ЭФФЕКТ ДВОЙНОЙ СЕТКИ: ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ И КАЧЕСТВЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Поцелуев Р. С.[1], студент, e-mail: pomakrut5@gmail.com,
Круглая К. П.[1], студентка,
Храмович Е. М.[1], канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры физики, e-mail: e.khramovich@bsuir.by,
Шабусов А. К.[2], учитель физики, e-mail: anationa@mail.ru

2026

1. Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
2. Государственное учреждение образования «Средняя школа № 1 г. п. Смиловичи»

Ключевые слова: муар-эффект, двойная сетка, периодические структуры, точечный источник света, тень, оптические явления.

Аннотация: Исследован вариант муар-эффекта, возникающего при прохождении света через две одинаковые сетки. Явление воспроизведено в лабораторных условиях, разработаны установки с двумя сетками и с одной сеткой и зеркалом. Установлены качественные зависимости размеров изображения от параметров установки, дано геометрическое объяснение явления, предложены варианты его практического применения.

Введение

Когда едешь в поезде, иногда полезно смотреть из окна на окружающий мир. Так, проезжая мимо стоящих на соседних путях вагонов для перевозки скота, мы обнаружили, что если посмотреть на небо через сетки на окнах вагонов, то наблюдается изображение в виде больших светлых ромбов.

В ходе наблюдения явления у нас возникли следующие вопросы:

– каким образом возникает изображение сетки?

– почему изображение сетки увеличенное?

– почему изображение сетки светлое, а не тёмное?

– почему при движении сеток изображение становится чётче?

Чтобы разобраться в явлении, мы провели обратный опыт: свет от точечного источника пропустили через две сетки, за которыми расположили экран. На экране наблюдалось изображение, повторяющее узор сеток, только гораздо больших размеров.

Описание явления мы пытались найти в различных источниках – от интернета до энциклопедий. Выяснилось, что в основе явления лежит муар-эффект, который обычно наблюдается в периодических структурах небольших размеров, например в тюлевых занавесках на окнах [1, 2]. Оказалось, что данный эффект можно наблюдать и на достаточно крупных

периодических структурах, например, если посмотреть через двойной сетчатый забор [1, 3]. Однако объяснения именно того варианта явления, который мы наблюдали с помощью двух одинаковых сеток, обнаружить не удалось, хотя литературы о муар-эффекте достаточно.

Цель работы – воспроизвести в лабораторных условиях и качественно исследовать вариант муар-эффекта, возникающего при прохождении света через две одинаковые сетки.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

– подобрать сетки, на которых эффект наблюдается наиболее отчётливо, и воспроизвести явление;

– разработать экспериментальные установки, позволяющие получать изображение на экране;

– выявить качественные зависимости размеров изображения от параметров установки;

– дать геометрическое объяснение возникновению изображения;

– оценить возможности практического использования эффекта.

Оборудование: сетки из различного материала разных размеров, зеркало, точечный источник света, экран, линейка, рулетка, штатив.

1 Воспроизведение явления в лабораторных условиях

1.1 Характеристики сеток

Для описания сетки введём две характеристики (рисунок 1): d – ширина одной ячейки сетки, которую будем называть периодом сетки, и b – ширина перемычек (проволочек) сетки.

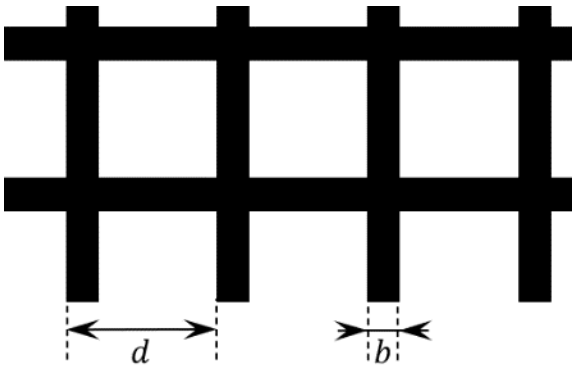


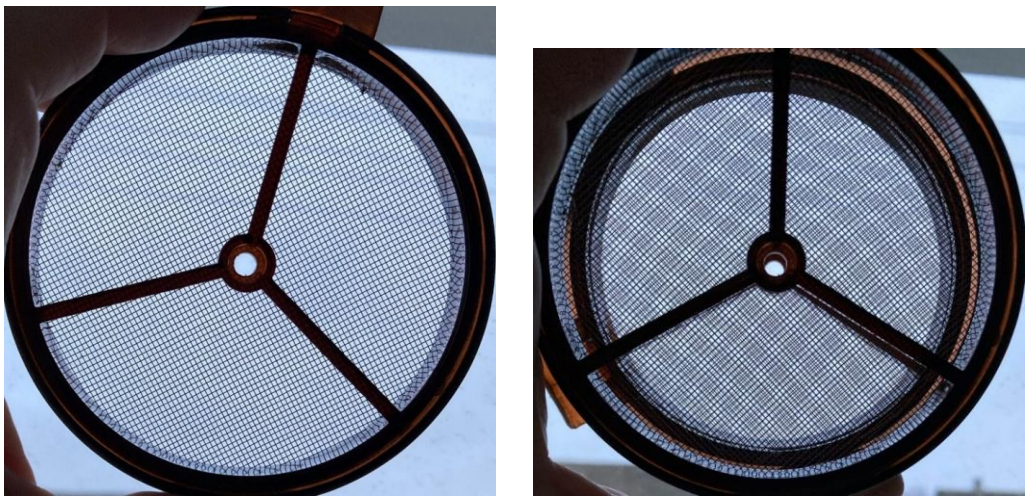
Рисунок 1 – Обозначение характеристик сетки

Воспроизведение эффекта, несмотря на кажущуюся простоту, оказалось самой сложной частью работы. Во-первых, толщина перемычек сетки должна быть меньше половины её периода, иначе изображения не будет. Во-вторых, если перемычки слишком тонкие, изображение плохо различимо. Если же перемычки слишком толстые, то они затеняют собой

изображение, и наблюдать эффект можно только с достаточно большого расстояния, что не всегда удаётся.

1.2 Наблюдение эффекта на двух сетках

С учётом этих условий мы подобрали две небольшие круглые сетки диаметром 10 см с размером ячеек 1,0 мм и толщиной проволоки 0,2 мм. Если смотреть сквозь них на светлый фон, то наблюдаются светлые фигуры, повторяющие узор сеток, но значительно большего размера (рисунок 2).



а б

Рисунок 2 – Появление муар-эффекта: а – свет проходит через одну сетку; б – через две сетки

Таким образом, основными элементами экспериментальной установки являются две сетки, светлый фон и регистратор (глаза или объектив фотокамеры). При небольших перемещениях сеток относительно друг друга узор меняется и становится отчётливее.

1.3 Установки с точечным источником света

Описанная демонстрация имеет существенный недостаток: при таком наблюдении нельзя измерить расстояние от сеток до изображения. Поэтому мы воспользовались принципом обратимости световых лучей и предложили усовершенствованную установку, которая помимо сеток включает точечный источник света и экран (рисунок 3, а).

Также мы придумали способ получить эффект при помощи только одной сетки. В этом случае сетка располагается перед зеркалом, а между сеткой и экраном помещается точечный источник света (рисунок 3, б). Роль второй сетки здесь играет зеркальное отражение первой.

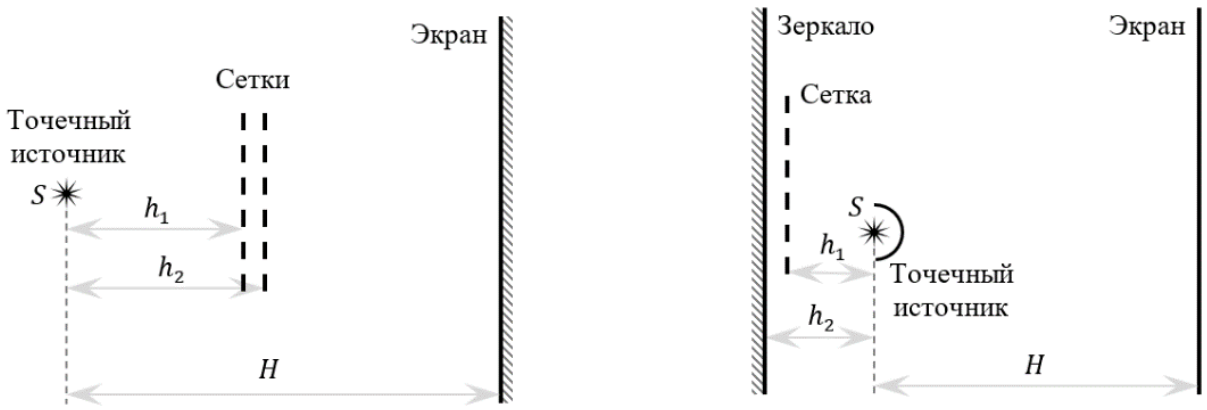


Рисунок 3 – Схемы установок: а – с двумя сетками; б – с одной сеткой и зеркалом

На рисунке 3 обозначены: h_1 – расстояние от точечного источника до первой сетки; h_2 – расстояние от точечного источника до второй сетки (до зеркала); H – расстояние от точечного источника до экрана.

Свет от точечного источника, проходя через две одинаковые москитные сетки, создаёт на экране увеличенное изображение их узора (рисунок 4).

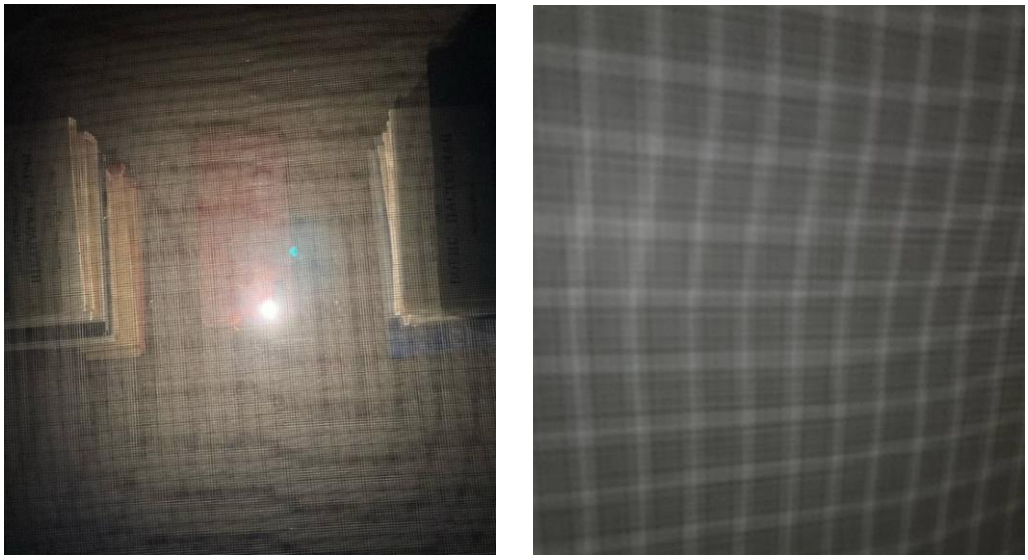


Рисунок 4 – Изображение двух москитных сеток на экране, полученное с помощью точечного источника света

1.4 Результаты наблюдений

Изменяя параметры установки, мы получили следующие качественные результаты:

– размер светлых клеток изображения увеличивается с увеличением периода сеток d;

– размер изображения зависит от расстояния между сетками $\Delta h = h_2 - h_1$: с увеличением этого расстояния размер клеток уменьшается;

– при небольших расстояниях H между источником и экраном изображение выделяется на экране менее чётко;

– размер изображения почти не зависит от расстояния между источником света и сетками, если расстояние между источником и экраном H остаётся постоянным.

Последний результат оказался неожиданным: при перемещении одной сетки между источником и экраном размер её тени заметно меняется, а размер наблюдаемого изображения – нет. Качественному объяснению наблюдений посвящён следующий раздел.

2 Геометрическое объяснение явления

2.1 Тень одной сетки

В однородной среде свет распространяется прямолинейно, поэтому при освещении непрозрачного предмета точечным источником за ним образуется тень, подобная предмету [4, 5]. При освещении сетки с квадратными ячейками точечным источником на экране появляется увеличенная тень сетки (рисунок 5).

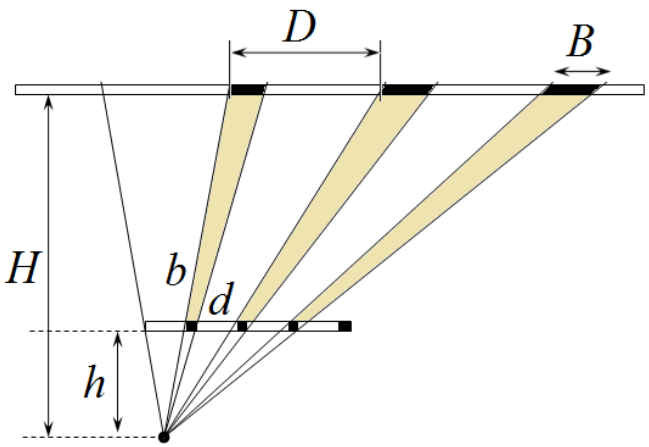


Рисунок 5 – Проекция одной сетки на экран точечным источником света

Из подобия треугольников период изображения сетки D на экране равен

$$D = \frac{H}{h} \cdot d, \qquad (1)$$

где h – расстояние от источника до сетки;

H – расстояние от источника до экрана.

Аналогично ширина тени проволочки B на экране равна

$$B = \frac{H}{h} \cdot b, \qquad (2)$$

Таким образом, одна сетка даёт на экране тёмное изображение, увеличенное в H/h раз, причём его размер сильно зависит от положения сетки. Изображение же, наблюдаемое в опыте с двумя сетками, светлое, а его размер почти не зависит от положения сеток. Следовательно, оно имеет иную природу.

2.2 Наложение двух периодических структур

Рассмотрим две решётки с близкими периодами d_1 и d_2 и шириной полос b_1 и b_2 (рисунок 6). При их наложении полосы в одних местах совпадают, а в других расходятся. Если в некоторой точке полосы решёток совпали, то следующее совпадение произойдёт лишь через большое число периодов – когда накопленное смещение одной решётки относительно другой станет равным одному периоду. Поэтому места совпадений повторяются с периодом, намного превышающим период самих решёток, и возникает крупный муаровый узор [1, 2].

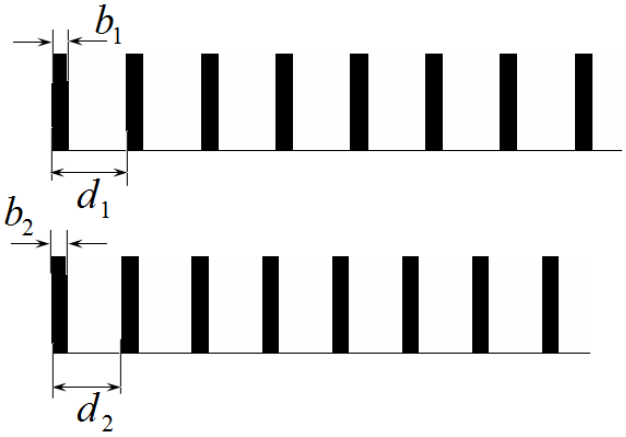


Рисунок 6 – Две решётки с близкими периодами

В установке с точечным источником две одинаковые сетки находятся на разных расстояниях от источника, поэтому, согласно формуле (1), их тени на экране имеют немного различающиеся периоды. Наложение этих теней и создаёт на экране увеличенный узор, повторяющий форму ячеек сеток. Этим объясняется, почему изображение увеличенное и почему его размер уменьшается с ростом расстояния между сетками: чем больше Δh, тем сильнее различаются периоды теней и тем чаще повторяются совпадения.

Там, где тени проволочек обеих сеток совпадают, они закрывают меньшую часть экрана, чем там, где они расходятся. Поэтому места совпадений выглядят светлыми, и изображение получается светлым, а не тёмным.

Тени отдельных проволочек при наблюдении не разрешаются – глаз неосознанно усредняет освещённость по участку, превышающему период сеток. При небольшом движении сеток мелкие детали теней смазываются ещё сильнее, а крупный муаровый узор сохраняется, поэтому он воспринимается чётче.

Количественное описание явления – точная зависимость периода изображения от параметров установки, в том числе объяснение его независимости от положения сеток, распределение освещённости на экране и границы наблюдаемости эффекта – требует построения математической модели и её экспериментальной проверки, что составляет направление дальнейшего исследования.

3 Возможные применения эффекта

Образование светлого изображения при прохождении света через двойную сетку можно использовать при строительстве заборов. Забор из сетки прочный и дешёвый, но не очень эстетичный. Если использовать двойную сетку, то забор можно установить так, чтобы прохожие наблюдали муаровые узоры, похожие на голограмму (рисунок 7).



Рисунок 7 – Муаровый узор на двойном сетчатом ограждении

Эффект двойной сетки можно использовать и в оконных занавесках – это придаёт интерьеру комнаты эффектный вид.

Параметры сеток можно подобрать так, чтобы их поверхность казалась парящей в пространстве: изображение находится за сетками, и при малейших колебаниях создаётся плавающий эффект. Для обоснованного выбора толщины проволоки, размера ячеек и расстояния между сетками потребуется количественная модель явления.

Заключение

В ходе работы исследовано оптическое явление – появление муаровых узоров при прохождении света через две одинаковые сетки. По результатам работы можно сделать следующие выводы:

– подобраны сетки, на которых эффект наблюдается наиболее отчётливо, и определены условия его наблюдения: толщина проволоки должна быть меньше половины периода сетки, но не слишком мала;

– эффект воспроизведён с использованием принципа обратимости световых лучей; разработаны установки с двумя сетками и с одной сеткой и зеркалом, позволяющие получать изображение на экране;

– установлены качественные зависимости: размер изображения растёт с увеличением периода сеток, уменьшается с увеличением расстояния между ними и почти не зависит от положения сеток между источником и экраном;

– дано геометрическое объяснение явления как результата наложения теней двух сеток, имеющих на экране близкие периоды;

– предложены варианты применения эффекта в качестве недорогого декоративного элемента.

Дальнейшее развитие работы связано с построением математической модели явления, компьютерным моделированием распределения освещённости на экране и количественной экспериментальной проверкой полученных зависимостей.

Список использованных источников

1. Пятакова, З. А. О муарах, оживших иллюстрациях и пользе моделей / З. А. Пятакова, А. П. Пятаков // Квант. – 2006. – № 6. – С. 13–17.

2. Кузнецов, Е. А. Теоретические основы муара [Электронный ресурс] / Е. А. Кузнецов. – Режим доступа : https://moluch.ru/young/archive/68/3715/. – Дата доступа : 14.01.2024.

3. Moiré pattern [Электронный ресурс] // Wikipedia : the free encyclopedia. – Режим доступа : https://en.wikipedia.org/wiki/Moir%C3%A9_pattern. – Дата доступа : 19.12.2023.

4. Жилко, В. В. Физика : учеб. пособие для 11-го кл. учреждений общ. сред. образования с рус. яз. обучения / В. В. Жилко, Л. Г. Маркович, А. А. Сокольский. – Минск : Нар. асвета, 2021. – 288 с.

5. Исаченкова, Л. А. Физика : учеб. для 8-го кл. учреждений общ. сред. образования с рус. яз. обучения / Л. А. Исаченкова, Ю. Д. Лещинский. – Минск : Нар. асвета, 2018. – 176 с.