

Модель №.3.

Оптика. Кольца Ньютона

Ким В.Р., Вишневский С.А
Группа М3207

Задание. Моделирование колец Ньютона для линзы заданного радиуса. Рассмотреть *монохроматический* и *квазимонохроматический* свет (задается середина и ширина спектра в нанометрах). Вывод цветного распределения интенсивности интерференционной картины и графика зависимости интенсивности от радиальной координаты.

1 Теория

1.1 Введение

Кольца Ньютона — это интерференционная картина в виде концентрических светлых и тёмных колец, наблюдаемая при освещении системы «выпуклая линза на плоской пластине» светом. Возникает она в результате *интерференции**** отражённого света в тонком воздушном зазоре между поверхностями линзы и пластины. Толщина зазора зависит от расстояния от точки касания, поэтому фаза отражённого света изменяется по радиусу, формируя характерные кольца.

Целью моделирования является вычисление и визуализация распределения интенсивности отражённого света в зависимости от радиальной координаты, как для *монохроматического*** свет, так и для *квазимонохроматического*** освещения.

* **интерференция** — взаимное увеличение или уменьшение результирующей амплитуды двух или нескольких когерентных**** волн при их наложении друг на друга

** **монохроматический свет** — это световые колебания одной частоты.

*** **квазихроматический свет** можно представить как суперпозицию монохроматических волн, частоты которых расположены в узком спектральном диапазоне.

**** **когерентные волны:** если частоты колебаний в обеих волнах одинаковы, а разность фаз возбуждаемых колебаний остается постоянной во времени, то такие волны называются когерентными.

1.2 Геометрия системы

Рассматривается выпуклая линза с радиусом кривизны R , которая лежит на плоской стеклянной пластине. Между ними образуется тонкий воздушный зазор переменной толщины. Вблизи центра (при $h \ll R$) толщина зазора $h(r)$ описывается:

$$h(r) = \frac{r^2}{2R} \quad (1)$$

где:

- r — расстояние от центра контактной точки (в метрах),
- R — радиус кривизны линзы (в метрах),
- $h(r)$ — толщина воздушного слоя.

1.3 Интерференция света

Свет отражается от двух границ: верхней (линза–воздух) и нижней (воздух–пластина). В результате возникают две когерентные волны, интерферирующие между собой.

1.3.1 Разность хода

Разность оптических путей между двумя отражёнными волнами:

$$\Delta = 2h(r) + \frac{\lambda}{2} \quad (2)$$

где λ — длина волны света, а $\lambda/2$ — поправка на сдвиг фазы при отражении от более плотной среды.

1.3.2 Условия интерференции

Для тёмных колец (минимум интенсивности):

$$2h(r) = (2m + 1)\frac{\lambda}{2}, \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (3)$$

$$r_m = \sqrt{(2m + 1)\frac{\lambda R}{2}} \quad (4)$$

$$(5)$$

Для светлых колец (максимум интенсивности):

$$2h(r) = m\lambda \quad (6)$$

$$r_m = \sqrt{m\lambda R} \quad (7)$$

$$(8)$$

где m — порядок интерференции.

1.4 Интенсивность отражённого света

Интенсивность отражённого света рассчитывается как:

$$I(r) = I_0 \cdot \left[1 + \cos\left(\frac{2\pi\Delta}{\lambda}\right) \right] \quad (9)$$

Подставляя разность хода:

$$I(r) = I_0 \cdot \left[1 + \cos\left(\frac{4\pi h(r)}{\lambda} + \pi\right) \right] \quad (10)$$

С учётом $\cos(x + \pi) = -\cos(x)$:

$$I(r) = I_0 \cdot \left[1 - \cos\left(\frac{4\pi h(r)}{\lambda}\right) \right] \quad (11)$$

И, подставляя $h(r)$:

$$I(r) = I_0 \cdot \left[1 - \cos\left(\frac{2\pi r^2}{\lambda R}\right) \right] \quad (12)$$

1.5 Квазимонохроматический свет

При освещении светом с конечной спектральной шириной $\Delta\lambda$, свет состоит из диапазона длин волн, распределённых вокруг центрального значения λ_0 : $\lambda_i \in [\lambda_0 - \Delta\lambda/2, \lambda_0 + \Delta\lambda/2]$. Интенсивность отражения тогда определяется усреднением по спектру:

$$I(r) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[1 - \cos \left(\frac{2\pi r^2}{\lambda_i R} \right) \right] \cdot S(\lambda_i) \quad (13)$$

где $S(\lambda)$ - вклад каждой длины волны λ , он определяется спектральной плотностью, распределенной по Гауссу:

$$S(\lambda) = \exp \left(-\frac{(\lambda - \lambda_0)^2}{2\sigma^2} \right), \quad \sigma = \frac{\Delta\lambda}{2\sqrt{2 \ln 2}} \quad (14)$$

1.6 Цветовое изображение интерференционной картины

Для двумерной визуализации кольцевой структуры строится двумерное поле интенсивности:

$$I(x, y) = I \left(\sqrt{x^2 + y^2} \right) \quad (15)$$

В случае квазимонохроматического света для каждой длины волны λ_i создаётся изображение и суммируется с соответствующим весом. Полученный спектр в каждой точке переводится в RGB с помощью соответствующей модели цветового зрения.

1.7 Итоги

На основе этой теории можно:

- Рассчитать радиусы тёмных и светлых колец;
- Построить зависимость интенсивности от расстояния r ;
- Получить цветное изображение интерференционной картины;
- Исследовать влияние спектральной ширины на чёткость колец.

2 Моделирование

В данном разделе описывается структура программы, реализующей моделирование колец Ньютона

2.1 Пользовательский интерфейс и настройка параметров

В этой части кода реализован графический интерфейс пользователя на базе Tkinter. Интерфейс позволяет задать следующие параметры:

- Радиус кривизны R (м).
- Центральная длина волны λ_0 (нм), которая затем переводится в метры.
- Ширина спектра $\Delta\lambda$ (нм), также переводимая в метры.

2.2 Расчёт интенсивности

Программа рассчитывает интенсивность интерференционной картины в зависимости от радиальной координаты r . Для этого используются две функции:

- **Монохроматический свет:** Функция `intensity_mono` рассчитывает интенсивность по формуле (9), где I_0 представлена коэффициентом нормировки (в коде установлено значение 0.5). Значение выражения $1 - \cos(\cdot)$ изменяется от 0 до 2, поскольку $\cos\left(\frac{2\pi r^2}{\lambda R}\right) \in [-1, 1]$. Если принять $I_0 = 0.5$, то получим

$$I(r) = 0.5 \left[1 - \cos\left(\frac{2\pi r^2}{\lambda R}\right) \right],$$

что нормирует интенсивность в диапазон $[0, 1]$. Такой выбор удобен для визуализации, так как после масштабирования (например, перемножением на 255) можно получить корректное 8-битное изображение, где 0 соответствует полной темноте, а 255 — максимальной яркости.

```
1 def intensity_mono(self, r, wavelength):
2     return 0.5 * (1 - np.cos(2 * np.pi * r ** 2 / (wavelength * self.R)))
3
```

- **Квазимонохроматический случай. Усреднение с использованием спектральной плотности** При квазимонохроматическом освещении свет рассматривается как диапазон длин волн

$$\lambda_i \in \left[\lambda_0 - \frac{\Delta\lambda}{2}, \lambda_0 + \frac{\Delta\lambda}{2} \right],$$

распределённых вокруг центрального значения λ_0 . Теоретически интенсивность определяется по формуле (13), где $S(\lambda)$ задаётся Гауссовой функцией (14)

В реализации используется следующий подход:

- Выбирается 20 равномерно распределённых точек в указанном диапазоне длин волн.
- Для каждой длины волны вычисляется вклад (вес) $S(\lambda)$ с помощью функции `spectral_density`.
- Весовые коэффициенты нормируются так, чтобы их сумма была равна 1. Это необходимо, чтобы итоговое усреднение не зависело от числа дискретных точек.
- Итоговая интенсивность вычисляется как сумма произведений интенсивности для каждой длины волны (рассчитанной по функции `intensity_mono`) и соответствующего весового коэффициента.

Таким образом, формула расчёта интенсивности в коде принимает вид:

$$I_{\text{quasi}}(r) = \sum_{i=1}^{20} w_i I_{\text{mono}}(r, \lambda_i),$$

где

$$w_i = \frac{S(\lambda_i)}{\sum_{j=1}^{20} S(\lambda_j)}.$$

```

1  def spectral_density(self, wavelength):
2      sigma = self.delta_lambda / (2 * np.sqrt(2 * np.log(2)))
3      return np.exp(-((wavelength - self.lambda0) ** 2) / (2 * sigma ** 2))
4
5  def intensity_quasi(self, r):
6      wavelengths = np.linspace(self.lambda0 - self.delta_lambda / 2,
7                                self.lambda0 + self.delta_lambda / 2, 20)
8      total = np.zeros_like(r)
9      weights = np.zeros_like(wavelengths)
10     for i, wl in enumerate(wavelengths):
11         weights[i] = self.spectral_density(wl)
12     # normalising
13     weights /= np.sum(weights)
14
15     for wl, weight in zip(wavelengths, weights):
16         total += weight * self.intensity_mono(r, wl)
17     return total
18

```

2.3 Построение двумерного поля интенсивности

Для визуализации интерференционной картины создаётся двумерная координатная сетка, где интенсивность $I(x, y)$ определяется как функция $I(\sqrt{x^2 + y^2})$. Это соответствует преобразованию теоретической зависимости $I(r)$ в изображение, что позволяет получить кольцевую структуру модели.

```

1  x = np.linspace(-0.01, 0.01, self.size)
2  y = np.linspace(-0.01, 0.01, self.size)
3  xx, yy = np.meshgrid(x, y)
4  r = np.sqrt(xx ** 2 + yy ** 2)
5

```

2.4 Преобразование интенсивности в изображение и цветное отображение

После расчёта интенсивности выполняется нормировка и преобразование полученных значений в изображение:

- Значения интенсивности умножаются на 255 для перевода в 8-битное представление.
- В случае монохроматического света реализуется функция `wavelength_to_rgb`, которая приближённо преобразует длину волны в соответствующий RGB-цвет. Это упрощение сделано для наглядного отображения спектральных характеристик, так как теория не диктует конкретный алгоритм преобразования спектра в цвет.