

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Томский государственный университет систем управления
и радиоэлектроники

Д.В. Окунев, А.Д. Безпалый, А.Е. Мандель

**ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ФУРЬЕ
И МЕТОДЫ ПРОСТРАНСТВЕННО-ЧАСТОТНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ
В ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

Методические указания к лабораторным работам
для студентов технических направлений подготовки и специальностей

Томск
2025

УДК 535.8
ББК 22.343
О-49

Рецензент:

Хатьков Н.Д., доцент кафедры сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники
ТУСУР, канд. техн. наук

Авторы:

Д. В. Окунев, А. Д. Безпальный, А. Е. Мандель

Окунев Дмитрий Вадимович

О-49 Преобразование Фурье и методы пространственно-частотной фильтрации в оптических системах: методические указания / Д. В. Окунев, А. Д. Безпальный, А. Е. Мандель. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2025. – 31 с.

Методические указания содержат теоретический материал, описывающий прямое и обратное преобразование Фурье и методы пространственно-частотной фильтрации в оптических системах. Описаны экспериментальные установки и методика проведения экспериментальных исследований преобразования оптических изображений.

Методические указания предназначены для студентов технических направлений подготовки и специальностей

Одобрено на заседании каф. СВЧиКР протокол № 6 от 14.02.2025 г.

УДК 535.8
ББК 22.343

© Окунев Д. В., Безпальный А. Д., Мандель А. Е., 2025
© Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ	5
1.1 Элементы теории оптической обработки информации	5
1.2 Преобразование Фурье в оптической системе	5
1.3 Обратное преобразование Фурье оптического сигнала	9
1.4 Пространственная фильтрация в оптической системе	10
2 ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ.....	11
2.1 Элементы теории оптической обработки информации	11
2.2 Подготовка экспериментальной установки к работе.....	11
3 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ФУРЬЕ В ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ.....	14
3.1 Цель работы	14
3.2 Задание к лабораторной работе	14
3.3 Порядок выполнения работы	15
3.4 Содержание отчета.....	17
3.5 Контрольные вопросы.....	17
4 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2. ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ В ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ: СЕЛЕКТИВНОЕ ВЫДЕЛЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ КОМПОНЕНТ	18
4.1 Цель работы	18
4.2 Задание к лабораторной работе	18
4.3 Порядок выполнения работы	19
4.4 Содержание отчета.....	21
4.5 Контрольные вопросы.....	21
5 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3. ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ В ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ: СЕЛЕКТИВНОЕ ПОДАВЛЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ КОМПОНЕНТ	22
5.1 Цель работы	22
5.2 Задание к лабораторной работе	22
5.3 Порядок выполнения работы	23
5.4 Содержание отчета.....	25
5.5 Контрольные вопросы.....	25
Список литературы	26
ПРИЛОЖЕНИЕ А (Обязательное) Транспарант EDU-TGB1	27
ПРИЛОЖЕНИЕ Б (Обязательное) Транспарант EDU-TGB1	31

Введение

Согласно теории, предложенной в конце XIX века немецким физиком Эрнстом Аббе и основанной на волновой природе света, процесс формирования оптического изображения объекта с помощью линзы может быть разделен на два последовательных этапа: **Фурье-анализ** исходного светового поля объекта и **Фурье-синтез** результирующего изображения.

На этапе **Фурье-анализа** происходит разложение исходного светового поля на пространственные гармоники, что осуществляется в процессе распространения световой волны от линзы до её задней фокальной плоскости. Этот процесс математически описывается как прямое пространственное преобразование Фурье от распределения амплитуды и фазы световой волны, падающей на линзу. Результатом данного этапа является формирование пространственного спектра светового поля, который представляет собой набор пространственных частот, соответствующих различным гармоническим компонентам исходного поля.

На этапе **Фурье-синтеза** происходит восстановление изображения объекта в результате распространения света от задней фокальной плоскости линзы до плоскости изображения. Математически этот процесс описывается как обратное преобразование Фурье от пространственного спектра, полученного на предыдущем этапе. В результате в плоскости изображения формируется распределение интенсивности света, которое воспроизводит структуру исходного объекта. Это распределение и представляет собой оптическое изображение объекта.

Таким образом, формирование изображения в оптических системах является результатом последовательного преобразования светового поля, включающего анализ его пространственных частот и последующий синтез изображения на основе этих частот. Данный подход лежит в основе современных методов обработки оптических сигналов и проектирования оптических систем.

Целью лабораторных работ является изучение методов преобразования Фурье и пространственной фильтрации спектра в оптических системах.

1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

1.1 Элементы теории оптической обработки информации

Основу методов и устройств обработки информации составляют явления интерференции и дифракции, в которых наиболее явно проявляются волновые свойства света [1, 2]. Основная идея методов оптической обработки информации заключается в переносе информации, подлежащей обработке, на оптический транспарант, в виде функции его пропускания от пространственных координат или пространственной зависимости его показателя преломления. Затем данный транспарант зондируется некогерентным или когерентным пучком света. Анализ светового поля, полученного в результате освещения транспаранта и преобразованного оптической системой, дает информацию о параметрах исходного сигнала.

К основным достоинствам оптических методов обработки информации можно отнести следующее.

1) Большую информационную емкость.

Действительно, световое поле представляет собой функцию, как минимум, двух пространственных координат. А электрический сигнал зависит лишь от одной переменной – времени. Поэтому объем информации при передаче оптического сигнала в виде изображения за некоторое время Δt значительно больше ее объема, передаваемого за то же время с помощью электрического сигнала. Так, телевизионный кадр выводится на экран электронно-лучевой трубки за 40 мс. В оптической системе за это же время можно передать огромное число подобных кадров, если изображение быстро меняется.

2) Многоканальность (параллельность передачи и обработки информации).

Световое поле зависит от двух пространственных координат, поэтому одна из них может рассматриваться как независимая переменная, а другая – как параметр, определяющий номер канала. В этом случае обработка информации может вестись параллельно по многим каналам.

3) Высокое быстродействие.

Потенциальное быстродействие оптических систем определяется скоростью света. Так, операция двумерного преобразования Фурье осуществляется сферической линзой за время распространения света от оптического транспаранта до задней фокальной плоскости линзы. При фокусном расстоянии линзы $F = 30$ см оценка этого времени дает $\tau \approx 10^{-9}$ с. Правда, это лишь потенциальное быстродействие. Реально его величина ограничивается скоростью ввода информации в систему и скоростью ее вывода. Во многих случаях быстродействие оптических систем определяется быстродействием электронного «обрамления» системы.

1.2 Преобразование Фурье в оптической системе

Рассмотрим простейшую оптическую систему, состоящую из одиночной тонкой сферической линзы (рисунок 1.1). Считаем, что эта система не имеет аберраций, и в ней нет эффектов поглощения, рассеяния и отражения света.

В передней фокальной плоскости P_1 (при $z = 0$) линзы с фокусным расстоянием F расположен носитель обрабатываемой информации – транспарант. Все транспаранты можно условно разделить на амплитудные и фазовые [1, 2]. Примером амплитудного транспаранта с пространственной модуляцией функции пропускания является

фото пленка или фото пластинка. Типичный пример фазового транспаранта – пространственный электрооптический модулятор света или акустооптический модулятор. В общем случае функция пропускания транспаранта может быть и комплексной:

$$T(x_1, y_1) = S(x_1, y_1) \cdot \exp[i\varphi(x_1, y_1)]. \quad (1.1)$$

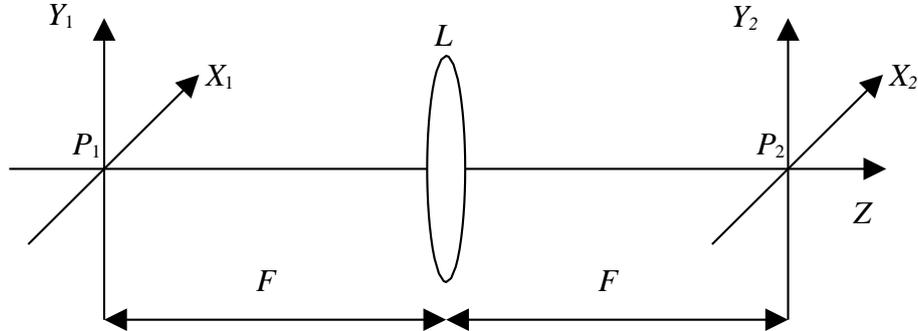


Рисунок 1.1 – Простейшая оптическая схема

Плоскость P_2 ($z = 2F$) является выходной плоскостью системы. Это задняя фокальная плоскость линзы.

Пусть в направлении z слева от транспаранта в системе распространяется плоская когерентная монохроматическая световая волна с частотой ω и волновым числом k :

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \cdot \exp[\omega t - kz]. \quad (1.2)$$

Тогда на выходе транспаранта поле этой волны принимает вид:

$$\vec{E}_1(x_1, y_1, t) = \vec{E} \cdot T(x_1, y_1) = \vec{E}_0 \cdot S(x_1, y_1) \cdot \exp[i(\omega t - \varphi(x_1, y_1))]. \quad (1.3)$$

Видим, что соотношение (1.3) описывает операцию умножения постоянной величины \vec{E}_0 на функцию $T_1(x_1, y_1)$. Если непосредственно за первым транспарантом поместить второй с функцией пропускания $Q(x_1, y_1)$, то после него получим световое поле вида:

$$\vec{E}_1(x_1, y_1) = \vec{E} \cdot T(x_1, y_1) \cdot Q(x_1, y_1). \quad (1.4)$$

Этот пример показывает, как легко реализуется в оптической системе операция перемножения двух или произвольного числа двумерных функций, представленных функциями пропускания транспарантов.

Найдем распределение комплексной амплитуды поля на выходе оптической системы. Для этого воспользуемся принципом Гюйгенса-Френеля, согласно которому каждая точка волнового фронта светового поля является источником вторичной сферической волны. Найдем сумму вкладов всех подобных источников вторичных волн в плоскости P_1 в напряженность светового поля в точке с координатами x_2, y_2 плоскости P_2 . Для небольших углов между направлением лучей и оптической осью системы получим:

$$E(x_2, y_2) = A \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp(ikr_{12})}{r_{12}} E_1(x_1, y_1) dx_1 dy_1, \quad (1.5)$$

где A – коэффициент пропорциональности, а r_{12} – расстояние между точкой (x_2, y_2) и текущими точками плоскости P_1 :

$$r_{12} = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + z^2}. \quad (1.6)$$

Если $r_{12} \gg x_2 - x_1, y_2 - y_1$, то величину r_{12} в знаменателе (1.5) можно вынести из-под знака интеграла. В этом случае:

$$E(x_2, y_2) = \frac{A}{r_{12}} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \exp(ikr_{12}) \cdot E_1(x_1, y_1) dx_1 dy_1. \quad (1.7)$$

Выразим r_{12} через x_1, x_2, y_1, y_2 . Для простоты рассмотрим одномерный случай (рисунок 1.2).

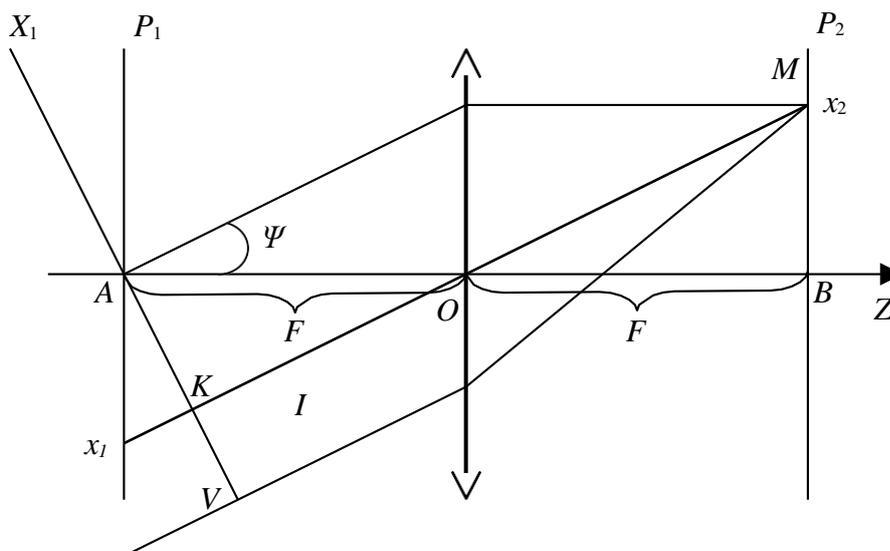


Рисунок 1.2 – Схема, поясняющая преобразование Фурье, выполняемое линзой

Поскольку плоскость P_2 находится в задней фокальной плоскости линзы L , то в рассматриваемую точку $M(x_2)$ будут собираться только параллельные лучи, распространяющиеся в области I в некотором направлении Ψ . Построим плоскость V , проходящую через начало координат системы и перпендикулярную направлению Ψ . Из курса оптики известно, что оптическая длина пути между точкой M с координатой x_2 и любой точкой на плоскости V является постоянной величиной. Обозначим эту величину как ρ . Найдем ее как сумму двух отрезков KO и OM :

$$\rho = KO + OM = \sqrt{F^2 - x_1^2 \cos^2 \Psi} + \sqrt{F^2 + x_2^2}. \quad (1.8)$$

Если $x_1, x_2 \ll F$, то:

$$\rho = F \left(1 - \frac{1}{2} \frac{x_1^2 \cos^2 \Psi}{F^2} + \dots \right) + F \left(1 + \frac{1}{2} \frac{x_2^2}{F^2} + \dots \right). \quad (1.9)$$

Поскольку треугольники Ax_1O и OBM равны, то $x_1 = x_2$, а если еще $\Psi \ll 1$, то $\rho \approx 2F$ и величина ρ не зависит ни от x_1 , ни от x_2 . Расстояние r_{12} отличается от ρ на

величину отрезка x_1K , которая зависит от положения точки x_1 на плоскости P_1 :

$$x_1K = -x_1 \cdot \sin(\Psi). \quad (1.10)$$

Здесь знак минус (-) учитывает направление оси X_1 . Учитывая, что $\sin \Psi = x_2/F$, получим:

$$r_{12} = \rho + x_1K = 2F - \frac{x_1x_2}{F}. \quad (1.11)$$

Тогда:

$$E_2 = \frac{A}{r_{12}} \exp(ik \cdot 2F) \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-ik \frac{x_1x_2}{F}\right) \cdot E_1(x_1) dx_1. \quad (1.12)$$

Введем обозначения:

$$B = \frac{A}{r_{12}} \exp\left(i \frac{4\pi}{\lambda} F\right); \quad \omega_{x_2} = \frac{2\pi}{\lambda F} x_2. \quad (1.13)$$

Тогда для E_2 получим:

$$E_2(x_2) = B \int_{-\infty}^{\infty} E_1(x_1) \exp(-i\omega_{x_2}x_1) dx_1. \quad (1.14)$$

Теперь воспользуемся выражениями для прямого и обратного преобразования Фурье для радиосигнала $f(t)$ и его спектра $F(\omega)$:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \exp(-i\omega t) dt, \quad (1.15)$$

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) \exp(i\omega t) d\omega. \quad (1.16)$$

Сравнивая выражения для $E_2(x_2)$, полученные выше, и для $F(\omega)$, легко видеть, что они полностью аналогичны по форме. Таким образом, $E_2(x_2)$ является прямым преобразованием Фурье от распределения $E_1(x_1)$. При этом роль времени играет координата x_1 , а роль временной частоты ω – величина ω_{x_2} , которую называют пространственной частотой, поскольку она является функцией координаты плоскости наблюдения x_2 .

Как отмечено, переход к одномерному случаю имел целью лишь упрощение рассмотрения. Можно просто записать аналогичное выражение и для двумерного случая:

$$E_2(x_2, y_2) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \exp[-i(\omega_{x_2}x_1 + \omega_{y_2}y_1)] E_1(x_1, y_1) dx_1 dy_1. \quad (1.17)$$

Рассмотрим физический смысл последнего выражения. При падении плоской

однородной световой волны на транспарант происходит ее дифракция на транспаранте. Дифрагированное поле представляет собой суперпозицию плоских световых волн, распространяющихся в пространстве во всех возможных направлениях. Амплитуда каждой из этих волн определяется видом функции $E_1(x_1, y_1)$. Таким образом, уже на этапе дифракции светового поля на транспаранте возникают элементы преобразования Фурье. Роль временных частот здесь играют углы или направления распространения плоских волн. Поэтому говорят, что на данном этапе происходит разложение светового поля в угловой спектр плоских волн. Поскольку фокусирующая линза собирает все лучи, распространяющиеся в одном направлении $(x_2/F, y_2/F)$ в одну точку (x_2, y_2) в ее задней фокальной плоскости, то она ставит в соответствие каждой плоской волне точку на плоскости P_2 . Теперь роль частоты спектра Фурье будет играть не направление распространения плоской волны, а координаты в фокальной плоскости P_2 . Комплексная амплитуда поля в этой точке соответствует величине спектральной составляющей Фурье.

Таким образом, в когерентной оптической системе распределения напряженности светового поля в фокальных плоскостях линзы связаны двумерным преобразованием Фурье. Функция $E_2(x_2, y_2) = S(\omega_{x_2}, \omega_{y_2})$ – это пространственный спектр сигнала $E_1(x_1, y_1)$. В связи с этим плоскость P_1 называют сигнальной плоскостью или плоскостью изображения, а плоскость P_2 – спектральной плоскостью.

1.3 Обратное преобразование Фурье оптического сигнала

В когерентной оптической системе достаточно просто может быть выполнена и операция обратного преобразования Фурье. Такая возможность очевидна световые поля в передней и задней плоскостях сферической линзы связаны преобразованием Фурье [3, 4]. Т.е. если в плоскости изображения само изображение является пространственным спектром некоторого светового поля, то в спектральной плоскости мы должны получить копию этого светового поля. Этот факт имеет строгое математическое подтверждение [1, 2]. На (рисунке 1.3) представлена схема установки, которая позволяет выполнить двукратное двумерное преобразование Фурье, т. е. сначала получить пространственный спектр некоторого светового поля, затем по спектру восстановить само поле.

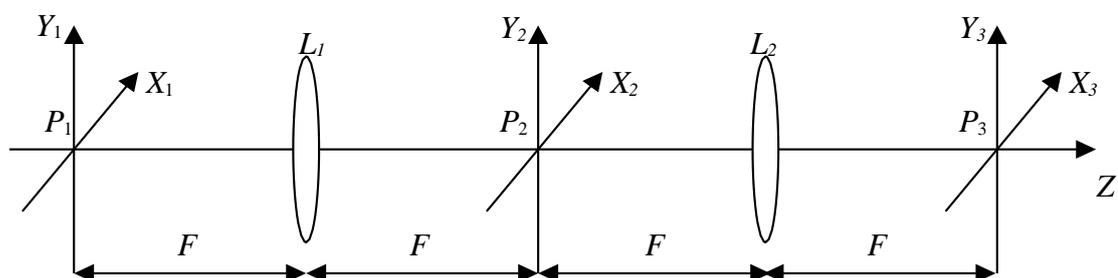


Рисунок 1.3 – Схема оптической системы, выполняющей двукратное преобразование Фурье

Следует отметить, что такая система формирует перевернутое изображение, поэтому при равенстве фокусных расстояний обеих линз световое поле в некоторой

точке плоскости P_3 отвечает соотношению:

$$E_3(x_3) = E_1(-x_3). \quad (1.18)$$

1.4 Пространственная фильтрация в оптической системе

Операция фильтрации требуемых спектральных составляющих в оптической системе может быть выполнена достаточно просто. Для этого в спектральной плоскости достаточно поместить некоторый транспарант – пространственный фильтр. Если функция пропускания транспаранта отвечает соотношению $H(\omega_{x2}, \omega_{y2})$, то распределение поля в этой плоскости после транспаранта будет иметь вид:

$$E_2^\Phi(x_2, y_2) = S(\omega_{x2}, \omega_{y2}) \cdot H(\omega_{x2}, \omega_{y2}). \quad (1.19)$$

Примером простейшего пространственного фильтра является фильтр с прямоугольной амплитудной характеристикой и постоянной фазовой характеристикой. Он представляет собой непрозрачный экран с окнами нужной формы и размеров [1, 2].

Наиболее часто пространственные фильтры в оптических системах используются с целью:

- подавления постоянной составляющей;
- выделения нужных пространственных частот;
- подавление некоторых заданных пространственных частот.

2 ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

2.1 Элементы теории оптической обработки информации

В лабораторных работах используется экспериментальная установка, схема которой представлена на рисунке 2.1.

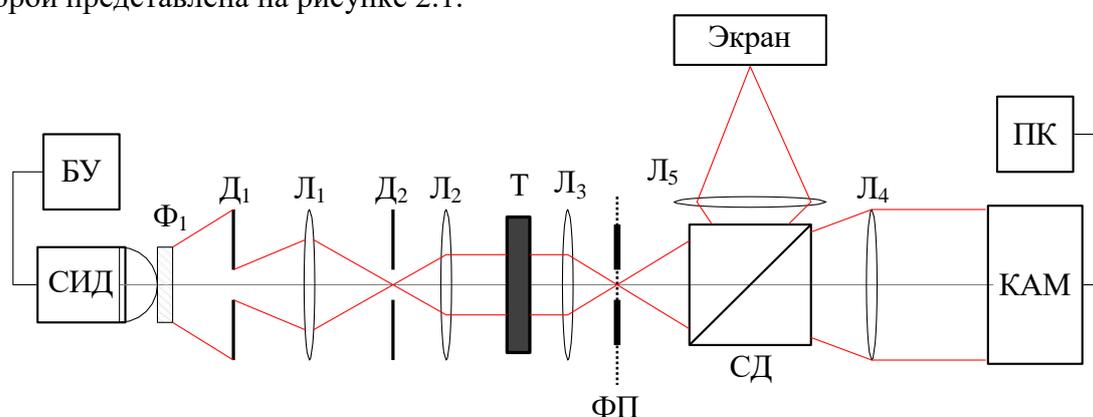


Рисунок 2.1 – Структурная схема установки по пространственной фильтрации изображения:
БУ – блок управления; СИД – светоизлучающий диод; Φ_1 – фильтры; D_n – диафрагмы; L_n – линзы;
Т – транспарант; ФП – Фурье-плоскость; СД – светоделитель; КАМ – камера;
ПК – персональный компьютер

В качестве источника излучения используется белый светоизлучающий диод (СИД) вместе с фильтром Φ_1 . Фильтр Φ_1 выделяет зеленую область спектра светоизлучающего диода (СИД). После фильтрации центральная длина волны излучения $\lambda = 500$ нм, а ширина спектра излучения $\Delta\lambda \approx 40$ нм. Диафрагмы D_1 и D_2 и линзы L_1 и L_2 формируют ограниченный световой пучок и проецируют его на транспарант Т. Мощность светодиода регулируется блоком управления (БУ). В качестве транспаранта Т используется один из элементов пластины EDU-TGB1. Расположение отдельных элементов на пластине представлено в приложении А.

Светоделитель (СД) позволяет разделить световой пучок, так что линзы L_3 и L_4 формируют на камере изображение транспаранта Т, а линза L_5 проецирует изображение Фурье-плоскости (ФП) на экран.

Фильтр Φ_2 в Фурье-плоскости не пропускает часть пространственного спектра. В качестве фильтра может использоваться регулируемая поворотная щель, ирисовая диафрагма или пластина EDU-TGC1 (приложение Б).

2.2 Подготовка экспериментальной установки к работе

Экспериментальная установка содержит множество оптических элементов. Для предотвращения повреждений и загрязнений оптических и механических элементов необходимо соблюдать аккуратность при работе с оборудованием.

Перед проведением работы необходимо выполнить следующие действия.

1. Осмотреть БУ, убедиться, что переключатель режимов находится в положении SW. Обозначение «SW» означает, что питание на СИД подается в непрерывном режиме.

Примечание: Часть излучения СИД находится в ультрафиолетовом диапазоне (длина волны до 400 нм), который может быть опасен для глаз и кожи. В целях

безопасности запрещено снимать фильтр Φ_1 во время работы. Кроме того, СИД нагревается в процессе эксплуатации, поэтому запрещено прикасаться к радиатору или размещать на нём посторонние предметы.

Лабораторную работу необходимо выполнять в защитных очках!

2. Включить СИД плавным поворотом регулятора мощности на БУ (рисунок 2.2).



Рисунок 2.2 – Блок управления светоизлучающим диодом:
1 – переключатель режимов работы; 2 – регулятор мощности

3. Снять защитный колпачок (рисунок 2.3) с фильтра Φ_1 ;



Рисунок 2.3 – Защитный колпачок

4. Проверить подключение камеры к USB-порту ПК.

5. Включить ПК. Для получения доступа ввести логин и пароль, предоставленные преподавателем.

6. Открыть приложение ThorCam и в стартовом окне приложения выбрать подключенную камеру (рисунок 2.4).

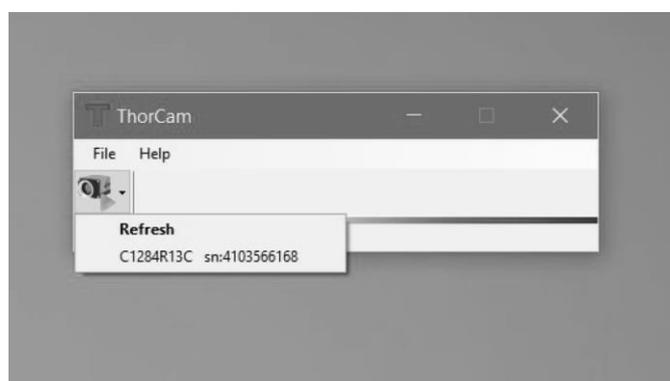


Рисунок 2.4 – Выбор подключенной камеры в программе ThorCam

7. Снять защитный колпачок с камеры.
8. Вывести изображение камеры, нажав на кнопку «Start Capture».
9. Выбрать папку для сохранения изображений (рисунок 2.5), и сохранить изображение в необходимом формате.

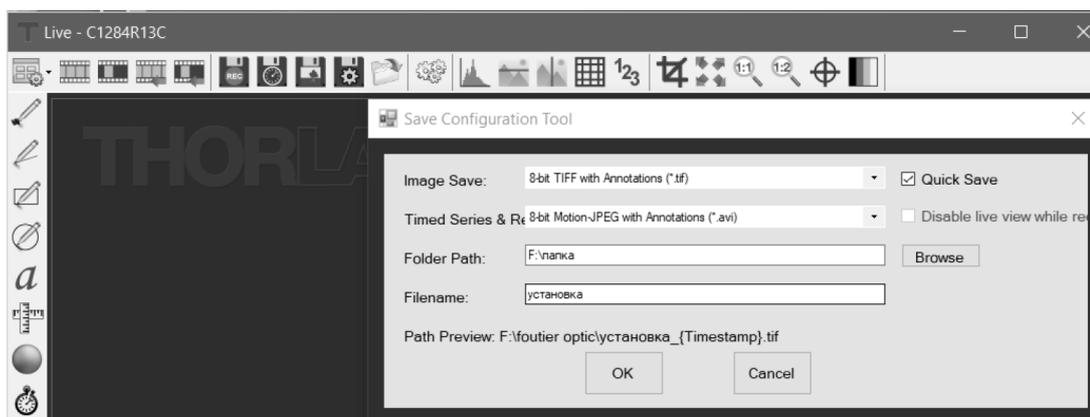


Рисунок 2.5 – Выбор места сохранения изображений в программе ThorCam

В процессе работы могут понадобиться дополнительные инструменты и крепежные элементы, например, такие как зажимная вилка (рисунок 2.6а) и шестигранный ключ на 6 мм (рисунок 2.6б).



Рисунок 2.6 – Дополнительные инструменты и крепежные элементы:
а – зажимная вилка; б – шестигранная ключ

При возникновении затруднений необходимо обратиться к преподавателю. После выполнения всех пунктов получить разрешение на выполнение лабораторной работы.

3 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ФУРЬЕ В ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

3.1 Цель работы

Изучение методов преобразования Фурье и способов фильтрации изображений в оптических системах. Экспериментальное исследование влияния ширины и положения фильтра в Фурье-плоскости оптической системы на качество восстановления изображения.

3.2 Задание к лабораторной работе

Перед выполнением работы необходимо:

- изучить теоретический материал (раздел 1);
- ознакомиться со схемой экспериментальной установки (рисунок 2.1);
- подготовить установку к работе в соответствии с описанием в подразделе 2.2;
- ознакомиться с порядком выполнения работы;
- получить вариант и допуск у преподавателя.

Номера вариантов и обозначения транспарантов указаны в таблице 3.1. Подробное описание каждого обозначения приведено в приложении А.

Таблица 3.1 – Варианты заданий

№ варианта	1	2	3
Обозначение транспаранта	F2, F12	F3, F12	F4, F12
Ширина фильтра, мкм	90, 200	100, 180	70, 190

Общий вид установки с регулируемой щелью представлен на рисунке 3.1.

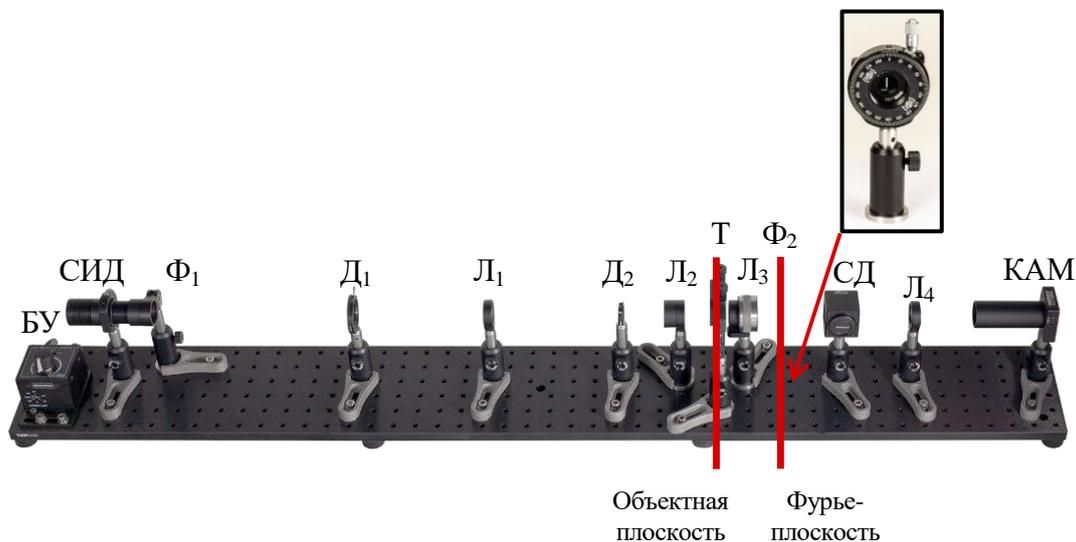


Рисунок 3.1 – Общий вид экспериментальной установки с регулируемой щелью:
 БУ – блок управления; СИД – светоизлучающий диод; Φ_n – фильтры; D_n – диафрагмы;
 L_n – линзы; Т – транспарант; ФП – Фурье-плоскость; СД – светоделитель; КАМ – камера

3.3 Порядок выполнения работы

Работа выполняется в следующем порядке:

1. Установить пластину с транспарантом в экспериментальную установку (рисунок 3.1). Регулировочные винты позволяют совместить выбранный транспарант (согласно варианту) со световым полем.

2. Отрегулировать четкость изображения транспаранта, получаемого на камере, с помощью вращения тубуса линзы Л₃. При необходимости отрегулировать мощность излучения с помощью блока управления (БУ) (рисунок 2.2).

3. После настройки изображения закрепить линзу Л₃, с помощью стопорного кольца (рисунок 3.2).

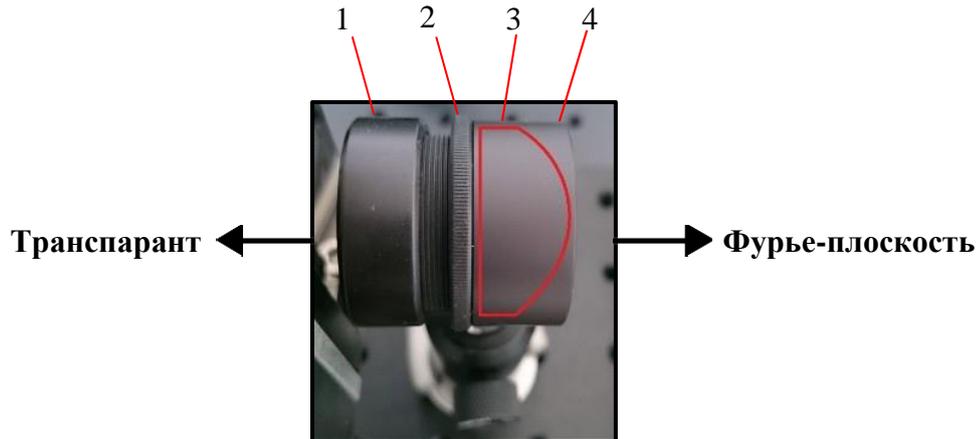


Рисунок 3.2 – Собирающая линза в регулируемом корпусе:

1 – держатель; 2 – стопорное кольцо; 3 – линза; 4 – вращающийся тубус линзы

4. Определить с помощью экрана положение Фурье-плоскости. Для этого необходимо:

- установить экран в задней фокальной плоскости линзы Л₃;
- передвигая экран вдоль оптической оси системы добиться четкого изображения спектра (рисунок 3.3).

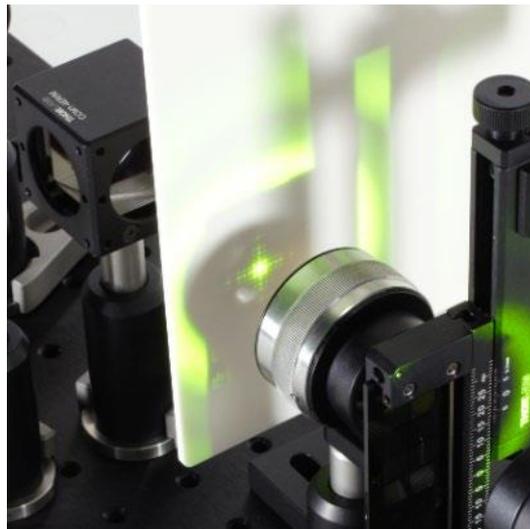


Рисунок 3.3 – Определение Фурье-плоскости линзы Л₃

5. Установить в Фурье-плоскость регулируемую поворотную щель (рисунок 3.1).
6. Настроить регулируемую щель (фильтр), прикрепленную к поворотной платформе (рисунок 3.4), таким образом, чтобы центр фильтра совпадал с оптической осью системы.

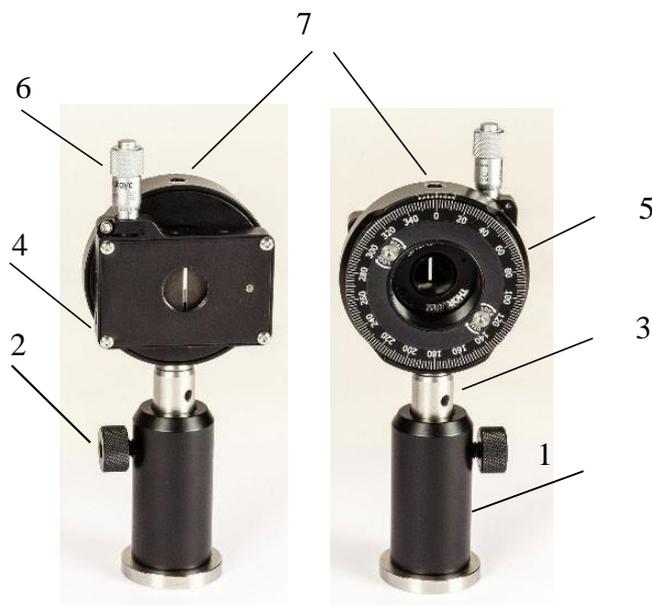


Рисунок 3.4 – Изображение регулируемой щели на поворотной платформе:
 1 – держатель стойки; 2 – фиксирующий винт для стойки; 3 – стойка; 4 – прямоугольная щель; 5 – поворотная платформа; 6 – регулировочный микровинт с делением 10 мкм;
 7 – фиксатор поворотной платформы

Для настройки щели необходимо:

- регулировочным винтом выставить ширину прямоугольной щели на величину ~1 мм;
 - повернуть поворотную платформу на 90° градусов;
 - шестигранным ключом закрыть фиксатор поворотной платформы;
 - ослабить фиксирующий винт с помощью шестигранного ключа (рисунок 2.6б);
 - перемещая стойку вверх/вниз, добиться, чтобы центральный максимум полученного спектра совпадал с серединой щели;
 - затянуть фиксирующий винт с помощью шестигранного ключа;
 - шестигранным ключом открыть фиксатор поворотной платформы;
 - вернуть поворотную платформу в положение 0°;
 - шестигранным ключом зафиксировать поворотную платформу;
 - перемещая держатель стойки, добиться, чтобы центральный максимум спектрального изображения совпадал с серединой щели;
 - закрепить фильтр к столу с помощью зажимной вилки (рисунок 2.6а);
 - сообщить преподавателю о завершении настройки.
7. Изменить ширину регулируемой щели в Фурье-плоскости.
 8. Передвигая экран, после линзы Л5, добиться четкого изображения спектра транспаранта. Интенсивность светового поля можно изменять с помощью диафрагмы Д₂. Зафиксировать полученный спектр.
 9. Закрывать фильтр в ФП с помощью регулировочного винта на ширину, указанную в таблице 3.1. Зафиксировать спектр изображения на экране и сохранить

изображение, используя камеру (КАМ), подключенную к компьютеру (ПК).

10. Повторить предыдущие действия, поворачивая фильтр на 20° , 45° , 70° и 90° .
11. С помощью регулировочного винта увеличить ширину щели и совместить второй транспарант Т со световым полем (согласно варианту). Зафиксируйте изображение с камеры и экрана.
12. Повторить пункты 8-10.

3.4 Содержание отчета

Отчет должен включать в себя следующие пункты:

- Цель работы.
- Элементы теории.
- Описание установки.
- Ход работы.
- Результаты проделанной работы и выводы.

Требования к оформлению отчета приведены в образовательном стандарте вуза ОС ТУСУР 01-2021 [5].

3.5 Контрольные вопросы

1. Что называется оптическим транспарантом?
2. Какие виды оптических транспарантов существуют?
3. В чем заключаются достоинства оптических методов обработки информации?
4. Что называется предметной и фокальной плоскостью?
5. Что называется Фурье-плоскостью?
6. Что называется угловым спектром плоской волны?
7. Какие элементы входят в состав оптической системы и как они взаимодействуют?

4 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2. ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ В ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ: СЕЛЕКТИВНОЕ ВЫДЕЛЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ КОМПОНЕНТ

4.1 Цель работы

Анализ влияния селективного выделения спектральных компонент на восстановление изображений в оптической системе.

4.2 Задание к лабораторной работе

Перед выполнением работы необходимо:

- изучить теоретический материал (раздел 1);
- ознакомиться со схемой экспериментальной установки (рисунок 2.1);
- подготовить установку к работе в соответствии с описанием в подразделе 2.2;
- ознакомиться с порядком выполнения работы;
- получить вариант и допуск у преподавателя.

Номера вариантов и обозначения транспарантов указаны в таблице 4.1. Подробное описание каждого обозначения приведено в приложении А.

Таблица 4.1 – Варианты заданий

№ варианта	1	2	3
Обозначение транспаранта	F9, F7	F12, F11	F10, F5

Общий вид установки с ирисовой диафрагмой представлен на рисунке 4.1.

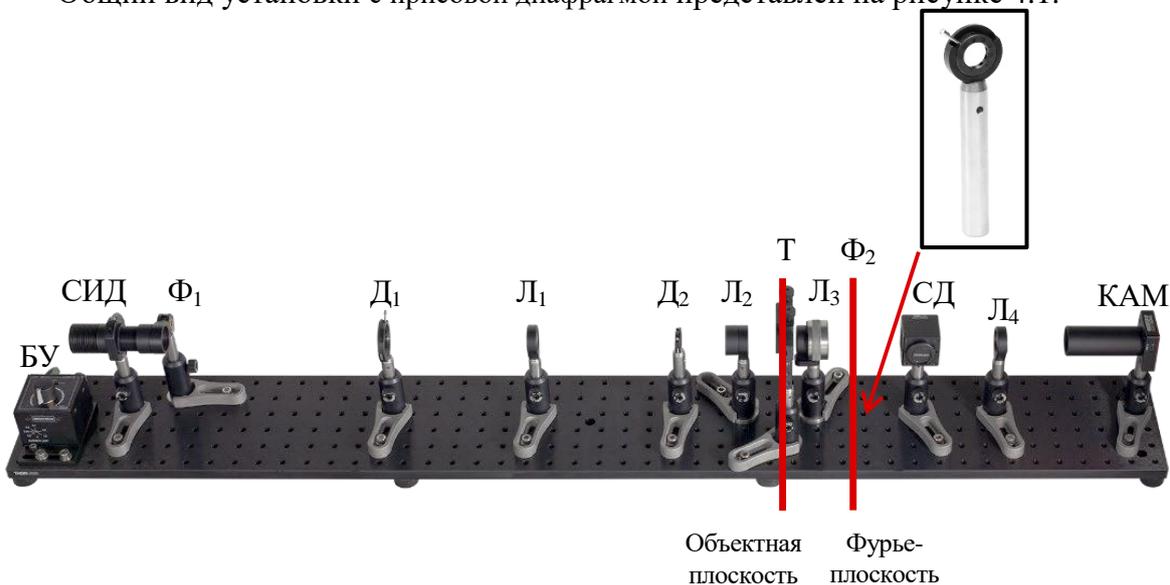


Рисунок 4.1 – Общий вид экспериментальной установки с ирисовой диафрагмой:
 БУ – блок управления; СИД – светоизлучающий диод; Φ_n – фильтры; D_n – диафрагмы;
 L_n – линзы; Т – транспарант; ФП – Фурье плоскость; СД – светоделитель; КАМ – камера

4.3 Порядок выполнения работы

Работа выполняется в следующем порядке:

1. Установить пластину с транспарантом в экспериментальную установку (рисунок 4.1). Регулировочные винты позволяют совместить выбранный транспарант (согласно варианту) со световым полем.

2. Отрегулировать четкость изображения транспаранта, получаемого на камере, с помощью вращения тубуса линзы Л₃. При необходимости отрегулировать мощность излучения с помощью блока управления (БУ) (рисунок 2.2).

3. После настройки изображения закрепить линзу Л₃ с помощью стопорного кольца (рисунок 4.2).

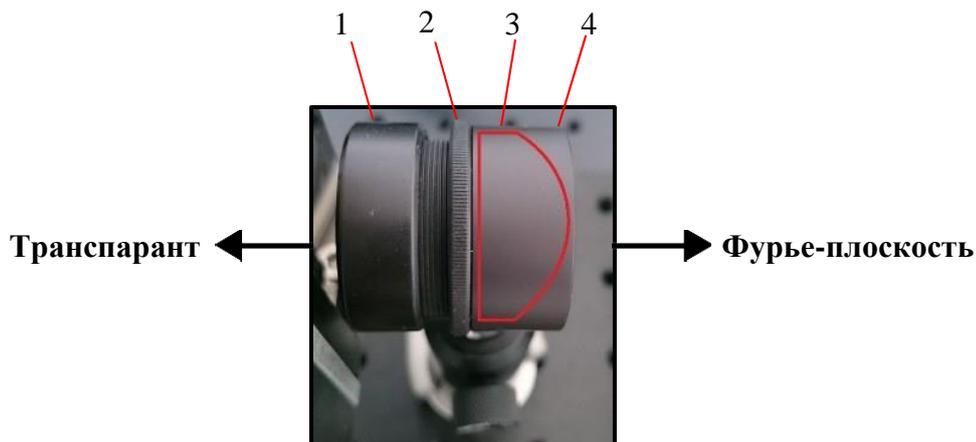


Рисунок 4.2 – Собирающая линза в регулируемом корпусе:

1 – держатель; 2 – стопорное кольцо; 3 – линза; 4 – вращающийся тубус линзы

4. Закрывать диафрагму Д₂ до минимального размера.

5. Определить с помощью экрана положение Фурье-плоскости. Для этого необходимо:

- установить экран в задней фокальной плоскости линзы Л₃;
- передвигая экран вдоль оптической оси системы добиться четкого изображения спектра (рисунок 4.3).

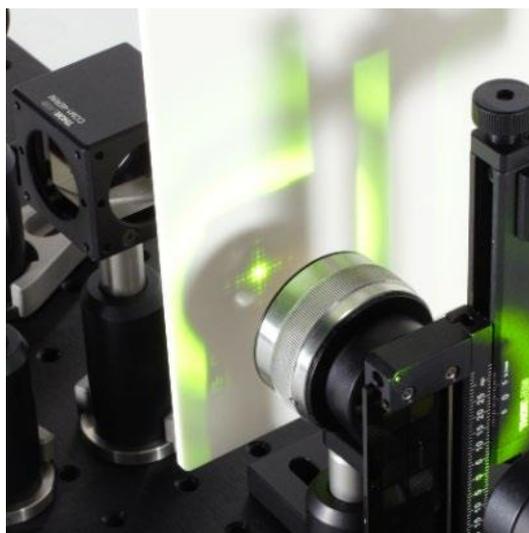


Рисунок 4.3 – Определение Фурье-плоскости линзы Л₃

6. Зафиксировать спектр изображения на экране и сохранить изображение, используя камеру (КАМ), подключенную к компьютеру (ПК).

7. Зарисовать спектр изображения и произвольно выбрать шесть спектральных компонент, исключая центральный максимум, например, как показано на рисунке 4.4.

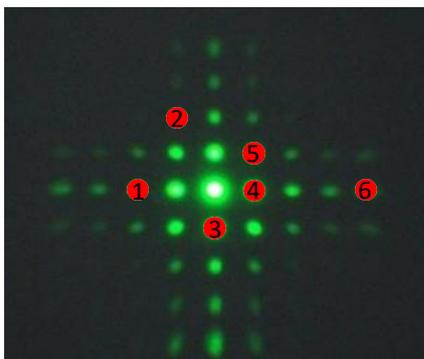


Рисунок 4.4 – Пример выбора спектральных компонент транспаранта F1

8. Установить в Фурье-плоскости линзы L_3 ирисовую диафрагму (рисунок 4.5) так, чтобы центральный максимум оказался в её центре.



Рисунок 4.5 – Фильтрация центрального максимума ирисовой диафрагмой

9. Закрыть диафрагму так, чтобы она пропускала только центральный максимум спектра. Зафиксировать спектр изображения, используя камеру (КАМ), подключенную к компьютеру (ПК).

10. Увеличивая диаметр отверстия диафрагмы, чтобы через фильтр проходил центральный максимум и максимумы первого порядка. Зафиксировать спектр изображения на экране и сохранить изображение, используя камеру (КАМ), подключенную к компьютеру (ПК).

11. Перемещая диафрагму в плоскости спектра поочередно отфильтровать произвольно выбранные в п. 7 спектральные компоненты изображения, изменяя размер диафрагмы. В каждом случае необходимо фиксировать, какая спектральная компонента проходит через ирисовую диафрагму.

12. Повторить эксперимент для второго транспаранта в соответствии с вариантом.

4.4 Содержание отчета

Отчет должен включать в себя следующие пункты:

- Цель работы.
- Элементы теории.
- Описание установки.
- Ход работы.
- Результаты проделанной работы и выводы.

Требования к оформлению отчета приведены в образовательном стандарте вуза ОС ТУСУР 01-2021 [5].

4.5 Контрольные вопросы

1. Что такое пространственные частоты?
2. Как выделение центральной составляющей влияет на изображение в выходной плоскости?
3. Как изменение апертуры фильтра влияет на результат фильтрации?
4. Какие элементы входят в состав оптической системы и как они взаимодействуют?
5. Какие преимущества и недостатки имеет пространственная фильтрация?
6. Какие задачи решает пространственная фильтрация в оптических системах?
7. Какие практические применения имеет селективная фильтрация спектральных компонент в оптических системах?

5 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3. ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ В ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ: СЕЛЕКТИВНОЕ ПОДАВЛЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ КОМПОНЕНТ

5.1 Цель работы

Анализ влияния селективного подавления спектральных компонент на восстановление изображений в оптической системе.

5.2 Задание к лабораторной работе

Перед выполнением работы необходимо:

- изучить теоретический материал (раздел 1);
- ознакомиться со схемой экспериментальной установки (рисунок 2.1);
- подготовить установку к работе в соответствии с описанием в подразделе 2.2;
- ознакомиться с порядком выполнения работы;
- получить вариант и допуск у преподавателя.

Номера вариантов и обозначения транспарантов указаны в таблице 5.1. Подробное описание каждого обозначения приведено в приложении А.

Таблица 5.1 – Варианты заданий

№ варианта	1	2	3
Обозначение транспаранта	F9, F7	F12, F11	F10, F5
Размер подавляющего фильтра (точки), мм	0,32; 0,8	0,48; 1,25	0,64; 1

Общий вид установки с набором подавляющих фильтров представлен на рисунке 5.1.

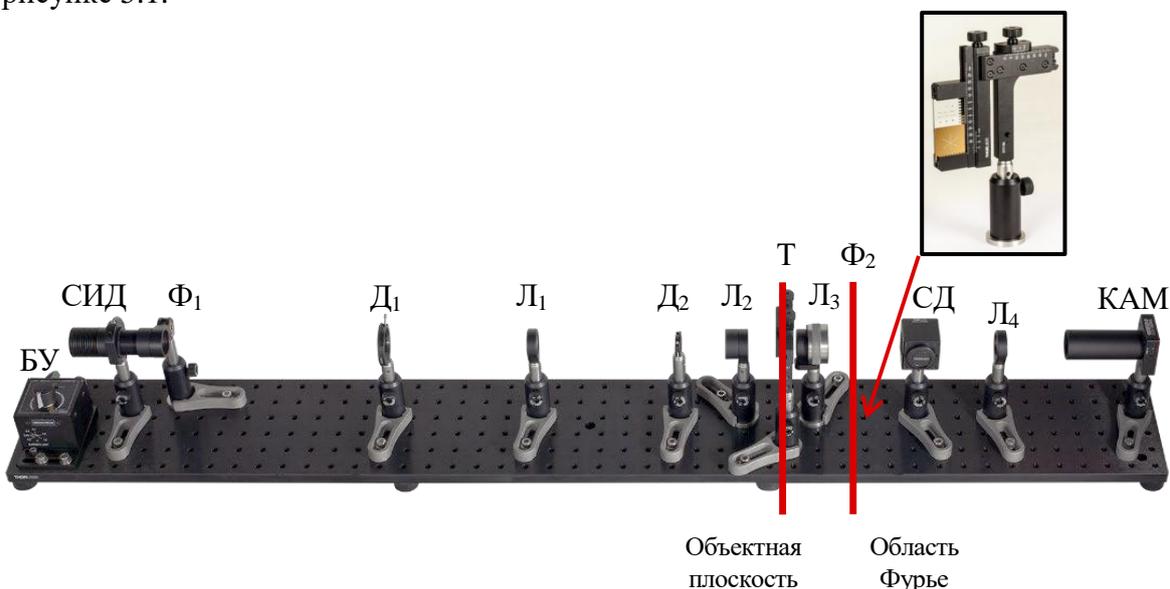


Рисунок 5.1 – Общий вид экспериментальной установки с набором подавляющих фильтров:
 БУ – блок управления; СИД – светоизлучающий диод; Φ_n – фильтры; D_n – диафрагмы;
 L_n – линзы; Т – транспарант; ФП – Фурье плоскость; СД – светоделитель; КАМ – камера

5.3 Порядок выполнения работы

Работа выполняется в следующем порядке:

1. Установить пластину с транспарантом в экспериментальную установку (рисунок 5.1). Регулировочные винты позволяют совместить выбранный транспарант (согласно варианту) со световым полем.

2. Отрегулировать четкость изображения транспаранта, получаемого на камере, с помощью вращения тубуса линзы Л₃. При необходимости отрегулировать мощность излучения с помощью блока управления (БУ) (рисунок 2.2).

3. После настройки изображения закрепить линзу Л₃, с помощью стопорного кольца (рисунок 5.2).

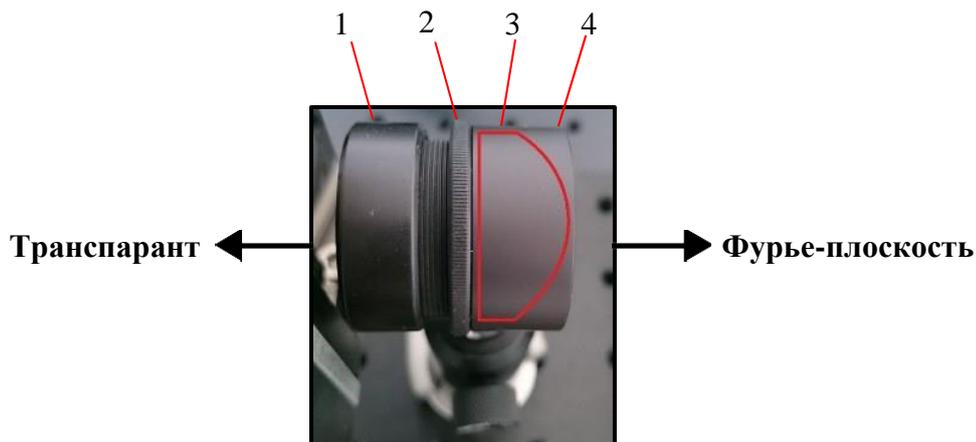


Рисунок 5.2 – Собирающая линза в регулируемом корпусе:

1 – держатель; 2 – стопорное кольцо; 3 – линза; 4 – вращающийся тубус линзы

4. Закрывать диафрагму Д₂ до минимального размера.

5. Определить с помощью экрана положение Фурье-плоскости. Для этого необходимо:

- установить экран в задней фокальной плоскости линзы Л₃;
- передвигая экран вдоль оптической оси системы добиться четкого изображения спектра (рисунок 5.3).

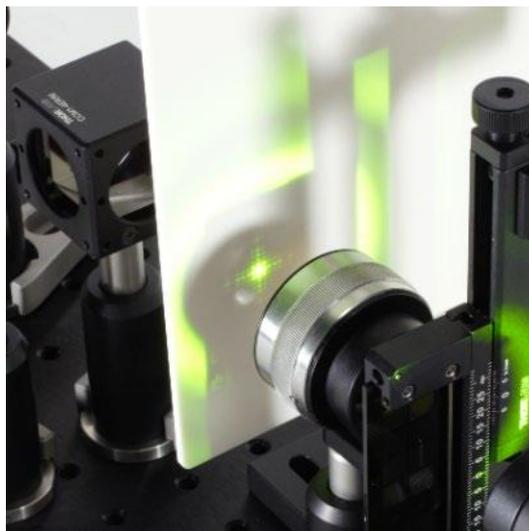


Рисунок 5.3 – Определение Фурье-плоскости линзы Л₃

6. Зафиксировать спектр изображения на экране и сохранить изображение, используя камеру (КАМ), подключенную к компьютеру (ПК).

7. Зарисовать спектр изображения и произвольно выбрать шесть спектральных компонент, исключая центральный максимум, например, как показано на рисунке 5.4.

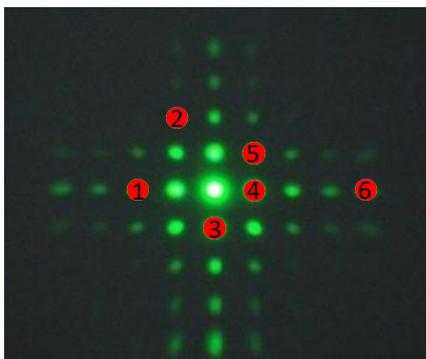


Рисунок 5.4 – Пример выбора спектральных компонент транспаранта F1

8. Установить в Фурье-плоскость маску EDU-TGC1 (приложение Б).

9. Установить подавляющий фильтр так, чтобы он перекрывал только центральный максимум спектра. Зафиксировать спектр изображения, используя камеру (КАМ), подключенную к компьютеру (ПК). Пример с подавлением центрального максимума представлен на рисунке 5.5.

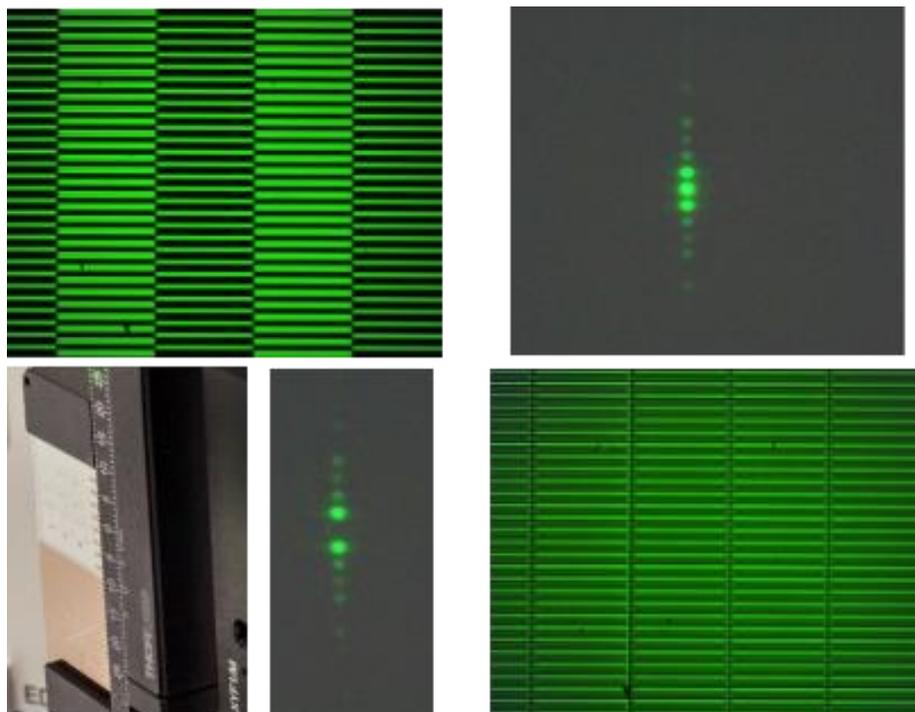


Рисунок 5.5 – Подавление центрального максимума фильтром

10. Перемещая подавляющий фильтр в плоскости спектра поочередно перекрыть произвольно выбранные в п. 7 спектральные компоненты изображения. В каждом случае необходимо фиксировать, какая спектральная компонента подавляется фильтром.

11. Заменить подавляющий фильтр маски EDU-TGC1 на другой (согласно своему варианту) и повторить пункт 9.

12. В соответствии со своим вариантом изменить изображение транспаранта и повторить пункты 6-10.

5.4 Содержание отчета

Отчет должен включать в себя следующие пункты:

- Цель работы.
- Теоретические сведения.
- Описание установки.
- Ход работы.
- Результаты проделанной работы и выводы.

Требования к оформлению отчета приведены в образовательном стандарте вуза ОС ТУСУР 01-2021 [5].

После оформления отчет сдать на проверку преподавателю и приступить к защите работы. Перед защитой необходимо повторно изучить рекомендуемую литературу.

5.5 Контрольные вопросы

1. Что такое пространственные частоты?
2. Как подавление центральной составляющей влияет на изображение в выходной плоскости?
3. Как изменение размера подавляющего фильтра влияет на результат восстановления изображения?
4. Какие элементы входят в состав оптической системы и как они взаимодействуют?
5. Какие преимущества у оптических методов подавления частот по сравнению с электронными?
6. Какие задачи решает пространственная фильтрация в оптических системах?
7. Какие практические применения имеет селективная фильтрация спектральных компонент в оптических системах?

Список литературы

1. Шандаров, В. М. Основы физической и квантовой оптики: учебное пособие [Электронный ресурс] / В. М. Шандаров. – Томск: ТУСУР, 2012. – 197 с. – Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/750> (дата обращения: 10.02.2025)
2. Шандаров, С. М. Введение в оптическую физику: Учебное пособие [Электронный ресурс] / С. М. Шандаров, Н. И. Буримов, А. С. Акрестина. — Томск: ТУСУР, 2023. — 252 с. — Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/11001> (дата обращения: 10.02.2025)
3. Гудмен, Дж. Введение в Фурье оптику / Дж. Гудмен, – М. : МИР, 1970. – 364 с.
4. Оптическая обработка информации. Применения / под ред. Д. Кейсесента ; пер. под ред. С.Б. Гуревича. – М.: Мир, 1980. – 349 с.
5. Образовательный стандарт вуза ОС ТУСУР 01-2021. Работы студенческие по направлениям подготовки и специальностям технического профиля. Общие требования и правила оформления от 25.11.2021 [Электронный ресурс]. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2021. – 52 с. – Режим доступа: <https://regulations.tusur.ru/#/documents/87> (дата обращения: 10.02.2025)

ПРИЛОЖЕНИЕ А
(Обязательное)
Транспарант EDU-TGB1

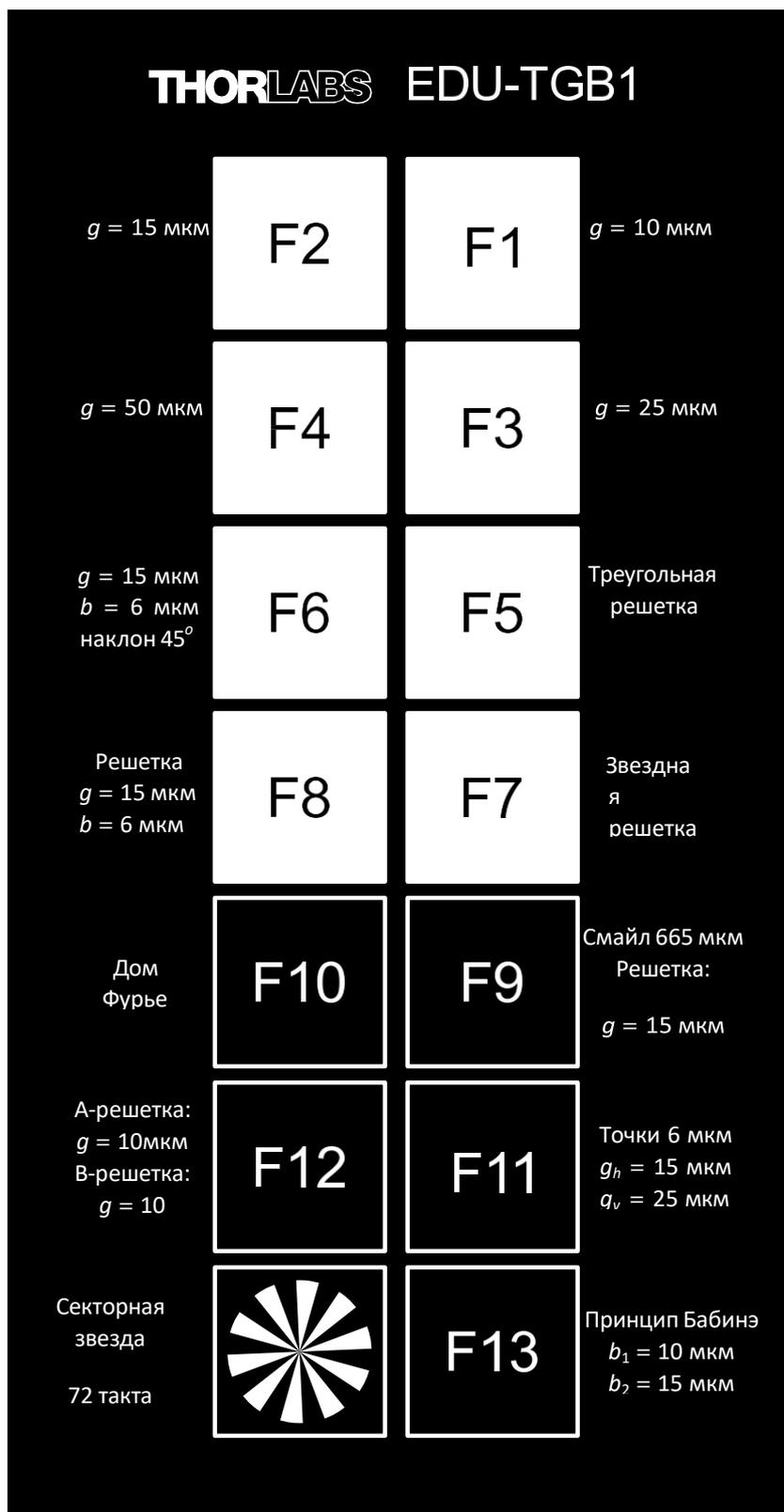


Рисунок А.1 – Транспарант EDU-TGB-1

Условные обозначения: g – период решетки; g_h, g_v – периоды решетки по горизонтали и вертикали; b – ширина щели дифракционной; h – высота треугольников в треугольной решетке.

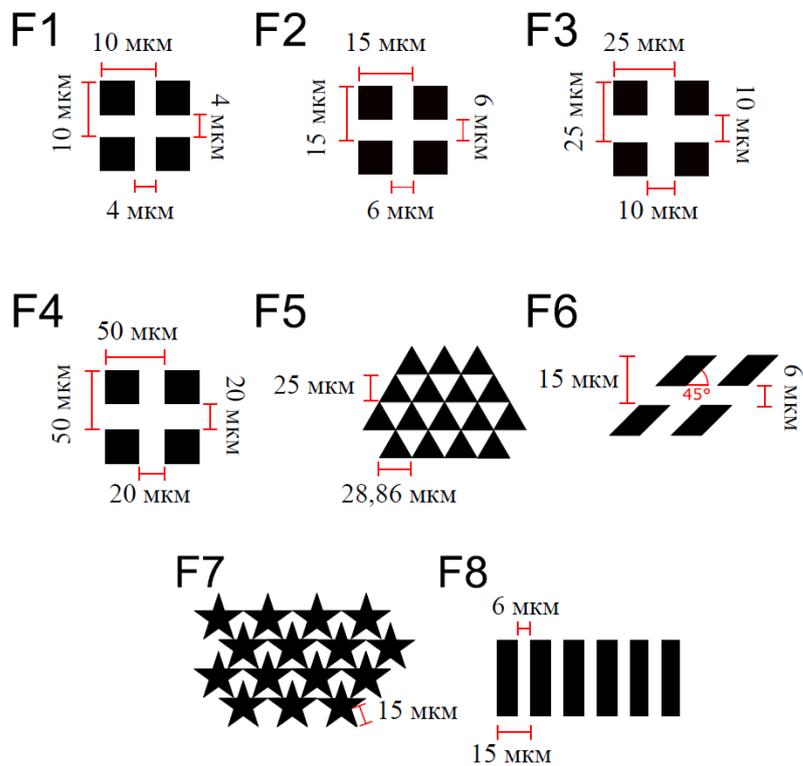


Рисунок А.2 – Подробное изображение транспаранта с F1 по F8

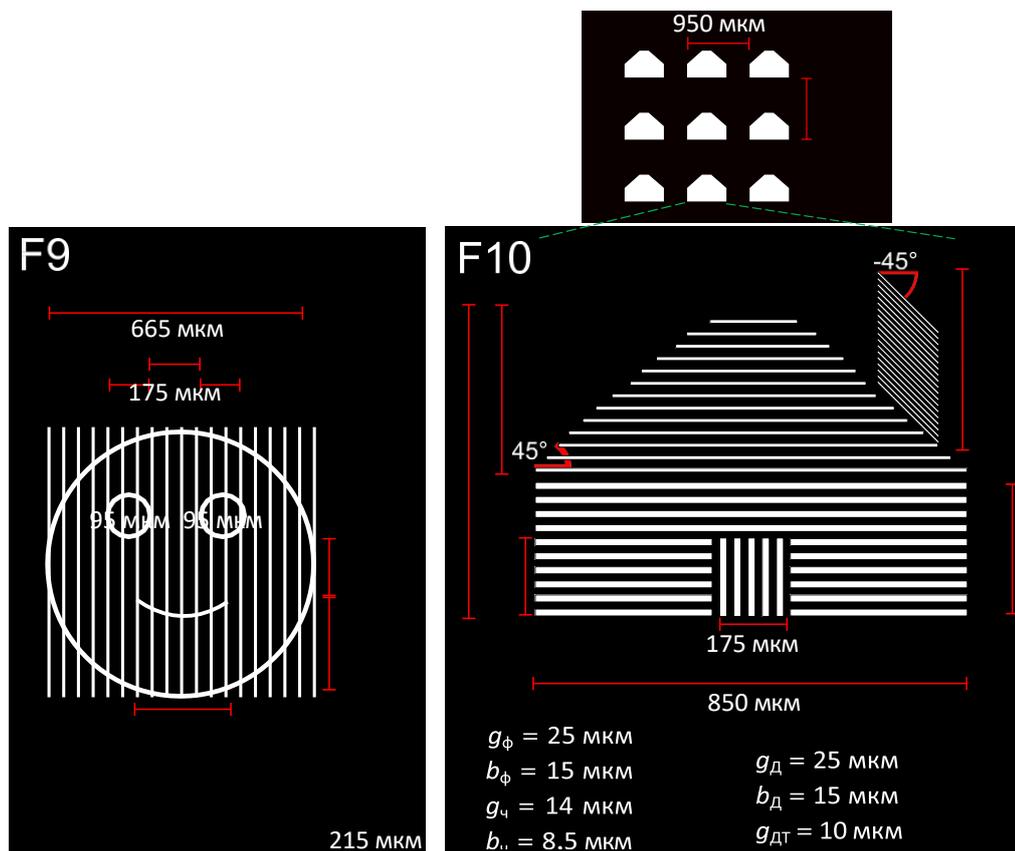


Рисунок А.3 – Подробные изображения F9 и F10

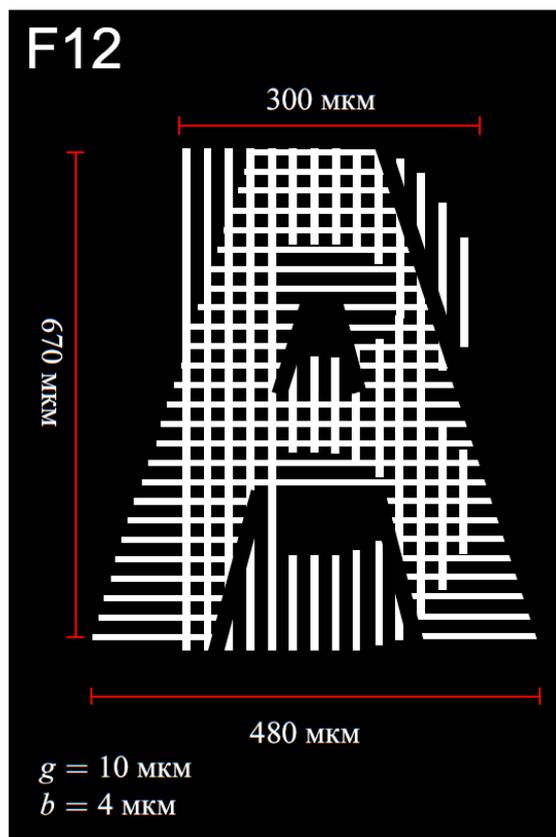
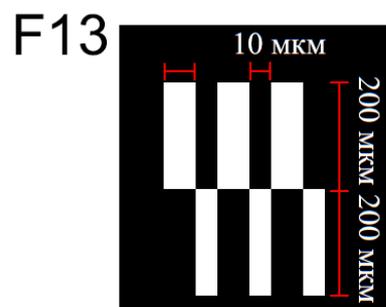
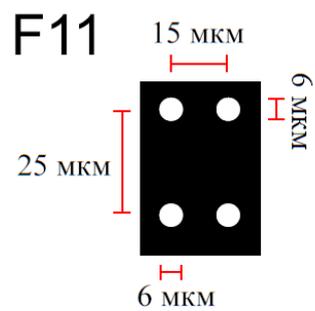


Рисунок А.3 – Подробные изображения транспаранта с F11 по F13

**ПРИЛОЖЕНИЕ Б
(Обязательное)
Транспарант EDU-TGB1**

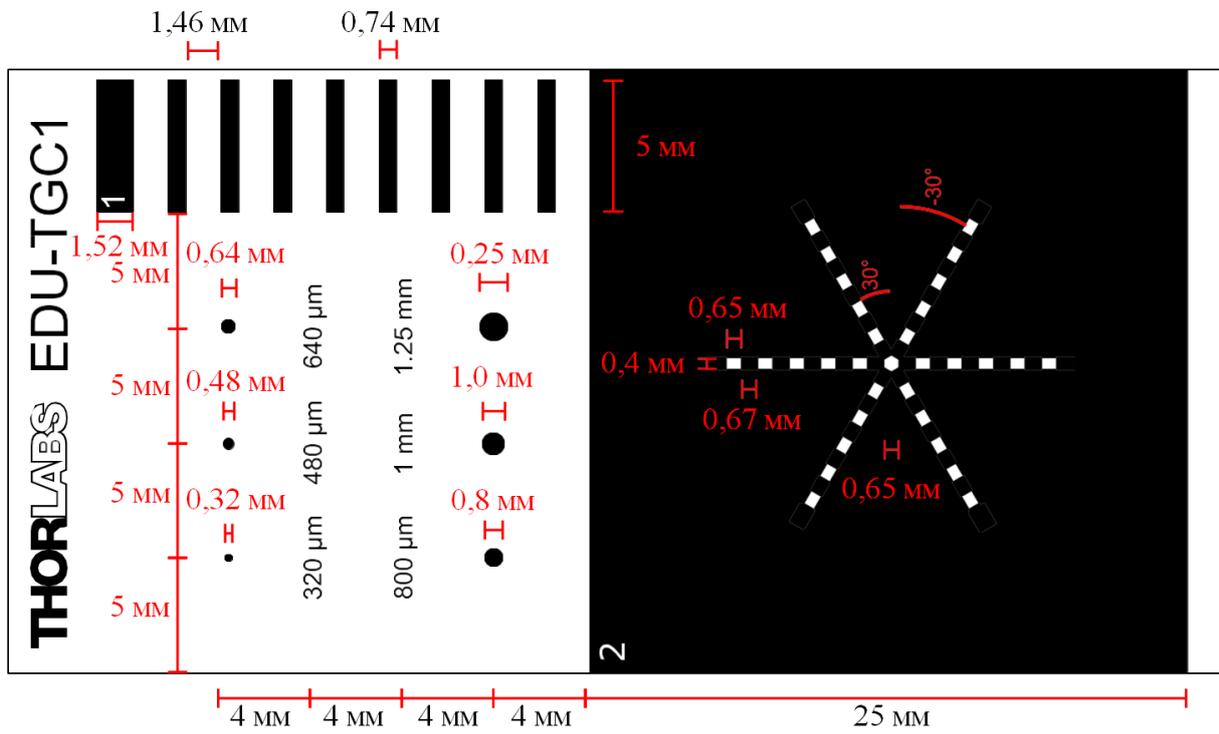


Рисунок Б.1 – Подробное изображение пластины EDU-TGC1