

Дифракция: экспериментальный поиск физических механизмов  
формирования рисунка

УДК 535.42:535.41

Автор: Слухаевский Сергей Павлович

Статус: Свободный исследователь

Аффилиация / Местоположение: г. Петропавловск, Республика Казахстан

Электронная почта: [egnetx@gmail.com] xtengt@gmail.com

### АННОТАЦИЯ

Дифракция традиционно рассматривается как результат нарушения непрерывности волнового фронта на препятствии, тогда как экспериментально обычно наблюдается лишь итоговое распределение интенсивности на удалённом экране. В данной работе реализован подход к инструментальному наблюдению пространственной эволюции дифракционного процесса путём последовательной модификации классических интерференционных и дифракционных схем применительно к новым исследовательским задачам.

Экспериментально установлено, что после взаимодействия с одиночной полуплоскостью внутри светового пучка формируется ограниченная по протяжённости слоистая структура, не выходящая за его поперечное сечение и состоящая из чередующихся светлых и тёмных областей, ориентированных параллельно кромке препятствия. Без пространственного перекрытия с другими возмущениями эти слои постепенно сглаживаются, а распределение интенсивности возвращается к однородному состоянию.

Показано, что в сложных системах каждая полуплоскость формирует собственную систему пространственного расслоения пучка. Признаки таких структур наблюдаются на расстояниях порядка 15 см до геометрической кромки препятствия и сохраняются на сопоставимом расстоянии после её

прохождения. При их пространственном перекрытии возникает взаимное отклоняющее воздействие множеств слоёв, сопровождающееся подавлением релаксации и формированием устойчивой широкоугольной дифракционной картины.

В лучах, маркированных регулярной геометрической структурой света, обнаружено, что области тёмных слоёв подавляют прохождение света от других источников аналогично непрозрачным объектам.

Изменяя степень пространственного перекрытия слоёв, удалось реализовать непрерывный переход от классического распределения с доминирующим центральным максимумом к режимам с усилением максимумов высоких порядков. Дополнительные эксперименты выявили пространственно селективный характер взаимодействия слоёв, а также слабую зависимость наблюдаемых эффектов от качества поверхности макроскопических препятствий.

Полученные результаты создают основу для дальнейшего анализа причинно-следственных механизмов формирования дифракционных структур и открывают возможности для практического применения выявленных закономерностей в контролируемых граничных условиях.

## ВВЕДЕНИЕ

Дифракция является одним из старейших и наиболее фундаментальных проявлений волновых явлений [1–3]. Со времён Френеля и Зоммерфельда её рассматривают как следствие нарушения непрерывности волнового фронта на препятствии, при этом в классических работах и учебных схемах основной наблюдаемой величиной выступает итоговое распределение интенсивности на удалённом экране. В результате сам процесс формирования дифракционной картины из падающего светового пучка в значительной степени реконструируется по конечному результату.

Теоретические подходы — от интеграла Кирхгофа до современных

численных методов распространения — позволяют с высокой точностью рассчитывать структуру наблюдаемой дифракционной картины [3–5]. Однако экспериментально обычно наблюдается лишь итоговое распределение интенсивности, тогда как промежуточные стадии пространственной эволюции пучка исследованы существенно менее подробно. Между тем прямое наблюдение таких стадий способно выявлять пространственные структуры и закономерности, неочевидные при анализе только конечного результата.

Ряд работ указывал на существование изменений интенсивности и фазы вблизи кромки препятствия, однако подобные эффекты обычно рассматривались как локальные особенности уже известных дифракционных процессов. Исторически основное внимание уделялось соответствию наблюдаемых картин существующим волновым моделям, тогда как пространственная динамика процесса между областью взаимодействия света с препятствием и областью регистрации исследовалась значительно менее подробно.

В настоящей работе реализован экспериментальный подход к прямому инструментальному наблюдению пространственной эволюции дифракционного процесса. Для этого использованы модифицированные схемы с одиночными полуплоскостями, пространственно разнесёнными кромками препятствий («дифракционная ступенька»), а также метод макроскопического раскрытия внутренней структуры светового пучка, обеспечивающий возможность её непосредственного визуального наблюдения в ближней зоне.

Особенностью исследования являлось последовательное развитие экспериментальной методики на основе результатов предшествующих наблюдений. В работе сохранена исходная логика экспериментального поиска: после определения областей, представляющих наибольший интерес для наблюдения процесса, были разработаны методы его пространственного разделения, прямого исследования внутренней структуры пучка и последующего изучения свойств обнаруженных структурных элементов.

Границы работы. (Scope)

Эта работа не оспаривает стандартные волновые формулы и не предлагает менять математическое описание дифракции. Наша цель — выяснить, могут ли те же самые, привычные дифракционные картины на экране формироваться за счет иных физических механизмов внутри самого луча. Мы не заменяем существующую математику, а исследуем реальную пространственную организацию световой энергии, которая приводит к тем же результатам.

### Описание и механизм.

Общепринятая теория отлично связывает препятствие на пути света и итоговую картинку на экране с помощью формул. Однако то, что формула верно предсказывает финал, не означает, что внутри процесса не могут скрываться другие динамические сценарии. Поэтому в данном исследовании математическое описание дифракции не считается полностью совпадающим с физикой процесса. Главное внимание уделяется поиску источников возникновения дифракционных явлений. Все наблюдения описываются в терминах, совместимых со стандартной оптикой, и не требуют её переписывания.

## МЕТОДИКА И ОБОРУДОВАНИЕ

В работе использовались следующие элементы:

- Лазерная указка типа 606 с зелёным лазерным диодом и встроенной фокусирующей линзой;
- Фрагменты лезвия бритвы (использовались в качестве полуплоскостей);
- Канцелярская булавка и школьная линейка;
- Пластилин для прецизионной фиксации элементов;
- Экран наблюдения, расположенный на расстоянии около 3 м (выполнен из двух листов белой бумаги формата А4).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Наблюдение 1. Экспериментальное определение доминирующего механизма двухлучевой интерференции в областях её традиционного наблюдения

Постановка задачи. В классических волновых представлениях интерференционная картина рассматривается как динамический результат непрерывного фазового сложения волн в каждой точке области перекрытия когерентных пучков [3, 5]. Однако, поскольку пространственные траектории максимумов и минимумов интенсивности в однородной среде являются прямолинейными, а инструментальное наблюдение самого акта фазового сложения недоступно, экспериментально крайне затруднительно отличить непрерывно протекающий в пространстве процесс интерференции от свободного прямолинейного распространения уже сформированной локальной слоистой структуры светового потока.

На итоговое распределение интенсивности данное различие не влияет, однако в классических представлениях дифракционная картина рассматривается как результат интерференции вторичных волн, возникающих на препятствии. Поэтому для раскрытия физического механизма дифракции установление пространственной области формирования самой интерференционной структуры является методологически важным. От этого зависит как выбор экспериментального инструментария, так и пространственная локализация областей наблюдения.

Цель наблюдения. Выполнить экспериментальное разграничение области, в которой происходит фазовое сложение волн, и области, в которой интерференционный рисунок распространяется без дальнейшего фазового взаимодействия — как проекция ранее сформированной пространственной структуры.

Методика эксперимента. Для проверки характера пространственной эволюции светового потока была реализована схема двухлучевой интерференции с бипризмой Френеля. В качестве тестового воздействия использовалась ограниченная апертура источника (зелёный лазер).

Геометрия пучков выбиралась таким образом, чтобы область интерференционного наложения потоков от реального и мнимого источников естественным образом переходила в зону их взаимного расхождения без применения дополнительных оптических элементов.

Поведение интерференционных полос регистрировалось на экране наблюдения, который располагался на разных расстояниях от бипризмы: от области непосредственного наложения пучков и вплоть до зоны полного продольного расхождения интерферирующих потоков. В качестве контрольного эксперимента применялась аналогичная схема с зеркалом Ллойда.

Результаты наблюдения. Установлено, что после выхода из области интерференционного наложения и последующего пространственного расхождения возможность фазового сложения применяемых потоков утрачивается, однако интерференционный рисунок сохраняется в каждом из пучков. Это позволяет сделать вывод о том, что в местах традиционного наблюдения интерференции её рисунок не формируется непосредственно на экране, а попадает на него в виде проекции событий, происходящих в точках взаимодействия света с оборудованием.

Вывод. Без воздействия внешних причин (изменения граничных условий) механизм фазового сложения световых потоков далее не реализуется, и новых дифракционных или интерференционных явлений в свободном пучке не возникает. Это позволяет относиться к областям взаимодействия света с внешними объектами как к физически значимым и первичным источникам формирования интерференционных и дифракционных структур.

Следствие. По этой причине перенос исследовательского внимания непосредственно к областям изменения граничных условий (в ближнюю зону дифракции) приобретает принципиальное методологическое значение.

Наблюдение 2. Пространственное разделение стадий дифракционного процесса («дифракционная ступенька»)

Цель наблюдения. Поиск мест фактического протекания активных процессов при формировании дифракционной картины путём изменения граничных условий.

Введение и обоснование метода. В отличие от двухлучевой интерференции, где итоговая картина формируется в результате последовательных операций разделения и последующего сведения пучков, дифракция на стандартных объектах обычно воспринимается как единый, пространственно неразделимый процесс. Это затрудняет экспериментальное выделение и независимое исследование промежуточных стадий формирования дифракционной картины.

Вместе с тем наблюдается существенное различие между дифракционными картинками, возникающими при близко расположенных и пространственно разнесённых границах. В классических щелевых схемах дифракции при малом расстоянии между границами формируется широкоугольное распределение интенсивности, а при одиночных или значительно разнесённых воздействиях наблюдаются существенно более узкие распределения интенсивности, характерные для режимов, традиционно относимых к дифракции Френеля и Фраунгофера [2–5]. Это указывает на возможное существование промежуточных стадий пространственной эволюции пучка, чувствительных к расстоянию между областями взаимодействия света с препятствиями.

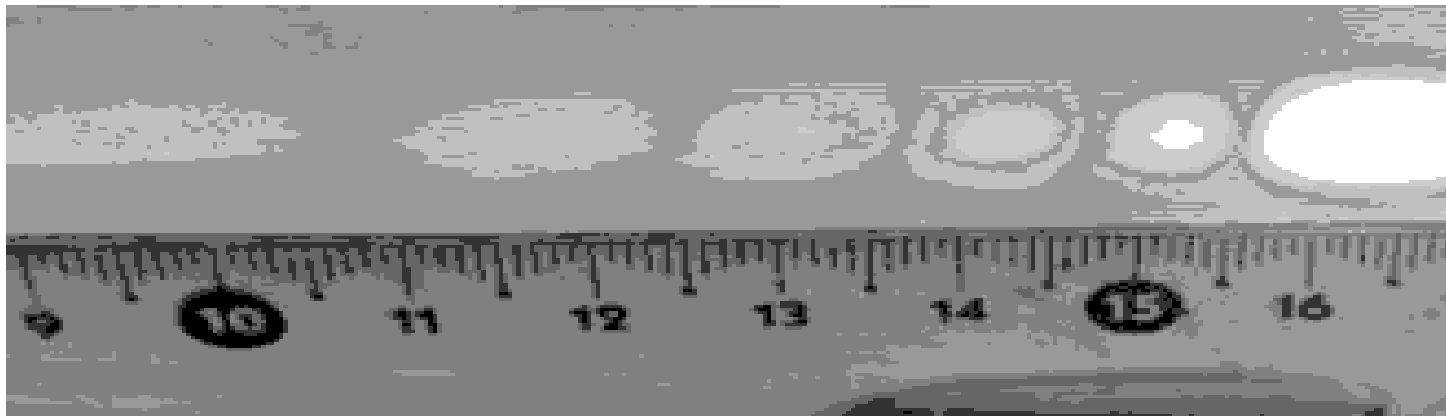
Для исследования данного фактического обстоятельства была реализована модифицированная дифракционная щель. Первая полуплоскость располагалась в начальной точке взаимодействия пучка, а вторая смещалась далее по ходу луча. В проекции на плоскость, перпендикулярную оптической оси, такая конфигурация соответствует обычной щели, однако физические точки взаимодействия света с её краями оказываются пространственно разнесёнными вдоль направления распространения.

Данная экспериментальная схема далее обозначается как **\*\*«дифракционная ступенька»\*\***, а продольное расстояние между полуплоскостями — как "шаг ступеньки"

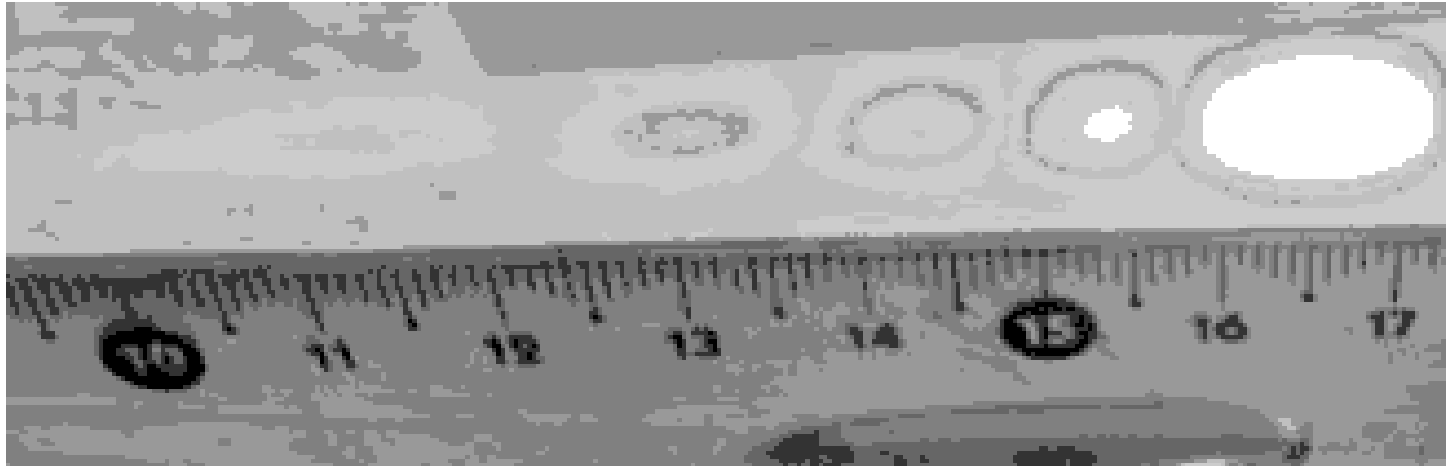
Результаты наблюдения. Установлено, что при изменении шага ступеньки в диапазоне от 0 до 15 см (для пучка зелёного лазера) на удалённом экране в областях геометрической тени соответствующих полуплоскостей наблюдаются две независимые широкоугольные дифракционные картины.



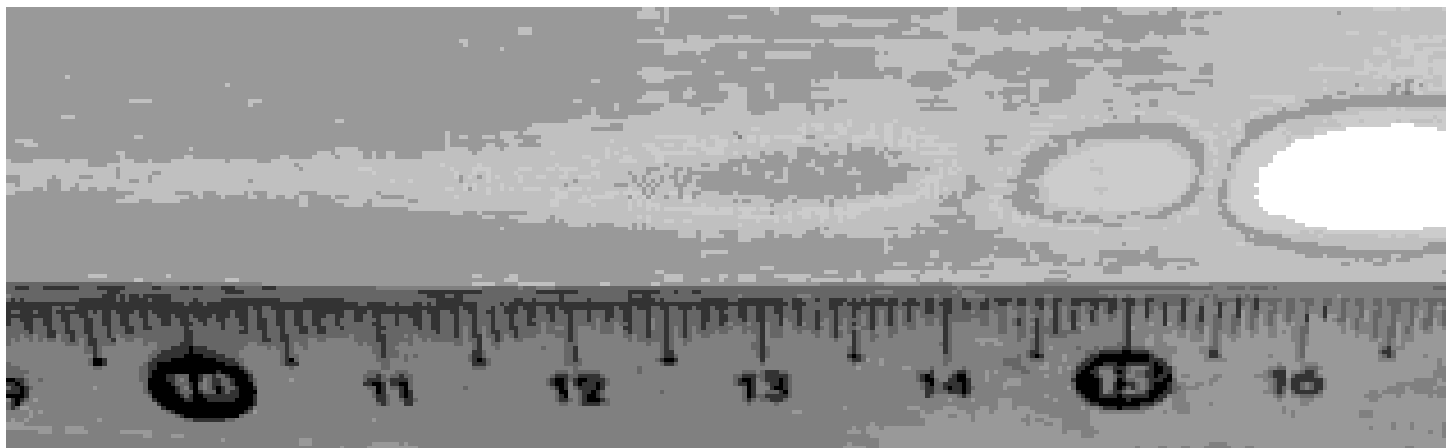
1 мм



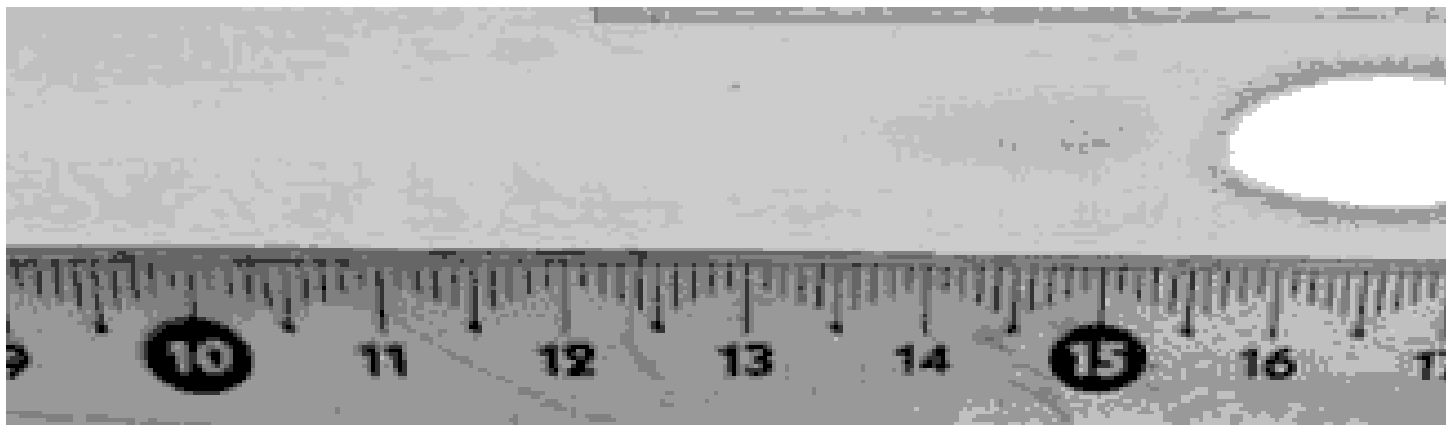
2 мм



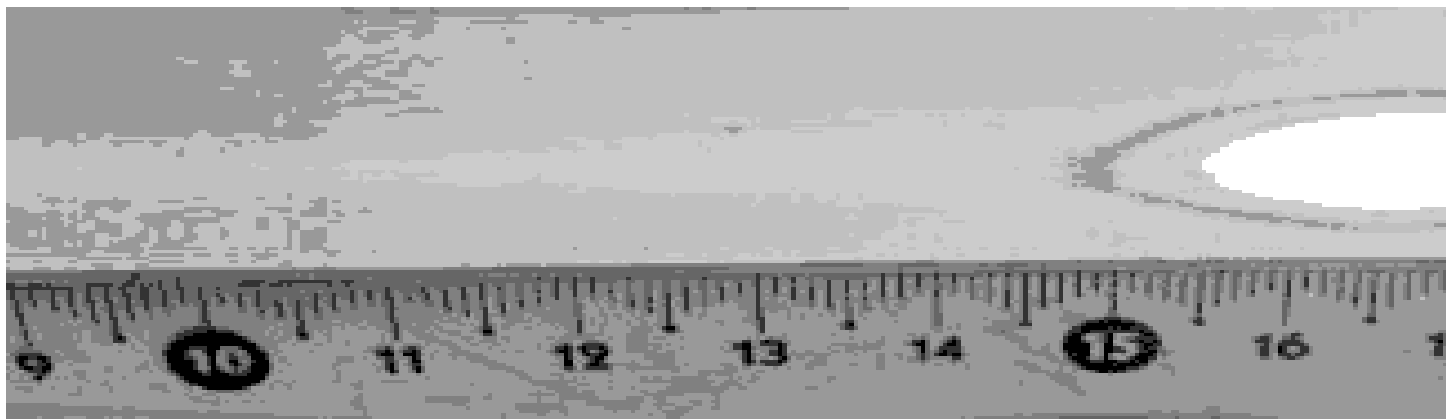
3 mm



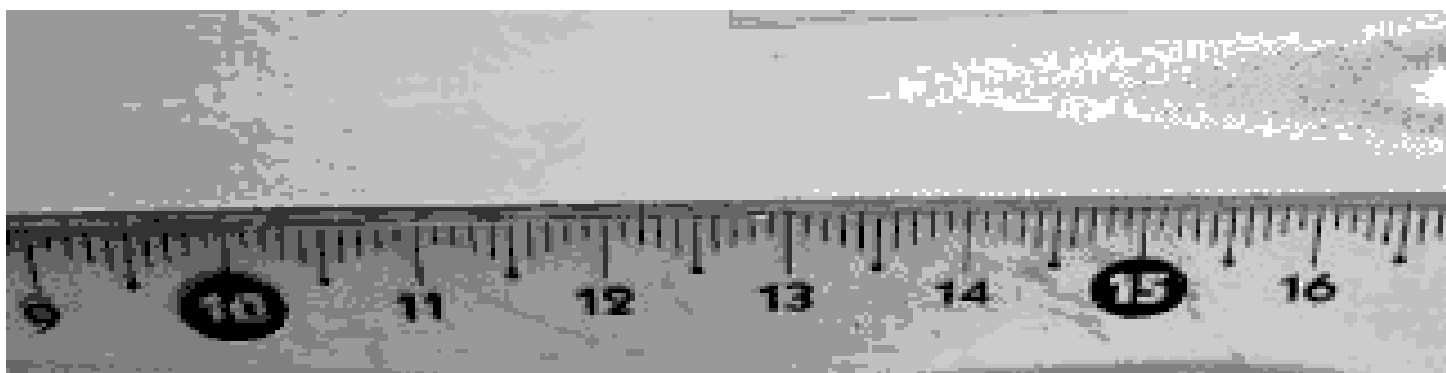
4 mm



5 mm



6 мм



8 мм

Fig. 1 (а–ж). Пространственная эволюция интерференционного поля в ближней зоне при последовательном изменении продольного шага схемы от 1 мм до 8 мм (кадры соответствуют шагу в 1, 2, 3, 4, 5, 6 и 8 мм). На кадрах зафиксирован момент перестройки распределения интенсивности. Линейная шкала фиксирует макроскопический масштаб процесса.

Динамика перестройки: На раскадровке отчетливо видно, как при минимальном шаге 1 мм пучок ведет себя как единая система, формируя классическое широкое распределение.

Полученные результаты свидетельствуют о взаимосвязанном (согласованном) влиянии обеих границ на распределение интенсивности в указанном диапазоне расстояний. При дальнейшем увеличении шага ступеньки влияние полуплоскостей постепенно разделяется, их воздействие на пучок становится преимущественно независимым, и в итоге взаимное влияние теряется — широкоугольная дифракционная картина не возникает.

Дифракционная картина от дальней полуплоскости (левая сторона фото) оказалась существенно более чувствительной к изменению шага ступеньки и величины просвета. При уменьшении просвета наблюдалось последовательное циклическое смещение тёмных полос, выходящих из центрального максимума и перемещающихся к периферии экрана с выраженным ускорением.

В противоположность этому распределение интенсивности, связанное с первой полуплоскостью, изменялось значительно слабее и сохраняло высокую пространственную устойчивость. Это позволило предположить, что после взаимодействия с первой полуплоскостью внутри пучка формируется протяжённая пространственная структура, состоящая из чередующихся областей повышенной и пониженной интенсивности, которые в эксперименте воспринимаются как своеобразные «слои разрешения и запрета», ориентированные параллельно кромке препятствия. Подобное описание носит феноменологический характер и используется для наглядного обозначения наблюдаемой пространственной структуры, поскольку непосредственное наблюдение фазового распределения в рамках выполненного эксперимента не осуществлялось.

При приближении шага ступеньки к границе прекращения взаимосвязанного влияния наблюдалось постепенное уменьшение числа максимумов и их уширение. Такое поведение указывает на наличие промежуточной пространственной структуры пучка, непрерывно эволюционирующей по мере распространения света.

Дополнительно установлено, что уменьшение просвета вблизи границы области взаимного влияния сопровождается характерным вытягиванием первого максимума в сторону геометрической тени с формированием острой каплеобразной формы. Это свидетельствует о неоднородном характере углового перераспределения интенсивности пучка в непосредственной близости от кромки полуплоскости.

Выводы. Результаты экспериментов с дифракционной ступенькой указывают на существование промежуточных стадий пространственной эволюции светового пучка после его взаимодействия с макроскопическим

препятствием. Полученные данные свидетельствуют о формировании внутри пучка протяжённой пространственной структуры, параметры которой зависят от макрогеометрии системы и могут изменяться при дополнительном воздействии со стороны второй границы.

Для непосредственного исследования данной структуры в ближней зоне были выполнены дополнительные наблюдения с использованием проекционного метода, рассмотренные в Наблюдении 3.

### Наблюдение 3. Исследование пространственной структуры пучка в ближней зоне (Проекционный метод)

Цель наблюдения. Прямая визуализация и исследование внутренней пространственной структуры светового пучка в непосредственной близости от кромки препятствия (в ближней зоне) для проверки суждения о локально м пространственном структурировании пучка после взаимодействия с полуплоскостью.

Методика эксперимента. Для фиксации распределения интенсивности непосредственно внутри пучка была применена проекционная оптическая схема, включающая короткофокусную отрицательную (рассеивающую) линзу и удалённый фиксированный экран. В стандартных условиях наблюдения дифракции плоскость регистрации фиксирует преимущественно интегральную картину в дальней зоне, что делает затруднительным прямой анализ внутренней структуры пучка на малых расстояниях от препятствия.

При установке отрицательной линзы распределение плотности светового потока, существующее в плоскости самой линзы, переносится на удалённый экран с многократным линейным увеличением. Для параллельных и слабо расходящихся пучков такая проекция эквивалентна увеличенному изображению поперечного сечения пучка. Отрицательная линза преобразует локальную координату внутри сечения пучка в угол отклонения луча, который затем вновь отображается в координату на экране. При этом локальная расходимость лучей не только обеспечивает увеличение, но и

снижает вероятность их вторичного пространственного перекрытия, а значительное удаление экрана в сочетании с расходимостью лучей обеспечивает высокое пространственное разрешение метода.

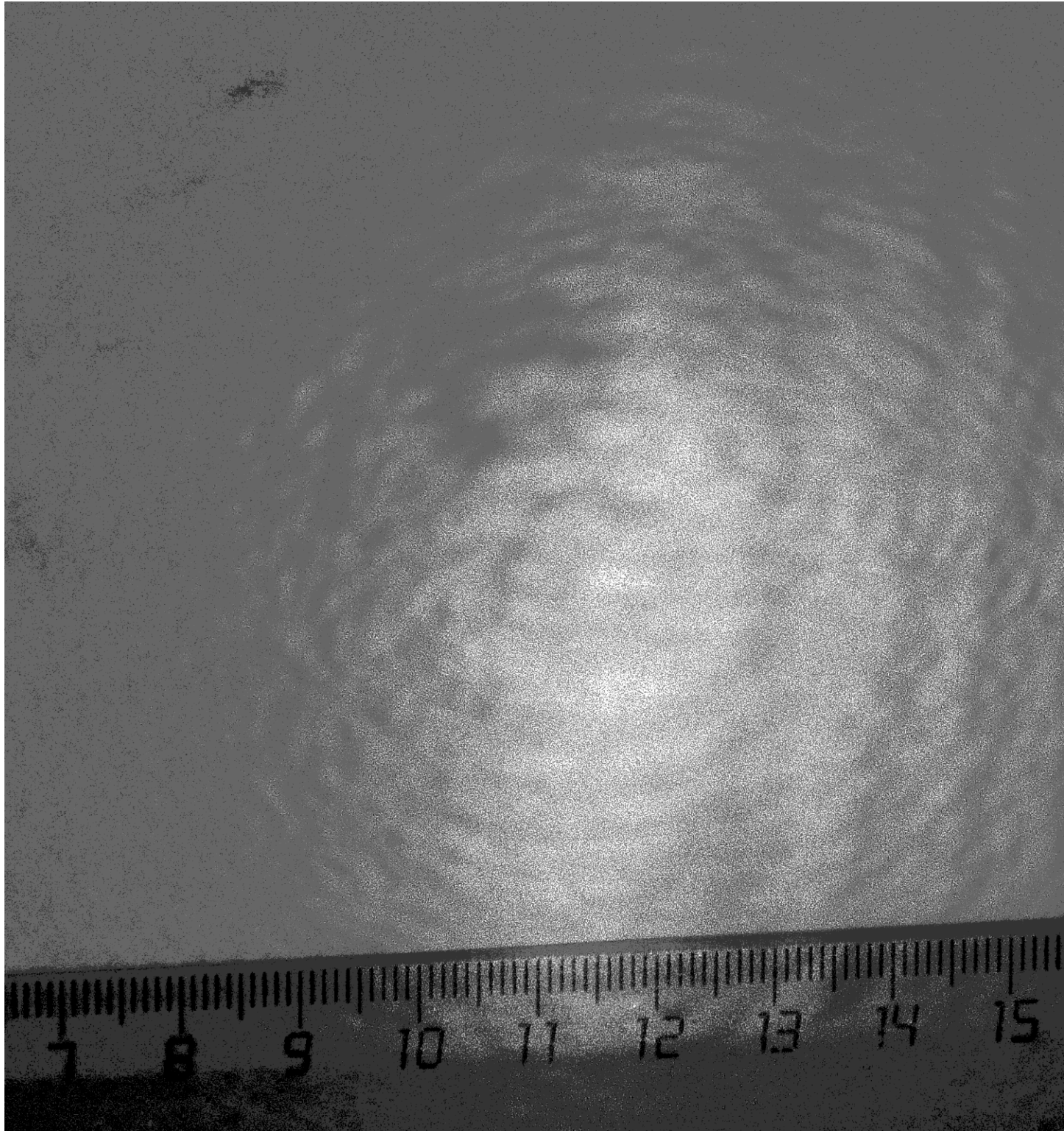


Fig 2. Внешний вид проекции света лазерной указки на экране.

Тестовое воздействие заключалось в последовательном сканировании

пучка вдоль направления распространения света путём перемещения линзы от кромки одиночной полуплоскости.

Результаты наблюдения. Сканирование пучка позволило зафиксировать на экране серию чётких чередующихся полос внутри основного сечения светового потока без изменения его поперечного сечения. Установлено, что данные полосы параллельны кромке полуплоскости, распределены неравномерно, а их пространственная частота и общее количество зависят от степени перекрытия пучка полуплоскостью.

Сканирование пучка от кромки полуплоскости в сторону экрана наблюдения выявило следующие закономерности:

1. В непосредственной близости от кромки полуплоскости светлые составляющие потока имеют минимальную поперечную ширину и максимальную контрастность.

2. По мере отдаления от полуплоскости светлые составляющие структуры постепенно расширяются, их контрастность снижается, и они последовательно заполняют всё поперечное сечение пучка.

3. На удалении порядка 15 см от полуплоскости внутренняя слоистая структура пучка визуальнo размывается, после чего световой поток восстанавливается за исключением стороны контакта, в которой сохраняется два-три слоя, отклоненных близостью кромки полуплоскости.

Таким образом, центральная часть пучка, формирующая в дальней зоне сплошной максимум, вблизи препятствия обладает выраженной внутренней структурой. Наблюдаемая модуляция интенсивности возникает без захода светового потока в область геометрической тени и без изменения общего поперечного размера самого пучка.

Выводы. Экспериментально установлено, что после взаимодействия с одиночной полуплоскостью в световом пучке возникает ограниченная по протяжённости (примерно 15 см) область пространственного структурирования, представленная чередующимися слоями, феноменологически воспринимаемыми как «зоны разрешения и запрета», ориентированные параллельно кромке препятствия. Подобная область

соответствует ближней зоне распространения, традиционно описываемой через число Френеля [3].

Полученные результаты свидетельствуют о существовании промежуточной стадии пространственной эволюции пучка между областью взаимодействия с препятствием и формированием итоговой дифракционной картины в дальней зоне. Наблюдаемая структура существенно влияет на характер распределения интенсивности при взаимодействии пространственно разнесённых препятствий и может определять условия их взаимосвязанного или независимого действия.

Вместе с тем открытым остаётся вопрос о механизме обратного влияния второй полуплоскости, влекущей образование широкоугольной дифракционной картины первой полуплоскостью. В частности, что именно является решающим фактором: продольное расстояние между полуплоскостями или геометрический ход пучка?

Для уточнения этого обстоятельства была реализована дополнительная экспериментальная схема, рассмотренная в Наблюдении 4.

#### Наблюдение 4. Разделение геометрического хода пучка в дифракционной ступеньке и расстояния между полуплоскостями.

Цель наблюдения. Исследование значимого параметра для существования взаимной согласованности элементов дифракционной ступеньки.

Методика эксперимента и результаты. Для анализа механизмов согласования воздействий полуплоскостей была исследована динамика светового потока при внесении разницы между геометрическим ходом пучка и фактическим пространственным расстоянием между полуплоскостями. Для этого применялась дифракционная щель увеличенного размера.

Конфигурация настраивалась так, чтобы пучок вначале касался только одной половины щели, проходил сквозь неё, затем отражался от возвратного

зеркала и на обратном пути касался второй половины щели. Такое расположение позволило увеличить протяжённость оптического пути (геометрического хода) между точками взаимодействия по сравнению с фактическим физическим расстоянием между полуплоскостями ступеньки в несколько десятков раз.

Экспериментально установлено, что причина формирования широкоугольной дифракционной картины распространяется вместе с геометрическим ходом пучка и не зависит от фактического расстояния между точками воздействия в пространстве лаборатории. Взаимовлияние полуплоскостей сохраняется при тех же значениях геометрического хода луча между точками воздействия — около 15 сантиметров.

Наблюдение позволяет констатировать, что в диапазоне взаимовлияния пучок приобретает пространственно-временные изменения, в область распространения которых и попадает вторая полуплоскость ступеньки. В результате на удалённом экране формируется распределение интенсивности с выраженным угловым расширением, соответствующее широкоугольной дифракционной причине.

Поскольку обнаружено, что носителем источника образования широкоугольной дифракционной картины является структура пучка, то влияние второй полуплоскости целесообразно объяснить геометрическим перекрытием зон. Вторая полуплоскость находится в структуре, возникающей после первой полуплоскости, а первая полуплоскость попадает в область предварительного структурирования второй полуплоскости.

Иными словами, дифракционный процесс имеет две активные стадии сопоставимой протяжённости:

1. "Стадия "преддифракции". Состоит в предварительном структурировании светового потока до геометрической плоскости препятствия.

2. Стадия дифракции. Активная перестройка, продолжающаяся после прохождения полуплоскости.

Дополнительно обнаружено, что в зоне взаимодействия после второй

полуплоскости наблюдается вытягивание максимумов в сторону геометрической тени, что указывает на нелинейный характер углового перераспределения интенсивности пучка.

Выводы. В наблюдении экспериментально фиксируется эффект предварительного структурирования пучка (преддифракции). Полученные данные указывают на то, что изменение пространственного распределения интенсивности инициируется не только непосредственно в плоскости взаимодействия с препятствием, но и в прилегающей области распространения пучка до второй границы. Эта область рассматривается как зона, в которой уже присутствуют условия для последующего формирования наблюдаемой картины.

Раскрыт механизм формирования широкоугольной картины: экспериментально показано, что итоговое широкоугольное распределение возникает при совместном действии двух пространственно разнесённых границ, каждая из которых по отдельности не приводит к сопоставимому угловому расширению. Ключевым фактором является пространственное наложение областей дифракции первой границы и преддифракции второй границы.

Для отдельного наблюдения сформированных расслоений в условиях их взаимодействия внутри ступеньки было выполнено Наблюдение 5.

Наблюдение 5. Раздельное наблюдение индивидуальных свойств структуры дифракции и структуры преддифракции при их совместном взаимодействии  
(Метод пространственного маркирования структуры пучка)

Цель наблюдения. Экспериментальное уточнение степени самостоятельности структур дифракции и преддифракции при их взаимодействии в дифракционных ступеньках.

Методика эксперимента. Для различения и анализа элементов структуры пучка, формируемых разными препятствиями, была применена

методика наделения слоёв геометрическими метками-маркерами. Экспериментальная схема была реализована в виде комбинации вертикально ориентированной иглы (канцелярской булавки) и полуплоскости. Игла располагалась впереди справа, а полуплоскость — далее по ходу луча слева, имея небольшой угловой наклон кромки против часовой стрелки. В комбинации это формировало дифракционную ступеньку и пространственную клинообразную щель.

В данной конфигурации световой пучок претерпевал двукратное структурирование: он формировал систему узких вертикальных полос, возникающих при дифракции на игле, и далее — наклонную слоистую структуру, связанную с наличием полуплоскости. На удалённом экране регистрировался наклонный дифракционный рисунок от полуплоскости, на который накладывались вертикальные маркерные полосы, соответствующие структуре пучка после взаимодействия с иглой.

#### Результаты наблюдения.

В ходе анализа взаимодействия двух дифракционных систем была обнаружена характерная пространственная особенность: в областях экрана, соответствующих тёмным слоям, формируемым наклонной полуплоскостью, пересекающие их вертикальные полосы от иглы существенно ослаблялись или локально исчезали. Визуально это проявлялось как локальное подавление маркерных полос в определённых областях, топологически напоминающее экранирование или затенение, как показано на фотографиях (Fig. 2, Fig. 3).

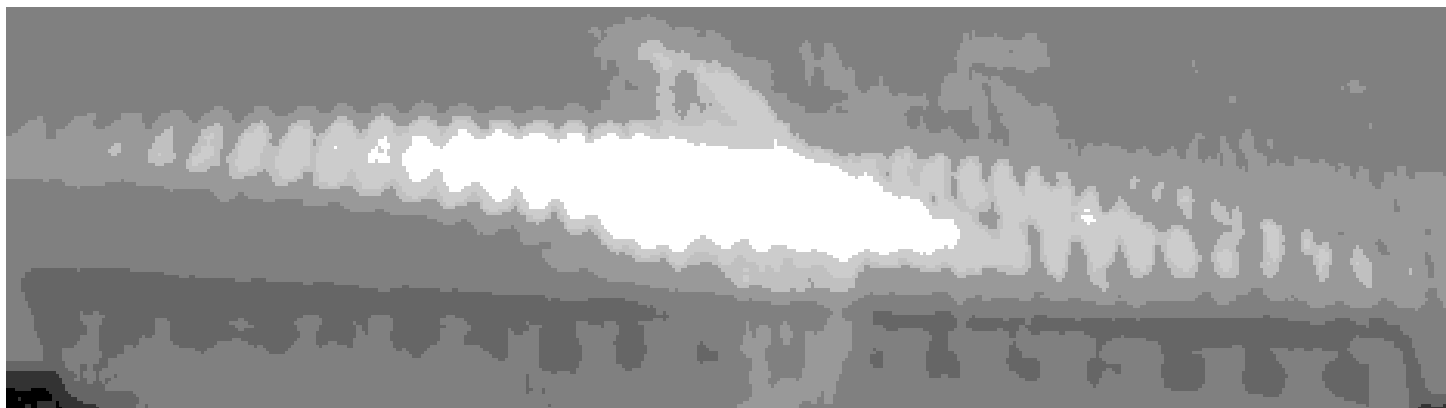


Fig 3. Визуализация пространственного взаимодействия структур светового поля в конфигурации «игла–полуплоскость» методом маркерных полос.при наклонной полуплоскости. Наблюдается эффект локальной деформации и «вырезки тенью».

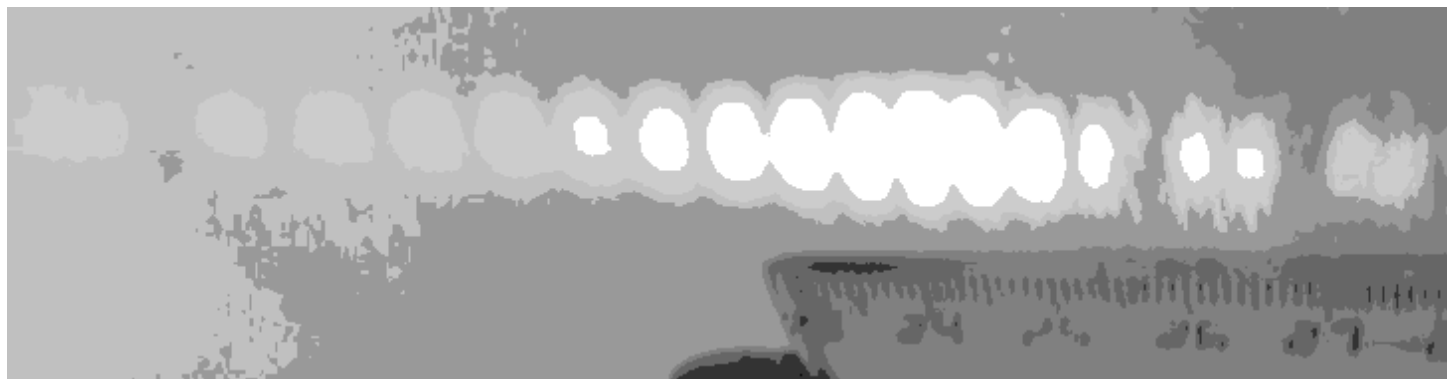


Fig 4. Пространственная модуляция светового поля в конфигурации параллельных кромок («прямая игла – прямая полуплоскость»). Оцифрованная шкала линейки фиксирует параметры регулярного чередования световых каналов и их изоляции в области геометрической тени крупного шага рисунка полуплоскости

Важнейшим фактором, обнаруженным при анализе динамики пучка, является поведение самих полос при изменении геометрии схемы. В эксперименте фиксируется не классическое перерисовывание интерференционного узора на экране, а согласованное отклонение целостных множеств слоёв. Каждая полуплоскость образует свою обособленную группу слоёв. При сближении полуплоскостей и наложении зоны дифракции первой полуплоскости на зону преддифракции второй полуплоскости все слои первой полуплоскости отклоняются в сторону её геометрической тени, а слои, формируемые вблизи кромки второй полуплоскости, смещаются в сторону геометрической тени второй полуплоскости. Угол отклонения для

первой полуплоскости однозначно определяется продольным шагом дифракционной ступеньки.

При этом наблюдаемое смещение не сопровождается исчезновением или разрушением слоёв. После выхода из области взаимодействия они продолжают существовать как устойчивые пространственные структуры, смещённые относительно своего первоначального положения. Индивидуальные слои, наделённые геометрической меткой, сохраняют эту метку внутри своей структуры на всём протяжении наблюдаемого процесса отклонения. Метка не претерпевает пространственного усреднения или заметной диффузии по сечению пучка, оставаясь связанной с тем же слоем, в котором была зарегистрирована первоначально.

Дополнительно установлено, что количество наблюдаемых слоёв первой полуплоскости при изменении шага ступеньки остаётся неизменным. Наблюдаемое отклонение сопровождается лишь незначительной деформацией общего дифракционного рисунка по сравнению с величиной его пространственного смещения. Таким образом, изменение положения картины происходит преимущественно за счёт согласованного переноса уже существующих слоёв, а не вследствие их разрушения, исчезновения или повторного формирования.

Описанный комплекс признаков свидетельствует о высокой степени пространственной устойчивости и индивидуальной сохранности наблюдаемых слоёв и согласуется с существованием взаимного отклоняющего воздействия между двумя множествами самостоятельных структур, формируемых различными элементами дифракционной ступеньки.

**Выводы.** Метод пространственного маркирования экспериментально подтвердил, что индивидуальные слои сохраняют свои геометрические метки, численность и внутреннюю идентичность в процессе пространственного смещения картины.

Изменение геометрии дифракционного рисунка происходит преимущественно за счет согласованного пространственного отклонения и переноса целостных множеств слоев, а не путем их локального разрушения или повторного формирования на новых координатах экрана.

Фиксируется выраженная пространственная селективность взаимодействия элементов светового поля, при которой области минимальной интенсивности (темные слои), сформированные одним препятствием, вызывают локальное подавление или ослабление маркерных меток, созданных другим.

Высокая стабильность и воспроизводимость обнаруженных эффектов указывают на их макроскопический характер и слабую чувствительность к локальной микроструктуре кромок препятствий. Это послужило основанием для проверки воспроизводимости результатов при изменении макрогеометрии схемы, для чего было выполнено Наблюдение 6.

#### Наблюдение 6. Проверка инвариантности макроскопических эффектов к макрогеометрии, форме и качеству обработки кромок материальных препятствий

Методика эксперимента. Для исключения механизмов рассеяния света на микродефектах кромок и проверки общей устойчивости результатов прецизионные острые кромки (лезвия), использованные в дифракционной ступеньке, были заменены двумя массивными стальными цилиндрами диаметром примерно 3 см. Цилиндры были установлены по аналогичной схеме пространственно разнесённой ступенчатой щели. Поверхности цилиндров специально не подготавливались, не полировались и сохраняли следы грубой механической (токарной) обработки.

Тестовое воздействие, как и в Наблюдении 2, заключалось в продольном разнесении объектов (изменении шага ступеньки) и варьировании поперечного зазора между ними.

Результаты наблюдения. Выполненные наблюдения показали, что характер формирования широкоугольных дифракционных картин, топология теневых полос и общая устойчивость воспроизведения результатов визуально не изменяются при замене прецизионных лезвий на грубо обработанные цилиндрические поверхности. Эффекты пространственного структурирования пучка, включая каплеобразную деформацию центрального максимума и селективное взаимодействие областей интенсивности, полностью сохраняют свою динамику.

Выводы. Полученные данные показывают, что в макроскопической динамике дифракции требования к прецизионному качеству и идеальной остроте кромок препятствий не являются критическими. Для таких процессов вклад локальных микродефектов поверхности препятствий усредняется и не оказывает определяющего влияния на общую геометрию результатов дифракции. Это согласуется с ранее полученным результатом о протяжённости области формирования пространственной структуры пучка порядка сотен миллиметров (зона локального согласования составляет примерно 15 см).

Наблюдение 7. Реализация конфигурации «дифракционной ступеньки» на макрообъектах с прямоугольной геометрией кромок (Эксперимент с элементами столовой вилки) Цель наблюдения. Подтверждение макроскопического инвариантного характера пространственного структурирования пучка при взаимодействии с двумя последовательными, пространственно разнесенными кромками прямоугольного сечения. Методика эксперимента. Для проверки устойчивости обнаруженных эффектов в оптическую схему был интегрирован макрообъект с прямоугольной геометрией — столовая вилка. Объект плавно разворачивался и наклонялся относительно оси распространения пучка зелёного лазера таким образом, чтобы в формировании картины участвовали только два зуба, развернутые в продольную ступеньку. Зубцы имели строго квадратное сечение, а световой пучок направлялся непосредственно на ближние и дальние ребра этих квадратов, образуя двухэлементную пространственную «ступеньку» вдоль хода светового поля. Регистрирующий экран был собран из двух последовательно установленных листов белой бумаги формата А4, расположенных вдоль направления развертки картины. Выходное сечение пучка и возникающие модуляции поля проецировались непосредственно на эту макроструктуру. Результаты наблюдения. Эксперимент продемонстрировал выраженную, крупномасштабную визуализацию внутреннего структурирования поля. При взаимодействии с разнесенными ребрами двух зубцов световой пучок претерпевал согласованную пространственную модуляцию: на экране зафиксирована четкая, устойчивая система чередующихся каналов повышенной и пониженной интенсивности. Ввиду чрезвычайно большой градации яркостей между зонами, фиксация протяженности структуры определялась инструментальными возможностями регистрирующей камеры. Экспериментально установлено, что устойчивые параметры регулярных сдвигов и чередование изолированных световых каналов уверенно

регистрируются оптикой на всем протяжении тестового экрана из двух листов формата А4. Регулярное чередование световых каналов оставалось изолированным и четко структурированным в крупном масштабе проекции. С геометрической точки зрения данная конфигурация приводит к исключительно широкому угловому распределению интенсивности, охватывающему значительную часть наблюдаемой полусферы. Вместо формирования узкого конуса рассеяния, характерного для гладких цилиндрических объектов, прямоугольные ребра двух зубцов вызывают протяженное латеральное перераспределение интенсивности. Это заставляет дифракционную картину на многометровом удалении от объекта драматически разворачиваться по всей площади регистрирующих листов, фрагмент дифракционного рисунка изображен на Fig 5. Выводы. Наблюдаемые эффекты согласуются с представлением о совместном влиянии двух последовательных граничных взаимодействий (ребер квадратного сечения), которые порождают значительно более широкое угловое перераспределение интенсивности, чем изолированные одиночные кромки. Четкая фиксация этих макроскопических каналов интенсивности, занимающих в длину масштаб двух листов А4, подтверждает, что трансформация светового поля в ближней зоне при прохождении «дифракционной ступеньки» является устойчивым объемным феноменом. Он жестко привязан к геометрии кромок-препятствий и успешно регистрируется доступными инструментальными средствами, несмотря на высокий динамический диапазон градации яркостей.



Fig. 5. High-textured fragment of a diffraction field in the configuration of a «diffraction step» under the interaction of laser radiation ( $\lambda \approx 532$  nm) with two unfolded teeth of a macro-object. The image clearly shows the result of light falling on the macro-object.

на ребра квадратного сечения зубцов, вызывающий пространственное расслоение светового потока на серию изолированных, высококонтрастных энергетических каналов. Кадр отображает протяженный участок структуры, зафиксированный в условиях большой градации яркостей на площади экрана из двух листов А4. удалённом экране.

Выводы. Наблюдаемые эффекты согласуются с представлением о одновременном влиянии нескольких близко расположенных граничных взаимодействий, которые порождают значительно более широкое угловое перераспределение интенсивности, чем изолированные кромки. Геометрический профиль макроскопического блока фактически диктует пространственные границы выходящего поля. Отчетливая фиксация этих макроскопических каналов интенсивности подтверждает, что трансформация светового поля в ближней зоне является устойчивым объемным феноменом, слабо зависящим от идеализации лабораторных компонентов, и наглядно идентифицируется на мультисантиметровой линейной шкале.

#### Феноменология пространственного обособления слоёв

Обнаруженный эффект сохранения индивидуальных геометрических меток внутри отклоняющихся слоёв, а также стабильность количества слоёв, наблюдаемых в тени первой полуплоскости при изменении шага дифракционной ступеньки, экспериментально указывают на существование устойчивых пространственных структур, сохраняющих свою идентичность и внутреннюю организацию в процессе формирования итоговой картины.

Тот факт, что маркированный слой смещается как единый объект, не претерпевая заметной диффузии или пространственного усреднения по сечению пучка, выходит за рамки традиционного представления об интерференционных полосах как о локальных максимумах и минимумах интенсивности непрерывного поля.

Данный результат открывает возможность для новых физических интерпретаций. Наблюдаемая инвариантность слоёв и их согласованное геометрическое отклонение позволяют поставить вопрос о существовании дополнительных механизмов пространственной организации светового потока в ближней зоне дифракции. В частности, полученные данные

допускают рассмотрение моделей, предполагающих наличие пространственно локализованных и устойчивых каналов переноса энергии, сохраняющих свою индивидуальность при изменении геометрии дифракционной системы.

В этом контексте представляется обоснованным анализ гипотез, связывающих наблюдаемое поведение слоёв с возможными механизмами пространственного квантования параметров светового потока вблизи макроскопических границ материальных тел. Полученные результаты сами по себе не позволяют однозначно выбрать между конкурирующими физическими интерпретациями, однако задают новые экспериментальные ограничения, которым должна удовлетворять любая теория, претендующая на описание процессов формирования дифракционных структур в ближней зоне.

Детальное теоретическое разграничение и математическое описание указанных подходов должно стать предметом отдельных фундаментальных исследований.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе предложен и экспериментально реализован подход к исследованию пространственной эволюции световых пучков в ближней зоне макроскопических препятствий. Разработанный комплекс методических решений («дифракционная ступенька», метод прямого проекционного увеличения и метод пространственного маркирования) позволил осуществлять контролируемое воздействие на пучок на промежуточных стадиях формирования дифракционной картины.

На основании выполненных наблюдений и их фотофиксации установлено следующее:

1. Взаимодействие светового пучка с полуплоскостью сопровождается формированием пространственно ограниченной области поперечного структурирования, возникающей на расстояниях порядка 15 см до препятствия (зона преддифракции) и сглаживающейся на сопоставимом расстоянии после него. В пределах этой области внутри пучка наблюдается

выраженная слоистая структура, представленная чередующимися светлыми и тёмными областями, ориентированными параллельно кромке препятствия. При этом минимальная ширина и максимальная контрастность светлых полос достигаются в плоскости прицельного сечения кромки.

2. При изменении продольного шага дифракционной ступеньки в исследованном диапазоне сохраняются характерные особенности распределения теневых полос в области геометрической тени первой полуплоскости. Воздействие второй полуплоскости проявляется преимущественно в угловой деформации прилегающей к ней части пучка при выраженной нелинейной зависимости величины отклонения от прицельного сечения. Наибольшее отклонение испытывают области структуры, проходящие в непосредственной близости от кромки второй полуплоскости, тогда как удалённые участки изменяются существенно слабее.

3. Необходимым условием формирования устойчивой широкоугольной дифракционной картины является пространственное наложение дифракционных слоёв первой полуплоскости на преддифракционные слои второй полуплоскости. Приращение оптического пути подтверждает, что этот процесс привязан к геометрическому ходу луча, а не к физическому расстоянию между телами в пространстве.

4. Эксперименты с пространственным маркированием выявили выраженную пространственную селективность наблюдаемых эффектов: области пониженной интенсивности, формируемые одной границей, сопровождаются ослаблением или подавлением маркеров, создаваемых другим препятствием.

5. Наблюдаемые эффекты инвариантны к микрогеометрии и форме препятствий: замена тонких лезвий на грубо обработанные стальные цилиндры диаметром 3 см не нарушает топологию теневых полос и динамику пучка, что указывает на объёмный, макроскопический характер перестройки поля.

Полученные результаты свидетельствуют о возможности представления процесса формирования дифракционной картины как совокупности пространственно разделённых стадий, доступных прямому

визуальному наблюдению и инструментальному контролю. Предложенный подход открывает новые перспективы для изучения пространственной динамики дифракционных процессов, формирования структурированных световых пучков и разработки устойчивых макроскопических интерферометрических схем.

В этой связи перспективным представляется проведение дополнительных экспериментов по исследованию прохождению локализованных участков структурированного пучка через макроскопические щели и пространственно разнесённые препятствия в условиях исключения прямого контакта основного максимума интенсивности с кромками объектов. Подобные изыскания могут быть использованы для уточнения причинно-следственных механизмов формирования дифракционных картин в ближней зоне, а также для развития новых методов пространственного микронзондирования и высоколокализованной оптической регистрации.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Young T. Experimental demonstration of the general law of the interference of light // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. 1804. Vol. 94. P. 1–16.
2. Fresnel A.-J. Mémoire sur la diffraction de la lumière // *Mémoires de l'Académie des Sciences de l'Institut de France*. Vol. 5. P. 339–475.
3. Born M., Wolf E. *Principles of Optics*. 7th ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1999. 986 p.
4. Goodman J. W. *Introduction to Fourier Optics*. 3rd ed. Greenwood Village: Roberts & Company Publishers, 2005. 491 p.
5. Hecht E. *Optics*. 5th ed. Boston: Pearson Education, 2017. 729 p.