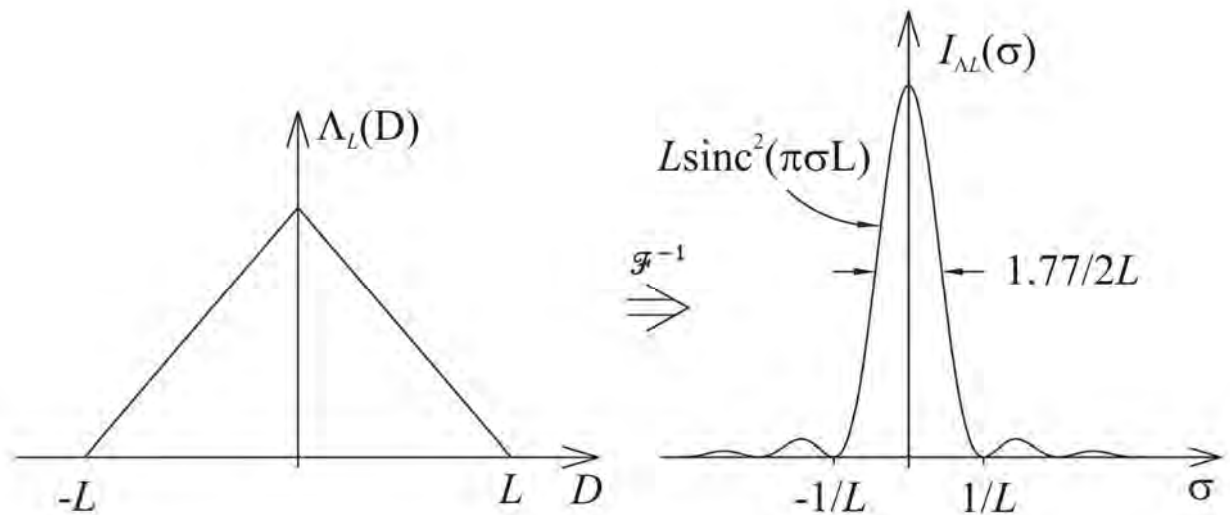


Рис. 6. Треугольная функция аподизации и восстановленный спектр

В результате такой аподизации мы получим аппаратную функцию вида

$$I_{\Lambda L}(\sigma) = \text{sinc}^2[\pi(\sigma - \sigma_0)L], \quad (27)$$

показанную на рис. 6, б. Спектральное разрешение фурье-спектрометра при треугольной аподизации станет равным  $1.77/2L$ , то есть ухудшится в полтора раза (см. выражение (22), но высота ложных пиков существенно уменьшится, а отрицательные пики исчезают (сравни с рис. 5).

Теперь, освоив основные принципы Фурье спектроскопии, мы можем перейти к описанию статического фурье-спектрометра.

## СТАТИЧЕСКИЙ ФУРЬЕ-СПЕКТРОМЕТР

### Принципиальная схема статического спектрометра

Запись интерферограммы в интерферометре Майкельсона требует значительного времени, и, следовательно, с его помощью можно измерить спектр только стационарных объектов. Спектр импульсных источников записать с помощью сканирующих приборов невозможно. Для таких целей можно использовать *статические фурье-спектрометры*. В *статическом фурье-спектрометре* интерферируют не два задержанных друг относительно друга волновых пакета, а две плоские волны, падающие на экран (детектор) под углом относительно друг друга. В этом случае интенсивность интерференционного сигнала зависит от *координаты* и регистрация интерферограммы осуществляется не во времени, а в пространстве. Основная проблема, которую нужно решить в этом случае, обеспечение когерентности интерферирующих лучей. Одной из лучших схем для статического фурье-спектрометра является *интерферометр Саньяка*, иногда называемый интерферометром с “*обратно-круговым*” ходом лучей.

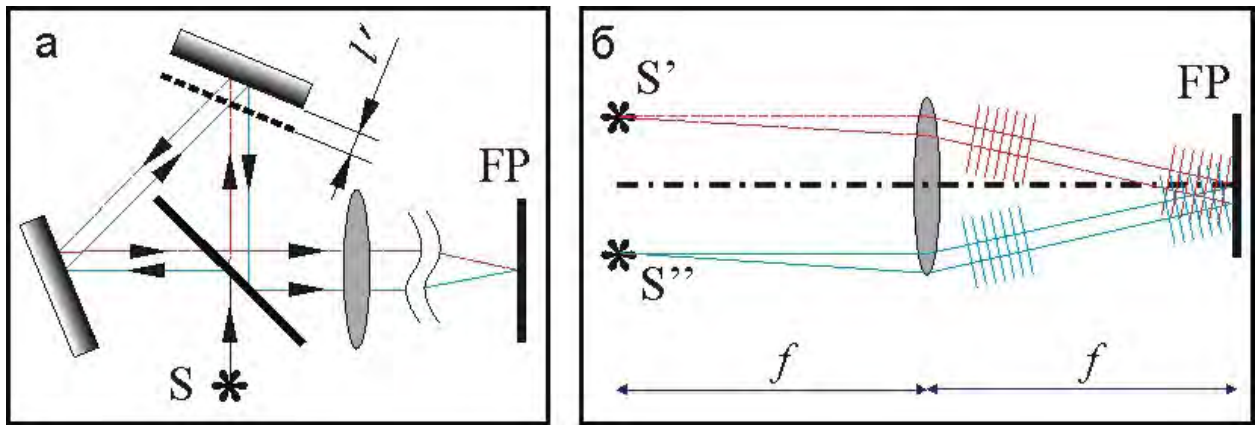


Рис. 7. Статический фурье-спектрометр по схеме Саньяка: (а) оптическая схема прибора и (б) эквивалентная оптическая схема

Схема интерферометра Саньяка показана на рис 7, а. Свет от исследуемого источника, который может иметь большие размеры и достаточно большую расходимость излучения, расщепляется светоделителем на два пучка, осевые лучи которых, показанные на рисунке, в электронном варианте (см. веб-сайт лаборатории физической оптики) обозначены синим и красным цветами. Два зеркала расположены под углами, обеспечивающими совмещение выходящих из интерферометра лучей при положении верхнего зеркала, показанном пунктиром. Если переместить это зеркало на некоторое расстояние  $l'$ , то лучи раздвинутся в поперечном направлении, оставаясь параллельными друг другу, а, следовательно, линза сведет их в одну точку в фокальной плоскости.

Эквивалентная оптическая схема интерферометра показана на рис. 4, б. Поскольку источники  $S'$  и  $S''$  являются в действительности *мнимыми изображениями* одного и того же источника, то, лучи, выходящие из одной точки *когерентны*, что и обеспечивает получение интерференционной картины. Заметим, что если и *виртуальные источники* ( $S'$ ,  $S''$ ), и детектор находятся на расстоянии, равном фокусному расстоянию линзы  $f$ , то все лучи, выходящие из одной точки, образуют после линзы плоскую волну. Таким образом, на детекторе интерферируют две плоские волны. Кроме того, как известно из волновой оптики, плоскость приемника в этом случае будет фурье-плоскостью по отношению к плоскости источников [9].

Очевидно, что, в отличие от интерференции в сканирующем спектрометре, где интерферируют параллельные, задержанные друг относительно друга пучки, здесь интерферируют две наклонные плоские волны на поверхности детектора. Минимальное время записи интерферограммы определяется только чувствительностью приемной линейки или матрицы, перемещения зеркала не требуется, а, следовательно, статический фурье-спектрометр, который далее для экономии места будем именовать сокращенно СФС, может регистрировать спектры импульсных источников.

### Основные уравнения

Для того, чтобы записать уравнение интерференции в СФС, еще раз нарисуете схему хода лучей, вышедших из сопряженных точек виртуальных источников  $S'$  и  $S''$  (рис. 8).

Лучи, испущенные под одним и тем же углом  $\alpha$ , в соответствии с законами геометрической оптики соберутся в фокальной плоскости линзы на расстоянии  $x = \alpha f$  от оптической оси системы. Разность фаз между этими лучами набирается только слева от линзы. Она равна

$$\Delta\varphi = 2\pi \frac{\alpha y}{\lambda} = 2\pi\sigma\alpha y = \frac{2\pi\sigma y x}{f}. \quad (28)$$

Расстояние между сопряженными точками виртуальных источников, согласно рис. 7, равна  $y = l'\sqrt{2}$ . Увеличивая это расстояние, мы увеличиваем частоту полос на детекторе и тем самым изменяем разрешающую силу спектрометра. Если источник протяженный, то для любой пары виртуальных источников справедливо выражение (28), которое определяет интерференционную картину на детекторе. Это уникальное свойство интерферометра Саньяка позволяет использовать очень широкие источники без потери *видности* интерференционной картины. Обозначив спектральный отклик системы символом  $B(\sigma)$  и интегрируя по всем волновым числам, получим интегральное уравнение интерферограммы

$$F(x) = \int_0^\infty E(\sigma)B(\sigma) \left[ 1 + \cos(2\pi\sigma x \frac{y}{f}) \right] d\sigma, \quad (29)$$

Если не считать метод получения фазового сдвига, оно в точности соответствует выражению (10), полученному для сканирующего фурье-спектрометра. Очевидно, что численное восстановление исходного спектра происходит по той же схеме, что для сканирующего спектрометра.

Имеется, однако, интересное отличие между этими двумя приборами, связанное с возможностью восстановления исходного спектра оптическим методом.

### СФС как голографический спектрометр (дополнительный материал)

Из теоретического курса вам известно [9, стр. 82], что линза в оптической схеме, изображенной на рис. 8 является Фурье-преобразователем, и распределение интенсивности в фокальной плоскости является Фурье-образом источника в области поперечных волновых чисел. Использование линзы позволяет рассматривать сфотографированную интерферограмму как голограмму Фурье [12, стр. 84], содержащую информацию о спектре излучения источника. Действительно, если принять светящуюся точку одного из виртуальных источников в качестве точечного опорного источника, расположенного в переднем фокусе линзы, а соответствующую ей точку другого виртуального источника - в качестве точки объекта, то в задней фокальной плоскости линзы получим фурье-голограмму точки.



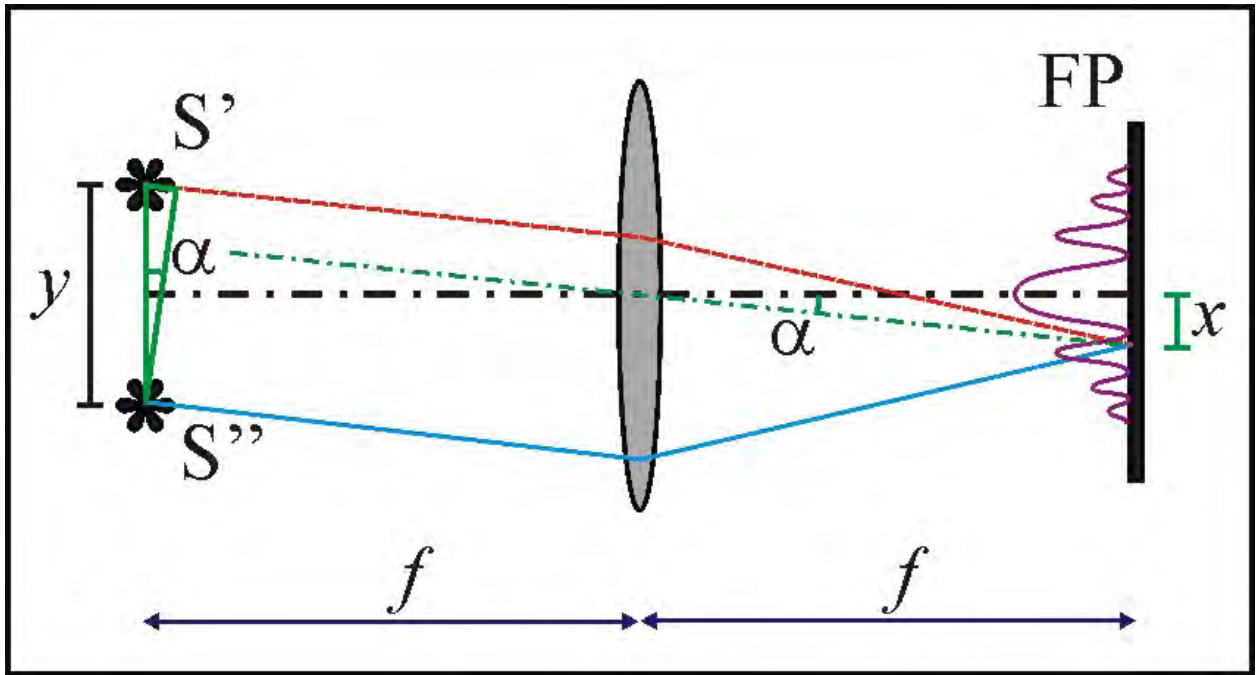


Рис. 8. Статический фурье-спектрометр по схеме Саньяка: координата точки фокуса на экране для параллельных лучей в зависимости от угла  $\alpha$ ; все лучи, вышедшие под тем же углом из разных точек источника, приходят в ту же точку на экране

В результате каждая точка источника будет представлена на экране своей элементарной голограммой. Так как излучение от разных точек некогерентно, то “перекрестных” интерферограмм (голограмм) образовываться не будет (интерферирует излучение только от соответствующих точек). Это значит, что в такой голограмме в отличие от голограммы когерентного излучения отсутствует фазовая информация о взаимном расположении точек. Полученная таким образом интерферограмма, представляет собой так называемую «голограмму некогерентного излучения» [13].

Голограмма позволяет получить спектр чисто голографическим методом, минуя машинную обработку. Для этого нужно распечатать интерферограмму с достаточно высоким разрешением на прозрачном транспаранте и осветить его широким параллельным пучком лазерного излучения. Поскольку голограмма представляет собой набор синусоидальных решеток, созданных при записи каждой монохроматической компонентой исследуемого излучения, то, установив после голограммы линзу, мы сфокусируем в ее плоскости все дифрагировавшие пучки, тем самым визуализировав спектральное распределение.

Иными словами, мы снова воспользовались линзой как Фурье-преобразователем. Если источник монохроматический, то голограмма будет просто синусоидальной дифракционной решеткой, и в этом случае, как



известно, кроме нулевого порядка, мы получим еще только два симметричных дифракционных максимума.

СФС как изображающий спектрометр (дополнительный материал)

Еще одним положительным свойством СФС является возможность получать спектр не только мгновенно, но и с пространственным разрешением.

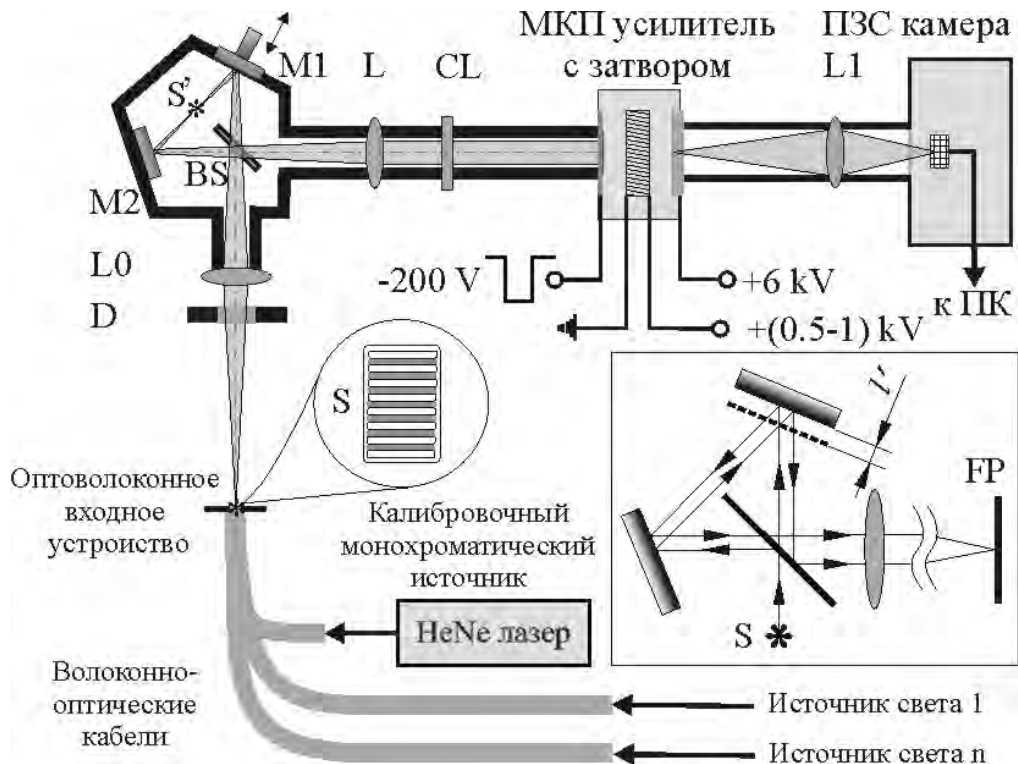


Рис. 9. Изображающий статический фурье-спектрометр

Как получить одномерное пространственное разрешение, можно понять, вернувшись к рис. 7. Предположим, что источник вытянут в плоскости, перпендикулярной рисунку. Очевидно, что в каждом сечении соответствующие виртуальные источники создадут свою интерферограмму в фокальной плоскости. Если детектором является не линейка, а матрица, то мы можем зафиксировать множество интерферограмм и, обработав каждую, восстановить спектр для каждого сечения протяженного источника. Схема такого спектрометра, созданного для научных исследований, показана на рис. 9.

Оптическая схема такого изображающего статического фурье-спектрометра [5] приведена на рис. 9. Линза L выполняет роль фурье-преобразователя и обеспечивает формирование фурье-образа входной плоскости на фотокатоде микроканального усилителя, тогда как цилиндрическая линза CL обеспечивает фокусировку источников в вертикальной плоскости и строит их изображение на той же плоскости.

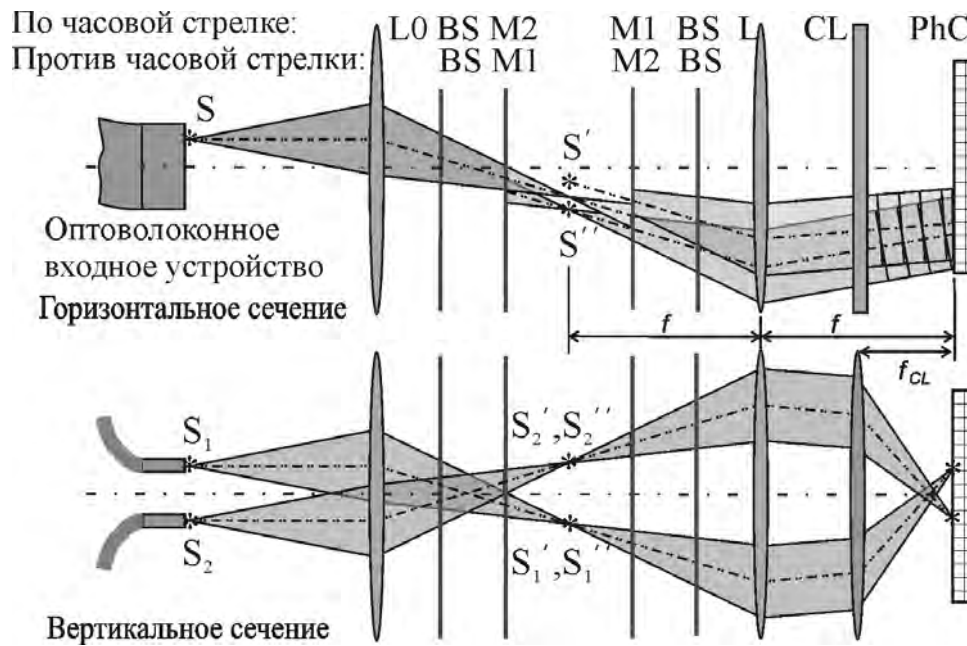


Рис. 10. Эквивалентная оптическая схема изображающего СФС спектрометра. BS – светоделитель;  $M_1$ ,  $M_2$  – зеркала интерферометра Саньяка; L и CL – линза и цилиндрическая линза; PhC – фотокатод микроканального усилителя яркости

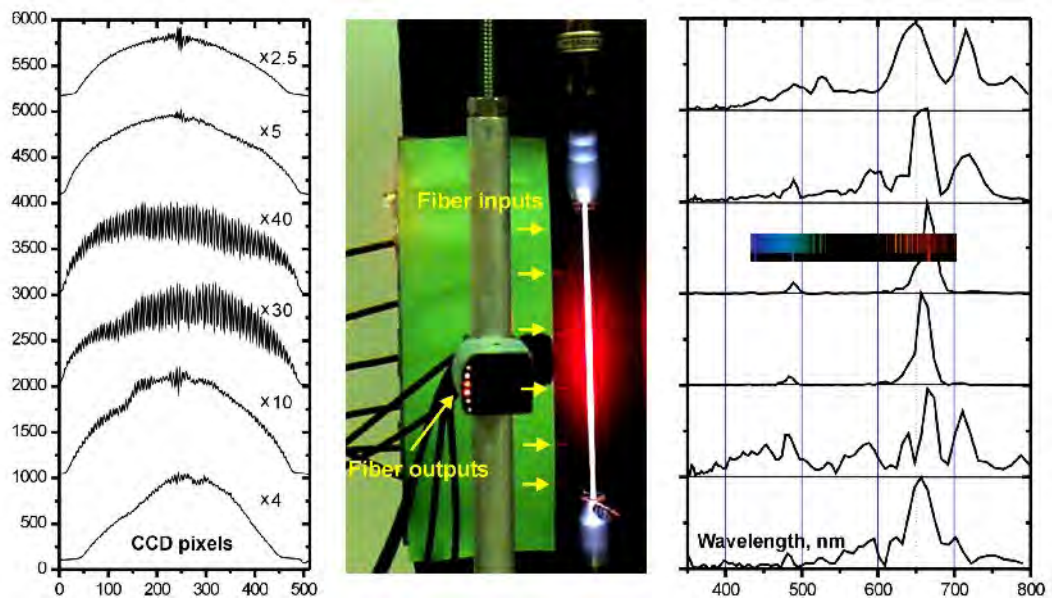


Рис. 11. Серия спектров водородной спектральной лампы, снятая на СФС с пространственным разрешением. Врезка на правых графиках – фотография спектра свечения водородной лампы, на которой яркие красная и синезеленая линии – линии серии Бальмера<sup>5</sup> атомарного водорода

<sup>5</sup> [https://ru.wikipedia.org/wiki/Серия\\_Бальмера](https://ru.wikipedia.org/wiki/Серия_Бальмера)

Микроканальный усилитель обеспечивает в случае необходимости усиление яркости излучения и позволяет работать с временем экспонирования до 10 наносекунд. Интерферограмма, в конечном счете, записывается ПЗС-матрицей. Эквивалентная оптическая схема этого устройства показана на рис. 10, на котором путь в треугольном интерферометре “развернут” в линию и в экспликации учтено, что лучи распространяются навстречу друг другу.

Пример работы этого устройства приведен на рис. 11. Источником света служила водородная лампа. Шесть оптических волокон, положение которых показано желтыми стрелками, собирали излучение с разных точек вдоль длины лампы. Другие концы световодов (Fiber outputs) помещались вдоль вертикальной линии на входе в спектрометр, как показано на фотографии рис. 9. Интерферограммы, записанные ПЗС-матрицей, приведены на рисунке слева, а восстановленные численным фурье-преобразованием спектры – справа от фотографии.

Видно, что в центральной части водородной лампы наблюдаются только  $H_{\alpha}$  ( $\lambda = 656.3$  нм) и  $H_{\beta}$  ( $\lambda = 486.1$  нм) линии атомарного водорода. Это подтверждается и визуально: на фотографии в этой области видно яркое красное свечение, характерное для атомарного водорода. В приэлектродных областях цвет свечения становится белым, и в спектрах наблюдаются кроме атомарных линий широкие полосы, коррелирующие со спектром молекулярного водорода.

### Контрольные вопросы

1. Опишите принцип работы сканирующего фурье-спектрометра на основе интерферометра Майкельсона. Чем он отличается от дисперсионных спектральных приборов?
2. Что такое «выигрыш Жакино» и «выигрыш Фельжетта»?
3. Что такое «частота Найквиста»?
4. Что такое временная и пространственная когерентности?
5. Почему линза “выполняет преобразование Фурье”?
6. Опишите принцип работы статического фурье-спектрометра. Нарисуйте его оптическую схему и эквивалентную оптическую схему.
7. \*\*\*Почему статический фурье-спектрометр можно назвать голографическим интерферометром?
8. \*\*\*Что такое «быстрое преобразование Фурье»?

\*\*\*Вопросы для любознательных

## Экспериментальная часть

### Статический фурье-спектрометр в лабораторном практикуме



Рис. 12. Общий вид экспериментальной установки. 1 – оптическая система; 2 – компьютер; 3 – ПЗС камера Hamamatsu BT CCD C10150; 4 – контроллер камеры C7557-01; 5 – юстировочный лазер; 6 – Набор монохроматических и полихроматических источников света (ЛИС)

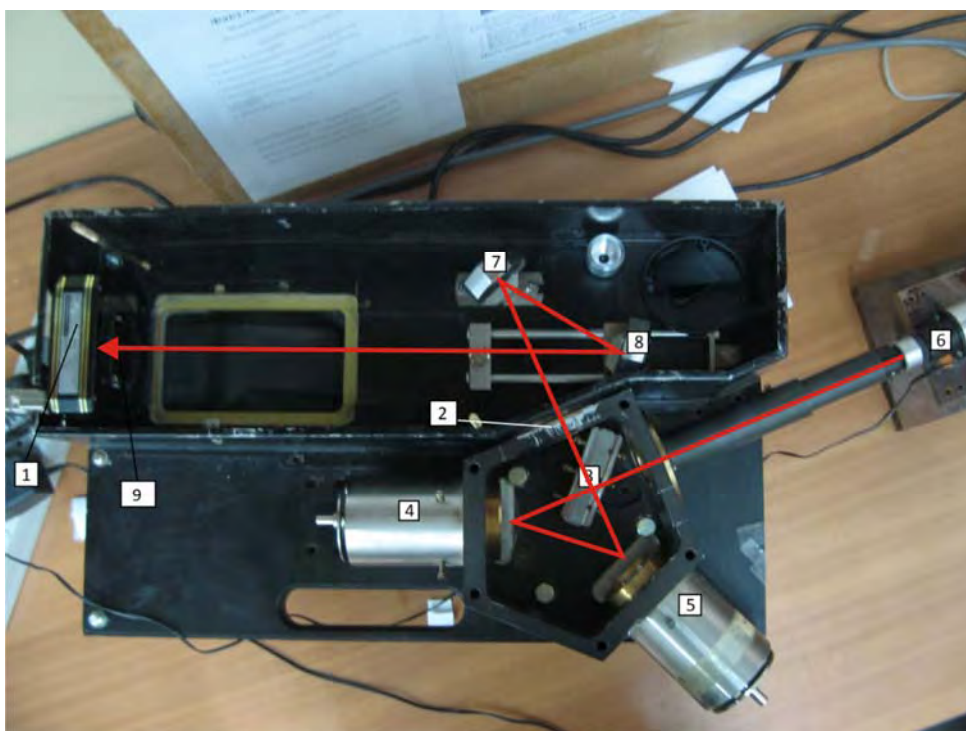


Рис. 13. Оптическая система СФС: 1 – камера Hamamatsu BT-CCD C10150; 2 – собирающая линза (находится внутри металлической стенки); 3 – светоделительная пластина; 4, 5 – зеркала для уменьшения габаритов спектрометра; 6 – монохроматический юстировочный лазер; 7, 8 – дополнительные зеркала; 9 – нейтральный светофильтр для ослабления входящего света



**ВНИМАНИЕ:** На сайте лаборатории имеется видеофильм [14], в котором имеется подробное описание работы с прибором, а также изложены теоретические основы фурье-оптики.

Спектрометр собран в простейшей конфигурации, показанной на рис. 7. Общий вид спектрометра приведен на рис. 12, а фотография оптической системы – на рис. 13. Фокусное расстояние линзы составляет 550 мм. Для уменьшения размеров прибора в выходной части использованы зеркала 7 и 8 (рис. 13). Основу спектрометра составляет интерферометр Саньяка (рис. 14). Каждый луч от источника излучения делится по амплитуде светоделительной пластиной, одна из поверхностей которой напылена алюминием, на два когерентных луча. Затем, дважды отразившись от зеркал и снова соединившись после прохождения светоделительной пластины, лучи, попав на собирающую линзу, фокусируются ею на матрицу камеры Hamamatsu BT CCD C10150 [15], где и интерферируют (на рис. 13, 14 схематично изображены оптические пути лучей). Зеркала 7 и 8 служат для уменьшения габаритов прибора.

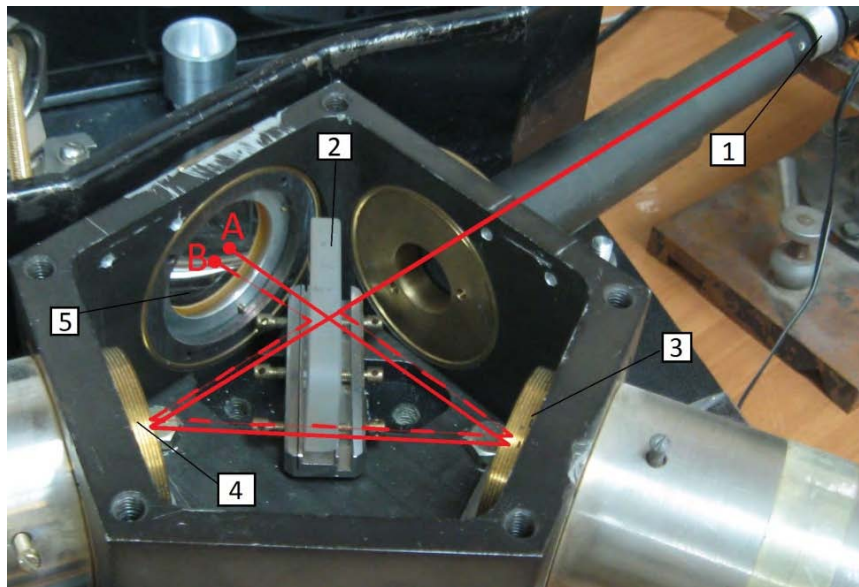


Рис. 14. Ход лучей в интерферометре Саньяка: 1 – монохроматический юстировочный лазер; 2 – светоделительная пластинка; 3, 4 – подвижное и неподвижное зеркала. 5-собирающая линза

Интенсивность излучения на приемнике следует сразу контролировать. Для предотвращения перегрузки и выхода из строя камеры для каждого источника излучения необходимо устанавливать в специальную кассету на входе в интерферометр набор нейтральных светофильтров, которые нужно получить у дежурного инженера. Интенсивность излучения на камере не должна превышать примерно 40 000 отсчетов (максимум –  $2^{16} = 65536$ ). В качестве источника излучения используется лабораторный источник света – ЛИС, принципиальная электрическая схема которого приведена на рис. 15, а внешний вид на рис. 16. Прибор включает в себя 5 излучателей: 4 светодиода

– белый (БД), красный (КД), зеленый (ЗД); синий (СД) и полупроводниковый лазер с длиной волны излучения  $\lambda=0.665$  мкм (ЛД). Прибор работает от напряжения 5 вольт, подаваемого от блока питания (БП). Выбор необходимого излучателя осуществляется включением соответствующего тумблера П1÷П5.

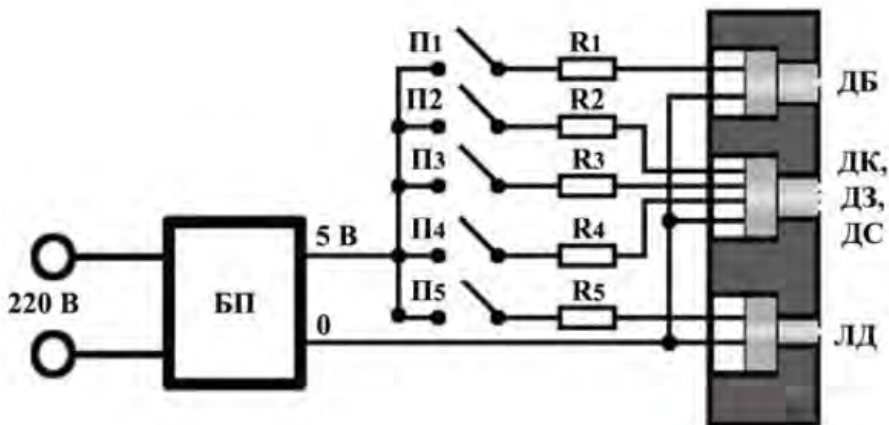


Рис. 15. Принципиальная электрическая схема лабораторного источника света ЛИС

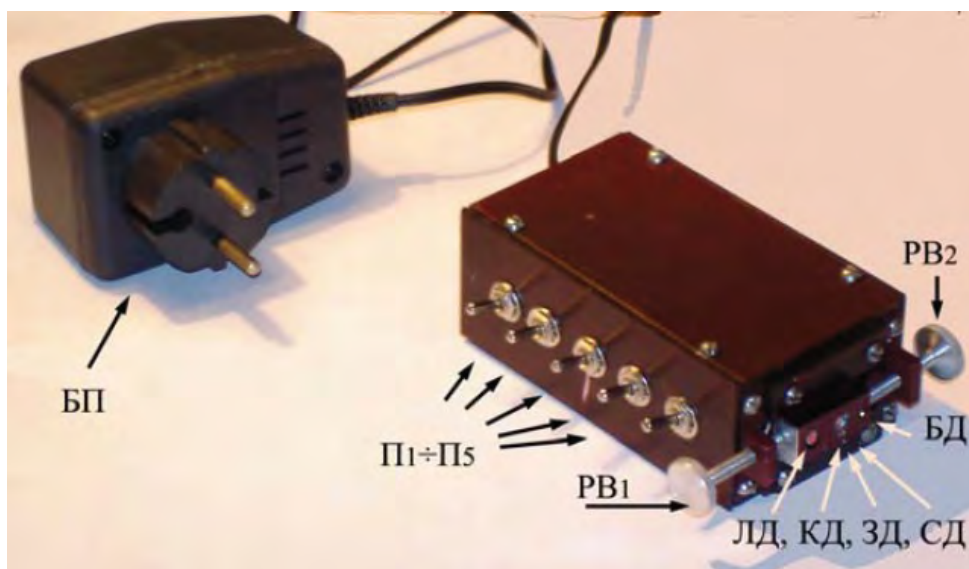


Рис. 16. Внешний вид ЛИС

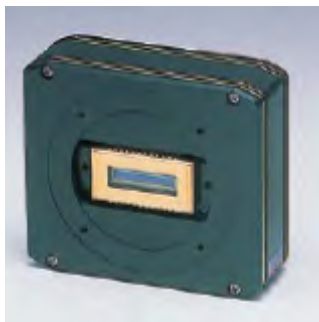
В качестве источника излучения используется лабораторный источник света – ЛИС, принципиальная электрическая схема которого приведена на рис. 15, а внешний вид на рис. 16. Прибор включает в себя пять излучателей: четыре светодиода – белый (БД), красный (КД), зеленый (ЗД); синий (СД) и полупроводниковый лазер с длиной волны излучения  $\lambda=0.665$  мкм (ЛД) и конусным расходящимся лучом. Прибор работает от напряжения 5 вольт, подаваемого от блока питания (БП). Выбор необходимого излучателя осуществляется включением соответствующего тумблера П1÷П5. При юстировке оптической оси системы (что студент не должен делать

самостоятельно), может также использоваться лазер с узконаправленным лучом.

### CCD камера высокого разрешения HAMAMATSU BT-C10150

Система регистрации интерферограмм состоит из фотоприемника и АЦП, связанных с управляющим персональным компьютером. В качестве фотоприемника используется камера высокого разрешения HAMAMATSU BT-CCD C10150 [15]. Связь с ПК осуществляется через контроллер C7557-01 и программное обеспечение C7557APL, которое позволяет легко контролировать работу камеры, а также быстро регистрировать данные. Фотография фотоприемника и его основные параметры приведены в табл. 1.

Табл. 1. Общий вид и характеристики камеры HAMAMATSU C10150



Спектральная чувствительность	200-1100 нм	
Диапазон рабочих температур, С	0	+50
Диапазон температур в режиме хранения, С	-20	+70
Количество пикселей 2068 x 512	Количество активных пикселей 2048 x 506	Активная область [мм(X) x мм(Y)] 24.576 x 6.072 мм

Программа C7557APL может считывать сигнал с камеры в двух режимах: Area Scanning Mode и Line Binning Mode. При работе в первом режиме программа фотографирует картину и сохраняет ее в bmp файл. При работе во втором режиме, программа выдает зависимость усредненной по вертикальной оси интенсивности излучения от координаты по оси X (в пикселях), т.е. столбец длиной 2068 чисел, который и будет в дальнейшем использоваться для численного восстановления исходного спектра. Программа также позволяет получать данные с камеры в непрерывном режиме, что удобно для юстировки спектрометра.

До того, как включить камеру, следует съюстировать оптическую систему СФС. Перед включением камеры внимательно прочитайте инструкцию по ее включению.

Инструкция по включению ПЗС-камеры HAMAMATSU C10150

1. До включения компьютера включите питание контроллера камеры
2. Включите компьютер и выберите операционную систему Windows XP
3. Вход в систему: Student без пароля
4. Откройте Hamamatsu/Application Software/C7557APL
5. Расширьте окно вниз
6. Выберите детектор S10142-1109 (несмотря на то, что контроллер на самом деле S10040!!!) – это “прикол” производителей программного обеспечения
7. Выберите число пикселей 512x2068
8. Чтобы избежать проблем при управлении программой (из опыта работы):
  - a. Режим работы Line Scanning Mode (**LBM**) с нашей камерой не работает (предлагает другой детектор)
  - b. Работать можно в Line Binning Mode (**ASM**) (одномерная)
  - c. Или Area Scanning Mode (картинка)
  - d. При работе в **ASM** не включать Continuous Measurement (после этого вам нужно будет набраться терпения, чтобы умудриться остановить камеру Stop'ом)
9. Теперь в **LBM** – Start.....Stop

Юстировка спектрометра

**Внимание!!!** Не начинайте настройку прибора, не поняв, как он работает.

**Внимание!!!** До начала юстировки следует проверить, нужно ли это делать. Не исключено, что спектрометр уже съюстирован или почти съюстирован, и, покрутив что-нибудь, вы обеспечиваете себе лишнюю работу часа на три-четыре.

**Если спектрометр разюстирован!!!** Юстировку спектрометра рекомендуется выполнять без вскрытия интерферометра, используя выведенные вниз из интерферометра ручки оптико-механических актуаторов (вращение и подстройка плоскостности).



**Если спектрометр разюстирован совершенно!!!** В этом случае следует пригласить преподавателя или дежурного инженера, чтобы согласовать с ним последовательность действий и получить, при необходимости, разрешение на вскрытие интерферометра. *Камера, естественно должна быть уже выключена!*

**При работе внутри камеры** интерферометра *не касаться руками или предметами светоделительной пластинки и зеркал*. Путь лучей наблюдать с помощью бумажной полоски, помещая ее в нужные места. Помните, что все лучи “ходят по кругу”, и нужно все время контролировать, луч какого направления вы наблюдаете.

**Юстировка спектрометра** осуществляется с помощью лазера с узким лучом. На рис. 14 изображен ход прошедшего через светоделительную пластину и отраженного от нее лучей (сплошная и пунктирная линии). На бумажном экране (устанавливается перед линзой 5) должны появиться два световых пятна (точка А и В). С помощью юстировочных винтов (*расположены под дном спектрометра – латунные винты внутри камеры служат для фиксации светоделителя, а не для его юстировки*), регулирующих положение пластины 2, добиваемся совмещения точек А и В и появления интерференционной картины в виде полос. Далее следует вращать подвижное зеркало 3 таким образом, чтобы ширина полос увеличивалась (до появления 3-4 полос). В хорошо отъюстированном интерферометре освещенность всего пятна становится почти равномерной, при этом ширина интерференционной полосы должна быть больше апертуры фотоприемника.

### Исследование спектров источников излучения

После юстировки системы на лазере с тонким лучом (предыдущий пункт), в качестве источника излучения для дальнейшей настройки спектрометра используется монохроматический полупроводниковый лазер с длиной волны излучения  $\lambda=0.665$  мкм. На линзе 5 (рис. 14) при этом наблюдается интерференционная картина, состоящая из множества полос. Вращением юстировочных винтов пластины 3, добиваемся вертикальности этих полос. Регулируя положения зеркал 7 и 8 (*они съюстированы и это следует делать в исключительных случаях и с разрешения преподавателя*), добиваемся попадания картины на камеру 1.

Далее включается блок питания камеры, компьютер и запускается программа C7557APL, с помощью которой сигнал с камеры считывается в компьютер, где производится его обработка. Используя монохроматический лазер с длиной волны 665 нм, отодвигая зеркало, добиться получения как можно большего количества интерференционных полос, из расчета 10-15 точек на полосу. После этого установка полностью настроена, и можно приступать к регистрации интерферограмм, используя другие источники излучения.

### Программы для обработки результатов измерений

Обработка результатов выполняется с помощью предоставляемых вам готовых программ на MathCAD. Первая программа (++SFS\_Calibration!!!.xmcd) обрабатывает результаты калибровочных измерений с монохроматическим источником излучения (полупроводниковый лазер) и передает вычисленные константы во вторую программу (++SFS\_Retrieve\_Spectrum\_Reconstruction!!!.xmcd) для обработки интерферограмм и восстановления спектров. Студентам закрыто изменение текста программ, но разрешен ввод данных из файлов и изменение параметров и формата графиков. Тексты программ приведены в **Приложениях 1 и 2**.

### Примеры записи и обработки интерферограмм

Примеры интерферограмм, полученных от индивидуальных источников, входящих в ЛИС, или их комбинаций, представлены на рисунках 17,а-25,а. Примеры зависимостей усредненных по вертикальной оси интенсивностей от расстояния по оси  $x$  полученных интерферограмм представлены на рисунках 7,б-15,б. С помощью них восстановлены спектры полученных интерферограмм (см. рис 17,в-25,в).

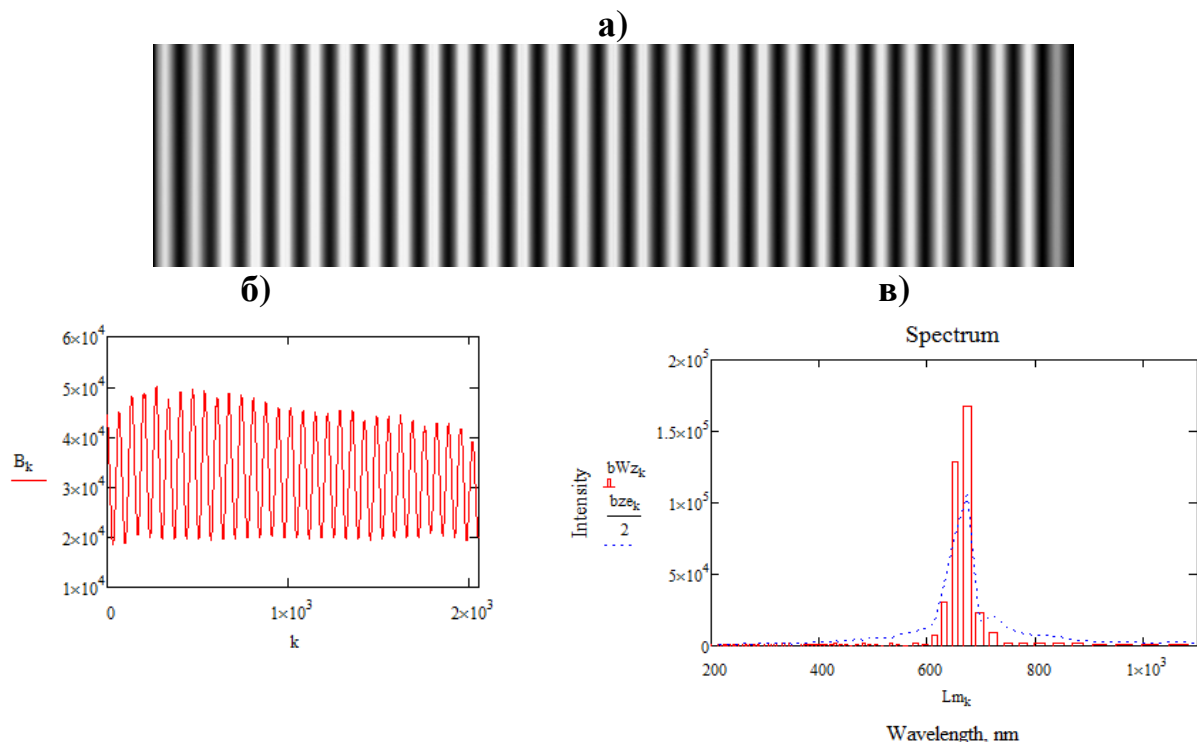


Рис. 17. Монохроматический полупроводниковый лазер (ЛИС)

а)

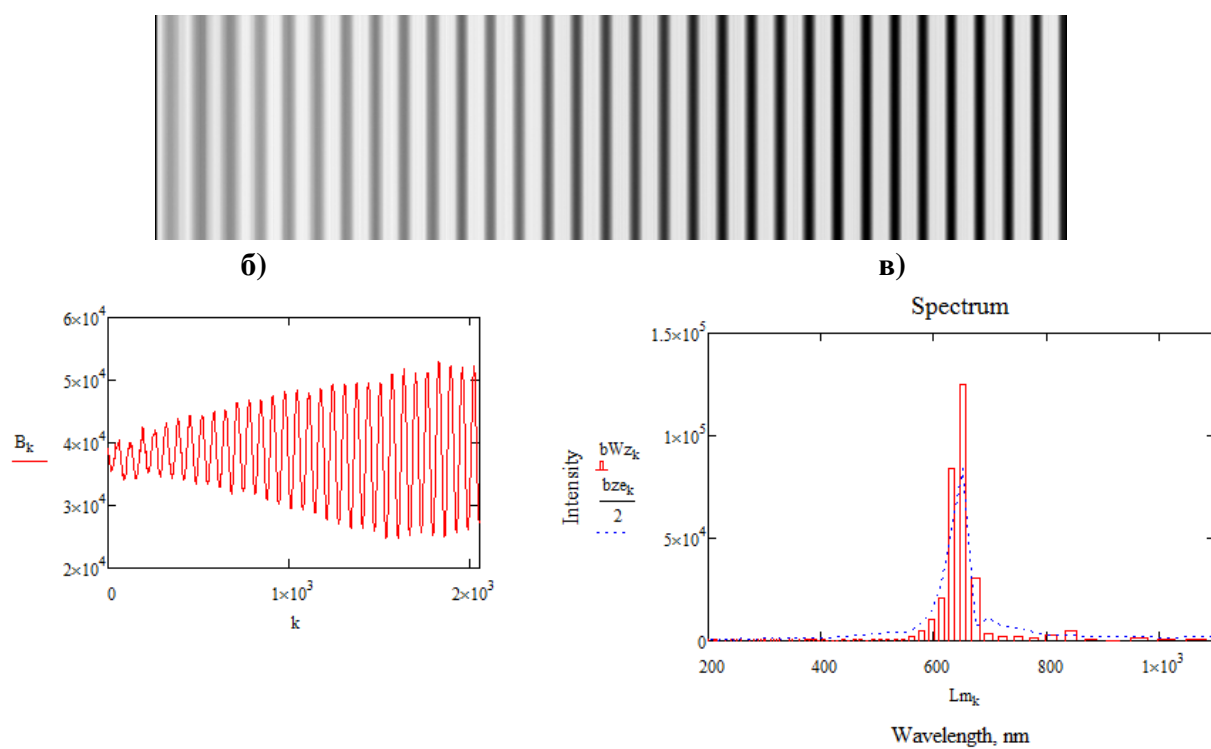


Рис. 18. Красный светодиод (ЛИС)

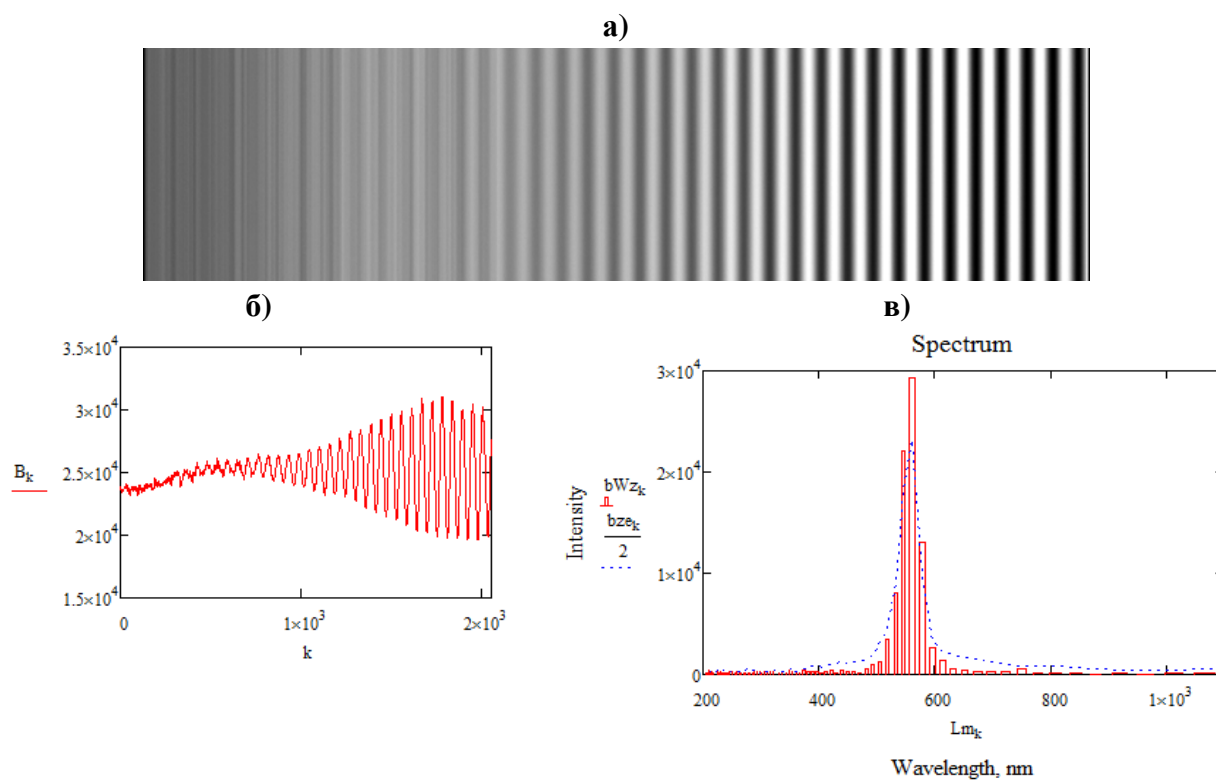


Рис. 19. Зеленый светодиод (ЛИС)

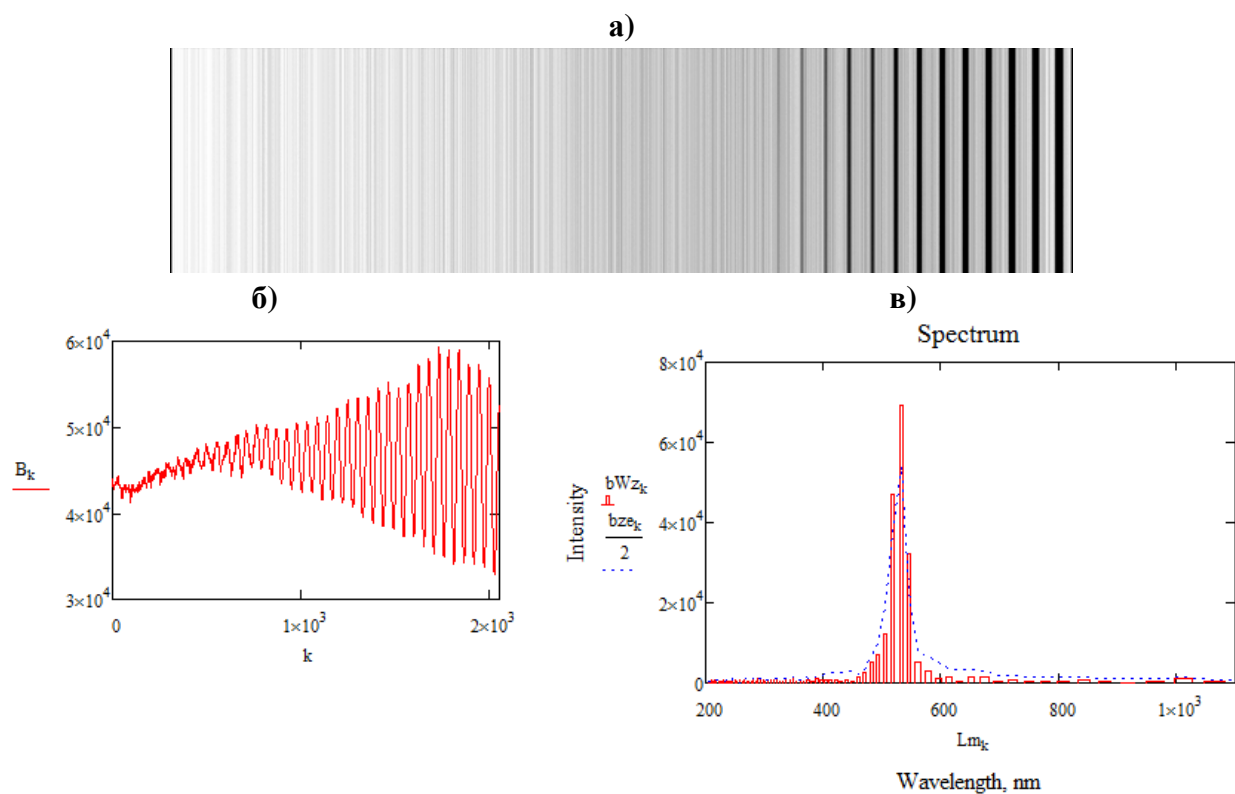


Рис. 20. Синий светодиод (ЛИС)

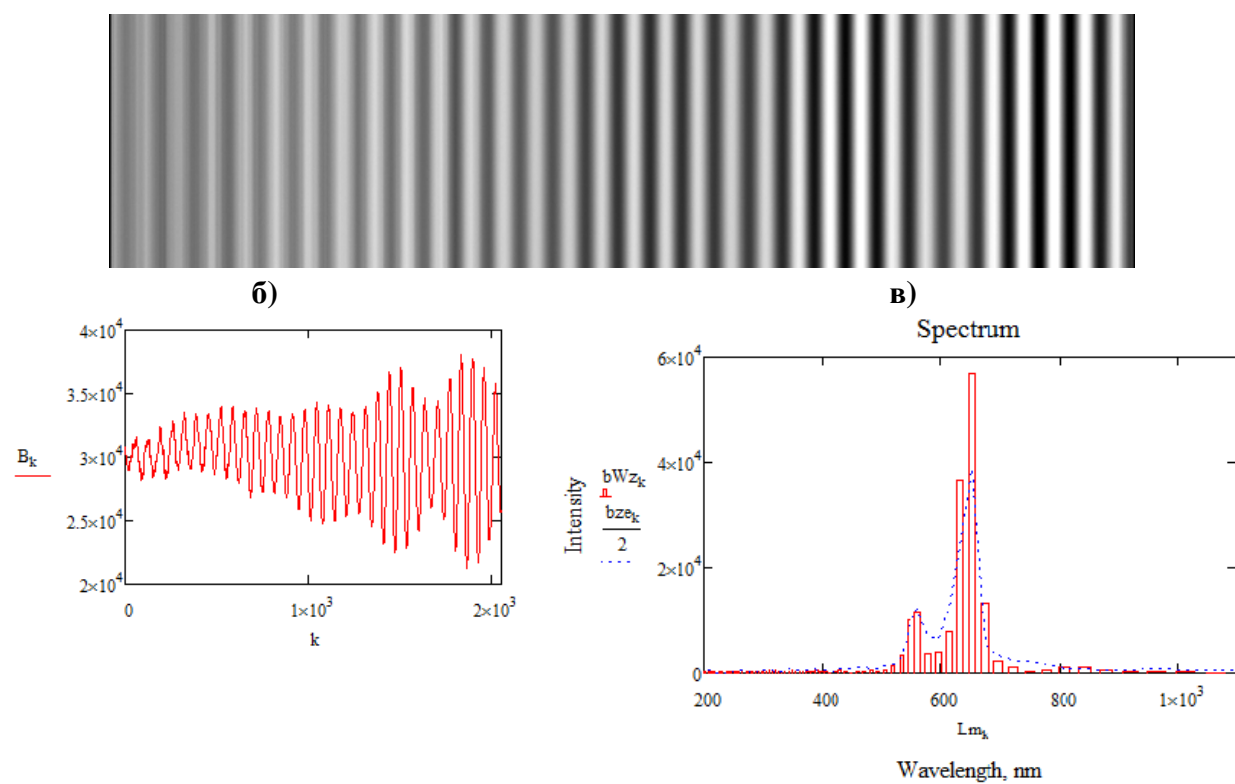


Рис. 21. Зеленый и красный светодиоды (ЛИС)

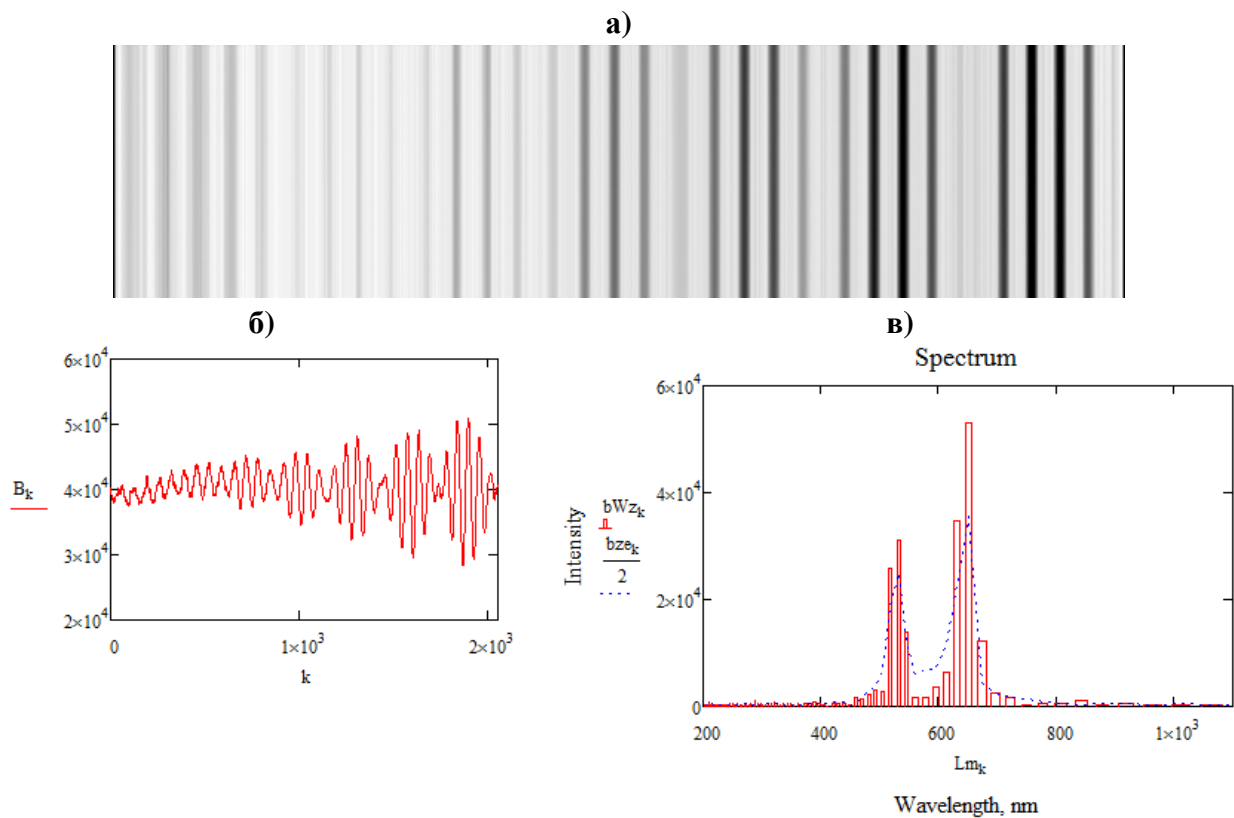


Рис. 22. Красный и синий светодиоды (ЛИС)

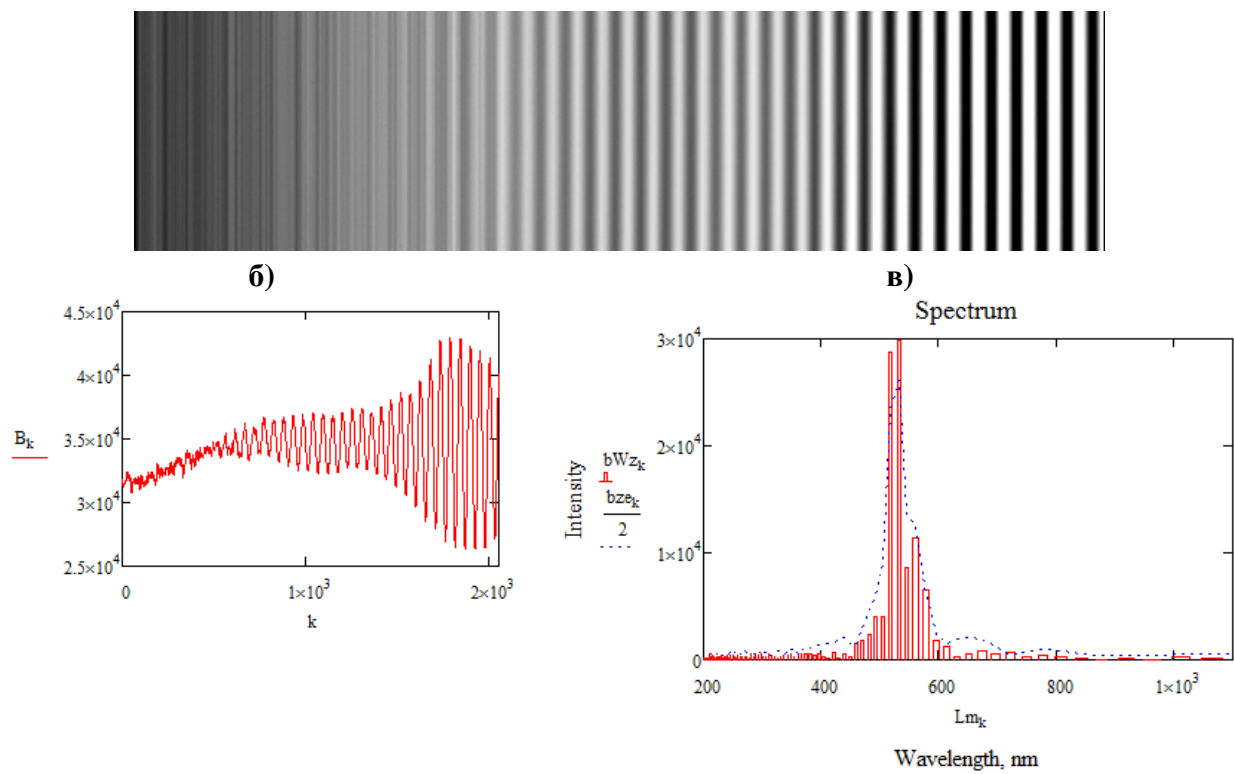


Рис. 23. Синий и зеленый светодиоды (ЛИС)

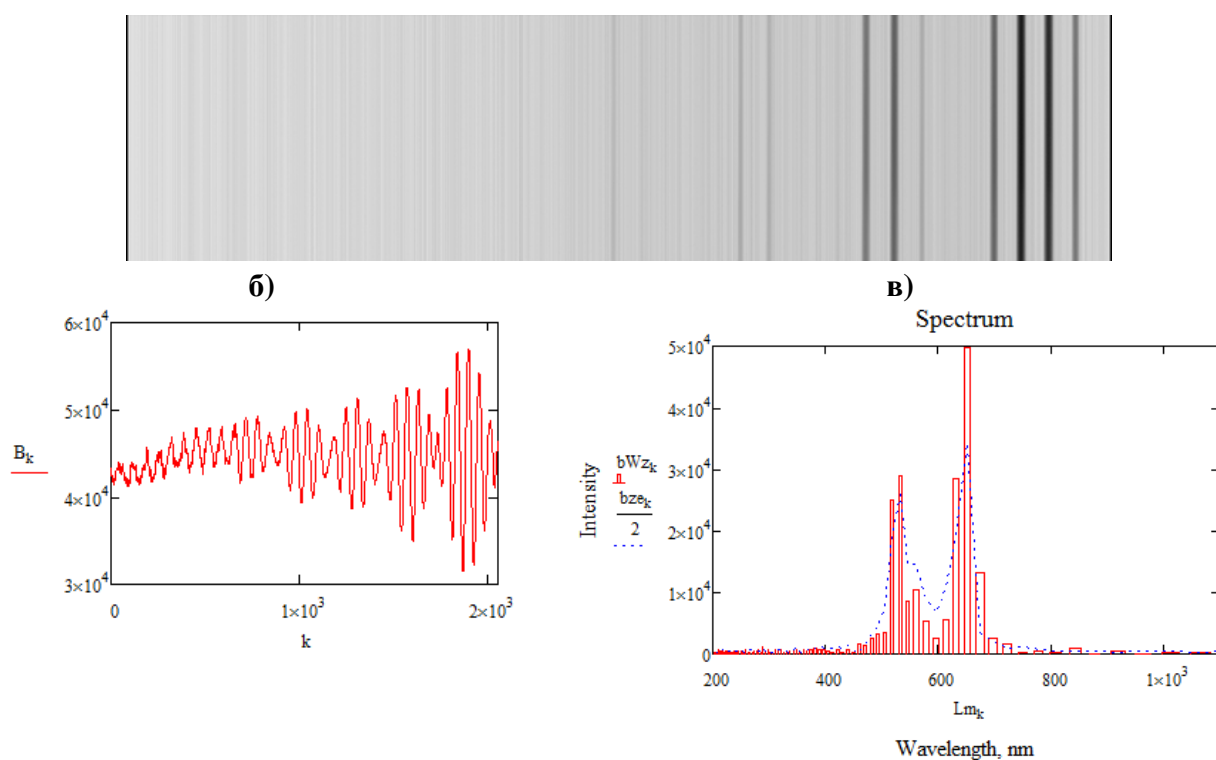


Рис. 24. Красный, зеленый и синий светодиоды (ЛИС)

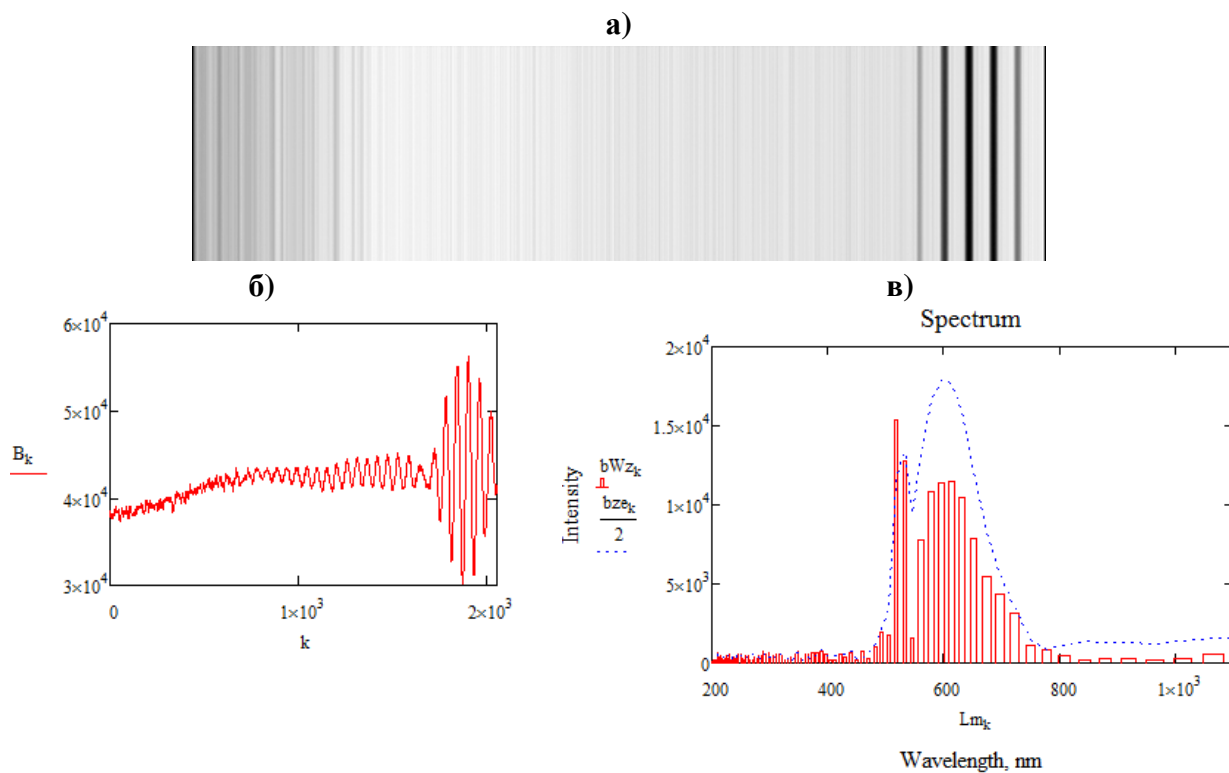


Рис. 25. Белый светодиод (ЛИС)

Табл. 2. Восстановленные спектры для различных источников излучения

Источник излучения	Полученный спектр, нм	Табличные данные, нм
Красный монохроматический полупроводниковый лазер, рис. 6-в.	670±10	665
Красный светодиод, рис. 7-в.	650±10	620-750
Зеленый светодиод, рис. 8-в.	560±15	495-570
Синий светодиод, рис. 9- в.	530±15	400-490
Красный и зеленый светодиоды, рис. 10-в.	650±15, 560±15	
Красный и синий светодиоды, рис. 11-в.	650±15, 530±15	
Зеленый и синий светодиоды, рис. 12-в.	560±15, 530±10	
Красный, зеленый и синий светодиоды, рис. 13-в.	650±15, 560±10, 530±10	
Белый светодиод, рис. 14- в.	518±10, 550-730	380-750

### Библиографический список

1. Бурмасов В.С., Князев Б.А., Любас Г.А., Федотов М.Г. Статический фурье-спектрометр на базе персонального компьютера с регистрацией фотодиодной линейкой. Новосибирск, 1992. (Препр./ МНВШТП РФ. Новосиб. гос. ун-т и СО РАН. Ин-т ядерной физики: 92- 490).
2. Бурмасов В.С., Князев Б.А., Любас Г.А., Федотов М.Г. Статический Фурье-спектрометр с регистрацией фотодиодной линейкой. *Приборы и техника эксперимента* // 1994, В.6, С.178.
3. Описание лабораторной работы 2.4 по физической оптике «Статический фурье-спектрометр»/ Б. А. Князев, В. С. Бурмасов, Г. А. Любас. Новосибирск, 1994.
4. Burmasov V.S., Doroshkin A.A., Knyazev B.A., Matveenko A.N., Fedotov M.G. Spatially-encoded Fourier spectrometer: prospects for plasma studies. *Plasma Devices and Operations*, 1999, V.7, P.181.
5. Knyazev B.A., Greenly J.B., Gretchikha A.V., Podulka W.J. Spectroscopic Diagnostics for the Cornell Ion Ring Experiment. *PPD APS Meeting*, Quebec, 2000; *Bull. Am. Phys. Soc.*, 2000, V.45, No.7, MP1 117.
6. А.Н.Зайдель, Г.В.Островская, Ю.И.Островский. Техника и практика

- спектроскопию М.: Наука, 1972.
7. Тонков М.В. Фурье-спектроскопия – максимум информации за минимум времени. Соросовский образовательный журнал, Т. 7, №1, С. 83-88 (2001).
  8. Белл Р. Дж. Введение в фурье-спектроскопию. // М.: Мир, 1975.
  9. Мешков И.Н., Чириков Б.В. *Электромагнитное поле, ч. 1.* // Новосибирск: Наука, 1987.
  10. Яковлев В. И. *Классическая электродинамика. Ч. 2. Электромагнитные волны.* // Новосибирск, 2009.
  11. Князев Б. А., Черкасский В. С. Дискретное преобразование Фурье – как это делается. *Вестник НГУ. Сер. Физика.* Т. 3, вып. 4, С. 74, 2008.
  12. Мешков И.Н., Чириков Б.В. *Электромагнитное поле, ч. 2.* // Новосибирск: Наука, 1987.
  13. Кольер Р., Беркрахт К., Лин Л. *Оптическая голография*, М.: Мир, 1973.
  14. Б. А. Князев, В. С. Черкасский. «Фурье-оптика на примере статического фурье-спектрометра». НГУ, 2013. Видеофильм на сайте лаборатории физической оптики.
  15. <http://www.datasheetdir.com/C10150+download>



Пт июл 19 20:59:11 2013

Приложение I.Калибровка Фурье спектрометра на монохроматическом лазере с известной длиной волны 665 нм.После каждого изменения положения подвижного зеркала спектрометра, он должен быть откалиброван заново.

Внимание! Области, отмеченные зеленым цветом, редактируются при необходимости студентом при обработке данных. Остальные области трогать не рекомендуется!

1. Считывание сигнала

Считывание сигнала, записанного камерой Hamamatsu BT-CCD C10150, и записанного программой C7557APL в txt файл(формат ASCII):

Считываем интерферограмму калибровочного лазера, предварительно удалив текстовые строки в файлах данных, записанных в формате камеры Hamamatsu:

Пт июл 19 20:59:11 2013

```
G := READPRN("Laser-1.txt")
```

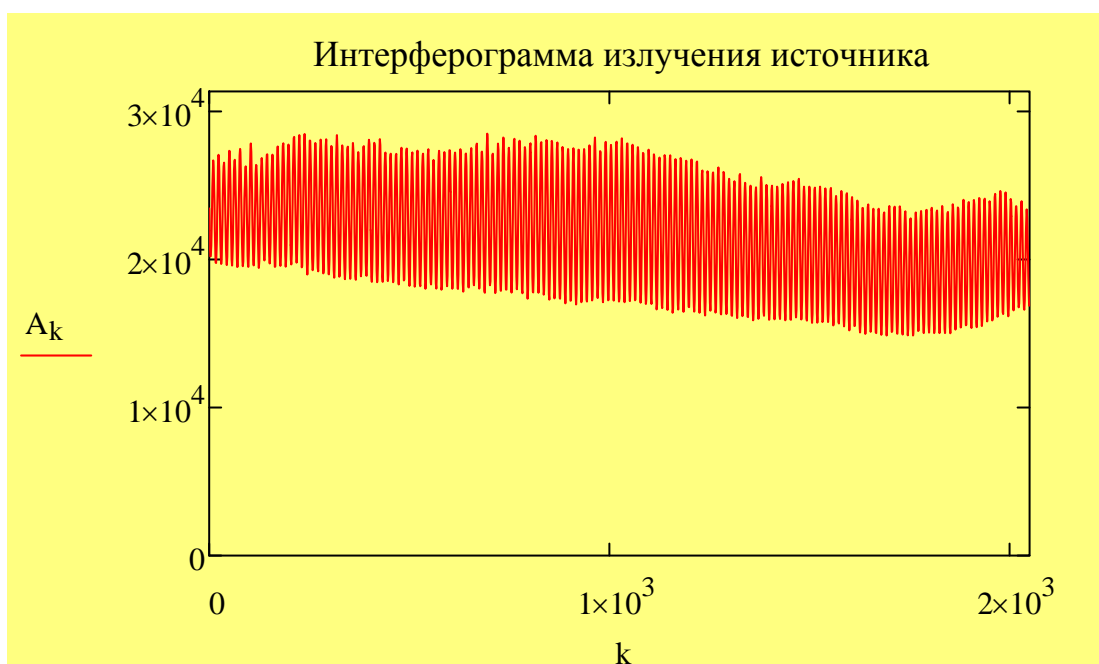
Пт июл 19 21:18:49 2013

Число элементов в массиве данных:  $NG := \text{rows}(G)$   $NG = 2.068 \times 10^3$

Из них только 2048 чисел нам нужны для выполнения быстрого преобразования Фурье:

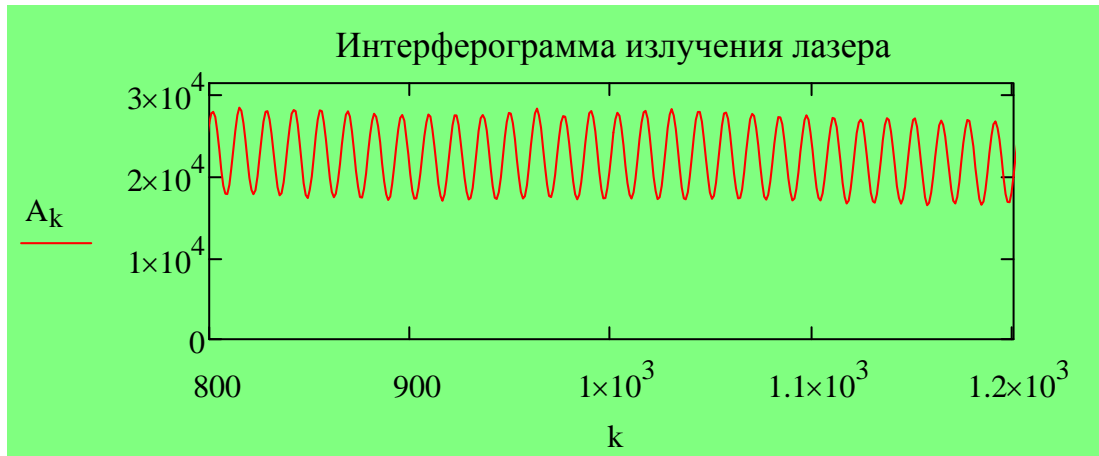
$N := 2048$   $k := 0 .. N - 1$  обрезаем лишние данные:  $A_k := G_{k+14}$

Выведем график интерферограммы во всем диапазоне переменных :



А на следующем графике вы можете отредактировать оси, чтобы рассмотреть детальнее форму и период интерферограммы:

Пт июл 19 21:18:49 2013



Пт июл 19 21:19:07 2013

## 2. Фурье-преобразование сигнала

быстрое фурье-преобразование:  $\underline{S} := \text{fft}(A)$   $k := 0 \dots \frac{N}{2}$

амплитуда фурье-спектра:  $SS_k := |S_k|$   $SS_{\max} := \max(SS)$

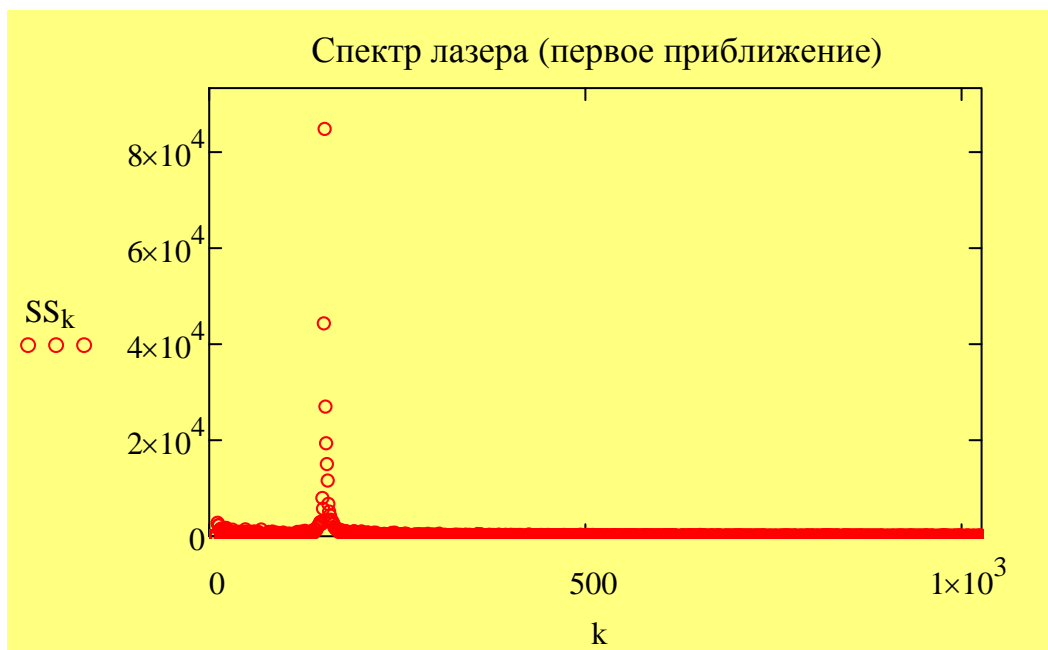
Убираем из спектра пик в нуле координат, который появляется из-за наличия постоянного смещения интерферограммы. Задаем количество точек  $keq0$ , в которых приравниваем значение  $SS$  нулю, затем зануляем их:

$keq0 := 10$

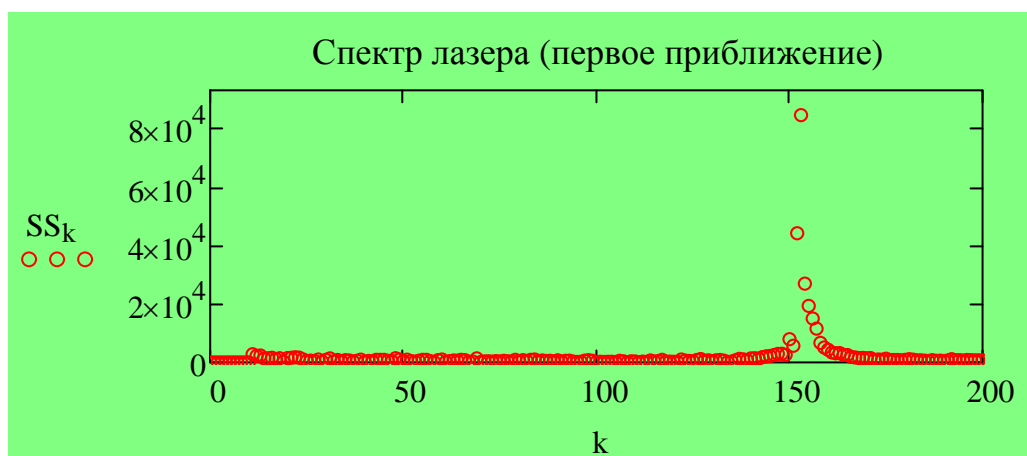
$kkk := 0 \dots keq0$   $SS_{kkk} := 0$   $SS_{\max} := \max(SS) = 8.448 \times 10^4$  Это амплитуда пика

Теперь находим координату максимума пика из массива дискретных данных :

$k_{\max} :=$   $\left| \begin{array}{l} h \leftarrow 0 \\ \text{while } SS_h < SS_{\max} \\ \quad h \leftarrow h + 1 \\ \quad h \end{array} \right.$   $k_{\max} = 153$   $\underline{s}_k := k$



Пт июл 19 21:19:07 2013



Пт июл 19 21:19:23 2013

### 3. Определяем параметры пика

Для точного определения координат максимума пика аппроксимируем его гауссовой функцией и находим ее максимум:

Вводим предполагаемые параметры  $s_0$ ,  $s_1$  и  $s_2$  гауссовой функции. Если предложенные вами параметры не позволят получить искомые параметры (программа не найдет решения), поварируйте их в разумных пределах. Особо тщательно подберите третий параметр - его удачный выбор существенно влияет на возможность подгонки. Если и это не поможет, то пропустите этот шаг и введите ниже значения параметров самостоятельно, оценив их из полученного выше спектра.

Пт июл 19 21:19:23 2013

$$vg := \begin{pmatrix} SS_{\max} \\ k_{\max} \\ 1.5 \end{pmatrix}$$

Пт июл 19 20:53:05 2013

$$G(z, c) := \begin{bmatrix} \frac{-(z-c_1)^2}{(c_2)^2} \\ c_0 \cdot e^{\frac{-(z-c_1)^2}{(c_2)^2}} \\ \frac{-(z-c_1)^2}{e (c_2)^2} \\ \left[ \frac{2 \cdot c_1 \cdot (z - c_1)}{(c_2)^2} \right] \cdot e^{\frac{-(z-c_1)^2}{(c_2)^2}} \\ \left[ \frac{2 \cdot c_0 \cdot (z - c_1)^2}{(c_2)^3} \right] \cdot e^{\frac{-(z-c_1)^2}{(c_2)^2}} \end{bmatrix}$$

c0 - амплитуда

c1 - положение максимума

c2 - полуширина

$$P := \text{genfit}(s, SS, vg, G)$$

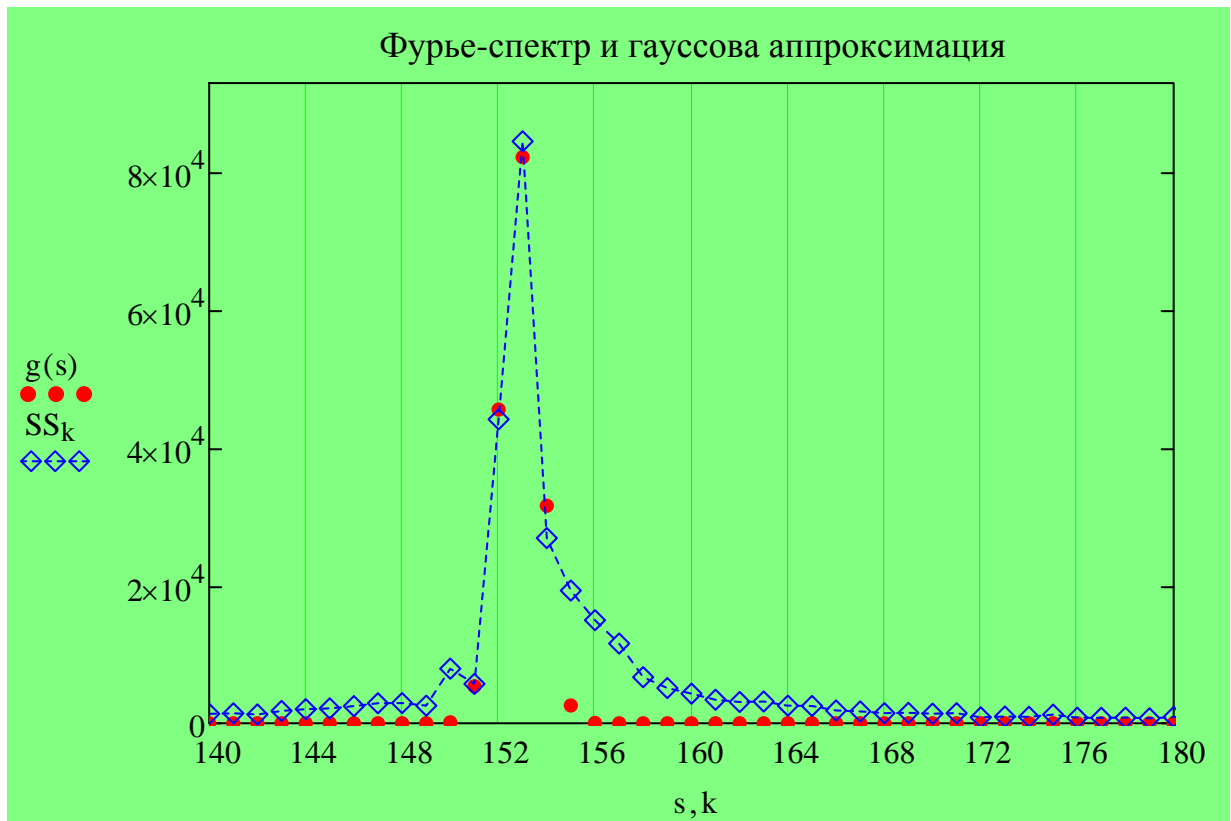
$$P = \begin{pmatrix} 83061.5955161 \\ 152.8816358 \\ 1.1371501 \end{pmatrix}$$

массив P - это найденные значения параметров c0, c1, c2

$$g(s) := G(s, P)_0$$

$$k_{\max new} := P_1 \quad k_{\max new} = 152.882$$

Пт июл 19 20:53:05 2013



Пт июл 19 21:18:32 2013

#### 4. Определяем параметры, необходимые для восстановления спектров неизвестных источников

Длина волны лазера (нм):  $\lambda L := 665$

$$g_0 := \lambda L$$

$$g_0 = 665$$

Соответствующее волновое число (1/см):  $\sigma L := \frac{1}{\lambda L \cdot 10^{-7}}$

$$\sigma L = 1.504 \times 10^4$$

Вычисляем период интерференции (пиксели):  $g_1 := \frac{N}{k_{\max \text{new}}}$

$$g_1 = 13.396$$

Размер одного пикселя камеры (см):  $x_{\text{pix}} := 0.0012$

Длина рабочей области камеры (см):  $L := x_{\text{pix}} \cdot 2048$

$$L = 2.458$$

Фокусное расстояние линзы фурье-спектрометра (см):  $f := 55$

Вычисляем смещение зеркала (см):  $\Delta l := \frac{k_{\max \text{new}} \cdot f}{\sigma L \cdot L}$

$$g_2 := \Delta l$$

$$g_2 = 0.228$$

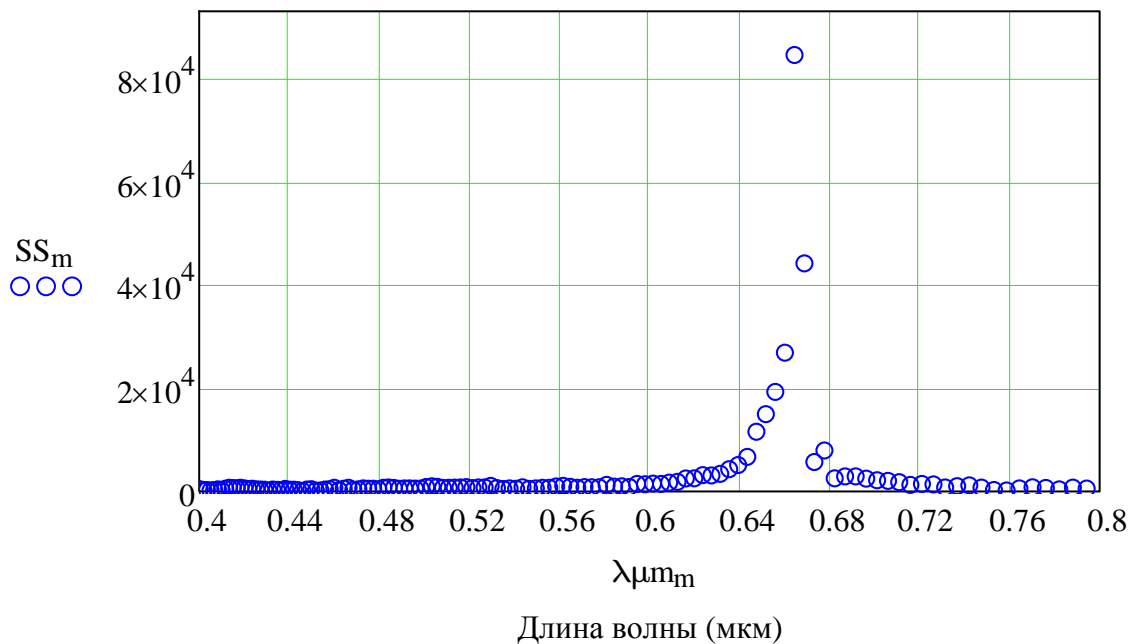
Записываем в файл вектор данных для калибровки результатов измерений неизвестных источников

```
WRITEPRN("g_calibr.prn") := g
```

До сих пор мы все вычисления выполняли в "пикселах", не привязывая их к частоте или длине волны излучения. Теперь пора связать полученный нами спектр монохроматического источника с реальной длиной волны. Для контроля правильности вычисления калибровочных параметров переведем ось абсцисс в микрометры и построим график спектра излучения калибровочного лазера. Длина волны  $g_0$  нам известна, и ее положение соответствует точке  $m=kmaxnew$ . Поскольку величина  $m$  в спектре пропорциональна волновому числу (частоте), длина волны обратно пропорциональна  $m$ , и мы сразу получаем выражение для перевода оси абсцисс в длину волны:

$$m := 1 \dots 1024 \quad \lambda_{\mu m_m} := \frac{kmaxnew}{m} \cdot g_0 \cdot 0.001 \quad \lambda_{min} := 0.4 \quad \lambda_{max} := 0.8$$

Спектр излучения калибровочного лазера




Программа калибровки завершена. Массив параметров  $g$ , необходимых для вычисления спектров неизвестных источников, вычислен и записан в файл  $g\_calibr.prn$ , который будет затем запрошен программой RETREIVE ("восстановление спектра").

Используя функцию Matcad "save as" вы можете сохранить этот отчет о калибровке спектрометра в файл в форматах RTF или HTML или

распечатать его в PDF формате.

Примечание: О численном преобразовании Фурье вы можете прочитать в журнале Вестник НГУ, Т. 3, вып. 4, 2008 (см. сайт ФФ) в статье Б.А. Князев, В.С. Черкасский "Дискретное преобразование Фурье - как это делается".

 Пт июл 19 21:18:32 2013

---

Пт июл 19 20:43:27 2013

Приложение II.

**Программа для восстановления спектра источника излучения из интерферограммы, записанной с помощью статического фурье спектрометра.**

**Перед использованием этой программы вы должны прокалибровать интерферометр с помощью калибровочного лазера, обработать его интерферограмму с помощью программы ++SFS\_calibration.xmcd и записать в рабочей папке файл g\_calibr.prn .**

**Примечание: Ни в коем случае не запускайте эту программу, используя кем-то ранее записанный калибровочный файл, - он заведомо не соответствует текущим настройкам интерферометра, - и все результаты будут ошибочными!!!**

**Внимание! Области, отмеченные зеленым цветом, могут редактироваться студентом. Изменение остальных областей заблокировано. Действия, выполняемые в этих областях должны быть изучены и объяснены студентом при сдаче работы.**

1. Считывание сигнала и калибровочных данных

Считывание сигнала, записанного камерой Hamamatsu BT-CCD C10150, и записанного программой C7557APL в txt файл(формат ASCII):

А. Считываем массив данных, полученный при калибровке спектрометра лазерным излучением:

В. Считываем интерферограмму калибровочного лазера, *предварительно удалив текстовые строки в начале файла данных, записанных в формате камеры Hamamatsu:*

А) `g := READPRN("g_calibr.prn")`

**Введите имя интерферограммы, записанной на фурье-спектрометре, освещаемом излучением исследуемого источника:**

Пт июл 19 20:43:27 2013

В) `G := READPRN("Red-Light-diode.txt")`

Пт июл 19 20:58:06 2013

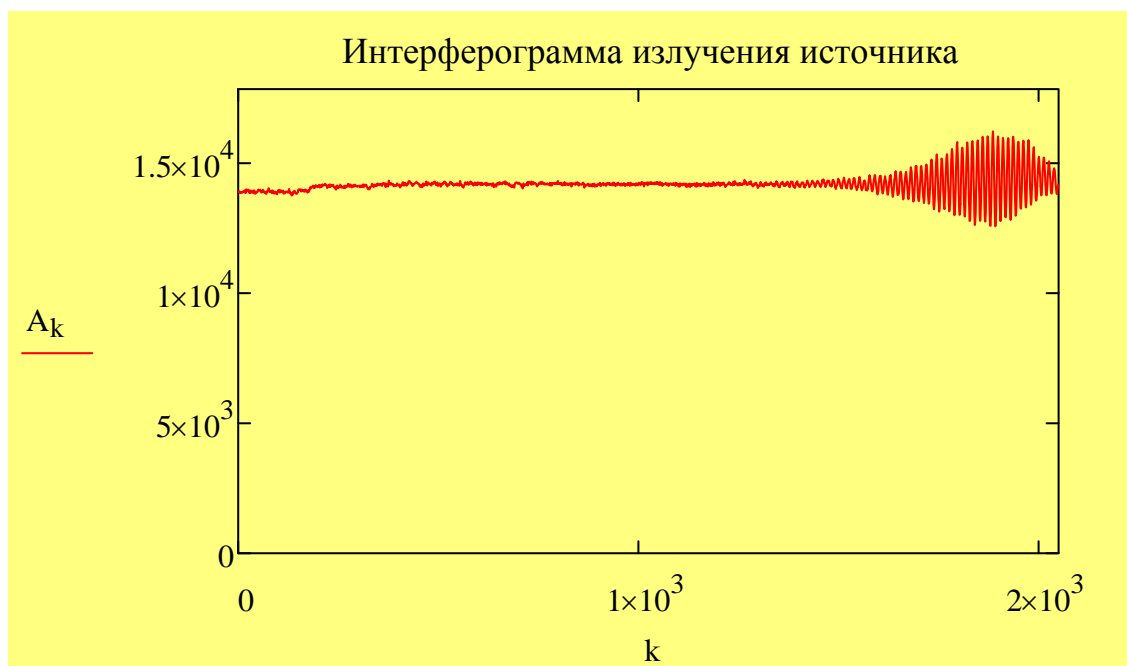
Число элементов в массиве данных:  $NG := \text{rows}(G)$   $NG = 2.069 \times 10^3$

Из них только 2048 чисел нам нужны для выполнения быстрого преобразования Фурье:

`N := 2048` `k := 0 .. N - 1` **обрезаем лишние данные:** `Ak := Gk+14`

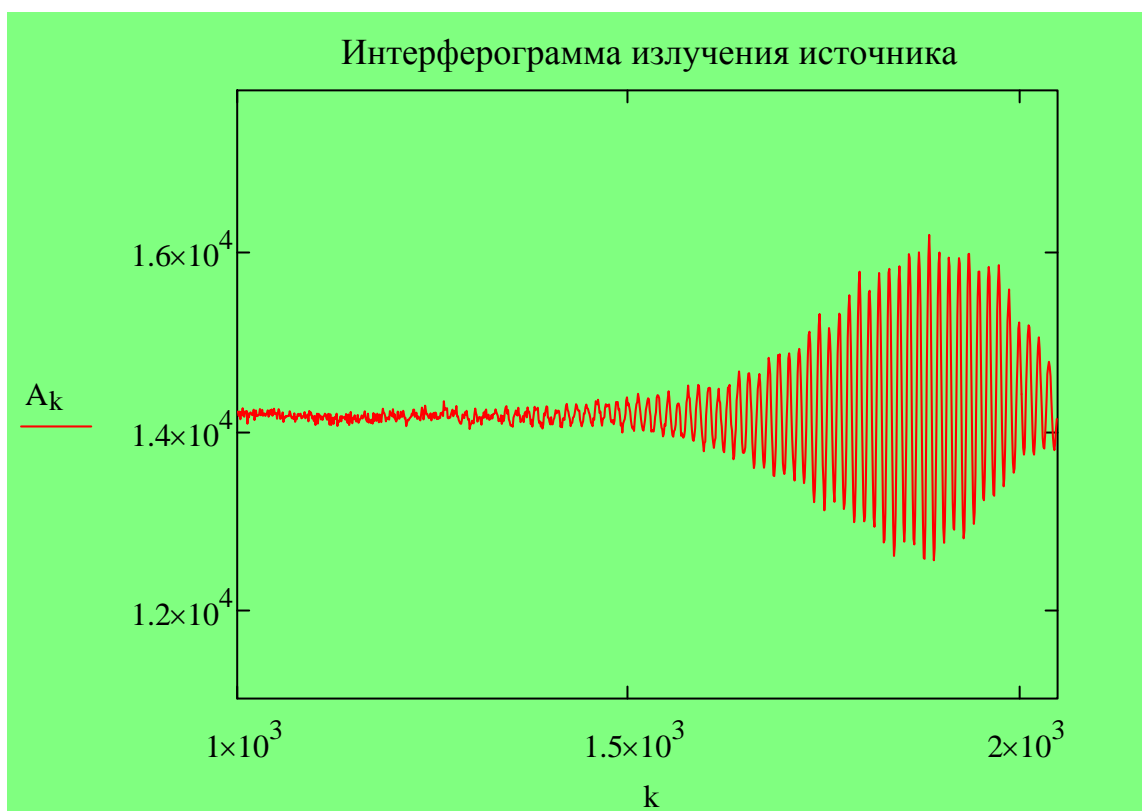


Выведем график интерферограммы во всем диапазоне переменных :



А на следующем графике вы можете отредактировать оси, чтобы рассмотреть детальнее форму и период интерферограммы:

Пт июл 19 20:58:06 2013



Пт июл 19 20:44:14 2013

## 2. Фурье-преобразование сигнала и аподизация

1. Вычисление амплитуды и фазы спектральных компонент интерферограммы A.

$$b := \text{fft}(A) \quad k := 0 \dots \frac{N}{2} \quad bz_k := |b_k| \quad \text{barg}_k := \arg(b_k)$$

Величины констант из программы Calibration  $g_0 = 665$   $g_1 = 13.4$

Определяем волновое число (номер "пиксела")  $d$ , соответствующее длине волны калибровочного лазера, и получаем выражение, связывающее волновые числа с длинами волн ( $d$  - рациональное число,  $k$  - целые числа)

$$d := \frac{N}{g_1} \quad d = 152.836 \quad k\lambda(\lambda) := \frac{d}{\lambda} \cdot g_0 \cdot 0.001$$

Находим предельные значения волновых чисел, соответствующих нижнему и верхнему пределам спектральной чувствительности системы, ограниченной пропусканием стеклянных элементов и чувствительностью ПЗС камеры. *Эти пределы равны приметно длинам волн 0.4 и 1.1 мкм.*

$$k_{\max} := \text{ceil}(k\lambda(0.4)) \quad k_{\max} = 255$$

$$k_{\min} := \text{floor}(k\lambda(1.1)) \quad k_{\min} = 92$$

Умножаем вычисленную амплитуду спектра на функцию expk, зануляющую значения амплитуды на краях спектра (аподизация)

$$k_{\text{center}} := \frac{k_{\min} + k_{\max}}{2} \quad \Delta k := \frac{k_{\max} - k_{\min}}{2} \quad \text{expk}_k := \exp\left[-\left(\frac{k_{\text{center}} - k}{\Delta k}\right)^{12}\right]$$

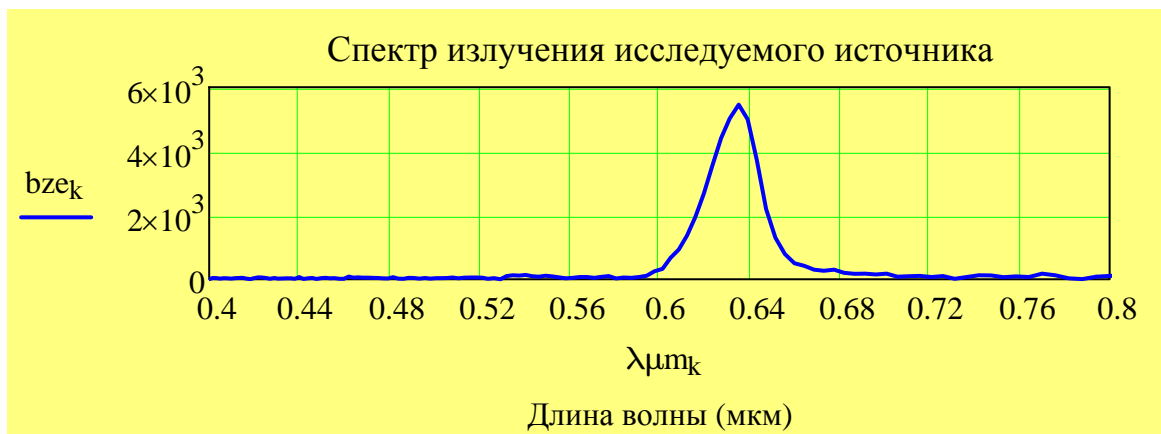
$$bze_k := bz_k \cdot \text{expk}_k \quad bz_{\max} := \max(bze) \quad bz_{\max} = 5.492 \times 10^3$$



#### 4. В заключение преобразуем переменную оси абсцисс и получим окончательно спектр излучения как функцию длины волны в микрометрах

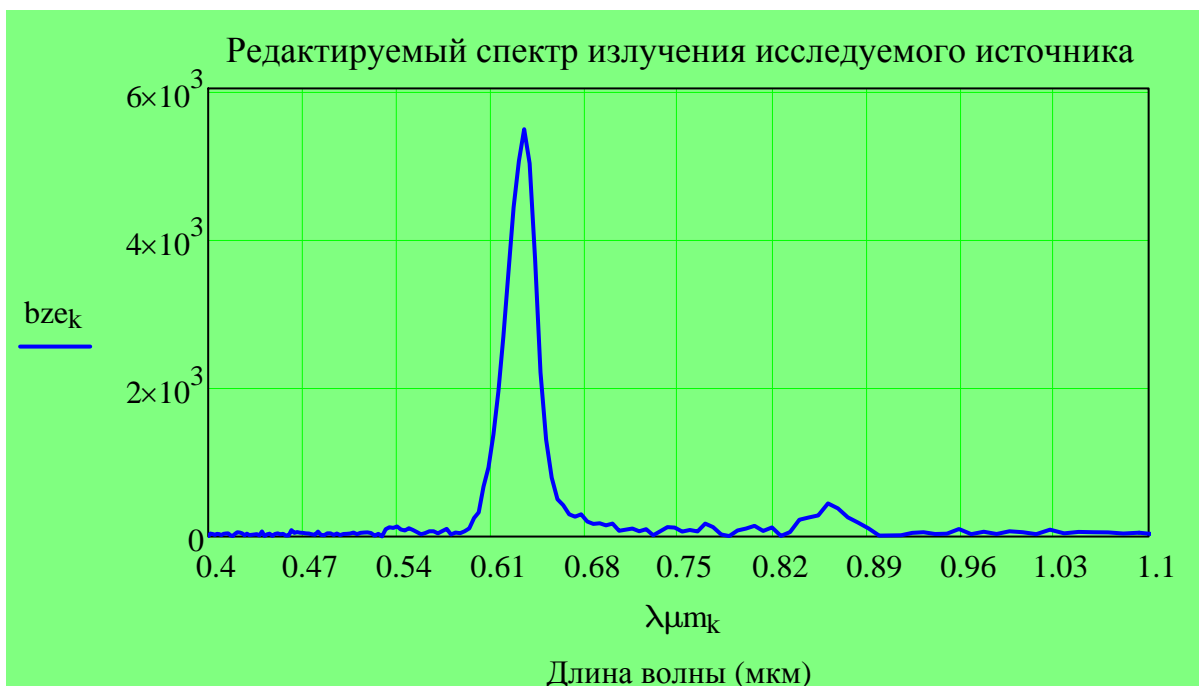
Длина волны  $\lambda = g_0$  нам известна, и ее положение соответствует точке  $k = d$ . Поскольку величина  $k$  в спектре пропорциональна волновому числу (частоте), длина волны обратно пропорциональна  $k$ , и мы сразу получаем выражение для перевода оси абсцисс в длину волны:

$$k := 1 \dots 1024 \quad \lambda_{\mu\text{m}_k} := \frac{d}{k} \cdot g_0 \cdot 0.001 \quad \lambda_{\text{min}} := 0.4 \quad \lambda_{\text{max}} := 0.8$$



Восстановление спектра выполнено. Ниже приведен этот же график, на котором вы можете изменять параметры осей для более детального исследования спектра (положение максимумов, ширина линий и т. п.)

Пт июл 19 20:44:14 2013



Пт июл 19 20:45:10 2013

Вы можете сохранить этот отчет о калибровке спектрометра в файл в форматах RTF или HTML, используя функцию Matcad "save as", или распечатать его в PDF формате. Кроме того этот график мы выводим в виде файла данных  $I(\lambda)$ :

$Ivs\lambda_{k,0} := \lambda\mu m_k$        $Ivs\lambda_{k,1} := bze_k$        $WRITEPRN("Spectrum\_tmp.prn") := Ivs\lambda$

После вывода файла со спектром немедленно переименуйте его, включив в его имя название восстановленного источника, поскольку файл Spectrum\_tmp.prn будет перезаписан при следующим запуске этой программы для обработки спектра следующего источника.

Пт июл 19 20:45:10 2013