

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНИКА

УДК 681.785.572

ТЕРАГЕРЦЕВЫЙ СКАНИРУЮЩИЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР ФАБРИ–ПЕРО

©2025 г. Г. И. Кропотов^а, Д. И. Цыпишка^{а,*}, В. С. Соколов^а

^а *Общество с ограниченной ответственностью “ТИДЕКС”*

Россия, 194292, Санкт-Петербург, ул. Домостроительная, д 16

**e-mail: dmitrytsypishka@tydex.ru*

Поступила в редакцию 12.05.2025 г.

После доработки 13.05.2025 г.

Принята к публикации 01.07.2025 г.

Разработан терагерцевый сканирующий интерферометр Фабри–Перо, предназначенный для измерения длины волны и интенсивности узкополосного излучения в терагерцевом диапазоне, а также для его фильтрации. Проведены измерения, подтверждающие возможность использования прибора во всем терагерцевом диапазоне. Приведены характеристики различных модификаций интерферометров Фабри–Перо.

1. ВВЕДЕНИЕ

Интерферометры Фабри–Перо (ИФП) широко применяются в спектроскопии, квантовой электронике, астрофизике, спектральном анализе, метрологии и других областях. Классический ИФП является ключевым элементом в перестраиваемых инфракрасных (ИК) и терагерцевых (ТГц) фильтрах. Однако их высокая разрешающая способность может быть реализована только тогда, когда коэффициент отражения внешних пластин фильтра близок к единице [1]. К недостаткам ИФП можно отнести относительную сложность конструкции, обусловленную наличием механизмов поддержания строгой параллельности зеркал, а также недостаточный контраст (резкость) спектральной картины.

Интерферометр Фабри–Перо для ТГц-диапазона длин волн является эффективным инструментом для анализа излучения в этом диапазоне, он широко применяется в различных системах, где требуется решить задачу спектрального анализа.

Рис.1. Схематическое изображение и спектр пропускания ИФП.

ИФП изготавливается на основе оптического резонатора, состоящего из двух параллельных пластин, отстоящих друг от друга на расстояние d , между которыми находится оптическая среда с показателем преломления n . Путем изменения расстояния d между пластинами осуществляется спектральная перестройка фильтра. На рис. 1 представлены схема и зависимость пропускания T от длины волны λ перестраиваемого фильтра на основе ИФП. Если поглощение пластин ИФП равно A , а отражение R , то пропускание T определяется по формуле Эйри [2] как

$$T = \left[1 + \frac{A}{T_0}\right]^{-2} \left[1 + \frac{4R_0}{(1-R_0)^2} \sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right)\right]^{-1}, \quad (1)$$

где R_0 , T_0 и A – значения коэффициента отражения, пропускания и поглощения для одной пластины (зеркала) соответственно. Поглощение, предполагаемое малым, равно

$$A \approx 1 - T_0 - R_0, \quad (2)$$

$$\delta = 4\pi n d \sigma \cos\theta - 2\varphi(\sigma), \quad (3)$$

где δ – разность фаз, связанная с длиной оптического пути d при прохождении одного фотона туда и обратно. Здесь θ – первичный угол падения лучей на интерферометр, φ – фазовый сдвиг отражения, а $\sigma=1/\lambda$. Расстояние между соседними максимумами составляет половину длины волны. Максимум пропускания ИФП

$$T_0 = \left(1 - \frac{A}{1-R}\right)^2 = \left(1 + \frac{A}{T}\right)^{-2} \quad (4)$$

в q -порядке при длине волны λ_q определяется из условия, что $\delta=2\pi q$, где $q=1, 2, 3, \dots$

Разрешающая способность интерферометра для первого порядка определяется как

$$Q = \frac{\lambda_q}{\Delta\lambda} = qF, \quad (5)$$

где $\Delta\lambda$ – полуширина полосы пропускания с центром λ_q , а F – так называемый фактор резкости (finesse) полосы пропускания, который при $R \geq 0.6$ определяется как

$$F = \frac{\pi}{\left(2 \arcsin \frac{1-R}{2R^{1/2}}\right)} \approx \frac{\pi R^{1/2}}{1-R}, \quad (6)$$

он является отношением расстояния между двумя соседними интерференционными максимумами l к ширине интерференционного максимума w (рис. 1).

2. СКАНИРУЮЩИЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР ФАБРИ-ПЕРО ДЛЯ ТГц-ДИАПАЗОНА

Сканирующий ИФП для ТГц-диапазона, разработанный в компании “ТИДЕКС” (рис. 2), – это спектральный многолучевой интерференционный прибор с высокой разрешающей

способностью и высоким пропусканием, который предназначен для измерения длины волны и интенсивности узкополосного ТГц-излучения. Он может быть использован для работы как с импульсными, так и с непрерывными источниками узкополосного ТГц-излучения. Устройство состоит из двух параллельных друг другу кремниевых (Si) зеркал, одно из которых смонтировано на моторизированном линейном трансляторе [3]. Зеркала изготавливаются из выращенного методом зонной плавки Si с удельным сопротивлением не менее 10 кОм·см, они представляют собой плоскопараллельные двусторонне полированные пластины. Зеркала обеспечивают отношение пропускания к отражению (54/46)% [4]. Достоинствами зеркал из Si являются относительная простота их производства и возможность охватить область спектра от 30 мкм до микроволнового диапазона всего парой зеркал. Измерение параметров ТГц-излучения происходит за счет перемещения подвижного зеркала (сканирования). Характерное значение фактора резкости для области 30–300 мкм составляет около 10, а для диапазона 300–3000 мкм – около 7.

Рис.2. Сканирующий ИФП для ТГц-диапазона компании “ТИДЕКС”.

На рис. 3 представлена одна из возможных схем установки прибора. Приведенная схема служит для анализа спектра источника ТГц-излучения. В качестве приемника может быть использован любой детектор ТГц-излучения, подходящий по диапазону спектральной чувствительности (например ячейка Голя [5]). Спектральные диапазоны источника ТГц-излучения и ИФП, а также диапазон спектральной чувствительности приемника должны быть взаимосогласованы, т.е. они должны пересекаться.

Рис.3. Принципиальная схема работы сканирующего ИФП.

Пакет ПО устройства проводит обработку сигнала с приемника и обеспечивает работу прибора с ПК и без помощи ПК. ПО работает в операционной системе Windows 7 или Windows 10 и осуществляет связь ПК с прибором по интерфейсу USB.

В общем виде отклик интерферометра $I(d)$ (зависимость сигнала на приемнике от расстояния между зеркалами) описывается при помощи определенного интеграла по длине волны от произведения ядра $J(\lambda, d)$ на искомый спектр $I(\lambda)$ (зависимость спектральной амплитуды от длины волны):

$$I(d) = \int_0^{\infty} J(\lambda, d) I(\lambda) d\lambda. \quad (7)$$

Ядро $J(\lambda, d)$ – это матрица значений функции аппаратного контура (АК) ИФП, рассчитанных для различных длин волн и расстояний между зеркалами ИФП.

Под АК прибора понимается спектральное распределение сигнала на выходе спектрального прибора при монохроматическом входном сигнале. Он отличается от АК

самого интерферометра, так как регистрируемая интерференционная картина несет на себе следы влияния всех составных частей установки. Разработанный математический аппарат позволяет рассчитывать спектр поступающего в ИФП излучения в сколь угодно широком диапазоне длин волн. Накладываемые ограничения носят сугубо технологически-производственный характер. Реализацию решения задачи по восстановлению спектра, поступающего в интерферометр ТГц-излучения, обеспечивает разработанное для этих целей ПО.

Устройство также может быть применено для измерения длины волны и интенсивности широкополосных источников ТГц-излучения и для фильтрации ТГц-излучения согласно спектру пропускания ИФП (рис. 4).

Рис.4. Спектр пропускания сканирующего ИФП при расстоянии между зеркалами 500 мкм.

Положение пиков пропускания (интерференционных максимумов) рассчитывается по формуле

$$\lambda_m = \frac{2d}{q}, \quad (8)$$

где d – расстояние между зеркалами ИФП, q – порядок интерференции, λ_m – положение максимума интерференции.

Управление прибором осуществляется моторизированной подвижкой со встроенным декодером; подвижка управляется с помощью программного обеспечения XILab. Благодаря декодеру можно точно устанавливать расстояние между зеркалами ИФП. В устройстве можно реализовать следующие варианты перемещения зеркала: движение зеркала в заданную позицию, сдвиг зеркала на заданное расстояние, непрерывное движение зеркала, циклическое движение зеркала. Также есть возможность задавать скорость движения зеркала, интервалы между перемещениями, начальное и конечное положения зеркала.

Фильтрация падающего ТГц-излучения согласно спектру пропускания проводится за счет изменения расстояния между зеркалами ИФП. Для перестройки полосы пропускания необходимо раздвинуть зеркала интерферометра на заданное расстояние, рассчитанное по формуле (8). На рис. 5 представлена типичная зависимость изменения полосы пропускания сканирующего ИФП от изменения расстояния между зеркалами. Спектры пропускания получены на фурье-спектрометре Bruker Vertex 70 при различных расстояниях между зеркалами.

Рис.5. Спектры пропускания сканирующего ИФП с зеркалами из кремния...

Также устройство может работать в режиме сканирования. Для этого необходимо задать требуемый диапазон перемещения зеркал и ввести количество повторов в программу управления моторизированной подвижки. На рис. 6 представлен результат измерения длины волны генерации непрерывного субмиллиметрового НСООН-лазера с оптической накачкой перестраиваемым СО₂-лазером при помощи сканирующего ИФП. Во время эксперимента лазер работал на длине волны 432.6 мкм. Как следует из графика, среднеарифметическое расстояние между соседними максимумами пропускания, измеряющееся как $(433 \text{ мкм} - 216 \text{ мкм} = 217 \text{ мкм})$, $(647 \text{ мкм} - 433 \text{ мкм} = 214 \text{ мкм})$, $(865 \text{ мкм} - 647 \text{ мкм} = 218 \text{ мкм})$, составляет $(217+214+218) \text{ мкм} / 3 = 216.3 \text{ мкм}$, что точно совпадает с половиной длины волны генерации лазера. Данный результат также согласуется с теоретическими расчетами положений максимумов пропускания ИФП по формуле (8).

Рис.6. Зависимость сигнала с детектора ТГц-излучения от расстояния между зеркалами ИФП.

Для измерения интегральной интенсивности прошедшего через интерферометр ТГц-пучка измеряется серия спектров пропускания в зависимости от положения зеркал. Эти спектры далее интегрируются в фиксированном диапазоне длин волн. Величина интеграла соответствует интегральной интенсивности, измеренной неселективным приемником любого типа. На рис. 7 представлена зависимость интегральной интенсивности излучения ртутной лампы фурье-спектрометра от расстояния между зеркалами ИФП.

Рис.7. Интегральная интенсивность ТГц-пучка, прошедшего через интерферометр, в зависимости от расстояния между зеркалами.

Сканирующий ИФП может быть использован для измерений параметров излучения гиротронов, субмиллиметровых лазеров с оптической накачкой, ламп обратной волны, лазеров на свободных электронах, источников ТГц-излучения на основе разностной генерации, источников ТГц-излучения на основе фотосмещения, квантово-каскадных лазеров, р-Ge-лазеров, а также принципиально новых источников ТГц-излучения.

Компания “ТИДЕКС” производит четыре различные модификации ИФП, отличающиеся друг от друга шириной зазора между зеркалами, высотой оптической оси и световым диаметром. В табл. 1 представлены основные параметры всех модификаций.

Таблица. 1. Оптико-механические параметры ИФП

Параметр	Модификация			
	TSFPI-1	TSFPI-2	TSFPI-RF-1	TSFPI-RF-2
Диапазон работы устройства, ТГц	0.1–15		0.02–15	
Область свободной дисперсии, ТГц	0.01–1.8			
Ширина зазора между зеркалами, мм	0–9.5		0–29.5	
Точность установки зазора, мкм	± 1.25			
Высота оптической оси, мм	53	110	53	110
Световой диаметр, мм	26	52	26	52

Для выделения определенной полосы излучения к ИФП дополнительно могут поставляться полосовые фильтры [6] на желаемую длину волны в диапазоне от 0.1 до 15 ТГц.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ТГц-диапазоне ИФП до недавнего времени в основном применялись в узких спектральных диапазонах для задач разделения серий пиков. Новизна подхода в данном приборе заключается в адаптации интерферометрической схемы к широкому спектральному диапазону, перекрывающему весь ТГц-диапазон и далее вплоть до частоты 20 ТГц ($\lambda = 1.5$ см). С этой целью для изготовления ИФП применяются зеркала из высокоомного Si. Также для этого разработан математический аппарат, с помощью которого осуществляется решение спектроскопической задачи восстановления спектра падающего на интерферометр ТГц-сигнала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жиглинский А.Г., Кучинский В.В. Реальный интерферометр Фабри–Перо. Ленинград: Машиностроение, 1983.
2. Cleary J.W., Fredricksen C.J., Muravjov A.V. et al. // Proc. SPIE. Terahertz and Gigahertz Electronics and Photonics VI. 2007. V. 6472. <https://doi.org/10.1117/12.700718> .
3. Tzibizov I.A., Kaveev A.K., Kropotov G.I., Tsypishka D.I., Zhdanov A.I., Ivanov A.A. // 38th IRMMW-THz. 2013. P. 1. <https://doi.org/10.1109/IRMMW-THz.2013.6665441>.
4. https://www.tydexoptics.com/ru/products/thz_optics/thz_beam_splitter1/ .
5. https://www.tydexoptics.com/ru/products/thz_devices/golay_cell/.
6. https://www.tydexoptics.com/ru/products/tgc-ustrojstva/thz_band_pass_filter/ .

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Схематическое изображение и спектр пропускания ИФП.

Рис. 2. Сканирующий ИФП ТГц-излучения компании “ТИДЕКС”.

Рис. 3. Принципиальная схема работы сканирующего ИФП.

Рис. 4. Спектр пропускания сканирующего ИФП при расстоянии между зеркалами 500 мкм: **а** – спектр падающего на ИФП излучения, **б** – спектр пропускания при фиксированном расстоянии между зеркалами, **в** – спектр излучения после прохождения его через устройство.

Рис. 5. Спектры пропускания сканирующего ИФП с зеркалами из кремния: **а** – расстояние между зеркалами 150 мкм, **б** – расстояние между зеркалами 225 мкм, **в** – расстояние между зеркалами 325 мкм.

Рис. 6. Зависимость сигнала с детектора ТГц-излучения от расстояния между зеркалами ИФП. Источник – субмиллиметровый лазер с оптической накачкой, $\lambda = 432.6$ мкм.

Рис. 7. Интегральная интенсивность ТГц-пучка, прошедшего через интерферометр, в зависимости от расстояния между зеркалами. Серия синих точек – экспериментально полученные значения. Красная кривая – теоретически рассчитанная зависимость интенсивности.

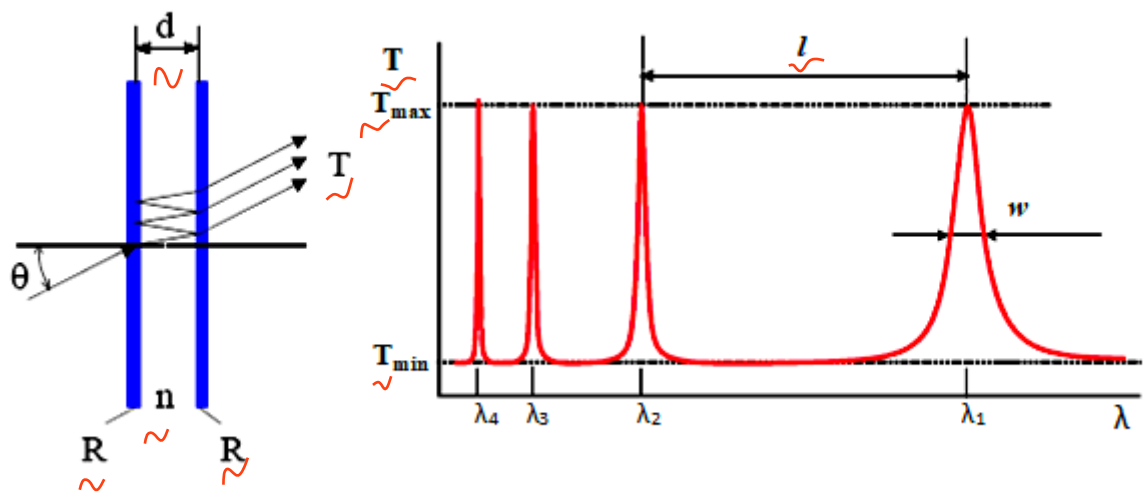


Рис. 1.

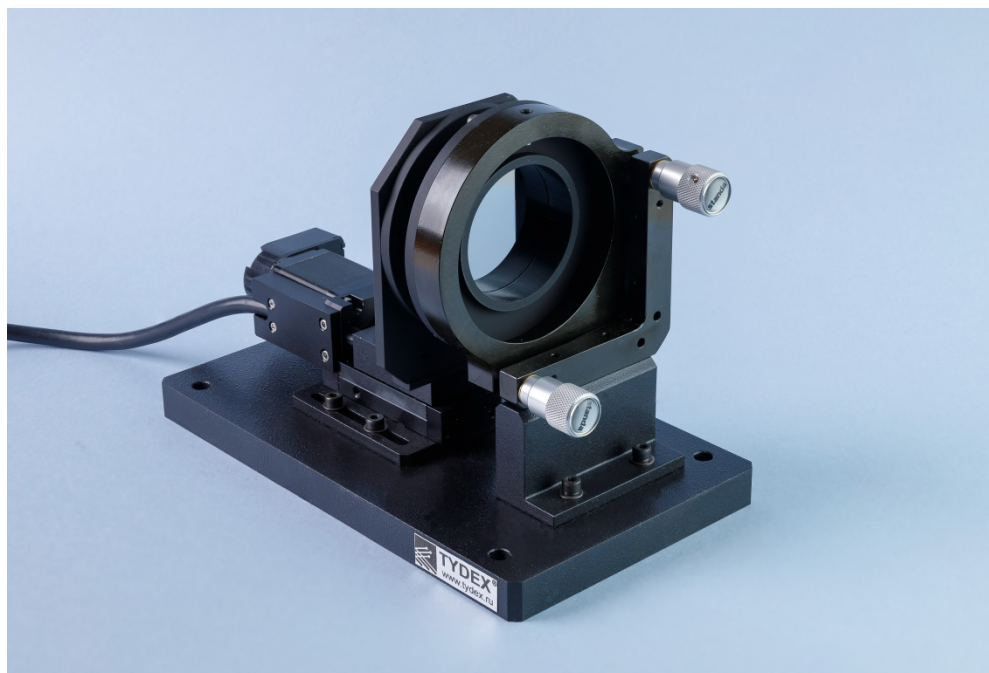


Рис. 2.

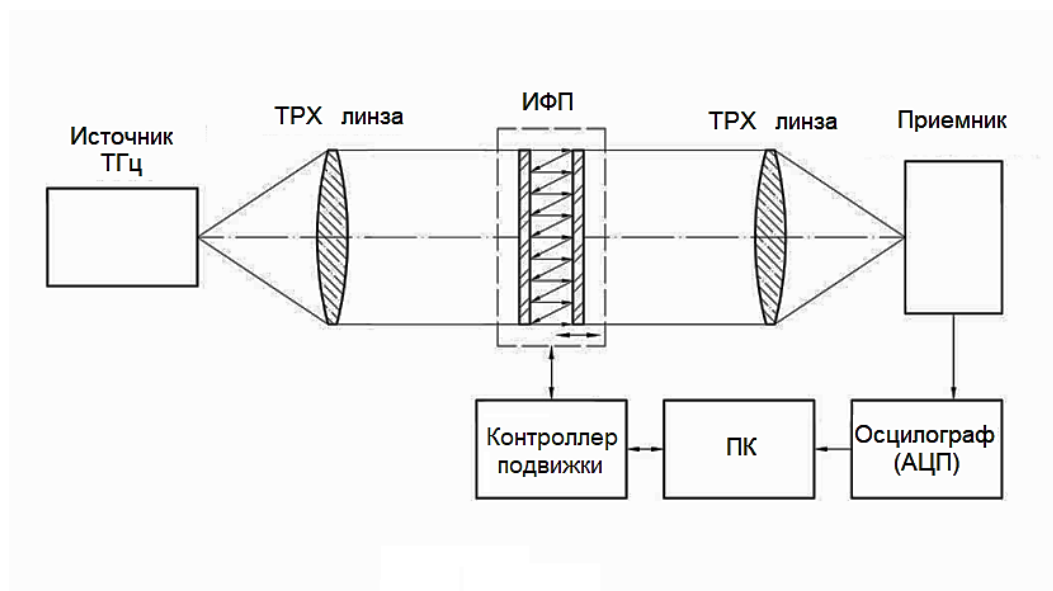


Рис. 3.

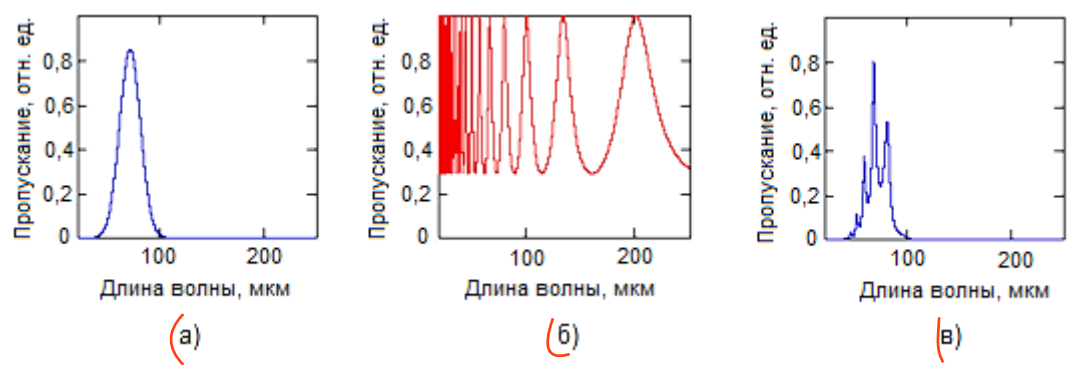


Рис. 4.

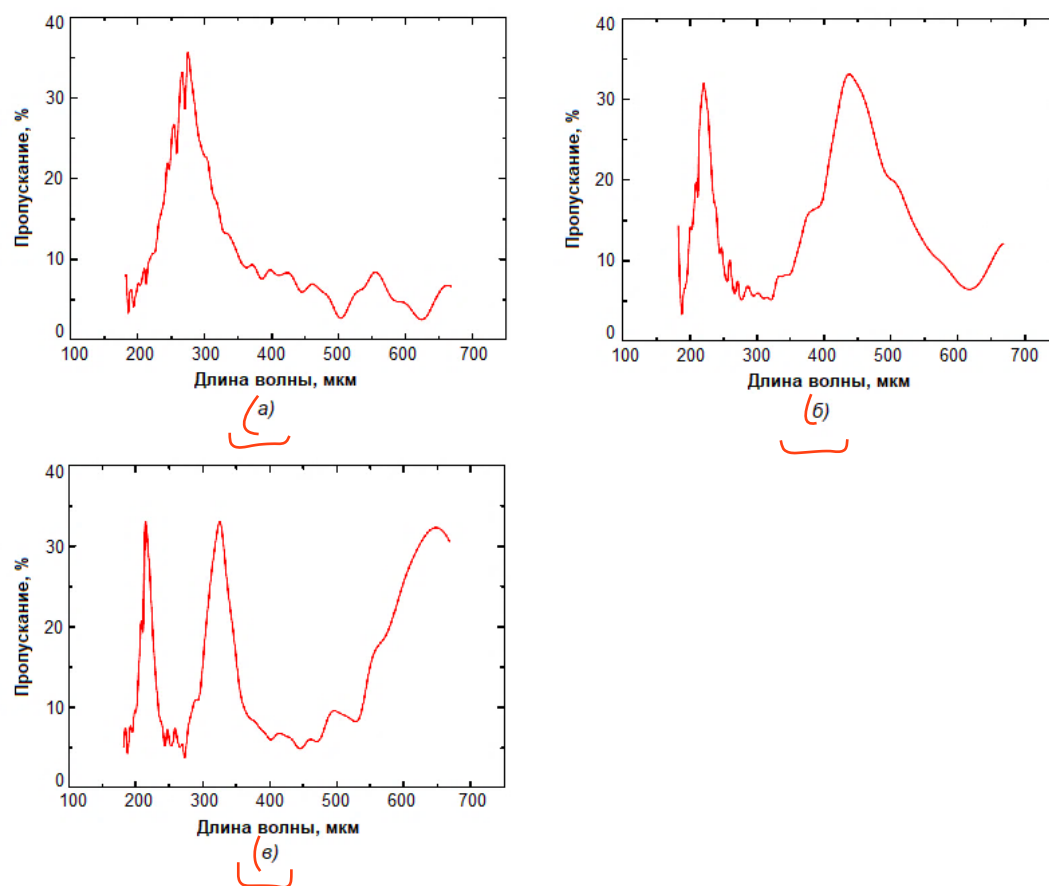
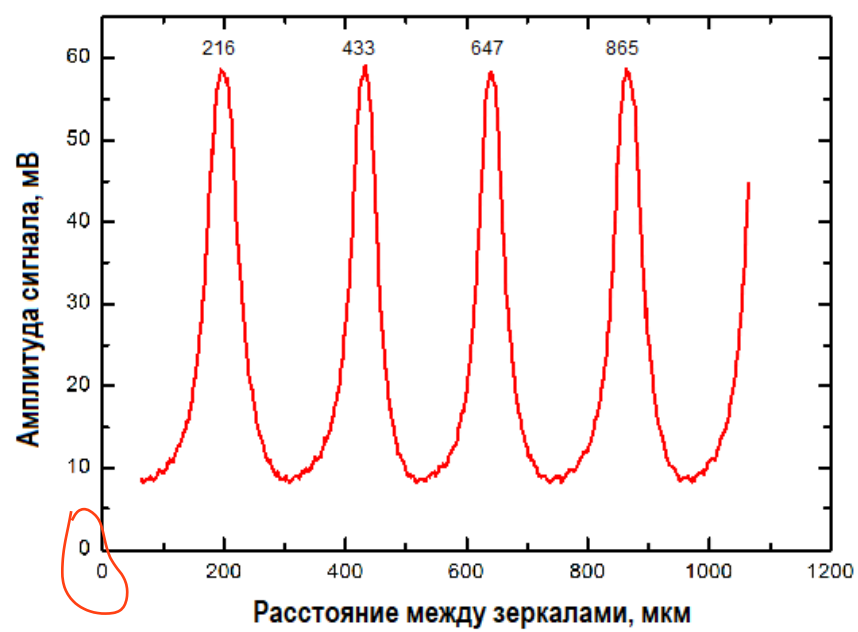


Рис. 5.



общий нуль

Рис. 6.

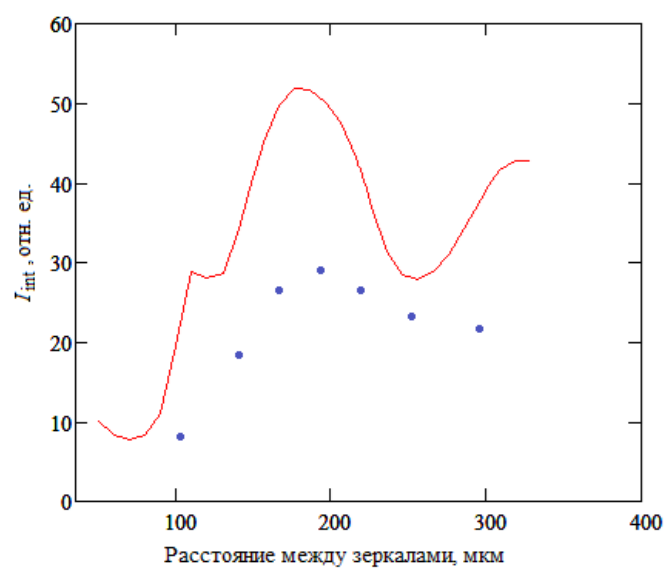


Рис. 7