



НАНОСТРУКТУРЫ

математическая физика и моделирование



Nanostructures. Mathematical physics & modelling

НАНОСТРУКТУРЫ

математическая физика и моделирование

Nanostructures.
Mathematical Physics & Modelling

2024, volume 24 (2)

Наноструктуры. Математическая физика и моделирование

Редколлегия:

**В.А. Аветисов, А.А. Белолипецкий, И.В. Волович,
В.В. Гусаров, Н.А. Дюжев, П.Н. Дьячков,
Р.Г. Ефремов, Ю.Ф. Крупянский, М.А. Мазо,
А.В. Махиборода (ответственный секретарь), А.Ю. Морозов,
С.А. Никитов, Г.Э. Норман, В.А. Тулин, Ю.А. Флёров,
А.С. Холево, А.Р. Хохлов, А.В. Чаплик,
Л.А. Чернозатонский, К.В. Шайтан**

Электронная версия журнала размещается на сайте
<http://nano-journal.ru>

Журнал включен в список ВАК и индексируется в РИНЦ

Адрес редакции:

123458, Москва, ул. Таллинская, д. 34, каб. 429
+7 (495) 916-88-76
nanostructures@hse.ru

Контакты для представления статей и деловой переписки

Ответственный секретарь А.В. Махиборода
+7 (916) 578-95-27
makhiboroda@yandex.ru

Москва

© 2024, ООО Сенсор Микрон

Содержание

В.И. Корнеев, Г.Д. Демин, П.Ю. Глаголев, Н.А. Дюжев
Анализ формирования изображения оптической системой на основе преломляющих линз в диапазоне мягкого рентгеновского излучения5

Актуальные публикации прошлых лет

Переписка между К. Уоддингтоном и Р. Томом37

Д. Мичи, Р. Чемберс
«Ящики» как модель формирования пространственной структуры51

О теме второго симпозиума.61

Информация и правила для авторов68

Contents

V.I. Korneev, G.D. Demin, P.Yu. Glagolev, N.A. Djuzhev Analysis of image formation by an optical system based on refractive lenses in the soft X-ray range	5
--	---

Actual matter published in the last years

Correspondence between C.H. Waddington and R. Thom	37
---	----

D. Michie, R.A. Chambers, Boxes as a spatial structure formation model	51
--	----

On the theme of the second symposium	61
---	----

The information and rules for authors	68
---	----

АНАЛИЗ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ НА ОСНОВЕ ПРЕЛОМЛЯЮЩИХ ЛИНЗ В ДИАПАЗОНЕ МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В.И. Корнеев, Г.Д. Демин, П.Ю. Глаголев, Н.А. Дюжев

*Национальный исследовательский университет «МИЭТ», Москва, Зеленоград
E-mail: kvi_07@mail.ru*

Поступила 25.10.2024

В работе рассматривается использование преломляющих линз для рентгеновской оптики в диапазоне мягкого рентгеновского излучения, которое характеризуется низким коэффициентом преломления и высоким поглощением в материале линзы. В работе сравниваются различные виды линз: двояковогнутые, дифракционные и киноформные. Для получения качественного изображения предлагается использовать киноформные линзы, которые существенно снижают поглощение излучения. Для увеличения числовой апертуры объектив содержит набор одинаковых киноформных линз. Для описания формирования изображения в составном объективе применяются уравнения Гельмгольца в параксиальном приближении. Изучены пути построения функции пропускания линзы с учетом поглощения с помощью аналитического и численного методов решения. Исследован механизм формирования изображения в фокусе линзы с учетом дифракционных эффектов и поглощения рентгеновского излучения в выбранном диапазоне длин волн.

Ключевые слова: преломляющая рентгеновская оптика, киноформные линзы, рентгеновская литография, мягкое рентгеновское излучение.

УДК [535.32+535-34+535-42](050)

DOI: 10/31145/2224-8412-2024-24-2-5-36

Введение

Рост производительности и снижение энергопотребления полупроводниковых приборов напрямую определяются возможностью их масштабирования до предельных критических размеров, находящихся на уровне единиц нм. Современное производство твердотельной наноэлектроники на технологических узлах ниже 10 нм требует использования инструмен-

тов нанолитографии в экстремальном ультрафиолете (EUV) с длиной волны излучения λ около 13,5 нм [1, 2]. Оптические системы EUV-литографов последнего поколения состоят из набора рентгеновских многослойных брэгговских зеркал с высокой отражательной способностью, близкой к 70 %, и числовой апертурой $NA=0,33$, что обеспечивает разрешение на уровне 13 нм [3].

Однако, существующие литографы это дорогостоящие и громоздкие, в несколько этажей, установки. И самое главное, в этих установках фиксированные источники излучения и соответственно, фиксированная длина волны излучения. Поэтому, в настоящее время в мире ведутся активные исследования в области рентгеновской литографии на основе компактных синхротронных источников когерентного рентгеновского излучения с киловаттным уровнем мощности и длиной волны меньшей 13,5 нм [4] и лазерно-плазменных (ЛП) источников, генерирующих излучение с длиной волны менее 13,5 нм [5–7]. Кроме того, рядом исследовательских групп предлагаются концепции оптических элементов, альтернативных многослойным брэгговским зеркалам: дифракционная оптика (зонные пластинки Френеля [8]), рефракционная оптика (двояковогнутые параболические линзы [9]), а также составные (рефракционно-дифракционные) киноформные линзы [10].

В работе рассматривается использование преломляющих линз для рентгеновской литографии в диапазоне $1 \div 14$ нм, где существенное влияние на качество изображения оказывает поглощение излучения в материале линзы. Рассматривается общая схема формирования изображения в проекционной преломляющей рентгеновской оптике, где объективом является составная линза, состоящая из двояковогнутых элементарных линз, а также дифракционных и киноформных линз.

В методологических целях, для иллюстрации применения полученных теоретических соотношений в диапазоне мягкого рентгеновского излучения была выбрана популярная в настоящее время длина волны $\lambda = 13.5$ нм. Из возможных материалов линзы, таких как кремний, алмаз, бериллий, был выбран бериллий, у которого наибольшее отношение декремента показателя преломления к коэффициенту поглощения на этой длине волны $\delta / \beta = 7.3$.

Литография на основе проекционной оптической системы должна иметь источник излучения, который направляет излучение на шаблон. За шаблоном стоит объектив, рефракционная линза, фокусирующая излучение на слой фоторезиста Рис.1.

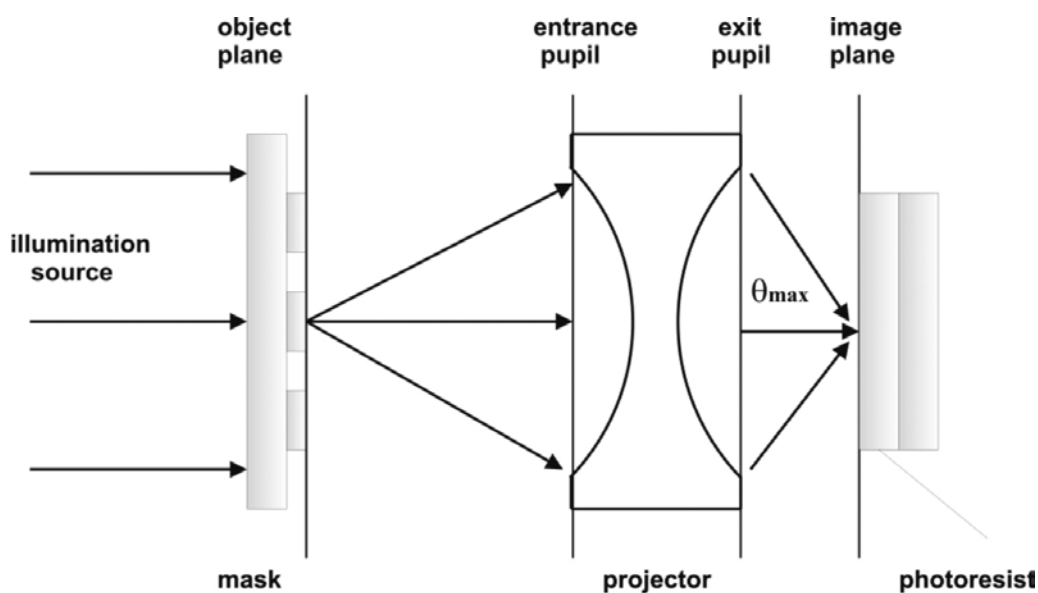


Рис.1. Схема формирования изображения в проекционной литографии.

Как видно на рисунке, излучение в оптической системе претерпевает три этапа преобразования. На первом этапе излучение распространяется в пустом пространстве между плоскостью объекта, маска, и входной плоскостью линзы. Это расходящаяся волна, содержащая информацию об узоре маски в виде дифракционных порядков, падающих на поверхность линзы. На втором этапе излучение проходит через линзу, где фронт расходящейся волны преобразуется во фронт сходящейся волны. На третьем этапе излучение распространяется в пустом пространстве между выходной плоскостью линзы и плоскостью изображения, фоторезиста. Излучение имеет вид сходящейся волны, содержащей в себе все дифракционные порядки, идеальный случай, попавшие на линзу.

1. Дифракционная теория распространения излучения в пустом пространстве

Рассмотрим распространение излучения в области между маской и входной плоскостью линзы, и в области между выходной плоскостью линзы и фоторезистом.

Пусть на маску падает плоская волна, тогда на выходе из маски $z = 0$ поле излучения будет характеризоваться функцией $f(x, y)$, Рис.2.

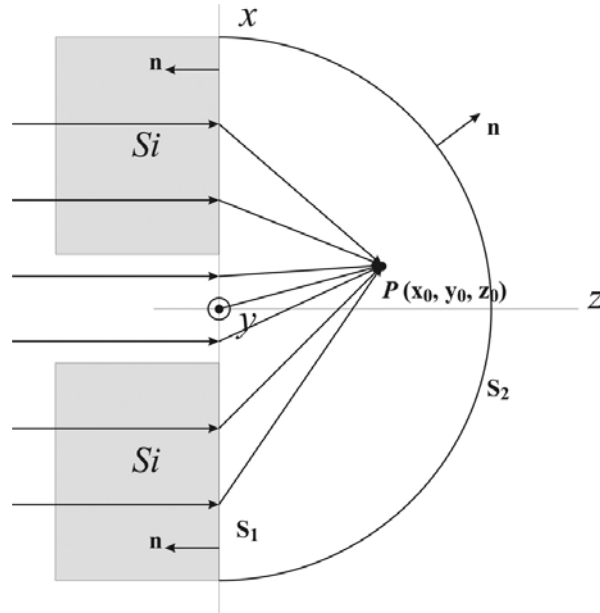


Рис.2. Схема прохождения излучения через отверстия в маске и нахождения поля в заданной точке (x_0, y_0, z_0) . Плоскость S_1 и полусфера S_2 ограничивают область решения уравнения Гельмгольца.

Далее задача состоит в том, чтобы получить распределение излучения в плоскости наблюдения x_0, y_0 на расстоянии z_0 от плоскости объекта S_1 Рис.2. Электромагнитное излучение, распространяющееся в однородной области между объектом и плоскостью наблюдения, должно удовлетворять скалярному уравнению Гельмгольца [11], где поле g — любая проекция электрического или магнитного поля внутри области ограниченной плоскостью S_1 и полусферой S_2 .

$$\Delta g + k^2 g = 0, \quad k = \frac{\omega}{c} \quad (1)$$

Будем предполагать, что расстояния от маски много больше длины волны излучения.

$$z_0 \gg \lambda, \quad z_0 k \gg 1, \quad kR \gg 1, \quad R = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + z_0^2}$$

Отодвигая полусферу S_2 на бесконечность в этом приближении, можно получить решение уравнения Гельмгольца в виде следующего интеграла.

$$g(x_0, y_0, z_0) = \frac{k}{2\pi i} \int_{S_1} f(x, y) \frac{e^{ikR}}{R} \frac{z_0}{R} dS \quad (2)$$

Этот интеграл называют интегралом Кирхгофа или формулой Грина [11].

Задачу определения поля $g(x, y)$ (решения уравнения Гельмгольца) в некоторой плоскости $z = \text{const} > 0$ по заданному полю $f(x, y)$ в плоскости $z = 0$ можно рассматривать как задачу линейной фильтрации L , ибо закон преобразования «входного сигнала» — поля в плоскости $z = 0$ в «выходной сигнал» — искомое поле в плоскости $z = \text{const} > 0$ определяется линейным уравнением Гельмгольца [12].

$$f(x, y) \rightarrow [L] \rightarrow g(x, y)$$

Операцию преобразования входного сигнала $f(x, y)$ в выходной сигнал $g(x, y)$ можно записать в виде.

$$L[f(x, y)] = g(x, y)$$

В приближении интеграла Кирхгофа эта операция имеет вид.

$$g(x, y) = \frac{k}{2\pi i} \int_{-\infty}^{\infty} d\xi \int_{-\infty}^{\infty} d\eta f(\xi, \eta) \frac{e^{ikR}}{R} \frac{z}{R} \quad (3)$$

$$R = \sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + z^2}$$

В теории дифракции можно использовать два подхода к изучению свойств поля излучения — спектральный и полевой подход [11]. При спектральном подходе мы исследуем преобразование пространственного спектра, при полевым подходе изучается преобразование самого поля как функции координат.

При определении пространственного спектра поля используется преобразование Фурье, где разложение поля производится по плоским волнам, с заданной комплексной амплитудой и волновым вектором $\vec{k}(k_x, k_y, k_z)$. Плоская волна удовлетворяет уравнению Гельмгольца, и поэтому проекции волнового вектора связаны соотношением.

$$k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = k^2, \quad k = \frac{\omega}{c}$$

В результате для входного поля $f(x, y)$ имеем двухмерное преобразование Фурье.

$$f(x, y) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} dk_x \int_{-\infty}^{\infty} dk_y F(k_x, k_y) e^{i(k_x x + k_y y)} \quad (4)$$

Подынтегральное выражение имеет вид.

$$\frac{1}{4\pi^2} F(k_x, k_y) dk_x dk_y e^{i(k_x x + k_y y)}$$

Это есть поле плоской волны с волновым вектором $\vec{k}(k_x, k_y, k_z)$, $k_z = \sqrt{k^2 - k_x^2 - k_y^2}$ в плоскости $z = 0$. Амплитуда и начальная фаза этой волны определяются комплексным множителем $F(k_x, k_y)$. Сделаем замену переменных $k_x = u$, $k_y = v$, где u, v называются пространственными частотам. В этом случае преобразование Фурье будет иметь вид.

$$f(x, y) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} du \int_{-\infty}^{\infty} dv F(u, v) e^{i(ux + vy)} \quad (5)$$

Функция $F(u, v)$ называется преобразованием Фурье (или спектром) функции $f(x, y)$. Символически этот интеграл часто записывают в виде $f(x, y) \Leftrightarrow F(u, v)$.

По заданной функции $f(x, y)$ ее спектр может быть найден по формуле (обратное преобразование Фурье).

$$F(u, v) = \int_{-\infty}^{\infty} dx \int_{-\infty}^{\infty} dy f(x, y) e^{-i(ux + vy)} \quad (6)$$

Искомое поле $g(x, y)$ в плоскости $z = \text{const} > 0$ можно также выразить через его спектр $G(u, v)$ с помощью преобразования Фурье.

$$g(x, y) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} du \int_{-\infty}^{\infty} dv G(u, v) e^{i(ux + vy)} \quad (7)$$

Можно показать, что спектры $F(u, v)$ и $G(u, v)$ полей на входе $f(x, y)$ и выходе $g(x, y)$ связаны простым соотношением.

$$G(u, v) = F(u, v) \cdot \exp\left(iz\sqrt{k^2 - u^2 - v^2}\right) \quad (8)$$

Здесь величина $H(u, v)$ называется частотной характеристикой свободного пространства.

$$H(u, v) = \exp\left(iz\sqrt{k^2 - u^2 - v^2}\right) \quad (9)$$

Поэтому связь между спектрами можно представить в виде.

$$G(u, v) = F(u, v) \cdot H(u, v) \quad (10)$$

Эта формула связывает спектры полей на входе в плоскости $z = 0$ и выходе в плоскости $z = \text{const} > 0$, т. е. эта формула показывает, как преобразуется спектр поля при изменении координаты z .

При полевом подходе частотная характеристика свободного пространства $H(u, v)$ связана с импульсным откликом свободного пространства $h(x, y)$ преобразованием Фурье.

$$h(x, y) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} du \int_{-\infty}^{\infty} dv H(u, v) e^{i(ux+vy)} \quad (11)$$

Используем Фурье-анализ, теорему свертки для произведения спектров [16].

$$G(u, v) = F(u, v) \cdot H(u, v) \rightarrow g(x, y) = f(x, y) \otimes \otimes h(x, y) \quad (12)$$

В результате получаем связь между полем на входе и выходе в виде интеграла свертки.

$$g(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} d\xi \int_{-\infty}^{\infty} d\eta f(\xi, \mu) h(x - \xi, y - \eta) \quad (13)$$

Можно показать, что импульсный отклик вычисляется с помощью формулы.

$$h(x, y) = -\frac{1}{2\pi} \frac{d}{dz} \frac{e^{ikR}}{R}, \quad R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (14)$$

Таким образом, описание дифракционных явлений основано или на спектральном равенстве (10), или на интеграле Кирхгофа (3), который сводится к свертке (13).

Характер дифракционных явлений определяется величиной трех основных параметров. Это, во-первых, длина волны λ , далее, расстояние от препятствия до плоскости наблюдения z и наконец, характерный линейный размер препятствия D (например, размером отверстия в непрозрачном экране, или характерные поперечные размеры каналов в маске). Обычно вводят безразмерную комбинацию этих параметров — волновой параметр P с помощью соотношения.

$$P = \frac{\sqrt{\lambda z}}{D}$$

Детальный анализ дифракционных явлений показывает, что области геометрической оптике соответствует условие $P \ll 1$. В области дифракции Френеля имеем $P \sim 1$. Области дифракции Фраунгофера соответствует условие $P \gg 1$.

Дифракция Френеля

Дифракцию Френеля можно получить из спектральных соотношений (8), (9), если предположить выполнение условий для пространственных частот.

$$z\sqrt{k^2 - u^2 - v^2} \approx kz - \frac{u^2 + v^2}{2k}z$$

Также можно получить соотношения дифракции Френеля исходя из интеграла Кирхгофа (3), если предположить выполнение условий для координат.

$$kR \approx kz - \frac{x^2 + y^2}{2z}k$$

В результате для частотной характеристики получаем следующее приближение.

$$H(u, v) \approx e^{ikz} \cdot \exp\left(-i \frac{u^2 + v^2}{2k}z\right) \quad (15)$$

Аналогично, для импульсного отклика получаем приближение.

$$h(x, y) \approx \frac{1}{i\lambda z} e^{ikz} \cdot \exp\left(ik \frac{x^2 + y^2}{2z}\right) \quad (16)$$

Выражение для поля на выходе можно записать, используя интеграл свертки (13).

$$g(x, y) = \frac{1}{i\lambda z} e^{ikz} \int_{-\infty}^{\infty} d\xi \int_{-\infty}^{\infty} d\eta f(\xi, \mu) \exp\left(i \frac{k}{2z} [(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2]\right) \quad (17)$$

Интеграл Френеля (17) можно записать в символическом виде.

$$g(x, y) = \frac{1}{i\lambda z} e^{ikz} f(x, y) \otimes \otimes \exp\left(ik \frac{x^2 + y^2}{2z}\right) \quad (18)$$

Эквивалентную связь между спектрами запишем в следующем виде.

$$G(u, v) = e^{ikz} \cdot F(u, v) \cdot \exp\left(-i \frac{u^2 + v^2}{2k} z\right) \quad (19)$$

Анализ показывает, что область применимости интеграла Френеля (17) очень широкая, она в частности охватывает условия $P \ll 1$ и $P \gg 1$. Выделяют области геометрической оптики и Фраунгоферовой дифракции потому, что в этих областях можно получить более простые формулы, чем интеграл Френеля (17).

Дифракция Фраунгофера

Дифракцию Фраунгофера можно рассматривать как предельный случай дифракции Френеля, когда выполняется неравенство $P \gg 1$. В этом случае интегралу Френеля (17) можно придать следующий вид.

$$g(x, y) = \frac{1}{i\lambda z} e^{ikz} \exp\left(ik \frac{x^2 + y^2}{2z}\right) \int_{-\infty}^{\infty} d\xi \int_{-\infty}^{\infty} d\eta f(\xi, \mu) \exp\left(-i \frac{k}{z} [x\xi + y\eta]\right) \quad (20)$$

Полученная формула (20) называется интегралом Фраунгофера. Легко видеть, что интеграл в формуле (20) имеет вид преобразования Фурье $F(u, v)$ от входного поля $f(x, y)$ от аргументов $u = kx/z$, $v = ky/z$.

Таким образом, поле в зоне Фраунгофера можно найти с помощью следующей формулы.

$$g(x, y) = \frac{1}{i\lambda z} e^{ikz} \exp\left(ik \frac{x^2 + y^2}{2z}\right) F\left(\frac{kx}{z}, \frac{ky}{z}\right) \quad (21)$$

2. Функция пропускания линзы

Простейшей центрированной оптической системой, формирующей изображение, является тонкая линза.

Если речь идет о видимом диапазоне излучения, то в тонкой линзе поглощением света, а значит, и изменением амплитуды проходящей световой волны можно пренебречь. Тонкая линза просто задерживает фронт падающей волны на величину, пропорциональную толщине линзы. Поэтому действие тонкой линзы на проходящую через нее волну сводится только к изменению фазы волны. В этом смысле действие тонкой линзы на падающую на нее волну можно рассматривать как действие фазового экрана (фазового транспаранта), модулирующего волну по фазе.

Для рентгеновского излучения, которое достаточно сильно поглощается материалами, из которых изготавливаются линзы, линза является не только фазовым, но и амплитудным модулятором. Пусть линза освещается плоской волной с комплексной амплитудой $f_0(x, y)$.

Что произойдет с волной в плоскости выхода из линзы? Переменная поглощательная способность линзы приводит к тому, что амплитуда волны на выходе будет не константой, а некоторой функцией координат $a(x, y)$. Переменный показатель преломления или толщина линзы приводят к различному в разных точках набегу фазы, так что фронт прошедшей волны не будет плоским, он будет деформирован по некоторому закону $\phi(x, y)$.

Таким образом, комплексная амплитуда волны $f(x, y)$ на выходе из линзы будет иметь вид.

$$f(x, y) = a(x, y)e^{i\phi(x, y)}f_0(x, y)$$

Введем функцию пропускания линзы $t(x, y)$.

$$t(x, y) = a(x, y)e^{i\phi(x, y)} \quad (22)$$

Тогда поля на входе и выходе линзы будут связаны соотношением.

$$f(x, y) = t(x, y) \cdot f_0(x, y) \quad (23)$$

Заметим, что эта формула выполняется для произвольного поля, которое можно представить с помощью преобразования Фурье, как суперпозицию плоских волн.

Рассмотрим линзу без поглощения, тогда функция пропускания будет иметь вид.

$$t(x, y) = e^{i\phi(x, y)} \quad (24)$$

Если линза тонкая и рассматриваются параксиальные лучи, то формула для фазы $\phi(x, y)$ находится довольно легко. Так, например, для двояковогнутой линзы Рис.1 с радиусом кривизны R и для рентгеновского излучения получаем следующую формулу.

$$t(x, y) = \exp\left(-i\frac{k}{2f}(x^2 + y^2)\right) \quad (25)$$

Здесь фокусное расстояние f находится по формуле.

$$f = \frac{R}{2(1-n)} = \frac{R}{2\delta}$$

Здесь показатель преломления с учетом поглощения имеет вид $n = 1 - \delta + i\beta$.

Если подставить функцию пропускания линзы в форме (25) в соотношение (23) для поля на входе в линзу и выходе, то можно увидеть, что плоская волна на входе в линзу превращается в сферическую сходящуюся волну на выходе из линзы.

Если учитывать поглощение в линзе, то множитель $a(x, y)$ в функции пропускания (22) уже не будет равен единице.

Пример линзы с поглощением

Для определенного класса преломляющих линз для рентгеновского излучения, оказывается можно получить приближенное аналитическое выражение для функции пропускания $t(x, y)$ с учетом поглощения (В. Кон, А. Снигирев) [13, 14].

Рассматриваем составную преломляющую линзу, которая состоит из N двояковогнутых линз радиуса кривизны R и толщины p Рис.3.

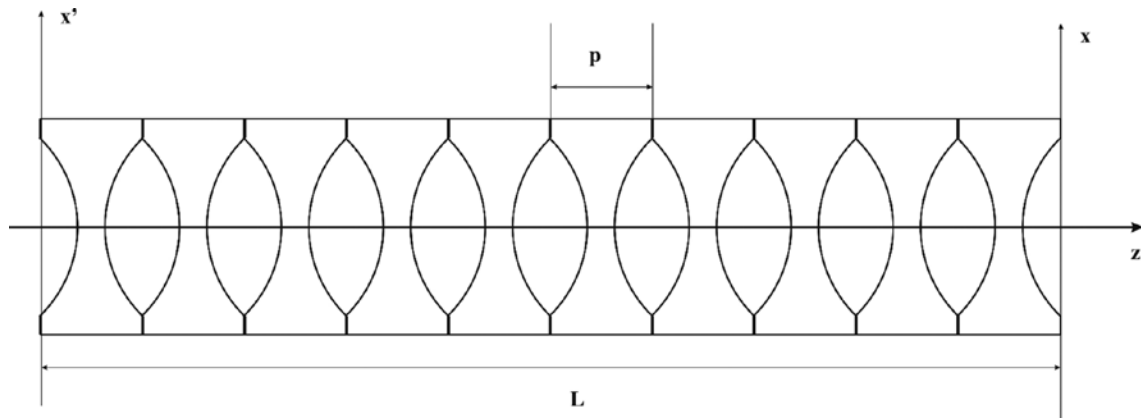


Рис.3. Составная преломляющая рентгеновская линза.
Здесь p — толщина элементарной двояковогнутой линзы.

Электрическое поле в линзе ищем в следующем виде.

$$E(x, y, z) = \exp(ikz) A(x, y, z)$$

Уравнение Гельмгольца для огибающей (или амплитуды) $A(x, y, z)$ принимает вид.

$$2ik \frac{\partial A}{\partial z} + \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} + \Delta_{\perp} A + k^2 (\epsilon(\vec{r}) - 1) A = 0$$

Если амплитуда $A(x, y, z)$ медленно меняется вдоль оси z на расстояниях порядка длины волны, то вторым членом пренебрегают. Получают параболическое уравнение. Это хорошее приближение для параксиальных лучей.

Параболическое уравнение, внутри составной линзы можно записать в следующем виде.

$$\frac{\partial A}{\partial z} = -ik\eta s(x, y, z)A + \frac{i}{2k}\Delta_{\perp}A \quad (26)$$

$$\eta = 1 - n = \delta - i\beta = \delta(1 - i\gamma), \quad \gamma = \frac{\beta}{\delta}$$

Здесь $s(x, y, z)$ — функция координат, которая равна 1 в области занятой материалом линзы и 0 в области не занятой. Идея В. Кона, А. Снигирева состояла в переходе от составной преломляющей линзы к непрерывно преломляющей линзе, где функция $s(x, y, z)$ усреднялась вдоль оси z и заменялась функцией $\bar{s}(x, y)$.

$$\bar{s}(x, y) = s_0 + \frac{x^2}{pR} + \frac{y^2}{pR}, \quad s_0 = \frac{d}{p}$$

Здесь d — самое тонкое место двояковогнутой линзы. Параболическое уравнение решается с граничным условием $A_0(x, y) = A(x, y, 0)$ на входе в линзу. В этом случае решение параболического уравнения можно записать в виде интегрального уравнения.

$$A(x, y, z) = \iint d x' d y' P(x, y, x', y', z) A_0(x', y') \quad (27)$$

Ядро интегрального уравнения $P(x, y, x', y', z)$ называется пропагатором линзы.

Для пропагатора линзы $P(x, y, x', y', z)$ удастся получить аналитические формулы. Пусть на линзу падает плоская волна с амплитудой E_0 , тогда интеграл (27) легко вычисляется. В результате получаем электрическое поле в любой точке линзы как функцию координат $E(x, y, z)$ в следующем виде.

$$E(x, y, z) = \frac{E_0}{c_z} \exp(ik(1 - \eta s_0)z) \exp\left(-i\pi \frac{s_z(x^2 + y^2)}{\lambda z_0 c_z}\right) \quad (28)$$

Параметры в выражении (28) определяются следующими формулами.

$$z_0 = \sqrt{\frac{pR}{2\eta}}, \quad c_z = \cos \frac{z}{z_0}, \quad s_z = \sin \frac{z}{z_0}$$

Если рассмотреть поле на выходе из линзы $z = pN$, то получаем следующее выражение для функции пропускания линзы.

$$t(x, y) = \frac{1}{c_z} \exp(ik(1 - \eta s_0)pN) \exp\left(-i\pi \frac{s_z(x^2 + y^2)}{\lambda z_0 c_z}\right) \quad (29)$$

$$c_z = \cos \frac{pN}{z_0}, \quad s_z = \sin \frac{pN}{z_0}$$

Если рассматривать двухмерную задачу, то для линзы составленной из цилиндрических линз получается следующее выражение для функции пропускания.

$$t(x) = \frac{1}{\sqrt{c_z}} \exp(ik(1 - \eta s_0)pN) \exp\left(-i\pi \frac{s_z x^2}{\lambda z_0 c_z}\right) \quad (30)$$

Сравним результаты, полученные с помощью параболического уравнения в модификации В. Кона, А. Снигирева с точным решением на Comsol на примере составной линзы из 5 преломляющих линз.

В качестве материала линзы возьмем бериллий Be на длине волны излучения $\lambda = 13.5 \text{ nm}$. Показатель преломления бериллия $n = 1 - \delta + i\beta$ на этой длине волны имеет следующие коэффициенты преломления и поглощения $\delta = 0.011$, $\beta = 0.0015$. Выберем следующие геометрические размеры линзы $R = 3 \text{ mm}$, $p = 3.5 \text{ mkm}$, $d = 100 \text{ nm}$. Диаметр линзы или геометрическая апертура, выбран $A = 200 \text{ mkm}$.

На Рис.4 показано распределение электрического поля внутри составной преломляющей линзы, рассчитанное с помощью программы Comsol. В качестве граничного условия берется плоская волна на входе в линзу.

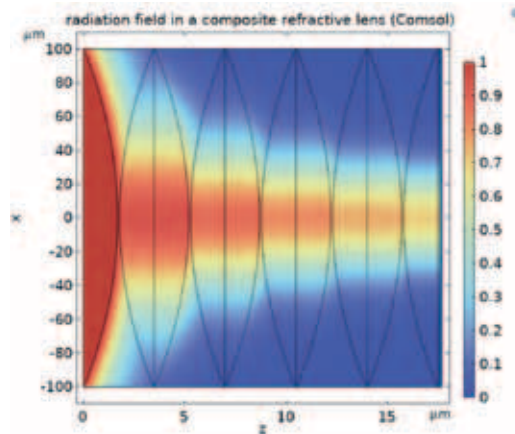


Рис.4. Распределение поля излучения в составной преломляющей линзе, составленной из пяти элементарных двояковогнутых линз.

На Рис.5 показано распределение поля внутри непрерывно преломляющей линзы, найденное с помощью аналитических формул.

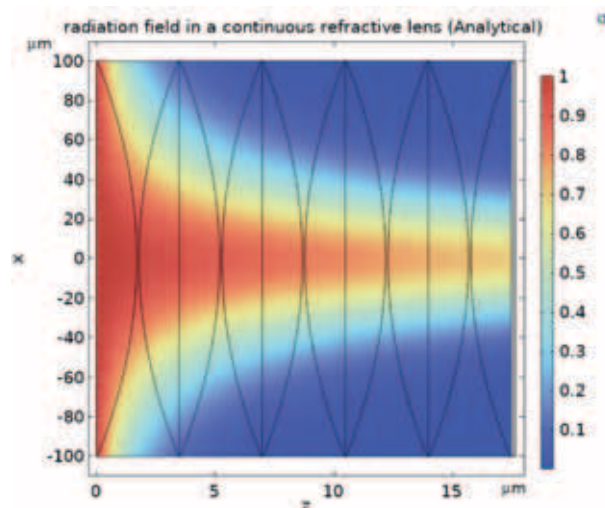


Рис.5. Распределение поля излучения в непрерывно преломляющей линзе, созданной из пяти элементарных линз.

Совпадение очень хорошее, учитывая, что непрерывно преломляющая линза В. Кона, А. Снигирева не имеет структуры вдоль оси линзы, вдоль оси z . Более того, сравнение поля излучения на выходе из линзы показывает блестящее совпадение результатов расчета двумя указанными способами.

На Рис.6 показано распределение амплитуды $a(x)$ функции пропускания линзы.

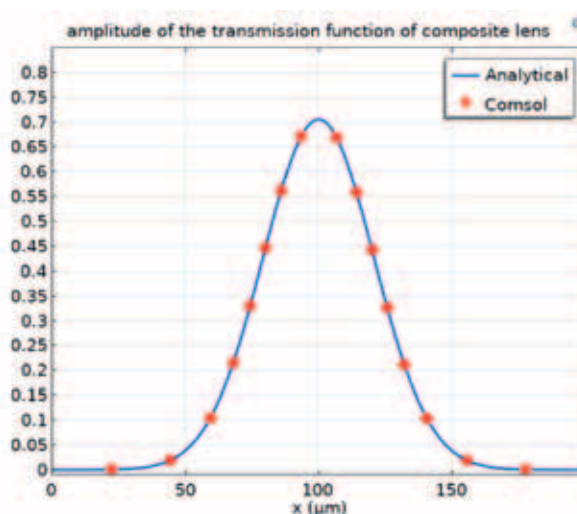


Рис.6. Зависимость амплитуды функции пропускания $|t(x)|$ составной преломляющей линзы от поперечной координаты x . Красные звездочки — результат моделирования в программе Comsol.

На Рис.7 показано распределение фазы $\phi(x)$ функции пропускания линзы.

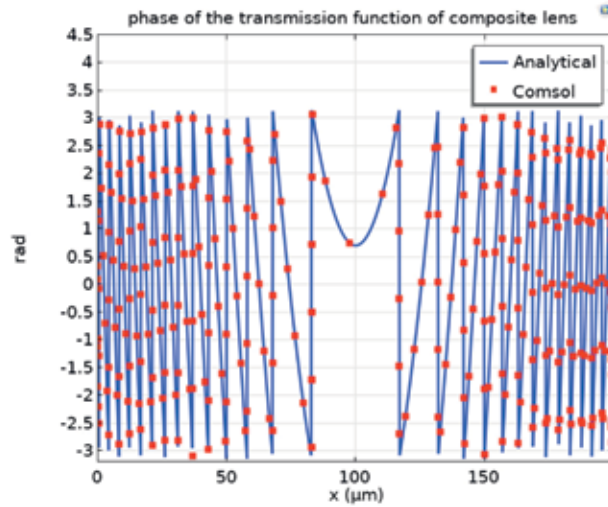


Рис.7. Зависимость фазы функции пропускания $\phi(x)$ составной преломляющей линзы от поперечной координаты x . Красные звездочки — результат моделирования в программе Comsol.

На Рис.7 график фазы изображен в форме, где фаза $\phi(x)$ является аргументом комплексного числа, и аргумент лежит в интервале $-\pi < \phi(x) < \pi$. Поэтому, если развернуть график Рис.7 в вертикальном направлении, то можно увидеть, что зависимость фазы функции пропускания линзы от поперечной координаты x имеет параболическую зависимость, как это показано в формуле (25). Это означает, что фронт волны на выходе из линзы преобразуется во фронт сферической волны, сходящейся в точку фокуса.

Заметим, что прекрасное совпадение результатов моделирования в программе Comsol и аналитических расчетов Рис.6, Рис.7, получено для составной линзы, содержащей 5 элементарных двояковогнутых линз. Если взять меньшее число элементарных линз $N = 4$, то результаты моделирования двумя способами будут отличаться.

Для большего числа элементарных линз $N \geq 5$, совпадение результатов оказывается снова прекрасным, что подтверждает одно из положений теории В. Кона, А. Снигирева, число элементарных линз должно быть большим $N \gg 1$.

Кроме того, здесь продемонстрированы возможности программы Comsol для нахождения функции пропускания $t(x, y)$ линзы сложной формы с учетом поглощения.

Поглощение рентгеновских лучей приводит к тому, что плоская волна при прохождении через линзу приобретает гауссову форму, и как видно на Рис.4, чем больше z , тем сильнее сжимается гауссов пучок. Если параметр $\gamma = \beta / \delta$ много меньше единицы, то можно получить формулу для оценки ширины a_z гауссова пучка на половине высоты интенсивности [17].

$$a_z = 0.664 \sqrt{\frac{\lambda p R}{2z \beta}}$$

Рассмотрим ширину гауссова пучка a_z на выходе из линзы, тогда $z = L$ — длина линзы, $N = L / p$ — число преломляющих линз в составной линзе. В этом случае формула для ширины гауссова пучка примет вид.

$$a_z = 0.664 \sqrt{\frac{\lambda R}{2N \beta}} \quad (31)$$

Для рассматриваемого примера ширина пучка на выходе из линзы равна величине $a_z = 35 \text{ мкм}$. Если ширину пучка оценивать по ширине на половине высоты амплитуды поля, то получится значение $a_z = 50 \text{ мкм}$, которое прекрасно согласуется с распределением амплитуды функции пропускания линзы Рис.6.

Ширину гауссова пучка на выходе из линзы, определяемую по формуле (31), принято называть эффективной апертурой составной преломляющей линзы. Как видно из приведенного примера, если геометрическая апертура линзы на входе была равна $A = 200 \text{ мкм}$, то из-за сильного поглощения она уменьшилась примерно в 5 раз.

Посмотрим, как влияет поглощение в линзе на ее преломляющие свойства. Для этого проведем моделирование составной линзы в программе Comsol без учета поглощения $\beta = 0$. Результат моделирования показан на Рис.8 и Рис.9.

На Рис.8 показано распределение фазы $\phi(x)$ функции пропускания составной преломляющей линзы без учета поглощения.

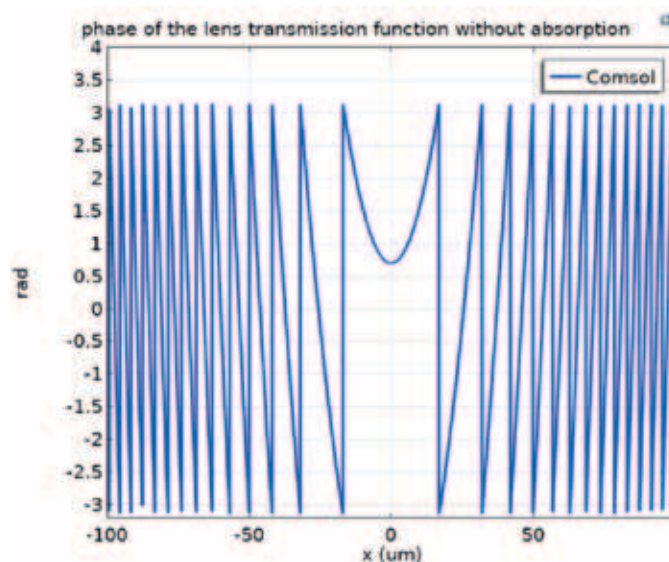


Рис.8. Зависимость фазы функции пропускания $\phi(x)$ составной преломляющей линзы от поперечной координаты x без учета поглощения.

Сравним Рис.7 и Рис.8: на первом рисунке учитывается поглощение в линзе, на втором рисунке поглощение равно нулю. Отличия в рисунках практически отсутствуют, распределение фазы функции пропускания одно и то же. Это означает, что при малом коэффициенте поглощения, поглощение в составной линзе оказывает слабое влияние на преломляющие свойства линзы.

Фронт волны на выходе из линзы соответствует фронту сферической волны, сходящейся в точку фокуса Рис.9. На Рис.9 показано распределение поля излучения в области за линзой без учета поглощения.

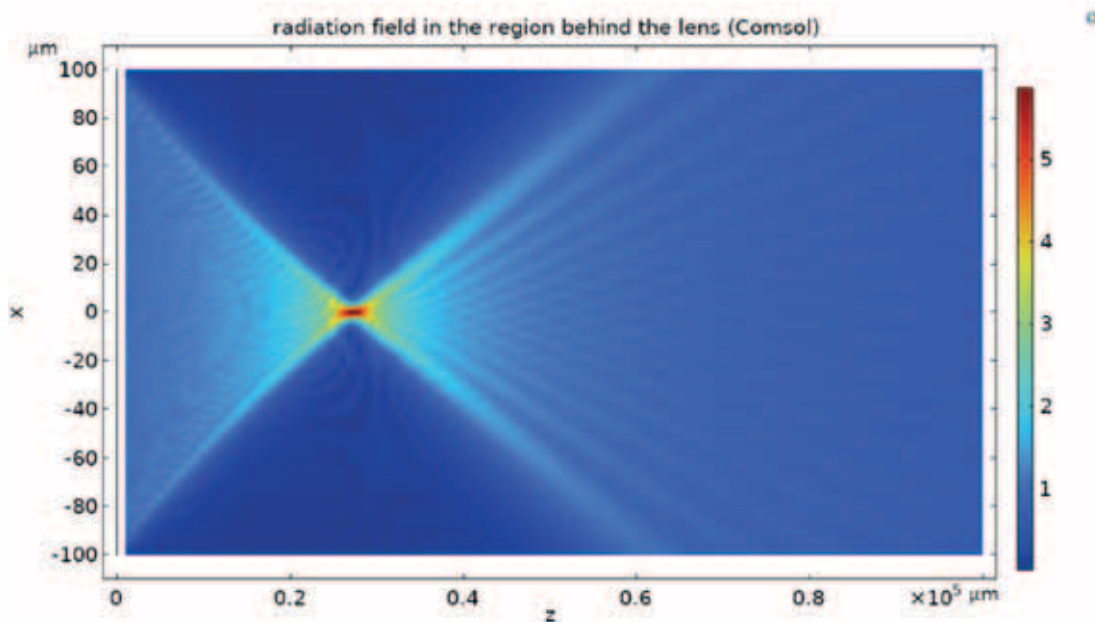


Рис.9. Фокусировка излучения составной преломляющей линзой без учета поглощения. Показано распределение поля излучения в области за линзой.

Моделирование показывает на сходимость лучей в точке фокуса, где фокусное расстояние равно величине $f = 27 \text{ mm}$. Отметим, что такое же значение фокусного расстояния, дает известная формула для фокусного расстояния составной преломляющей линзы.

$$f = \frac{R}{2N\delta}$$

Заметим также, что моделирование составной преломляющей линзы с учетом поглощения, проведенное выше, дает то же значение фокусного расстояния $f = 27 \text{ mm}$. Однако амплитуда поля в фокусе без учета поглощения примерно в 5 раз больше, чем с учетом поглощения Рис.10.

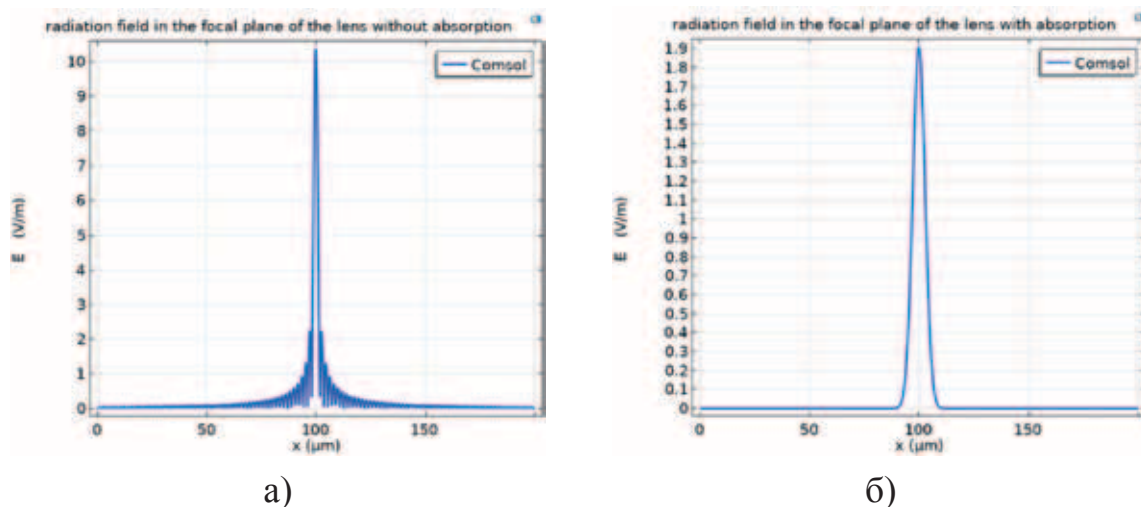


Рис.10. Распределение поля излучения в фокальной плоскости составной преломляющей линзы без учета поглощения а).
Распределение поля излучения с учетом поглощения б).

Таким образом, для нахождения функции пропускания линзы сложной конфигурации и с учетом поглощения удобно использовать программу Cmsol, которая позволяет решать уравнения Максвелла для поля излучения в линзе с заданными граничными условиями.

3. Общая схема формирования изображения в элементарной оптической системе

Анализ работы любого оптического устройства и изучение его предельных возможностей может быть основано только на волновом подходе, используя дифракционную теорию. Важно подчеркнуть важность выполнения моделирования с использованием волновой оптики, а не трассировки лучей. Трассировка лучей, по сути, хотя и предоставляет много полезной информации и рекомендаций, не сможет предоставить полную картину и может ввести в заблуждение при проектировании оптической системы. Будем рассматривать элементарную оптическую систему, изображенную на Рис.11.

Будем полагать, что во входной плоскости (x, y) , расположенной на расстоянии z_1 от линзы, задано поле $f(x, y)$, созданное маской, освещенной плоской волной. Задача состоит в определении поля $g(x, y)$ в выходной плоскости фоторезиста, расположенной на расстоянии z_2 справа от линзы.

Основная особенность изображённой на Рис.11 системы состоит в том, что она представляет собой линейный пространственный фильтр. Благодаря линейности можно использовать для исследования полей Фурье-анализ, что позволяет применять два подхода к изучению свойств поля излучения — спектральный и полевой.

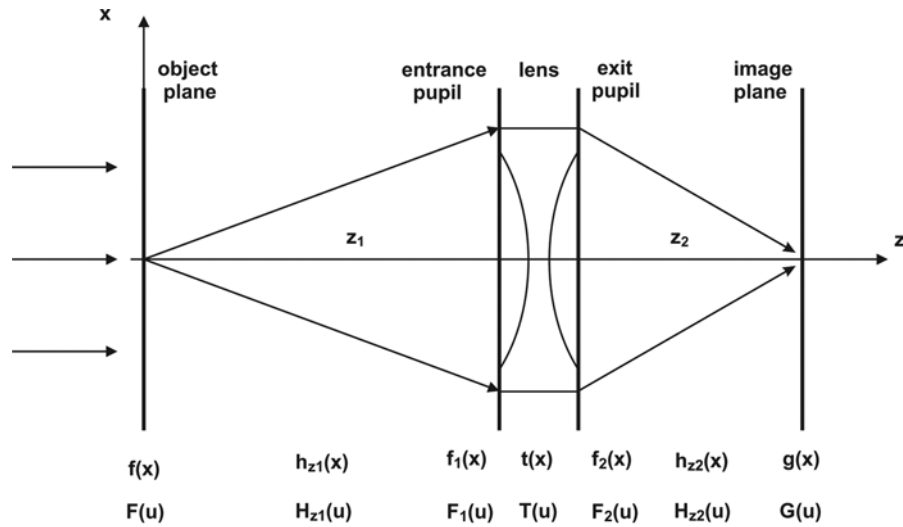


Рис.11. Схема получения изображения спектральным методом и полевым методом в проекционной литографии.

Блок-схема, эквивалентная изучаемой системе, изображена на Рис.12.

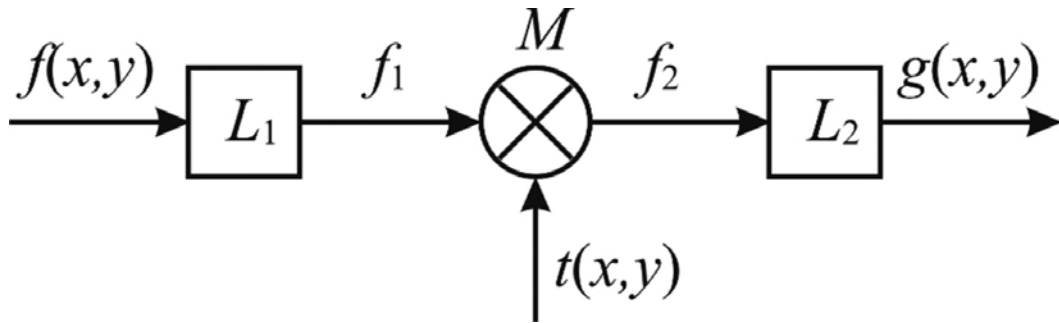


Рис.12. Блок-схема получения изображения полевым методом в проекционной литографии.

Линейные пространственные фильтры L_1 и L_2 описывают преобразование волны на участках свободного пространства Рис.11. Эти фильтры разделены пространственным модулятором M — линзой с функцией пропускания $t(x,y)$. Для изучения работы этого фильтра можно использовать два подхода: при спектральном подходе мы исследуем преобразование пространственного спектра; при полевым подходе изучается преобразование самого поля как функции координат

С помощью частотной характеристики $H_z(u,v)$ (15), полученной в приближении Френеля, найдем связь между спектрами на входе и выходе фильтров L_1 и L_2 .

$$F_1(u,v) = F(u,v) \cdot H_{z1}(u,v), \quad G(u,v) = F_2(u,v) \cdot H_{z2}(u,v) \quad (37)$$

Здесь частотные характеристики свободного пространства для областей между маской и линзой, а также между линзой и фоторезистом определяются следующими формулами.

$$H_{z_1}(u, v) = e^{ikz_1} \cdot \exp\left(-i \frac{u^2 + v^2}{2k} z_1\right), \quad H_{z_2}(u, v) = e^{ikz_2} \cdot \exp\left(-i \frac{u^2 + v^2}{2k} z_2\right)$$

Поле на входе в линзу $f_1(x, y)$ и поле на выходе из линзы $f_2(x, y)$ связаны функцией пропускания линзы $t(x, y)$ с помощью соотношения.

$$f_2(x, y) = t(x, y) \cdot f_1(x, y) \quad (38)$$

Найдем $T(u, v)$ — Фурье-образ функции пропускания линзы.

$$T(u, v) = \int_{-\infty}^{\infty} dx \int_{-\infty}^{\infty} dy t(x, y) e^{-i(ux+vy)} \quad (39)$$

Тогда свертка уравнения (38) дает связь между спектрами F_1 и F_2 на входе и выходе линзы.

$$F_2(u, v) = F_1(u, v) \otimes \otimes T(u, v)$$

В спектральном подходе мы имеем спектр $F(u, v)$ поля излучения в плоскости объекта Рис.11. После прохождения излучения через оптическую систему получаем спектр $G(u, v)$ поля в плоскости изображения. Связать эти спектры можно одним интегральным уравнением.

$$G(u, v) = \left\{ \left[F(u, v) \cdot H_{z_1}(u, v) \right] \otimes \otimes T(u, v) \right\} \cdot H_{z_2}(u, v) \quad (40)$$

Это основное уравнение получения изображения в спектральном подходе. Не составляет труда получить соответствующее интегральное уравнение в полевом подходе.

$$g(x, y) = \left\{ \left[f(x, y) \otimes \otimes h_{z_1}(x, y) \right] \cdot t(x, y) \right\} \otimes \otimes h_{z_2}(x, y) \quad (41)$$

Оба подхода эквивалентны, но обычно предпочтение отдается спектральному подходу, потому что для решения уравнения (40) можно использовать быстрое дискретное преобразование Фурье.

Основным этапом в построении изображения для задач литографии является выбор линзы с хорошими преломляющими свойствами и небольшим поглощением, а также получение математического описания ее функции пропускания $t(x, y)$ и соответствующего Фурье-образа $T(u, v)$.

4. Разрешающая способность преломляющей линзы

Одой из важных характеристик линзы является разрешающая способность линзы. Возникает задача, если во входной плоскости есть два близко расположенных точечных источника, сумеем ли мы разрешить их, т. е. можно ли по картине интенсивности, возникающей в плоскости изображения, отличить два точечных источника от одного, и как на это будет влиять поглощение в линзе.

Вначале посмотрим, как формируется изображение точечного источника. Пусть во входной плоскости в точке (x_0, y_0) имеется точечный источник единичной амплитуды и нулевой начальной фазы.

$$f(x, y) = \frac{1}{r} \exp(ikr), \quad r = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + z^2}$$

Такой источник излучает сферическую волну, которая, проходя через линзу, создает в плоскости изображения некоторое поле $g(x, y, x_0, y_0)$. Это поле является функцией координат (x, y) в выходной плоскости и положения точечного источника (x_0, y_0) во входной плоскости и называется функцией рассеяния точки.

Поле на входе в линзу $f_1(x, y)$ создается сферической волной, излучаемой точечным источником, и в параболическом приближении имеет следующий вид.

$$f_1(x, y) = \frac{1}{z_1} e^{ikz_1} \cdot \exp\left(ik \frac{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}{2z_1}\right) \quad (42)$$

Будем рассматривать линзу без поглощения, тогда с учетом формулы (25) получаем функцию пропускания линзы.

$$t(x, y) = p_a(x, y) \exp\left(-i \frac{k}{2f} (x^2 + y^2)\right) \quad (43)$$

Здесь $p_a(x, y)$ — единично-нулевая функция, функция входного зрачка линзы. Поле на выходе из линзы будет иметь вид.

$$f_2(x, y) = f_1(x, y) \cdot t(x, y)$$

В области между линзой и плоскостью изображения используем импульсный отклик в приближении Френеля.

$$h_2(x, y) = \frac{1}{i\lambda z_2} e^{ikz_2} \cdot \exp\left(ik \frac{x^2 + y^2}{2z_2}\right) \quad (44)$$

Тогда поле в плоскости изображения будет определяться сверткой.

$$g(x, y, x_0, y_0) = f_2(x, y, x_0, y_0) \otimes h_2(x, y)$$

Распишем последнее выражение.

$$g(x, y, x_0, y_0) = \iint f_2(x', y', x_0, y_0) h_2(x - x', y - y') dx' dy' \quad (45)$$

Будем предполагать, что расположение входной плоскости и плоскости изображения связаны формулой линзы.

$$\frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2} = \frac{1}{f}$$

В этом случае интеграл (45) принимает следующий вид.

$$g(x, y, x_0, y_0) = \frac{e^{ik(z_1+z_2)}}{i\lambda z_1 z_2} e^{ik\left((x^2+y^2)/2z_2 + (x_0^2+y_0^2)/2z_1\right)} \cdot P_a\left(k\left(\frac{x}{z_2} + \frac{x_0}{z_1}\right), k\left(\frac{y}{z_2} + \frac{y_0}{z_1}\right)\right) \quad (46)$$

Здесь $P_a(u, v)$ — фурье-образ функции входного зрачка линзы $p_a(x, y)$, функции диафрагмы линзы. Если диафрагма имеет бесконечный радиус, т. е. линза рассматривается без диафрагмы, то фурье-образ $P_a(u, v)$ выражается через дельта-функции. В результате функция рассеяния точки принимает вид.

$$g(x, y, x_0, y_0) = \frac{\lambda z_2 e^{ik(z_1+z_2)}}{i z_1} e^{ik\left((x^2+y^2)/2z_2 + (x_0^2+y_0^2)/2z_1\right)} \cdot \delta\left(x + \frac{z_2}{z_1} x_0\right) \cdot \delta\left(y + \frac{z_2}{z_1} y_0\right)$$

Отсюда следует, что максимум интенсивности поля $I(x, y) = |g(x, y)|^2$ в плоскости изображения находится в точке $x = -x_0 z_2 / z_1$, $y = -y_0 z_2 / z_1$, соответствующей геометрическому изображению точечного источника. В этой точке интенсивность равна бесконечности, а в других точках равна нулю.

Возьмем диафрагму конечного размера, для простоты рассмотрим прямоугольное окно размером $2a \times 2b$. В этом случае распределение интенсивности поля в плоскости изображения определяется следующей формулой.

$$I(x, y) = \left(\frac{4ab}{\lambda z_1 z_2}\right)^2 \left| \frac{\sin\left(\frac{ka}{z_2}\left(x + \frac{z_2}{z_1} x_0\right)\right)}{\frac{ka}{z_2}\left(x + \frac{z_2}{z_1} x_0\right)} \right|^2 \left| \frac{\sin\left(\frac{kb}{z_2}\left(y + \frac{z_2}{z_1} y_0\right)\right)}{\frac{kb}{z_2}\left(y + \frac{z_2}{z_1} y_0\right)} \right|^2 \quad (47)$$

Из этой формулы следует, что максимум интенсивности поля в плоскости изображения по-прежнему находится в точке $x = -x_0 z_2 / z_1$, $y = -y_0 z_2 / z_1$, соответствующей геометрическому изображению точечного источника. Однако теперь интенсивность в этой точке равна конечной величине $I_m = (4ab / \lambda z_1 z_2)^2$. При удалении от этой точки интенсивность спадает до нуля.

Таким образом, сферическая волна от точечного источника, пройдя через диафрагму и линзу, фокусируется в плоскости изображения не строго в точку, а в некоторую небольшую окрестность этой точки в пятно размером $\Delta x = \lambda z_2 / a$, $\Delta y = \lambda z_2 / b$.

Если рассматривать двухмерную задачу, то для цилиндрических линз формула (47) упрощается и принимает следующий вид.

$$I(x) = \frac{4a^2}{\lambda z_1 z_2} \left| \frac{\sin \left(\frac{ka}{z_2} \left(x + \frac{z_2}{z_1} x_0 \right) \right)}{\frac{ka}{z_2} \left(x + \frac{z_2}{z_1} x_0 \right)} \right|^2 \quad (48)$$

Из этой формулы следует, что если точечный источник находится во входной плоскости с координатой x_0 , то поле, созданное этим источником в плоскости изображения, имеет максимум интенсивности в точке с координатой $x = -x_0 z_2 / z_1$. Распределение интенсивности имеет вид чередующихся максимумов и минимумов, причем ширина главного пика равна величине $\Delta x = \lambda z_2 / a$.

Если имеются два точечных источника с координатами x_{01}, x_{02} во входной плоскости, то в плоскости изображения функции рассеяния этих источников будут иметь максимумы с координатами $x_1 = -x_{01} z_2 / z_1$, $x_2 = -x_{02} z_2 / z_1$. Если функции рассеяния двух точечных источников не перекрываются, то такие источники всегда различимы. Если же функции рассеяния перекрываются, то можно следовать критерию Рэлея [15,16] — источники различимы, если максимум функции рассеяния одного источника совпадет с минимумом функции рассеяния другого источника. Возьмем более сильное условие различимости, когда главные пики функций рассеяния двух источников не перекрываются. Из рассмотренных соотношений видно, что различимость будет определяться неравенством.

$$|x_2 - x_1| \geq \lambda z_2 / a \quad (49)$$

Учитывая связь между координатами точечного источника и его изображения, можно условие различимости записать в виде неравенства для координат точечных источников.

$$|x_{02} - x_{01}| \geq \lambda z_1 / a$$

В качестве примера рассмотрим составную линзу, содержащую одну элементарную двояковогнутую линзу. В качестве материала линзы возьмем бериллий Be на длине волны излучения $\lambda = 13.5 \text{ nm}$. Выберем следующие геометрические размеры линзы: $R = 1 \text{ mm}$ — радиус кривизны, $A = 600 \text{ mkm}$ — диаметр линзы или ее геометрическая апертура. У такой линзы фокусное расстояние равно следующей величине $f = 45.5 \text{ mm}$.

Рассмотрим линзу с двукратным уменьшением. Тогда расположение входной плоскости и плоскости изображения будут определяться следующими параметрами $z_1 = 136.4 \text{ mm}$, $z_2 = 68.2 \text{ mm}$. Для такой линзы теоретический дифракционный предел разрешения (49) будет определяться величиной $\Delta x = 3.1 \text{ mkm}$. Это означает, что во входной плоскости два точечных источника будут находиться на расстоянии $\Delta x_0 = 6.2 \text{ mkm}$.

Если не учитывать поглощение в линзе, то моделирование дает следующую картину изображения двух точечных источников Рис.13а.

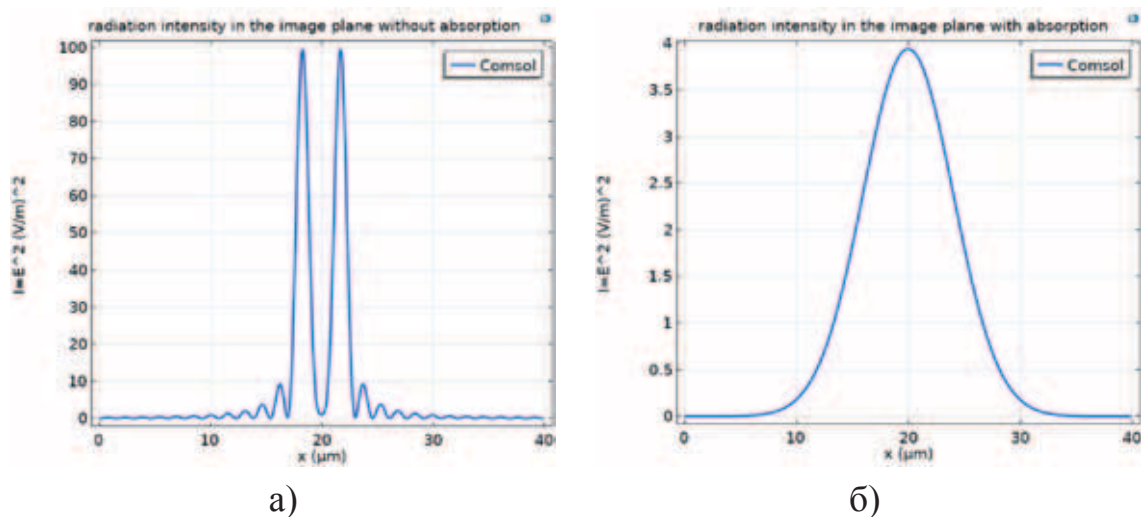


Рис.13. Распределение интенсивности поля излучения двух точечных источников в плоскости изображения преломляющей линзы без учета поглощения а). Распределение интенсивности поля излучения с учетом поглощения б).

Заметим, что распределение интенсивности Рис.13а полученное в программе Cmsol полностью совпадает с картиной, которую можно построить с помощью формулы (48). Рис.13а показывает хорошую разрешимость двух точечных источников. Однако не надо забывать того, что рентгеновское излучение сильно поглощается всеми материалами, из которых можно создать преломляющую линзу, и это поглощение может оказывать значительное влияние на полученное изображение.

Проведем моделирование с учетом поглощения рентгеновского излучения в рассматриваемой линзе Рис.13б. Результат, приведенный на Рис.13б,

показывает, что эффект поглощения полностью подавляет дифракционную структуру картины, показанной на Рис.13а, два точечных источника теперь не различимы. Поэтому возникает задача уменьшения потерь на поглощение при прохождении излучения через объем линзы.

В свое время Френель предложил вырезать из материала линзы полосы вдоль оптической оси, оптическая длина которых выбирается такой, чтобы набег фазы был кратен 2π . Оставшаяся часть линзы при этом работает как сплошная линза. В результате мы приходим к дифракционным и киноформным линзам [17, 18].

Рассмотрим преломляющую двояковогнутую линзу и дифракционную линзу, полученную на основе первой линзы Рис.14а, Рис.14б.

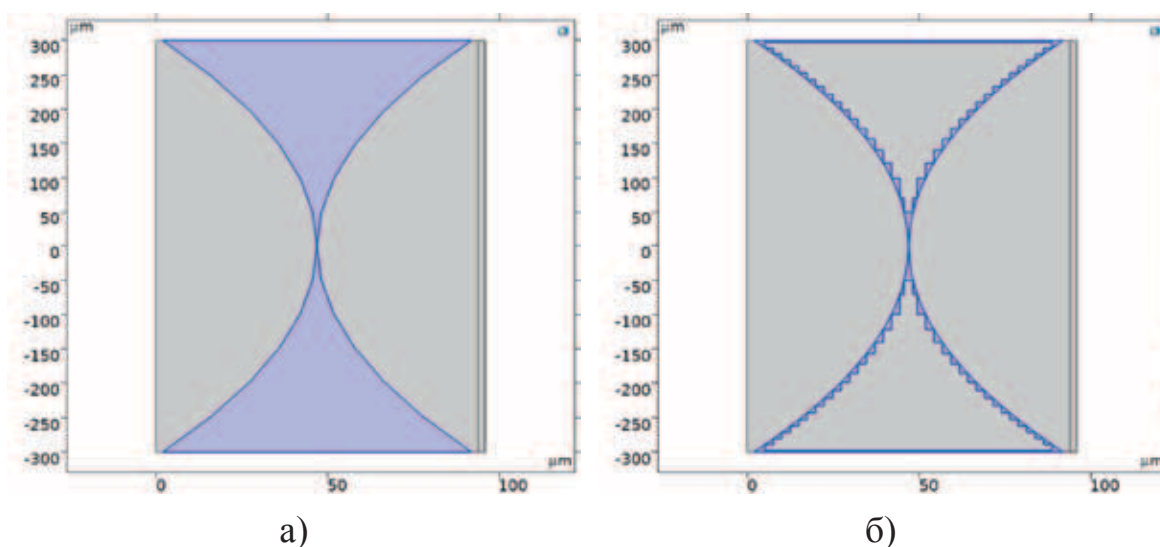


Рис.14. Двояковогнутая преломляющая линза для рентгеновского излучения а).

Дифракционная линза с уменьшенными потерями на поглощение рентгеновского излучения б).

Проведем моделирование получения изображения двух точечных источников с помощью дифракционной линзы, показанной на Рис.14б. Результат моделирования приведен на Рис.15.

На Рис.15 показано хорошее разрешение двух точечных источников. Если сравнить результат с Рис.13а, когда отсутствует поглощение, то можно увидеть, что высота пиков уменьшилась примерно в четыре раза. Однако имеется хорошая различимость изображений.

Рассмотрим еще вариант дифракционной линзы Рис.16а, а также киноформную линзу Рис.16б, построенную на основе дифракционной линзы, показанной на Рис.16а.

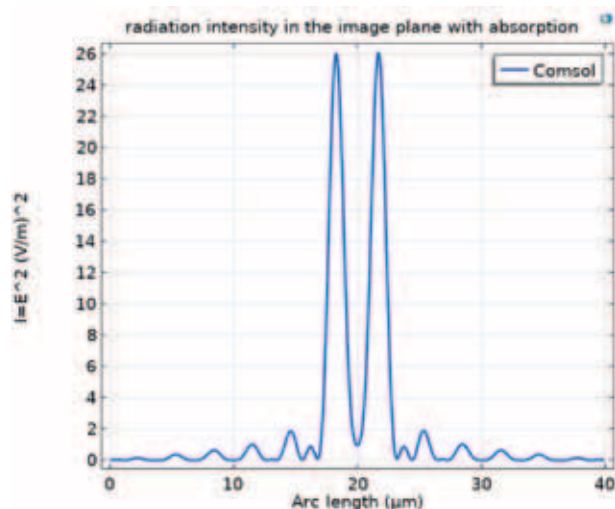


Рис.15. Распределение интенсивности поля излучения двух точечных источников в плоскости изображения дифракционной линзы с учетом поглощения.

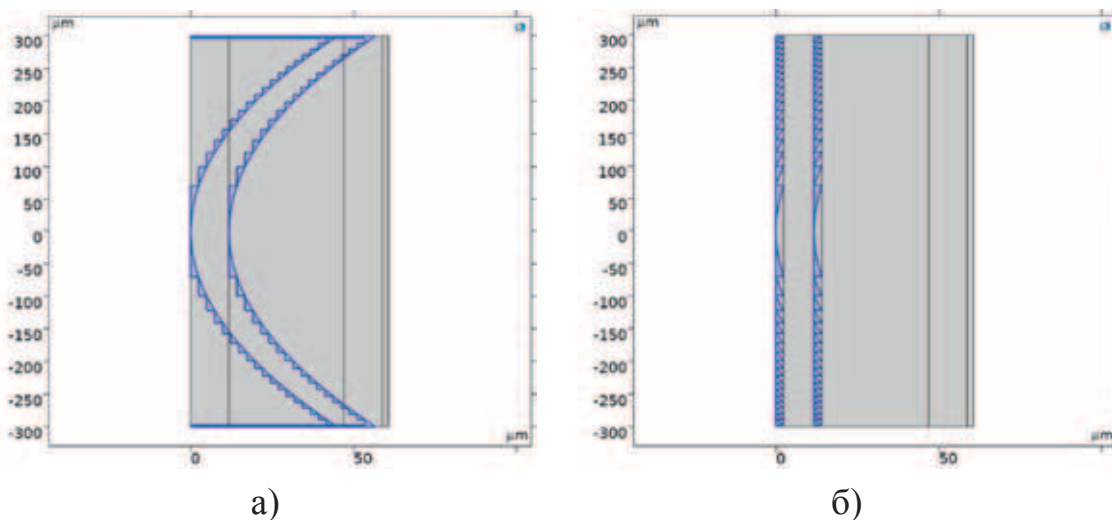


Рис.16. Вариант дифракционной линзы с уменьшенными потерями на поглощение рентгеновского излучения а).
Киноформная преломляющая линза для рентгеновского излучения б).

Все линзы Рис.14, Рис.16 с учетом поглощения, как показывает моделирование в программе Cmsol, имеют совершенно одинаковые оптические характеристики.

Построим изображение трех каналов маски четырехкратно уменьшенное с помощью дифракционной линзы, показанной на Рис.16а. Поскольку для такой линзы дифракционный предел разрешения равен $\Delta x = 3.1 \text{ мкм}$, то попробуем получить изображение одного канала шириной 10 мкм . Это изображение будет создано каналом с шириной 40 мкм . У такой линзы фокусное

расстояние равно величине $f = 45.5 \text{ mm}$. Поэтому плоскость объекта будет находиться от линзы на расстоянии 227.5 mm , а плоскость изображения на расстоянии 56.9 mm от линзы.

На Рис.17а и Рис.17б показана картина получения изображения от трех каналов маски без учета поглощения и с учетом поглощения в линзе.

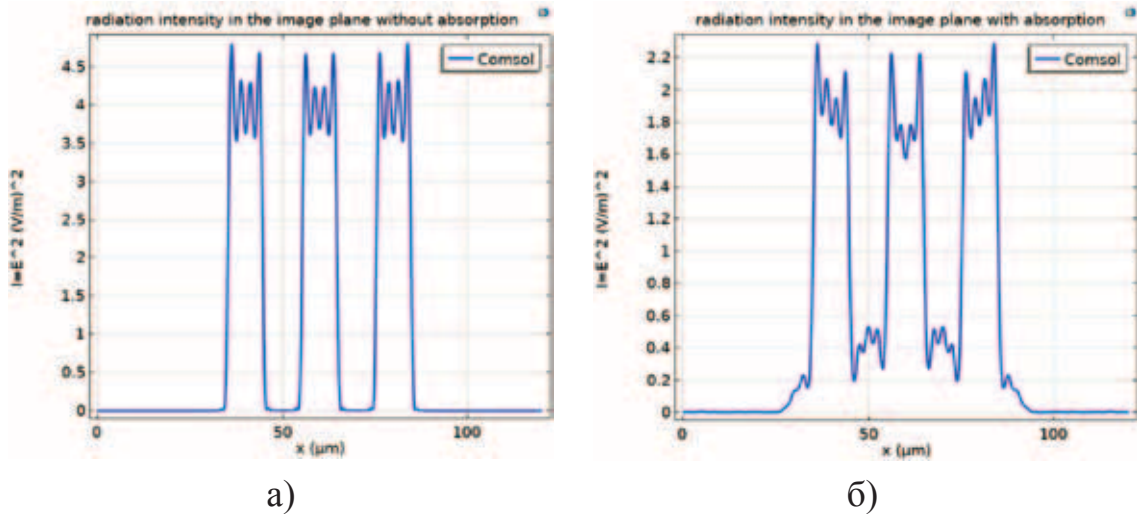


Рис.17. Изображение трех каналов в дифракционной линзе
с четырехкратным уменьшением без учета потерь
на поглощение рентгеновского излучения а).
Изображение трех каналов с учетом потерь
на поглощение рентгеновского излучения б).

Рис.17а, Рис.17б показывают, что для выбранной дифракционной линзы с уменьшенными потерями на поглощение Рис.16а получается достаточно хорошее изображение, однако интенсивность поля изображения с учетом поглощения Рис.17б примерно в два раза меньше, чем интенсивность поля изображения без поглощения Рис.17а.

Если из N дифракционных или киноформных линз создать составную линзу, то фокусное расстояние такой линзы будет определяться формулой.

$$f_N = \frac{f_1}{N}, \quad f_1 = \frac{R}{2\delta}$$

Дифракционный предел составной линзы можно тогда оценить следующим соотношением $\Delta x = \lambda f_1 / Na$ (49). Посмотрим, сколько линз, рассмотренных выше, надо взять, чтобы получить для составной линзы разрешение, например $\Delta x = 40 \text{ nm}$. Используем следующие параметры — длина волны излучения $\lambda = 13.5 \text{ nm}$, фокусное расстояние элементарной линзы $f_1 = 45.5 \text{ mm}$, радиус диафрагмы $a = 300 \text{ mkm}$. В этом случае $N = 51$, т. е. потребуется составная

линза, состоящая примерно из 50 элементарных линз. Однако если взять киноформную линзу диаметром $2a = 10\text{ mm}$, то число элементарных линз сократится до $N = 3$. Для разрешения в $\Delta x = 20\text{ nm}$ число элементарных линз будет равно $N = 6$. Конечно, на формирование изображения будет оказывать влияние поглощение в линзах, но чем меньшее число элементарных линз использовано, тем лучше конечный результат. Нахождение оптимальных размеров линз и выбор материалов, выбор длины волны рентгеновского излучения, а также выбор количества элементарных линз требуют дополнительного исследования.

Заключение

Сильное поглощение рентгеновского излучения в диапазоне длин волн $\lambda = 1 \div 14\text{ nm}$ является главной причиной отказа от преломляющей оптики в рентгеновской литографии. Поэтому в работе было проведено исследование влияния поглощения рентгеновского излучения на оптические свойства преломляющих линз с целью найти пути ослабления фактора поглощения. Из-за того, что действительная часть показателя преломления $n = 1 - \delta + i\beta$ меньше единицы для фокусировки рентгеновских лучей приходится использовать двояковогнутые линзы. Кроме того, малое значение коэффициента рефракции $\delta \ll 1$ приводит к большому фокусному расстоянию $f = R / 2\delta$ линзы, и соответственно к малой апертуре. Чтобы увеличить апертуру, можно применять составную линзу с фокусным расстоянием $f = R / 2N\delta$, где N — число элементарных двояковогнутых линз. Однако поглощение излучения в такой линзе возрастает примерно в N раз.

Исследование двояковогнутых линз показало, что на формирование изображения оказывают влияние два фактора: дифракционное расплывание, связанное с конечным размером диафрагмы, и расплывание, связанное с поглощением излучения в линзе, причем второй фактор часто оказывает большее влияние. Эти же два фактора оказывают влияние на разрешающую способность линзы. Переход к дифракционным линзам и киноформным линзам значительно уменьшает поглощение, и влияние обоих факторов становятся сравнимыми.

Литература:

1. *Levinson H.J.* High-NA EUV lithography: current status and outlook for the future // *Jpn. J. Appl. Phys.* 61, SD0803 (2022).
2. *Golde D., Butscher B., Gräupner P., Kürz P., Jürgens D., Conradi O., Van Schoot J., Stoeldraijer J.* Emergence of next generation EUV optics: status, outlook and future // 38th European Mask and Lithography Conference (EMLC 2023), U. F. Behringer, H. Loeschner, and J. Finders, eds. (SPIE, 2023). P. 3.
3. *Smeets C., Benders N., Bornebroek F., Carbone J., Van Es R., Minnaert A., Salmaso G., Young S.* 0.33 NA EUV systems for high volume manufacturing // *Optical and EUV Nanolithography XXXVI*, A. Lio and M. Burkhardt, eds. (SPIE, 2023). P. 9.

4. Jiang B., Feng C., Li C., Bai Z., Wan W., Xiang D., Gu Q., Wang K., Zhang Q., Huang D., Chen S. A synchrotron-based kilowatt-level radiation source for EUV lithography // *Sci. Rep.* 12 (1), 3325 (2022).
5. Tallents G., Wagenaar E., Pert G. Lithography at EUV Wavelengths // *Nature Photon.* 4 (12). P. 809–811 (2010).
6. Otsuka T., Li B., O’Gorman C., Cummins T., Kilbane D., Higashiguchi T., Yugami N., Jiang W., Endo A., Dunne P., O’Sullivan G. A 6.7-nm beyond EUV source as a future lithography source / P. P. Naulleau and O. R. Wood II, eds. (2012). P. 832214.
7. Kalmykov S.G., Butorin P.S., Sasin M.E. Xe laser-plasma EUV radiation source with a wavelength near 11 nm—Optimization and conversion efficiency // *J. Appl. Phys.* 126 (10), 103301 (2019).
8. Schümmer A., Mertins H.-Ch., Schneider C.M., Adam R., Trellenkamp S., Borowski R., Juschkin L., Berges U. Fast and easy fabrication methodology of Fresnel zone plates for the extreme ultraviolet and soft x-ray regions // *Appl. Opt.* 58 (4), 1057 (2019).
9. Cocco D., Cutler G., Sanchez Del Rio M., Rebuffi L., Shi X., Yamauchi K. Wavefront preserving X-ray optics for Synchrotron and Free Electron Laser photon beam transport systems // *Physics Reports* 974, 1–40 (2022).
10. Tong X., Chen Y., Xu Z., Li Y., Xing Z., Mu C., Zhao J., Zhen X., Mao C., Tai R. High-efficiency focusing and imaging by dielectric kinoform zone plate lenses with soft X-rays // *J. Synchrotron Rad.* 30 (2), 319–326 (2023).
11. Виноградова М.Б., Руденко О.В., Сухоруков А.П. Теория волн. М. : Наука, 1979. 384 с.
12. Локшин Г.Р. Дифракция, пространственная фильтрация. М. : МФТИ, 2016. 156 с.
13. Кон В.Г. К теории рентгеновской преломляющей оптики. Точное решение для параболической среды // *Письма в ЖЭТФ*. Т. 76. Вып. 10. С. 701–704 (2002).
14. Kohn V., Snigireva I., Snigirev A. Diffraction theory of imaging with X-ray compound refractive lens // *Optics Communications* 216 (2003) 247–260.
15. Erdmann A., Fühner T., Evanschitzky P., Agudelo V., Freund C., Michalak P., Xu D. Optical and EUV projection lithography: A computational view // *Microelectron. Eng.* 132, 21–34, 2015.
16. Мишем А. Оптика мягкого рентгеновского излучения. М. : Мир, 1989. 352 с.
17. Aristov V., Grigoriev M., Kuznetsov S., Shabelnikov L., Yunkin V., Weitkamp T., Rau C., Snigireva I., Snigireva A., Hoffmann M., Voges E. X-ray refractive planar lens with minimized Absorption // *Applied Physics Letters*. Vol. 77. No. 24. December 11, 2000. P. 4058–4060.
18. Faklis D., Michael Morris G. Spectral properties of multiorder diffractive lenses // *Applied Optics*. Vol. 34. No. 14. May 10, 1995. P. 2462–2467.

ANALYSIS OF IMAGE FORMATION BY AN OPTICAL SYSTEM BASED ON REFRACTIVE LENSES IN THE SOFT X-RAY RANGE

V.I. Korneev, G.D. Demin, P.Yu. Glagolev, N.A. Djuzhev

*National Research University of Electronic Technology (MIET),
124498, Moscow, Zelenograd, Russia
kvi_07@mail.ru*

Received 25.10.2024

The paper considers the use of refractive lenses for X-ray optics in the soft X-ray range, which is characterized by a low refractive index and high absorption in the lens material. A comparison of various types of lenses, such as biconcave, diffractive and kinoform, is carried out. To obtain a high-quality image, it is proposed to use kinoform lenses, which significantly reduce radiation absorption. To increase the numerical aperture, the lens contains a set of identical kinoform lenses. To describe the formation of an image in a compound lens, the Helmholtz equations are used within the paraxial approximation. Using analytical and numerical methods of solution, the ways of obtaining the transmission function of the lens in the case of non-zero X-ray absorption are studied. The mechanism of image formation in the focus of the lens is investigated taking into account diffraction effects and absorption of X-ray radiation in the selected wavelength range.

Keywords: refractive x-ray optics, kinoform lenses, x-ray lithography, soft x-rays

АКТУАЛЬНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПРОШЛЫХ ЛЕТ

Продолжение. Начало в предыдущих номерах

НА ПУТИ К ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ БИОЛОГИИ. I. ПРОЛЕГОМЕНЫ

Перевод с английского
С.Г. Васецкого

Под редакцией и с предисловием
акад. Б.Л. Астаурова

М. : Мир, 1970

Предисловие к английскому изданию

Теоретическая физика представляет собой вполне сложившуюся самостоятельную науку, и во многих университетах ею занимаются специальные лаборатории и кафедры. Более того, наши теории о природе окружающего нас материального мира, безусловно, оказывают глубокое влияние на общефилософские концепции. Что же касается теоретической биологии, то едва ли можно сказать, что такая наука уже существует. Трудно сказать, чем она должна заниматься и по каким путям ей следует развиваться; к тому же очень редко случается, что

философы ощущают связь таких биологических проблем, как теория эволюции или восприятие раздражения, с традиционными проблемами философии.

Международный союз биологических наук (МСБН) счел своим долгом, как организация, объединяющая биологов из разных стран, стимулировать создание некоего костяка понятий и методов, на котором могла бы формироваться теоретическая биология. Это совсем не простая задача; поэтому было решено провести три симпозиума на эту тему с годовыми интервалами. Эти симпозиумы предполагалось посвятить не обсуждению теоретических основ каких-либо частных биологических процессов, например проницаемости мембран, наследственности, нервной деятельности и т. д., а попыткам выявить и сформулировать основные концепции и логические связи, характеризующие живые системы в отличие от неживых, и рассмотрению вытекающих из них общефилософских представлений.

На меня была возложена обязанность пригласить докладчиков и организовать заседания.

Первый симпозиум проходил с 28 августа по 3 сентября 1966 г. на вилле Сербеллони в Беладжо (озеро Комо). Чтобы создать известную базу для дискуссии и сосредоточить внимание на некоторых проблемах, я разослал участникам симпозиума свои лекции, прочитанные за год до этого в университете Северного Уэльса и нарочито переработанные с тем, чтобы придать им несколько полемический характер. Одновременно были разосланы некоторые комментарии Рене Тома к этим лекциям, а также статья Эрнста Майра.

Заседания на вилле Сербеллони, носившие весьма непринужденный характер и оказавшиеся очень плодотворными, не стенографировались.

В процессе обсуждения внимание было сосредоточено главным образом на проблемах биологической теории, а не на более общих проблемах. Хотя в результате работы симпозиума стали вырисовываться пусть еще не очень четкие, но уже определенные контуры теоретической биологии, было совершенно ясно, что необходимо продолжить обсуждение и обмен мнениями между приверженцами различных точек зрения, прежде чем удастся разработать некое подобие схемы стройной и самостоятельной науки. Поэтому предлагаемая вниманию читателя книга состоит из отдельных статей, написанных после симпозиума в духе проводившегося на нем обсуждения. Они еще не связаны друг с другом в некое единое целое. Именно сознание того, что такого единого целого не существует, что его создание представляет собой длительную и нелегкую задачу, и заставило принять решение провести три симпозиума. Мы надеемся, что на втором симпозиуме будут сделаны дальнейшие шаги на пути к синтезу различных точек зрения. Поэтому этот первый том и получил подзаголовок «Прологомены».

К. Уоддингтон

ПЕРЕПИСКА МЕЖДУ К. УОДДИНГТОНОМ И Р. ТОМОМ

1. Из письма К. Уоддингтона Р. Тому Эдинбург, 25 января 1967 г.

...Я хотел бы остановиться на одном моменте в Вашей рукописи, который на первый взгляд может показаться личным, но в действительности таковым не является. На стр. 7 (см. стр. 148) Вы говорите о «биохимической интерпретации клеточной дифференцировки» (данной Дельбрюком и Сцилардом). Я знаю, что подобную интерпретацию — в терминах «альтернативных устойчивых состояний» — обычно приписывают этим авторам; Дельбрюк писал об этом в 1949 г., а Сцилард чуть позднее. Однако я говорил об этом еще в 1939 г. Но я посвятил этому всего лишь несколько фраз, и притом сделал это в своем «Введении в современную генетику» [2], а обычно принято считать, что в учебниках не может быть никаких новых идей. Кроме того, уже в то время я говорил об альтернативных, протяженных во времени креодах (хотя я не называл их так в то время), тогда как Дельбрюк и Сцилард придерживались более простой и в сущности неверной — по отношению к развитию — идеи об альтернативном выборе одного из устойчивых состояний. Поэтому я хотел бы, чтобы в процитированной выше фразе фигурировало и мое имя: «...биохимическая интерпретация... данная Уоддингтоном, Дельбрюком и Сцилардом». Вы вновь возвращаетесь к этой теме на стр. 18 (стр. 154), и в этом случае я хотел бы сделать одно замечание по существу. Вы пишете: «...всякая клеточная дифференцировка характеризуется — в соответствии с представлениями Дельбрюка и Сциларда — устойчивым режимом обмена веществ, т. е. обладает центром притяжения А локальной динамической биохимической системы...». Выражение «устойчивый режим» для неискушенного биолога будет означать неизменный режим, устойчивое состояние. Но Ваша модель, разумеется, вовсе не связана с подобным ограничением. Мне кажется, что Вам следует переписать эту фразу, указав, что «устойчивый режим обмена веществ» может определенным образом изменяться во времени.

2. Из письма Р. Тома К. Уоддингтону Бюр, 27 января 1967 г.

...перехожу теперь к вопросу о Дельбрюке и Сциларде; откровенно говоря, я не видел их работ и поэтому просто следовал тому, что говорится во всех статьях на эту тему. Действительно ли они считали, как Вы пишете, что клеточная дифференцировка обусловлена четким выбором между двумя «устойчивыми режимами», которые определены *in abstracto* и фиксированы не вполне строго? Это возможно, особенно если они знали биологию не слишком хорошо. И все же это физики, которые должны были понимать разницу между локальным и глобальным состояниями. Но в любом случае вопрос этот становится чисто академическим, если Вы высказали эту идею значительно раньше них. Поэтому я предлагаю внести в мою рукопись следующее исправление: вычеркнуть слова «данной Дельбрюком и Сцилардом» и дать следующую сноску: «Идею истолкования клеточной дифференцировки в терминах устойчивого режима метаболизма, т. е. центров притяжения в биохимических кинетических системах, часто приписывают Дельбрюку и Сциларду. В действительности она была предложена — в своей локальной и, на мой взгляд, единственно правильной форме — Уоддингтоном в его «Введении в современную генетику» еще в 1939 г. [2]».

Что же касается второго Вашего замечания, то проще всего убрать ссылку на Дельбрюка и Сциларда и добавить слово «локальный» после слов «метаболизм».

Сопоставление Ваших представлений и идей, высказанных Дельбрюком и Сцилардом, наводит меня на один вопрос, который а priori представляется мне весьма важным. Вы — автор термина «креод», и Вам принадлежит право определить это понятие. Мне, однако, также приходится его использовать и, как мне кажется, в значительно более широком смысле, чем принятый Вами. Мне представляется, что для Вас «креод» — это «путь развития», т. е. он связан с «центром притяжения» локальной биохимической кинетической системы. В этом случае не имело бы смысла рассматривать креоды, в которых могла бы происходить конкуренция нескольких центров притяжения. Как только появляется «пункт переключения» (по моей терминологии — «бифуркация»), от креода, строго говоря, ничего не остается. Далее, поскольку органогенез в большинстве областей организма требует взаимодействия тканей различных типов (например, эпителия и мезенхимы), регулируемых разными центрами притяжения, образование такого органа, как, скажем, почка, никогда нельзя будет описать с помощью лишь одного креода.

Сам я склонен использовать термин «креод» как синоним «поддержания морфогенетического поля» независимо от числа конкурирующих друг с другом центров притяжения или от морфологии участков, которые они регулируют в пределах этого морфогенетического поля. Я бы хотел знать, одобряете ли Вы использование термина «креод» в этом смысле? Если нет, я откажусь от него и буду использовать лишь термин «морфогенетическое поле».

3. Письмо К. Уоддингтона Р. Тому Эдинбург, 4 февраля 1967 г.

Спасибо за Ваше письмо от 27 января. Я считаю Ваше предложение о том, как поступить со ссылкой на Дельбрюка и Сциларда, совершенно правильным. Однако признаюсь, мне не совсем ясно различие между «локальным» и «глобальным» состояниями. Мне хочется провести различие между режимом (равновесием потока), который не изменяется на протяжении определенного периода времени, и режимом, который в каждый данный момент является устойчивым, но изменяется во времени. Поэтому, когда Вы говорите «устойчивый режим локального обмена веществ», я бы сказал что-нибудь вроде «устойчивый, но развивающийся (во времени) режим локального обмена веществ».

Я посылаю Вам ксерокопию нескольких страниц из той работы Дельбрюка, на которую обычно ссылаются. Ссылок на работы Сциларда я не знаю. Посылаю Вам также ксерокопии нескольких страниц из моей книги [2]. Прочитав их, Вы убедитесь, что я пытался говорить о топологии, но не имел необходимой для этого подготовки.

Теперь о смысле термина «креод». Я считаю Ваше использование его в широком смысле вполне оправданным. Я сам бы расширил его сходным образом, но меня останавливала постоянная необходимость донести его основной смысл до аудитории биологов, которые едва ли могут понять даже простейшие приложения этого термина. Тем не менее я писал о переключении эктодермы амфибий на стадии ранней гаструлы на альтернативные креоды эпидермальной, нейральной и мезодермальной дифференцировки. Совершенно очевидно, что в пределах каждого из этих «главных» креодов имеется ряд «субкреодов» — так, например, внутри мезодермального креода

позже могут происходить переключения па образование мышечной ткани, мезенхимы, железисто-эпителиальной ткани и т. п. — и что между участками ткани, избравшими разные креоды, будет происходить взаимодействие. Таким образом, я имел в виду, что, например, в «мезодермальном» креоде на более поздних стадиях может возникнуть ряд различных (и взаимодействующих) центров притяжения (для мышц, кожи, соединительной ткани и т. д.). Однако возможно, что ко времени катастрофы, вызывающей бифуркацию на креоды А и В (скажем, нейральный и мезодермальный), каждый из этих креодов содержит более одного центра притяжения или, быть может, каждый из них содержит к этому времени только один центр притяжения, для которого характерна либо внутренне присущая ему неустойчивость, в результате чего из него впоследствии образуются два или более центров притяжения, либо неустойчивость по отношению к воздействиям со стороны других частей системы, которые вызывают появление новых креодов.

Приложение I к письму К. Уоддингтона (отрывок из статьи М. Дельбрюка «Биологические единицы, наделенные генетической непрерывностью» [3]).

Обсуждая явления, которые наблюдал Зоннеборн и он сам, М. Бил высказал предположение, что эти явления обусловлены свойствами популяции плазматенов, воспроизведение которых избирательно стимулируется или подавляется в зависимости от условий среды.

Я не собираюсь оспаривать эту концепцию, но мне хотелось бы привлечь внимание к некоторым общим свойствам систем, находящихся в так называемом состоянии «равновесия потока» (*en squilibre de flux*); эти свойства необходимо рассмотреть, прежде чем постулировать существование генетически непрерывных биологических элементов в каком-либо одном или во всех случаях, когда наблюдается генетическая непрерывность функции.

Развиваемое мною положение состоит в следующем: *многочисленные системы, находящиеся в состоянии равновесия потока, могут иметь несколько равновесных состояний при одних и тех же условиях. Они могут переходить от одного состояния равновесия к другому под влиянием проходящих возмущений.*

Это общее положение можно проиллюстрировать простой моделью.

В приведенном здесь схематическом изображении клетки (фиг. 1) буквы A_1 , A_2 , B_1 , B_2 соответствуют различным ферментам. Буквами a_1 и b_1 обозначают соответствующие субстраты. Под влиянием ферментов A_1 и B_1 эти субстраты превращаются в промежуточные продукты обмена веществ — a_2 и b_2 , которые в свою очередь представляют собой субстрат для ферментов A_2 и B_2 и под их влиянием превращаются в продукты распада a_3 и b_3 . В условиях постоянной среды клетка быстро приобретает устойчивое состояние, характеризующееся некоторой постоянной концентрацией промежуточных

продуктов a_2 и b_2 . В этой модели имеется лишь одно устойчивое состояние, определяемое условиями среды и ферментативными свойствами клетки.

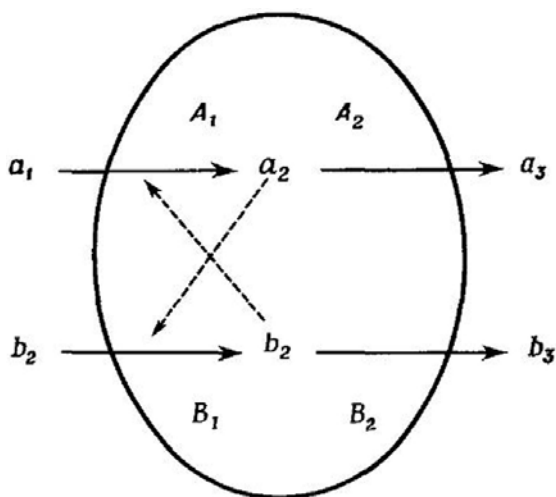
Предположим теперь, что между двумя последовательностями ферментативных реакций существует взаимодействие. Уточним далее характер взаимодействия, допустив, что вещество a_2 влияет на характер реакции, катализируемой ферментом B_1 таким образом, что эта реакция подавляется¹ при *высоких* концентрациях a_2 . Предположим также, что вещество b_2 оказывает сходное действие на фермент A_1 . Эти взаимодействия изображены на схеме (фиг. 1) пунктирными стрелками.

Эта измененная модель клетки при постоянных условиях также достигнет состояния равновесия потока. Однако теперь уже для тех же условий среды возможны три состояния равновесия — два устойчивых и одно неустойчивое. Рассмотрим, например, условия, определяемые равными концентрациями веществ a_1 и b_1 . Возникающее в конечном счете равновесие потока зависит от очередности введения этих веществ в среду. В зависимости от этого возможны три случая:

1) большое количество a_2 и незначительное количество b_2 , если первым ввели a_1 — равновесие устойчиво; назовем его *состоянием a*;

2) немного a_2 и много b_2 , если первым ввели b_1 , — равновесие снова устойчиво; назовем его *состоянием b*,

3) a_2 и b_2 присутствуют в равных и притом низких концентрациях, если оба вещества добавили одновременно в равных количествах; наблюдается равновесие потока, но оно неустойчиво, и незначительные возмущения могут вызвать переход из состояния a в состояние b .



Фиг. 1. Схема взаимодействия между ферментативными реакциями, происходящими в клетке.

¹ Подобная ситуация может быть обусловлена обратимой димеризацией a_2 , когда только димер подавляет реакцию, катализируемую ферментом B_1 .

Этот переход из состояния a в состояние b можно вызвать какими-либо резкими *преходящими* возмущениями. Например, в случае начального состояния a *одномоментное* снятие подавляющего действия a_2 на B_1 вызовет переход из состояния a в состояние b .

Подобные результаты можно получить при различного рода воздействиях: *временная* обработка сывороткой против a_2 ; *временное* изменение температуры, вызывающее избирательное подавление активности фермента A_1 ; *временный* перенос в среду, лишенную вещества a_1 .

Таким образом, наша модель клетки может существовать в двух функционально различающихся состояниях, не связанных с какими-либо изменениями генов, плазмагенов, ферментов и любых других структурных элементов; переход из одного состояния в другое обусловлен *временными* изменениями условий среды.

Модели подобного рода можно изменять бесчисленными способами, отвечающими множеству различных состояний равновесия потока, наделенных любой степенью устойчивости. Переход из одного состояния в другое в разных случаях может быть обратимым или необратимым, как и в явлениях дифференцировки, для объяснения которой также постулировали, не имея на то фактических оснований, существование плазмагенов.

Я не намерен излагать здесь теорию явлений, описанных Зоннеборном и Билом. Я хотел бы просто подчеркнуть, что в случае систем, находящихся в состоянии равновесия потока (но не систем, находящихся в состоянии равновесия), возможны различные объяснения, которые из общих соображений никак нельзя считать ни неправдоподобными, ни даже маловероятными. Предложенное выше объяснение не ново, и многие биологи более или менее ясно представляют себе, что оно влечет за собой. Я надеялся, что эта простая модель поможет конкретизировать и уточнить предложенное объяснение.

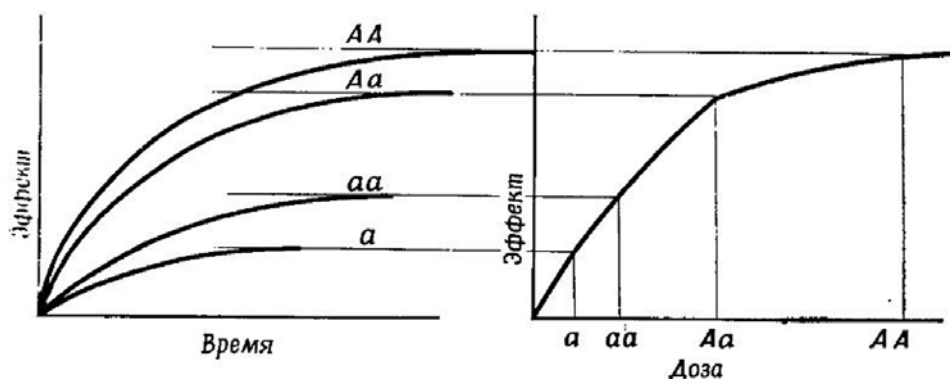
Приложение II к письму К. Уоддингтона (отрывок из книги К. Уоддингтона «Введение в современную генетику» [2], стр. 180–184).

3. Кривые время — эффект и доза — эффект. В предыдущем разделе мы пытались описать течение морфогенетических реакций, приводящих к образованию определенного вещества. Мы могли бы суммировать все эти реакции для какого-либо конкретного случая, строя график зависимости количества вещества от времени. Получаемую при этом кривую можно назвать *кривой время — эффект* исследуемого гена. В этом разделе мы попытаемся расширить это представление, с тем чтобы кривая время — эффект для данного гена включала в себя всю информацию об активности гена в процессе развития.

Прежде всего необходимо рассмотреть связь между кривыми время — эффект и доза — эффект одного и того же гена (фиг. 2). Кривые доза —

эффект, о которых мы уже говорили, можно получить, откладывая по оси абсцисс дозы данного гена, а по оси ординат — его конечный эффект, проявляющийся во взрослых организмах. С морфогенетической точки зрения конечный эффект гена во взрослом организме либо должен асимптотически приближаться к кривой время — эффект, когда развитие постепенно замедляется по мере достижения зрелости, либо, как у некоторых животных, должен иметь некое конечное значение, достигаемое к тому моменту, когда развитие внезапно прерывается метаморфозом. В любом случае значение в конечной точке кривой время — эффект совпадает со значением для этого гена на кривой доза — эффект. Если у нас есть ряд аллеломорфов, то кривая доза — эффект представляет собой в сущности просто сумму значений в конечных точках отдельных кривых время — эффект.

Этот момент весьма важен, поскольку он показывает, что некоторые выводы относительно кривых доза — эффект приложимы также к кривым время — эффект. Например, у нас довольно мало подробных сведений о зависимости кривых время — эффект от генетической среды, хотя Форд и Гексли описали действие некоторых модифицирующих факторов на кривую время — эффект для образования пигмента в глазах бокоплава: известно и несколько других случаев. Однако имеется значительно больше данных о компенсации дозы, например в случае мутации *shaven* и др.; это показывает, что кривые доза — эффект зависят не от одного только исследуемого гена, но и от соотношения между этим геном и всем остальным генотипом. Таким образом, можно видеть, что это действие генетической среды на кривую доза — эффект должно быть обусловлено ее действием на кривую время — эффект, и важный вывод о том, что кривая время — эффект является функцией всего генотипа, получает гораздо более прочную основу.



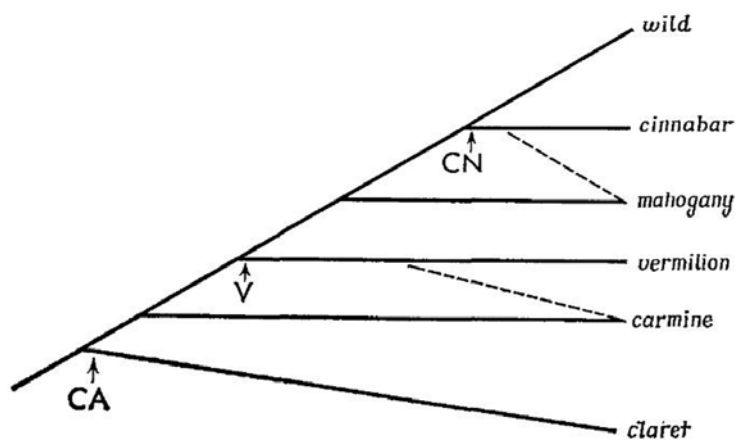
Фиг. 2. Связь между кривыми время — эффект и доза — эффект.

Кривая время — эффект простейшего типа — это такая кривая, которая описывает какие-либо непосредственно наблюдаемые морфогенетические процессы, например откладку пигмента в глазах бокоплава или в коже гу-

сениц непарного шелкопряда *Lymantriu*. Но изучение пигментов глаза, например, у дрозофилы ясно показывает, что доступный непосредственному наблюдению процесс — это лишь конечное звено в целой цепи изменений, ведущих от гена к пигменту. Теоретически мы можем расширить представление о кривых время — эффект с тем, чтобы они отражали не только течение конечного наблюдаемого нами процесса, но и процессы, протекавшие ранее, о которых мы, как правило, знаем гораздо меньше. Например, если пигмент образуется из предшественника, то мы можем не только построить кривую скорости образования пигмента, но и включить в нее более «раннюю» кривую, описывающую скорость образования предшественника.

Если бы мы попытались строго сформулировать только что сказанное, то оказалось бы, что для каждого нового вещества, для изменения концентрации которого мы захотели бы построить кривую, нам пришлось бы вводить новое изменение в пространство, а это вызвало бы тревогу у нематематиков, не привыкших создавать вселенные по своему собственному усмотрению. Однако, даже не затрудняя себя введением многомерных пространств, нетрудно выделить основные моменты, которые выявляются при такого рода обобщении кривых время — эффект.

Прежде всего, в ряде случаев конечные эффекты различаются лишь количественно и непрерывно изменяются в известных пределах. В таком случае единственное, что мы можем сказать относительно кривых время — эффект, это то, что скорости описываемых процессов могут изменяться непрерывно, так что к моменту прекращения развития образуются различные количества конечного продукта. Быть может, более важное значение имеют те случаи, в которых мы находим несколько довольно четко выраженных и альтернативных морфогенетических процессов; такие процессы легко изобразить в виде системы разветвляющихся линий (фиг. 3). Например, в развитии дрозофилы имеется определенный период, когда для нормальной пигментации глаза необходимо вещество *vermilion*. Если его нет, то образующие пигмент вещества изменяются таким образом, чтобы происходил синтез вещества *vermilion*; если же это вещество имеется, то образующие пигмент вещества изменяются так, чтобы развивалась нормальная пигментация.



Фиг. 3. Схема процессов образования пигмента в глазу у дрозофилы.

Процесс развития идет слева направо по разветвляющимся линиям. Точки CA, V, CN символизируют выбор между двумя альтернативными путями развития, зависящий от наличия веществ *claret*, *vermilion* и *cinnabar*. Таких ответвляющихся путей развития, вероятно, гораздо больше, однако мы пока не можем включить их в нашу схему. Так, известно, что у мутантов *carmine* очень мало или вообще нет вещества *vermilion*, а у мутантов *mahogany* мало вещества *cinnabar*. Однако мы пока не знаем, ответвляются ли пути развития особей, гомозиготных по этим генам, от нормального пути развития до точек ветвления V и CN или же они представляют собой вторичные ветви (прерывистые линии) и процесс идет до второй точки ветвления, когда наличие или отсутствие другого вещества, *cinnabar*, определяет, в каком направлении будет происходить дифференцировка. В подобном случае имеется смесь реагирующих веществ (например, два-три фермента и несколько субстратов), и в каждой точке ветвления имеется два альтернативных пути, по одному из которых может пойти изменение этой смеси в зависимости от наличия или отсутствия вещества *vermilion*; возможно, например, что это вещество подавляет наиболее активный фермент и позволяет действовать другому, менее активному. У нас нет никаких подробных сведений об этих процессах; мы знаем лишь, что имеем здесь дело с системой, обладающей способностью изменяться по альтернативным путям.

Поэтому, если мы хотим рассмотреть всю цепь реакций, участвующих в каком-либо процессе развития, например в образовании пигмента, мы должны заменить одиночную кривую время — эффект системой разветвляющихся линий, которая символизирует все возможные пути развития, контролируемые различными генами. Более того, нам следует помнить, что на каждую из этих ветвей воздействует не только ген, соответствующий данной ветви, но и весь генотип. Мы смогли бы учесть все это, изобразив процессы развития не в виде линий, разветвляющихся на плоскости, а в виде, скажем, ветвящихся долин на поверхности земли. Линия, по которой развивается этот процесс, т. е. действительная кривая время — эффект, соответствует при этом дну долины, все остальные гены, совместное действие которых определяет направление кривой время — эффект, — ее склонам; некоторые из этих генов располагаются на одном склоне, изменяя направление кривой в одну сторону, а другие — на другом склоне и изменяют ее направление в противоположную сторону. Можно было бы сравнить всю совокупность генов с геологической структурой, определяющей форму долины, а такие гены, как *vermilion*, оказывающие влияние в критические моменты выбора одного из взаимоисключающих направлений, — с интрузивными породами, отклоняющими долину в сторону.

Эта попытка символического изображения процессов развития может показаться излишне образной и абстрактной. Однако ее абстрактность сле-

дует отнести за счет недостаточности наших знаний о действительно происходящих процессах. В этой модели наглядно отражены два важных, но абстрактных момента: во-первых, что процесс развития определяется многими генами; во-вторых, что эти гены часто определяют альтернативные направления, по которым могут идти соответствующие реакции.

Ту же самую схему можно использовать для описания развития признаков, которые представляют собой не просто вещество, а некую сложную структуру. Например, была привлечена сходная с вышеописанной последовательность реакций, чтобы объяснить морфогенетическое действие гена *Bar* у дрозофилы; этот пример был разработан довольно детально путем изучения влияния температуры на число фасеток в глазу. К сожалению, мы наблюдаем лишь конечный результат, «замороженный» наступлением метаморфоза. Оказалось, что изменение температуры влияет на число фасеток у особей с геном *Bar* лишь в определенный период (непосредственно перед появлением фасеток).

Было высказано предположение, что на ранних стадиях развития синтезируется некое образующее фасетки «вещество», что существуют разрушающие это вещество реакции, контролируемые геном *Bar*, и что, наконец, третий ряд процессов определяет конкретное время начала образования фасеток; при этом число образовавшихся фасеток соответствует имеющемуся в наличии количеству «вещества». Температура, повидимому, оказывает влияние на процесс разрушения вещества, контролируемый геном *Bar*, причем это влияние наблюдается лишь в присутствии гена *Bar*. В этом случае конечный продукт, соответствующий «эффекту» на графике время — эффект, представляет собой не какое-то одно вещество, как, например, пигмент, а относительно сложно организованную ткань — фасетки глаза. Однако образующее фасетки вещество, быть может, представляет собой определенное химическое соединение, поскольку Эфрусси недавно показал, что число фасеток, образующихся у мутантов под действием гена *Bar*, можно увеличить, вводя мутантным особям соответствующие экстракты из куколок дикого типа. Мы ничего не знаем о механизме действия этого вещества — быть может, оно усиливает какой-то индуктивный фактор, стимулирующий образование фасеток, или же снижает порог реакции на этот фактор. Само же вещество может быть близким в каких-то отношениях веществу *vermilion* или даже идентичным ему; известно, что ген *Bar* подавляет образование вещества *vermilion*, но только в самом глазу, а не в других органах.

Рассматривая развитие с эмбриологической точки зрения, мы можем, как и в случае мутации *Bar*, не выражая интересующие нас признаки в терминах количества определенных веществ, говорить о гистологических типах, например о нервной ткани, фасетках глаза и т. д. Однако экспериментальная эмбриология приводит к концепции совершенно такой же системы альтерна-

тивных возможностей, какую нам пришлось создать для объяснения результатов действия генов. Например, развитие эктодермы зародыша амфибий на стадии гаструлы может пойти по двум альтернативным направлениям: она может превратиться в эпидермис или, под действием индуктора, в нервную ткань. Этот случай аналогичен одной из точек ветвления в системе образования пигмента у дрозофилы. Для обоих этих подходов к изучению развития (генетического и эмбриологического) характерна одинаковая постановка основных проблем, и мы можем надеяться на успешное сотрудничество генетики и эмбриологии в решении этих проблем.

4. Письмо Р. Тома К. Уоддингтону Бюр, 20 февраля 1967 г.

Большое спасибо за Ваше письмо от 4 февраля и присланные Вами выдержки из статьи Дельбрюка и Вашей книги — они, как мне кажется, имеют фундаментальное значение для истории развития представлений о клеточной дифференцировке. Однако я должен сознаться, что не смог уловить подчеркиваемых Вами различий между «состояниями равновесия потока» Дельбрюка и Вашими «креодами или путями развития». Насколько я понял, Вы имеете в виду, что в модели Дельбрюка происходит выбор, который, по крайней мере на некоторое время, фиксирует некоторое устойчивое состояние обмена веществ. Я не думаю, что Дельбрюк сам согласился бы с подобным толкованием; прежде всего он сам проводит различие «в случае систем, находящихся в состоянии равновесия потока (но не систем, находящихся в состоянии равновесия)» (стр. 160): Это, по-видимому, означает, что в отличие от простого равновесия «равновесие потока» в какой-то мере может смещаться. Но, разумеется, эта терминология не совсем ясна. Кроме того, не следует забывать, что все эти рассуждения относятся к «плазмагенам» или цитоплазматической наследственности. Как же в таком случае это так называемое устойчивое состояние переживает те огромные изменения обмена веществ, которые претерпевает любая клетка в процессе митоза, споруляции или гаметогенеза?

Разумеется, Дельбрюк, предлагая свою модель с веществами a_1, b_1, a_2, b_2 и ферментами A_1, B_1, A_2, B_2 и т. д., вовсе не претендовал на описание всего обмена веществ клетки. Он хотел лишь описать некую подсистему S метабо-

литов, которую можно с достаточным основанием рассматривать как независимую или по крайней мере слабо связанную со всей остальной системой обмена веществ R , отличающейся по составу от этой подсистемы S . «Устойчивые растворы», «центры притяжения» подсистемы S — при условии, что они структурно устойчивы, — будут оставаться качественно неизменными или изменяться лишь незначительно за относительно длительное время. (Отметим, что это наблюдение справедливо для всех биохимических моделей, в том числе и для модели регуляции, предложенной Жакобом и Моно). Однако остальная часть (R) обмена веществ может сама претерпевать значительные изменения и соответственно приводить к существенным изменениям фенотипа. В конечном счете эти изменения могут вызвать разрушение в результате катастрофы центра притяжения в подсистеме S и тем самым обесценить модель.

Что касается Ваших «креодов» или путей развития, то единственный способ обеспечить их устойчивость, или «канализацию», состоит в том, чтобы связать креод с какой-либо подсистемой S , типа описанной Дельбрюком. Это именно то, что Вы имеете в виду, когда говорите о склонах долины, определяемых действием антагонистических генов (или групп генов) (см. стр. 162). Мы должны также учитывать, что координатами этому локальному расщепляющему фактору S (split factor) обмена веществ могут служить не концентрации метаболитов, а их весьма сложные функции (так что простая биохимическая интерпретация фактора S становится весьма затруднительной). Более того, в каждый данный момент может существовать несколько таких «расщепляющих» факторов $S_1, S_2, \dots$, каждый из которых имеет ряд центров притяжения; это, пожалуй, может дать наиболее вероятное определение понятия «гомологичных креодов» в эмбриологии. Наконец, я не думаю, что между моделью Дельбрюка и Вашей есть существенная разница, если не считать того, что Ваша модель носит более общий характер. Основная заслуга Дельбрюка заключается в том, что он воплотил эту идею в частную форму, более приемлемую для рядовых биохимиков.

Из всего этого можно сделать вывод, что такие термины, как «равновесие потока», «локальный устойчивый режим обмена веществ», «устойчивое состояние» и др., могли бы стать более точными лишь при использовании геометрической модели, даже если она не слишком детализирована. Вместо предлагаемого Вами уточнения: «устойчивый, но развивающийся (во времени) режим локального обмена веществ» я бы сказал: «центр притяжения кинетической биохимической системы, касательной в рассматриваемой точке». Это было бы единственно правильным выражением, но кому из биологов была бы понятна такая терминология?

Поскольку я не уверен, что я знаком со всеми Вашими работами, я просил бы Вас указать, где Вы лучше всего определили термины:

- 1) креод;
 - 2) эпигенетический ландшафт;
 - 3) гомеорез (в отличие от гомеостаза).
- Заранее Вам признателен.

5. Письмо К. Уоддингтона Р. Тому Эдинбург, 23 февраля 1967 г.

Спасибо за Ваше письмо. Вы спрашиваете: в чем различие между тем, что сказал Дельбрюк, и тем, что сказал я? Я допускаю, что мог неверно понять его, но я понял его следующим образом: существует некое замкнутое пространство, в которое поступают определенные вещества (a_1, b_1), а выходят из него другие вещества (a_3, b_3). Внутри этого пространства имеется механизм переключения. Когда Дельбрюк говорил о «системах, находящихся в состоянии равновесия потока (но не о системах в состоянии равновесия)», то, как мне казалось, он имел в виду «системы, находящиеся в состоянии равновесия, несмотря на то что какие-то вещества непрерывно поступают в них и выходят из них, т. е. системы, находящиеся в устойчивом равновесии», противопоставляя их «системам, находящимся в состоянии равновесия, через которые не проходит поток веществ». Это, как мне представляется, обычное значение термина «равновесие потока». В обеих этих фразах слово «равновесие» (будь то равновесие потока или просто равновесие) должно означать, что концентрации веществ внутри систем остаются постоянными. Вы спрашиваете: как они могут оставаться постоянными при столь глубоких изменениях, как деление клетки и т. п.? Я должен подчеркнуть, что модель Дельбрюка была предложена как *альтернатива* постулированию генетически непрерывных «плазмагенов» и была специально предназначена для объяснения передачи неизменяющегося признака на протяжении многих поколений клеток. При этом подразумевалось, как мне кажется, что пертурбации клеточного деления — это преходящее изменение некой системы, лишь слабо связанной с описываемой нм системой сохранения признака.

Я думаю, что именно так большинство биологов поняло Дельбрюка. Например, Жакоб и Моно [4] писали: «Сохранение включает в себя различную функциональную активность нуклеотидных последовательностей, обусловленную, например, установлением устойчивых систем, способных к клональному воспроизведению, как указал в 1949 г. Дельбрюк».

Я считаю, что прогрессивная дифференцировка *не есть* клональное воспроизведение.

Итак, мы подошли к различию между системой Дельбрюка, как я ее понимаю, и моей. В его системе клеточный признак, находящийся в одном из своих альтернативных состояний, остается постоянным во времени — концентрации веществ находятся в состоянии «равновесия потока» в том смысле, что они не изменяются, несмотря на непрерывное протекание веществ через систему. Это «гомеостаз». В предлагаемой мною системе альтернативные состояния клетки находятся между «равновесными» состояниями типа гомеореа, в каждом из которых концентрации веществ не остаются постоянными, а изменяются по определенным протяженным во времени траекториям.

Вопрос. «Кто сказал первый?», разумеется, довольно тривиален, но вопрос «Кто сказал правильно?» более важен. По-моему, в 1949 г. Дельбрюк говорил о выборе между круговым движением по площади Согласия или круговым движением по площади Этуаль, а это лишь частный пример того, о чем я говорил в 1939 г. — об альтернативе между поездкой от аэровокзала у Дома Инвалидов к аэропорту Орли или к аэропорту Ле Бурже.

Различия между представлениями Дельбрюка и моими стираются лишь в том случае, если Вы столь чистый математик, что не видите различия между параметрами, представляющими материальные переменные, например концентрацию веществ, и параметром, представляющим время. Но именно на таком уровне абстракции математика утрачивает связь с конкретными проблемами биологии.

Что касается перечисленных Вами терминов, то:

- 1) термин «креод» впервые был введен мною в 1957 г. ([5], стр. 32).
- 2) термин «эпигенетический ландшафт» — в 1940 г. [6], а затем в 1957 г. [5]:
- 3) термин «гомеореа» я впервые использовал в 1957 г. [5], а понятие, как я пытался показать Вам, фактически уже содержалось в моих книгах 1939 [2] и 1940 гг. [6].

ЛИТЕРАТУРА

1. *Thompson d'Arcy W.* On growth and form, Cambridge University Press. 2nd ed., 1942.
2. *Waddington C.H.*, An introduction to modern genetics. Allen and Unwin, London, 1939.
3. *Delbrück M.* in: Unités biologiques douées de continuité génétique. C. N. R. S., Paris, 1949. P. 33.
4. *Jacob F., Monod J.*, in: Cytodifferentiation and macromolecular synthesis, M. Locke, ed., Acad. Press, New York and London, 1963. P. 30–64.
5. *Waddington C.H.* The strategy of the genes. Allen and Unwin, London, 1957.
6. *Waddington C.H.* Organisers and genes. Cambridge Univ. Press, 1940.

«ЯЩИКИ» КАК МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ

Д. МИЧИ и Р. ЧЕМБЕРС
(Эдинбургский университет)

Трехцветный флаг. При обсуждении проблемы регуляции морфогенеза Вольперт использовал сравнение с трехцветным флагом. Как можно было бы получить структуру, подобную трехцветному флагу, в колонне стоящих в строю солдат? Если у каждого солдата есть красный, белый и синий флажки, из которых можно поднять одновременно только один, то какими правилами должен пользоваться начальник колонны, чтобы получить из этих флажков желаемую трехцветную структуру?

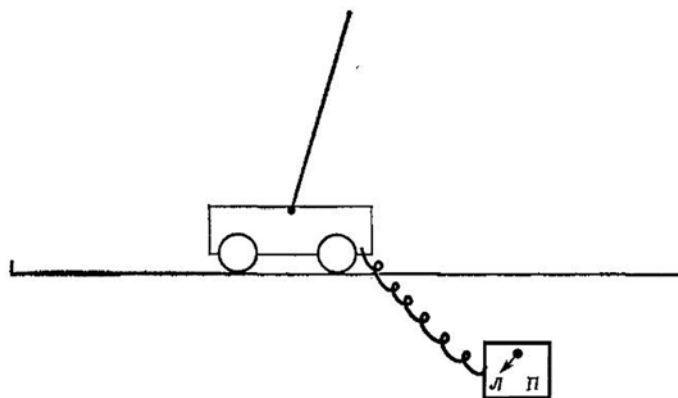
Некоторые локальные правила явно будут при этом полезны, так как они упрощают глобальные инструкции. Например, правило, гласящее: «Если солдат, стоящий впереди вас, и солдат, стоящий позади вас, подняли флажки одного цвета, то и вы поднимите флажок того же цвета», не только позволяет корректировать возможные ошибки, но и обеспечивает, чтобы запланированная вертикальная граница между различными цветами была действительно вертикальной и прямолинейной. С этим можно сравнить задачу синхронизации цепи стрелков, когда цепь солдат, каждый из которых может обмениваться информацией лишь с двумя своими соседями, должна «прийти к соглашению» и выстрелить одновременно (см. [1]).

Мы не будем больше обсуждать проблему трехцветного флага. Однако почти все, что мы скажем, можно интерпретировать как относящееся именно к этой проблеме. В частности, описываемый нами эксперимент имеет непосредственное отношение к проблеме трехцветного флага, хотя мы этого и не знали.

Центральная и локальная организация. Мы представляем себе эту проблему следующим образом: определенная пространственная структура возникает в результате взаимодействия в последовательные моменты времени некоторой совокупности глобальных и ряда локальных инструкций, которыми должны быть снабжены — каждый в отдельности — автоматы, объединенные центральным управлением. Под глобальной инструкцией мы понимаем инструкцию, исходящую от начальника в процессе образования структуры, которой каждый автомат подчиняется независимо от действий соседних автоматов. Что касается локальных инструкций, то в простейшем случае они одинаковы для всех автоматов, и приводимый нами пример отно-

сится именно к таким случаям. Но это ограничение не обязательно. Главное значение имеет вопрос о том, в какой мере, руководствуясь соображениями экономии и эффективности, следует (и следует ли это делать вообще) децентрализовать управление процессом, вместо того чтобы целиком подчинить его центральной власти.

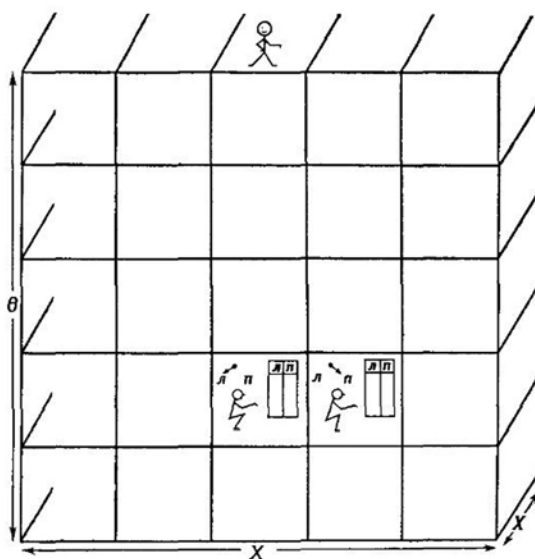
Этот вопрос имеет несомненное отношение к теориям морфогенеза. Значение приводимого нами примера, если он вообще имеет какое-то значение, обусловлено именно тем, что эта работа очень далека от проблем морфогенеза и от биологических проблем вообще. Пытаясь решить одну трудную задачу, связанную с адаптивным регулированием, мы разработали систему локальных автоматов, взаимодействующих с центральным управлением, в которой обнаруживаются некоторые поразительные параллели тому, каким образом некоторые проблемы адаптации решались природой.



Фиг. 1. Схема регулируемого устройства.

Наша проблема адаптивного регулирования представляет собой одну из разновидностей проблемы «черного ящика». По правилам игры должна быть сконструирована некая система, регулирующая некое физическое устройство, свойства которого вначале более или менее неизвестны. Эта система должна самоорганизовываться, используя свои пробы и ошибки в качестве единственного источника информации, на основании которой она самоорганизуется в соответствующую структуру типа «стимул — ответ»; под этим мы подразумеваем структуру, дающую возможность эффективно регулировать данное физическое устройство. Составленная для этой цели программа вычислительной машины служит примером «обучающейся», «эволюционной», «адаптивной» или «самоорганизующейся» системы. Так как мы исходим из предположения, что за каждую ошибку, допущенную при формировании структуры, приходится платить определенный штраф, наша цель состоит в разработке системы, способной создать структуру заданного типа, совершая при этом возможно меньше ошибок.

Система с уравниванием стержня. Первые попытки решения этой проблемы были сделаны Д. Вулдриджем младшим, который составил всю программу и принял участие в обсуждении общей конструкции. Выбранное нами для проведения испытаний физическое устройство было сходно с моделью, впервые использованной Дональдсоном [2] для иных, хотя и близких, целей. Это тележка с качающимся стержнем, которая с помощью мотора движется по дорожке определенной длины (фиг. 1). Регуляция осуществляется с помощью ключа, имеющего лишь два альтернативных положения: «левое» и «правое», так что мотор всегда работает на полную мощность либо в одном, либо в другом направлении. Устройство регулярно издает последовательные сигналы, описывающие его состояние. Каждый сигнал представляет собой вектор с четырьмя компонентами x , $\dot{x}$, θ и $\dot{\theta}$, соответствующими положению тележки на дорожке, скорости тележки, углу наклона стержня и скорости изменения этого угла. Вместо вектора, характеризующего состояние, может появиться сигнал «ошибка», обрывающий последовательность сигналов.



Фиг. 2. Пространство состояний (для ясности опущено четвертое измерение, т. е. $\dot{\theta}$, разделенное па «ящички» с независимыми автоматами в каждом из них и «начальником», регулирующим их действия).

Это может означать, что тележка сошла с дорожки, что упал стержень или же что произошло и то и другое, и следует, устранив неполадки, начать новую серию испытаний. Задача управляющего устройства сводится к тому, чтобы сопоставить каждому из этих векторов (не имея никакого представления об их физическом смысле) определенное значение двузначной управляющей переменной таким образом, чтобы исключить появление сигналов ошибки. Следует сразу же сказать, что во всех наших опытах тележка со

стержнем имитировалась специальной частью программы. Мы считали, что на этой стадии изготовление физического экземпляра такой тележки было бы нерациональной затратой времени и сил.

Прежде всего представим нашу проблему в условной графической форме, откладывая значения четырех характеризующих состояние системы переменных на четырех взаимно перпендикулярных осях. Состояние нашего устройства будет при этом соответствовать точке в так определенном четырехмерном координатном пространстве. Обучение методом проб и ошибок может в принципе осуществляться с помощью программы, в которую заложен периодически повторяющийся вопрос: «Был ли я здесь раньше? А если был, то что я делал и к чему это привело?» В координатном пространстве имеется бесконечное число точек, соответствующих состояниям нашего устройства, так что ответом на этот вопрос практически всегда будет: «Нет, я здесь раньше не был».

Поэтому мы последовали примеру Уидроу [3], изучавшего систему тележки со стержнем с тех же позиций, что и Дональдсон (т. е. автоматическое обучение путем имитации предсуществовавшего управляющего устройства, а не обучение *de novo* методом проб и ошибок). Уидроу разделил бесконечно большое число возможных состояний системы на относительно небольшое число классов с помощью соответствующих пороговых значений, определяющих состояние переменных величин; тем самым все координатное пространство было разбито на небольшое число подпространств, или «ящичков», как мы их назвали; на фиг. 2 показано принятое нами разбиение. Мы различаем только три значения для положения x , шесть значений для угла θ , три — для скорости $\dot{x}$ и три — для скорости $\dot{\theta}$ изменения угла, что дает нам всего 162 ящика. Эти переменные имеют следующие пороговые значения:

$$\begin{aligned}x &— \pm 7; \pm 21 \text{ дюйм}, \\ \theta &— 0; \pm 1; \pm 6; \pm 12 \text{ град}, \\ \dot{x} &— \pm 1; \pm 30 \text{ дюйм/сек}, \\ \dot{\theta} &— \pm 6; \pm 24 \text{ град/сек},\end{aligned}$$

и каждый выход за пределы этих значений немедленно вызывает сигнал ошибки.

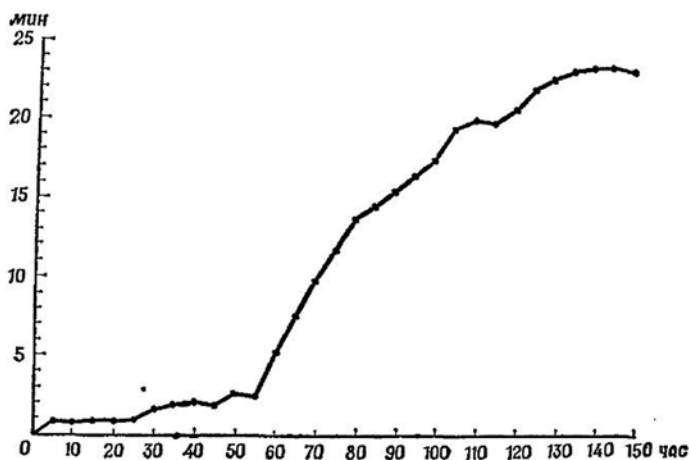
Коллектив автоматов. Теперь мы опишем предлагаемое нами решение проблемы. Оно, как нам кажется, будет иметь некоторое отношение к обсуждавшемуся нами ранее представлению о возложении ответственности на коллектив автоматов низшего уровня, каждый из которых действует независимо друг от друга в соответствии с локальными правилами принятия решения.

Представим себе, что в каждом ящике (фиг. 2) находится автомат, изображенный на схеме в виде человечка. У этого робота есть переключатель, который он может переводить в одно из двух положений — «левое» или «правое» — и доска, разделенная соответственно на «левый» и «правый» столбцы. В левый столбец робот заносит текущую оценку ожидаемого времени жизни системы до наступления ошибки, следующей за принятием «левого» решения; эта оценка представляет собой взвешенное среднее, взятое по всем предшествующим случаям, когда система попадала в его ящик и он принимал «левое» решение. Аналогичные записи делаются и в правом столбце. Что же происходит в то время, когда работает программа, имитирующая поведение этой системы? Имеется один «главный автомат», или «начальник», изображенный на фиг. 2, который принимает все последовательные сигналы о состояниях и поэтому всегда знает, в каком ящике находится в данное время точка, положение которой отражает состояние всей системы. Если он принимает сигнал «ошибки», то он информирует об этом всех роботов. Во всех других случаях он подает команду тому роботу, в чьем ящике находится в данный момент точка, отражающая состояние системы, и этот робот производит следующие действия:

1) сравнивает имеющиеся у него в данный момент сведения об «ожидаемом времени жизни в случае «левого» решения» и об «ожидаемом времени жизни в случае «правого» решения» и в зависимости от того, которое из них больше, переводит переключатель в «левое» или «правое» положение;

2) начинает отсчет времени;

3) когда он в конце концов получит от начальника сигнал об ошибке, он использует этот отсчет времени для вычисления новой текущей оценки времени жизни в левом или в правом столбце своей доски.



Фиг. 3. Успешное обучение. По оси ординат отложены результаты обучения системы (взвешенная средняя продолжительности одного цикла регулирования — от начала до совершения ошибки), причем больший вес имеют последние по времени циклы. По оси абсцисс отложено общее время, в течение которого происходило обучение системы.

В этом и состоит общая логическая схема нашей адаптивной системы регуляции. Есть еще различные детали, которые мы не будем здесь обсуждать, поскольку они были опубликованы в другой работе [4]. Но они не меняют общей картины. На этой стадии следует сделать два замечания:

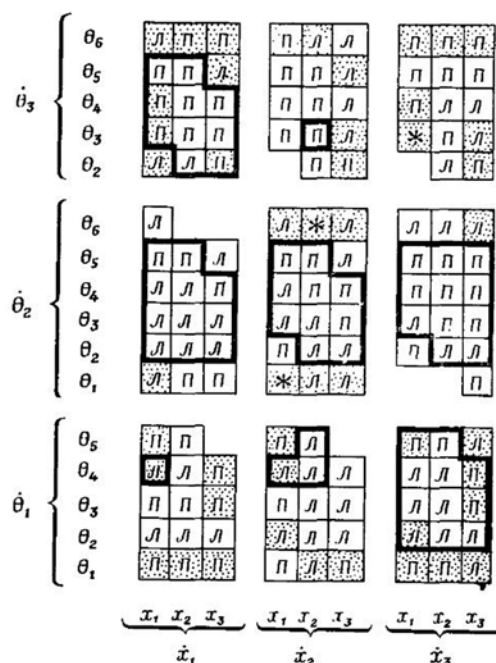
1. Эта программа работает. На фиг. 3 показан успешный ход обучения.

2. Эта задача представляет собой нетривиальную проблему автоматического управления. Все обычные методы требуют строгого определения физических параметров устройства, которое в нашем случае составляет часть условий проблемы. Программа составлена так, что она может имитировать любую физическую систему, состояние которой определяется не более чем четырьмя переменными, каким бы ни был физический смысл этих переменных.

Формирование пространственной структуры. Обратимся теперь к аналогиям из области биологии. Круг их довольно широк. Принцип построения пространственной структуры некоторой целостностной системы с использованием коллективного поведения локально автономных подсистем, по-видимому, представляет собой характерную стратегию Природы. Лонгет-Хиггинс (личное сообщение) говорил о «подпорядках» в применении к морфогенезу, и при подробном исследовании любой сложной системы — нейрофизиологической, морфогенетической или эволюционной — мы, несомненно, обнаружим эту черту ее организации. Но сначала мы постараемся показать, что ящики и стержни действительно имеют отношение к формированию пространственной структуры.

Рассмотрим начальное состояние нашей четырехмерной системы из 162 ящиков. Первоначальное положение переключателей в этих ящиках выбирается случайно: в одних ящиках это «левое» положение, в других — «правое». Совокупность этих положений не образует никакой пространственной структуры. Однако *конечное* состояние системы, сохраняя некоторую долю случайности в редко посещаемых участках, в других участках обладает весьма сложной структурой. Это формирование пространственной структуры проиллюстрировано на фиг. 4 и 5, на которых представлено конечное расположение переключателей, отвечающее успешному течению процесса; при этом опущены «недостижимые» ящики, отвечающие невозможным сочетаниям наших переменных. Используемый вариант программы содержит контролирующую часть, позволяющую обследовать содержимое каждого ящика на любой стадии процесса. Эта часть программы использовалась в конце процесса; цифры показывают количество информации, накопленной в каждом ящике, и относительную ценность «правого» и «левого» решений в каждом из ящиков. Взяв значения каждой из этих двух величин для каждого ящика и сравнив их с выбранными пороговыми значениями, мы разделили все ящики на «информированные» и «неинформированные» (фиг. 4)

и «решительные» и «нерешительные» (фиг. 5). Эти два разбиения связаны с двумя основными чертами структуры, показанными на фиг. 4 и 5, а именно с появлением симметрии и наличием «границ переключения».



Фиг. 4. Конечное состояние системы —

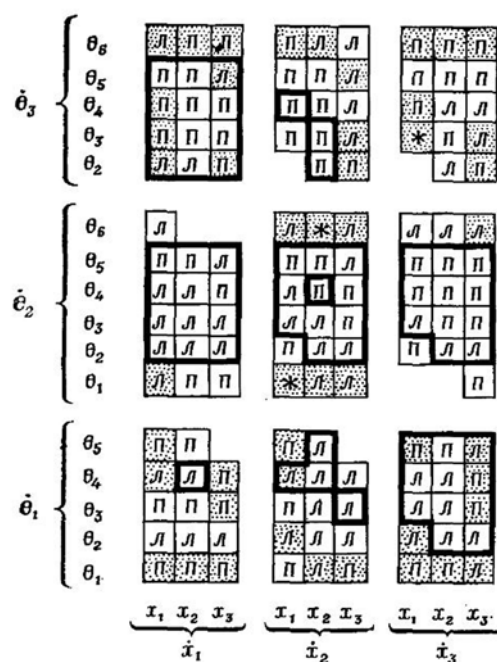
«информированные» ящики обведены жирной линией.

П — правое; Л — левое; * — слишком мало информации для принятия решения. Белые ящики — симметричные; ящики с пунктиром — несимметричные.

$$\begin{array}{lll}
 x_1 \text{ — } (-21:-7), & x_2 \text{ — } (-7:+7), & x_2 \text{ — } (+7:+21) \text{ дюймов} \\
 \dot{x}_1 \text{ — } (-30:-1), & \dot{x}_2 \text{ — } (-1: +1), & \dot{x}_3 \text{ — } (+1:+30) \text{ дюймов в 1 сек.} \\
 \theta_1 \text{ — } (-12:-6), & \theta_2 \text{ — } (-6:-1), & \theta_3 \text{ — } (-1:0) \text{ град.} \\
 \theta_4 \text{ — } (0:+1), & \theta_5 \text{ — } (+1:+6), & \theta_6 \text{ — } (+6:+12) \text{ град.} \\
 \dot{\theta}_1 \text{ — } (-24:-6), & \dot{\theta}_2 \text{ — } (-6:+6), & \dot{\theta}_3 \text{ — } (+6:+24) \text{ град/сек.}
 \end{array}$$

Поскольку эта задача симметрична, то естественно ожидать, что система, самоорганизующаяся для выполнения этой задачи, будет обладать такой же симметрией. Природа этой симметрии состоит в следующем: взяв координаты некоторой точки в пространстве состояний со знаком минус, мы получаем симметричную ей точку, и если, скажем, для регуляции в первой точке необходимо «левое» решение, то в симметричной ей точке необходимо «правое» решение. Поскольку каждый ящик представляет собой совокупность сходных точек, эта симметрия распространяется с отдельных точек на ящики. Мы обнаружили, как и ожидалось, что пространственная структура, формирующаяся в системе ящиков, имеет примерно 50%-ную симметрию

в своей начальной случайной конфигурации, а по мере накопления в ящиках информации, на основе которой они принимают решения, степень этой симметрии возрастает. В конце процесса мы обнаруживаем на фиг. 4, что «информированные» ящики обладают 84%-ной симметрией, тогда как симметрия «неинформированных» по-прежнему остается на уровне около 50 %.



Фиг. 5. Конечное состояние системы — «решительные» ящики обведены жирной линией.

Сравним теперь фиг. 4 и 5 и отметим группы тех ящиков, которые одновременно и «информированы» и «решительны». В этих группах имеются четко очерченные участки, в которых все переключатели находятся в «левом» положении, и участки, в которых все они находятся в «правом» положении. Эти участки соответствуют тем областям в пространстве состояний, в которых «левое» (или соответственно «правое») решение существенно для успешного хода регуляции. Есть также и «безразличные» участки, в которых положение можно скорректировать независимо от того, было ли принято «правое» или «левое» решение, хотя характер корректировки может различаться в разных частях такого участка. В тех участках, где ящики «информированы», но «нерешительны», как, например, ящик $(x_2, \dot{x}_2, \theta_4, \dot{\theta}_2)$, структуры, полученные в ходе различных попыток обучения, будут несколько различаться в деталях, подобно тому как отпечатки ладоней у разных людей различаются в одних участках и сходны в других. В пределах групп «информированных» ящиков «левые», «правые» и «безразличные» участки легко различимы и имеют очень простые границы.

Участки «неинформированных» ящиков — это главным образом те участки, где регуляция очень затруднена или вообще невозможна. Например, в двух участках $(\dot{x}_1, \dot{\theta}_1)$ и $(\dot{x}_3, \dot{\theta}_3)$ скорость тележки $\dot{x}$ и угловая скорость стержня $\dot{\theta}$ имеют один и тот же знак. Чтобы уменьшить угловую скорость $\dot{\theta}$, тележка должна двигаться быстрее, приближая тем самым $\dot{x}$ к критическому пределу, после которого возникает ошибка, тогда как уменьшение скорости $\dot{x}$ приближает к критическому пределу угловую скорость $\dot{\theta}$. Процесс регулирования каждый раз начинается в некой случайно выбранной точке в одном из двух центральных ящиков, $(x_2, \dot{x}_2, \theta_3, \dot{\theta}_2)$ или $(x_2, \dot{x}_2, \theta_4, \dot{\theta}_2)$, и поэтому может попасть в один из упомянутых выше «трудных» участков лишь в результате решения, принятого ящиком, расположенным ближе к центру. Поскольку «неинформированные» ящики — это те, которые посещаются лишь изредка, можно видеть, что система вырабатывает свою собственную классификацию на «контролируемые» и «неконтролируемые» участки и обучается избегать «неконтролируемых» участков.

Разделение и объединение. Слабость нашей программы в ее теперешнем виде заключается в том, что она не соответствует идеалу — независимости от специального знания физического устройства системы. Некоторые сведения такого рода фактически вводятся в программу, когда экспериментатор устанавливает пороговые значения переменных, характеризующих состояние системы. Нетрудно выбрать эти значения так, что задача регулирования станет неразрешимой. На следующем этапе исследования мы намерены наделить программу способностью изменять границы ящиков посредством процессов «разделения» и «объединения». Поскольку здесь напрашивается аналогия с биологическими процессами дифференцировки и дедифференцировки, мы вкратце расскажем о наших планах, хотя эта новая способность еще не введена в программу.

После того как системе ящиков была предоставлена возможность самоорганизовываться в течение некоторого времени, разумно установить примерное разделение ящиков на 3 категории, перечисленные выше; две из них не вызывают никаких забот:

1) ящики, которые редко посещались и поэтому накопили мало информации для того, чтобы научиться выбирать между «левым» и «правым» положениями переключателя;

2) ящики, которые накопили много информации, позволяющей четко принимать одно или другое решение.

Беспокойство вызывает третья категория:

3) ящики, в которых информации накоплено много, однако эта информация не дает возможности сделать выбор между «левым» и «правым» решением.

Наличие такой категории указывает на то, что границы между ящиками были выбраны неудачно; эта категория наводит на мысль, что в пределах одного ящика есть точки, для которых обязательно «левое» решение, и другие точки, требующие «правого» решения. Такое положение указывает на целесообразность разделения этого ящика на два меньших. В результате *вблизи границы переключения* пространство состояний оказывается разделенным на более мелкие ящики. Если же, напротив, окажется, что два или более примыкающих друг к другу ящиков однородны не только в пределах каждого ящика, но и между собой, то такие ящики объединятся в один. Следовательно, в процессе развития системы способность к тонкому различению состояний увеличивается и концентрируется там, где она нужна, и наоборот, уменьшается там, где в ней нет необходимости. Вопрос о том, как с помощью такого процесса дискретной аппроксимации могут быть практически найдены непрерывные границы переключения, предстоит выяснить в дальнейшем.

В заключение следует сказать, что описанная здесь адаптивная система обладает рядом свойств, характерных для различных самоорганизующихся биологических систем, в частности для процесса эволюции, морфогенеза и обучения. Проводя параллель с эволюцией, мы должны иметь в виду, что каждый ящик развивается в среде, представляющей собой в основном продукт деятельности других ящиков. Пожалуй, наиболее близки к описываемой системе небольшие полуизолированные субпопуляции, относящиеся к одной обширной популяции, изменяющейся в определенном направлении. Степень полезности таких аналогий зависит от характера мышления исследователя. Мы решили опубликовать сообщение об этой работе в надежде, что она поможет некоторым из наших читателей несколько по-новому взглянуть на уже известные проблемы.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Moore E.F.* The firing squad synchronization problem, in: Sequential machines: Selected papers, E.F. Moore, ed., Addison-Wesley Publishing Co. Inc., Massachusetts. P. 213–214 (1964).
2. *Donaldson P.E.K.* Error decorrelation: a technique for matching a class of functions, Proc. III Intern. Conf. on Medical Electronics. P. 173–178 (1960).
3. *Widrow B., Smith F.W.* Pattern recognising control systems, in: Computer and information sciences, J.T. Tou and R.H. Wilcox, eds., Clever Hume Press. P. 288–317 (1964).
4. *Michie D., Chambers R.A.* Boxes: an experiment in adaptive control, in: Machine intelligence, 2, E. Dale and D. Michie, eds., Oliver and Boyd, Edinburgh. P. 137–152 (1968).

О ТЕМЕ ВТОРОГО СИМПОЗИУМА

Б. ГУДВИН
(Сассекский университет)

Физика в основном имеет дело с системами, которые можно описать инвариантными во времени величинами, причем центральное место среди них занимает энергия. Биология имеет дело с системами, главными отличительными особенностями которых являются развитие и изменение. Это не означает, что не существует инвариантных во времени величин, которые определяли бы «оболочку», в пределах которой перемещается система, но ясно, что энергия не принадлежит к числу таких величин.

Несомненно, существуют инварианты для систем, в которых энергия не сохраняется, например инвариант Вольтерры для систем типа «хищник — жертва». В этих системах сохраняются какие-либо другие величины. Можно было бы допустить (хотя, в сущности, чисто интуитивно), что свойство жизни должно быть определимо как некая постоянная характеристика биологической системы; что должна существовать некоторая функция движения, активности и изменения, представляющая биологический процесс, подобно тому как энергия представляет процесс физический. Однако невозможно втиснуть биологическое поведение в рамки законов, формулируемых аналитическим образом инвариантно по времени, если оно этому не поддается. Допустить, что задача теоретической биологии состоит в том, чтобы открывать и формулировать такие законы, значило бы предвосхищать события. Это может оказаться не только сверхсамонадеянным, но и неверным.

Более осторожный и эмпирический подход сводится к тому, чтобы сосредоточить внимание на некоторых ключевых понятиях, которые обсуждались на этом симпозиуме. Одной из главных задач второго симпозиума, вероятно, должно быть точное определение этих понятий и их взаимосвязей. Ниже перечислены некоторые из этих понятий с соответствующими вопросами относительно их взаимосвязей, причем они расположены в определенной последовательности, казавшейся нам естественной, которая начинается и заканчивается понятием энергии.

1. Энергия и упорядоченность

1) Какого рода упорядоченность можно вывести из рассмотрения энергетических взаимодействий между элементами?

2) В какого типа биологических системах можно обнаружить такую упорядоченность? В оболочках вирусов, в коллагеновом матриксе, в зародышевых листках?

3) Каковы характеристики устойчивости таких систем, т. е. каков критерий их устойчивости?

2. Упорядоченность и информация

1) Полезно ли связывать упорядоченность (или неупорядоченность) с информацией (отрицательной энтропией) обычной формулой

$$I = -k \lg \Omega = -S,$$

где Ω — число усложнений макромолекулы или число положений, которые может занимать клетка зародыша?

2) Выражает ли это определение информации то, что мы имеем в виду, когда говорим об информации в плане регуляции, т. е. о регуляции активности ферментов при помощи малых молекул?

3) Какова связь между информацией и специфичностью?

3. Информация и организация

1) Включает ли в себя понятие организации непрерывный обмен информацией между частями системы?

2) Можно ли определить организацию в терминах информационного взаимодействия между элементами по аналогии с определением упорядоченности в терминах энергетического взаимодействия?

3) Какой критерий устойчивости определяет организованное поведение? Приспособление, выживание? Чем он отличается от физической устойчивости?

4. Организация и память

1) Для любой организованной системы характерно приспособление к некоторой среде. Обязательно ли такое приспособление связано с предсказанием и, следовательно, с памятью? Является ли память необходимой чертой организованной системы?

5. Память и самовоспроизведение

1) Необходима ли память для самовоспроизведения?

2) Каков простейший автомат, способный к самовоспроизведению? Может ли это быть конечный автомат? Машина Тьюринга?

6. Самовоспроизведение и измерение

1) Связаны ли проблемы квантовомеханического измерения с самовоспроизведением макромолекул типа ДНК?

2) Не встретится ли с трудностями попытка примирить принципы квантовой механики с очевидной надежностью (устойчивостью) макромолекулярного синтеза?

7. Измерение и энергия

1) Могут ли биологи удовлетвориться физической догмой, согласно которой все системы должны в конечном счете допускать описание их (в принципе) в терминах квантовой механики, а следовательно, с использованием таких физических понятий, как энергия, пока не будут решены физические дилеммы, подобные квантовомеханическому измерению?

2) Будет ли иметь решение этой проблемы какое-нибудь значение для теории биологии?

ЗАМЕЧАНИЯ К.Х. УОДДИНГТОНА

Мои основные замечания относятся к первому параграфу; мне кажется, что Гудвин неправ, предлагая нам проявить слабость и попытаться формулировать наши теории в терминах обычных понятий физики.

Мне представляется, что в результате обсуждения на этом первом симпозиуме выявились три основные черты биологии:

1. Биология существенно связана с тремя шкалами времени, отвечающими обмену веществ, развитию фенотипа и эволюции; не может существовать ни мгновенной жизни, ни жизни, попросту представляющей собой циклическое или повторяющееся развитие.

2. Биология существенно многомерна: ни одну единицу, какой бы сложностью она ни обладала, нельзя рассматривать как «живую», не касаясь ситуации, не включенной в эту единицу.

3. Биология существенно упорядочена, в том смысле, что она проявляет гомеорез (а не гомеостаз): не может быть живого существа, которое было бы способно одинаково легко изменяться во всех мыслимых направлениях с течением времени.

Из первой черты биологии следует, что основные понятия биологии не могут быть безразмерными, а должны включать в себя фактор времени. Вместо энергии или даже скорости (которая безразмерна, если пространство и время эквивалентны) мы должны иметь какой-то аналог ускорения. Вместо информации — алгоритм.

Из второй черты следует, что основная теория должна быть сходна с топологией n -мерного пространства.

Из третьей черты следует, что для этой топологии характерна креодичность — продвижение вдоль стабилизированных временных траекторий.

Мне не кажется а priori невозможным построение логической (или математической) теории, обладающей этими свойствами. И, на мой взгляд, лишь такая теория заслуживала бы названия «теоретической биологии».

Эта точка зрения в какой-то степени отражается в поставленном Гудвином вопросе о том, является ли память необходимой чертой организованной системы (хотя я включил бы сюда вместе с памятью и преднастройку, т. е. протяженность во времени).

ЗАМЕЧАНИЯ Г. ПАТТИ

Дорогой профессор Уоддингтон!

Я хочу поделиться некоторыми соображениями по поводу Ваших замечаний к программе, предложенной Гудвином для второго симпозиума.

Я согласен с Вами, что мы не должны «проявлять слабость» и принять «осторожный» подход. Проблема жизни, безусловно, требует смелого и широкого наступления по всем фронтам. Я согласен также с перечисленными Вами тремя основными чертами биологии, выявившимися на первом симпозиуме. Однако я хотел бы остановиться на них подробнее, с тем чтобы, во-первых, убедиться, что я правильно понял, что Вы имеете в виду, и, во-вторых, постараться связать это с тем, что имею в виду я сам.

1. Множественность временных шкал, несомненно, представляет собой важнейший аспект жизни. Физика обычно использует только одну временную шкалу (если не считать некоторых областей нелинейной термодинамики). Я хотел бы только заметить, что для описания всей биологии трех временных шкал может оказаться недостаточно. Например, существует физическое время (в уравнениях движения), каталитическое время (необходимое для описания ферментативных реакций), время клеточного деления, время индивидуального развития, время генерации, время экологической сукцессии и, наконец, эволюционное время. Может быть, следует добавить еще психологическое время, или время сознания.

2. Не существует такой единицы жизни, которую можно было бы назвать «живой» безотносительно к внешней среде. Я сказал бы в связи с этим, что используемые Вами термины «многомерность» и «топологический» не

столь наглядны, как биологические термины. Биологи должны подчеркивать еще и еще раз, что жизнь — это неизбежное свойство, присущее *экосистеме в целом*, а не свойство изолированного скопления макромолекул. Мне кажется, что центральный вопрос происхождения жизни — это не вопрос о том, что возникло прежде, ДНК или белки, а вопрос о том, какова простейшая экосистема? Я думаю, что Кэрнс-Смит с этим согласится.

3. Вы говорите, что «для топологии жизни характерна креодичность», и полагаете, что возможно существование логической теории, основные допущения которой совместимы с пунктами 1 и 2, но следствия из которой обладают креодичностью. Я, пожалуй, согласен с этой Вашей интуитивной оценкой положения, но мне хочется сказать несколько слов о возникающих при этом трудностях.

Такие слова, как «гомеорез» и «креод», связаны для меня с детерминированной реакцией очень сложной системы на очень сложную среду, причем логические элементы этой реакции, по существу, имеют *наследственный* характер. Это означает, что осуществляется выбор или отбор из нескольких физически возможных альтернатив. (Если имеется более чем одна альтернатива и вы выбираете только одну из них, то вы тем самым осуществляете преобразование, переводящее много состояний в одно.) В физическом плане устройство, осуществляющее такое преобразование, например клапан или переключатель, всегда представляет собой неголономную связь; это просто означает, что пространство, в котором могут быть описаны возможные системы, имеет больше измерений, чем число измерений, связанных с реальной траекторией или развитием данной системы. Если угодно, ее можно назвать также «организованной» системой или системой с памятью.

Проблема заключается в том, что элементарные физические законы используют лишь один масштаб времени и выражают лишь взаимно однозначные, или «групповые», преобразования переменных. (Я думаю, кстати, что «топологические» отображения имеют такой же характер. «Полугрупповые» преобразования или преобразования автоматов переводят много состояний в одно.) Как нам быть с этой проблемой? Мы, конечно, можем придумать «математическую биологию», которая будет формально описывать и предсказывать поведение биологических систем. Но в понятие «теоретическая биология» я вкладываю нечто большее. Это должна быть «физическая биология», учитывающая физическую основу всех наших наблюдений над окружающим миром и взаимодействий с ним. При этом мне хочется подчеркнуть, что я рассматриваю такую физическую биологию как вероятную возможность, разработка которой, однако, представляется весьма не легким делом.

В своей заметке Гудвин задает вопрос: «Могут ли биологи удовлетвориться физической догмой, согласно которой все системы должны в конеч-

ном счете допускать описание в терминах квантовой механики?..» Такая постановка вопроса неправомерна. Большинство тех, кого удовлетворяет такая догма, — это представители новой биологии, подобно Крику, Уотсону и Кендрию, тогда как физики, например Бор, Шредингер и Вигнер, настроены не столь решительно. Я думаю, что ни биологи, ни физики не могут удовлетвориться такой догмой, более того, они не могут игнорировать противоречия между физическим и биологическим описаниями. Если биологи не знают физики, то им остается лишь работать с математическими моделями, которые могут дать правильный ответ, но на основе ложных предпосылок.

Я считаю, что Вы дали правильную картину биологии. Но «ослабить» наши усилия в области теоретической биологии — значит забыть о физических законах и успокоиться на одной лишь «математической» биологии. В сущности, я бы считал, что тайна жизни заперта именно в этом противоречии между физическим и биологическим описаниями. Она лежит у самого корня извечных проблем соотношения между объектом и субъектом, детерминизмом и свободой, материей и сознанием, мертвым и живым. Разумеется, было бы самонадеянным считать, что подобные проблемы можно решить раз и навсегда, но игнорировать эти вопросы в связи с теоретической биологией также было бы неразумным.

Все свои дальнейшие соображения я выскажу на симпозиуме.

Искренне Ваш

Г. Патти.

ЗАМЕЧАНИЯ У. ЭЛЬЗАССЕРА

Дорогой Говард!

Я получил Ваше письмо, адресованное проф. Уоддингтону, которое он, по-видимому, разослал всем участникам симпозиума.

Едва ли нужно говорить, что я почти во всем с Вами согласен, хотя есть несколько второстепенных моментов, по которым я могу сейчас же высказаться. Во всяком случае, может оказаться, что они и не будут обсуждаться на симпозиуме.

Прежде всего я решительно возражаю против объединения точек зрения Бора, Шредингера и Вигнера. По мнению Бора, характерная черта автономии любого явления природы состоит в том, что, если подойти к нему с двух совершенно различных сторон, можно получить противоречивые результаты. Он говорит также, что, по его мнению, квантовая механика еще не

достигла такого уровня, чтобы дать адекватное описание жизни, поскольку живому в значительно большей степени свойственно явление комплементарности. В своем выступлении я пытался показать, что такое расширение, по-видимому, не связано с изменением математического аппарата квантовой теории. Я хорошо знал Шредингера и знаю Вигнера и хотел бы сказать, что ни тот ни другой даже не приблизились к той глубине и полноте, с которой Бор рассматривал отношения между физикой и биологией. Его отец был не просто биологом, но, как я недавно узнал, превосходным и мыслящим биологом.

Я не могу согласиться также и с тем, что «теоретическая биология» будет обладать большей глубиной, нежели «математическая» биология. Вместе с тем, как Вы сами отметили, при этом нам приходится гораздо глубже вникать в «философию». Я думаю, что причина этого весьма проста: ведь все мы представляем собой организмы и поэтому биология ближе нашим сердцам, чем физика. Однако я думаю, что перечисленные Вами понятия объекта и субъекта, детерминизма и свободы, материи и сознания в таком контексте приобретают метафизический оттенок. Все это сошло бы до тех пор, пока не вышли на сцену Уайтхед и Рассел. Они научили нас формулировать науку в терминах чисто абстрактных построений, которые затем следовало сопоставлять с экспериментальными данными.

Переходя к биологии, я считаю, что основной проблемой в связи с этим представляется весьма веское возражение, выдвигавшееся многими против дарвинизма: что эволюция в конечном счете должна включать в себя элементы творческого начала. Однако Бергсон совершил грубую ошибку, попытавшись прямо ввести в свои рассуждения понятие творческого начала, которое неизбежно сохраняло метафизический смысл. Я старался избежать этой ошибки, введя понятие «вопросов, на которые нельзя получить ответа». Это несколько напоминает стиль Витгенштейна, который однажды сказал: «Если не существует ответа, то нет и вопроса».

Мое собственное ощущение, которое я вынес из довольно тесного за последние годы общения с биологами, сводится к тому, что, по всей вероятности, еще одному или двум поколениям исследователей придется сосредоточить свои усилия на математической биологии, прежде чем сможет возникнуть подлинная теоретическая биология. Таким образом, мы должны запастись терпением. Этот симпозиум, несомненно, способствовал прояснению мыслей (по крайней мере моих мыслей). Я очень сожалею, что такая возможность возникла не до того, как я закончил свою книгу, а после. Многие из тех, кто участвовал в симпозиуме, заинтересованы в создании подлинной теоретической биологии, так что, во всяком случае, мы не должны торопиться.

Информация и правила для авторов

Общие положения

Журнал «Наноструктуры. Математическая физика и моделирование» (сокращенно: НМФМ) публикуется с 2009 года и является периодическим научным изданием. Электронная версия журнала размещается на сайте <http://www.nano-journal.ru>. Основная цель издания: представление новых теоретических и вычислительных методов моделирования наноструктур и мягкой материи, общих подходов в исследовании мезосистем, а также ключевых экспериментальных результатов в данной области и связанных с этим проблем математической физики.

Журнал НМФМ имеет междисциплинарный характер и в силу этого несет определенную образовательную направленность, а не только узко научную. Работы, представляемые в журнал, должны содержать вводные сведения, которые обеспечат понимание постановок задач и восприятие результатов не только прямыми специалистами. Определения понятий, объяснение обозначений и терминов, оценки характерных параметров, теоретические предпосылки и идеи, используемые методы и т. п. должны быть кратко объяснены в тексте статьи, имея в виду читателей, специализирующихся в иных направлениях. Должны быть описаны базовые математические модели и уравнения. Во Введении и в последующих разделах очерчивается стратегия и основные трудности, это увязывается с используемыми моделями. Структура статьи ориентируется на прояснение общей логики и методики исследования, содержит резюмирующие выводы. В тексте должны быть рассмотрены характерные примеры (хотя бы методические), ясно иллюстрирующие предлагаемые алгоритмы.

Журнал публикует научные обзоры, исследовательские статьи и краткие научные сообщения, а также избранные аналитические и информационно-образовательные материалы, тексты докладов и циклов лекций, прочитанных в университетах, научных центрах, на школах-семинарах, конференциях, нигде ранее не публиковавшиеся и не принятые к публикации в других изданиях. Язык публикации в журнале НМФМ, как правило, русский. Работы, представляемые в журнал, не могут иметь научно-популярный или компилятивный характер. Все статьи рецензируются и могут быть отклонены редколлегией журнала. В случае принятия работы к печати ее авторы передают издателью журнала НМФМ право на разовую безвозмездную публикацию текста и его размещение в электронной версии на сайте журнала. Перевод опубликованных в журнале статей на другие языки может осуществляться только с разрешения и при участии авторов.

Порядок представления статей

- В редакцию изначально представляются:
 - файл статьи, файлы с иллюстрациями;
 - сопроводительное письмо, можно в электронной форме, содержащее сведения об объеме статьи и обо всех авторах (фамилии, имена, отчества, полные названия мест работы, почтовый адрес с индексом, номер контактного телефона с кодом города, электронный адрес автора, ответственного за переписку с редакцией); предпочтительно, чтобы это письмо было выполнено на бланке учреждения, в котором работает кто-то из авторов, было заверенное печатью и содержало утверждение о возможности открытого опубликования статьи;
 - файл с переводом на английский язык названия статьи, фамилий и инициалов авторов, аннотации, ключевых слов.
- Авторские файлы могут быть присланы на электронный адрес: papers@nano-journal.ru; (резервный адрес в случаях затруднений с пересылкой: nano@miem.edu.ru) или переданы в редакцию на любом электронном носителе. Авторы получают из редакции подтверждение о получении их материалов.
- Телефон (факс) редакции: +7 (495) 916-8876. Адрес редакции: Москва, 109028, Б. Трехсвятительский пер., 3/12, Московский институт электроники и математики (МИЭМ), комн. 449.

Общие требования к представляемым файлам

- Допускается использование текстового редактора WORD.
К рабочим файлам должна быть приложена их pdf-копия. В названии файлов используется латинский алфавит, пробелы заменяются знаком Шляпка статьи содержит название, инициалы и фамилии авторов, место работы, электронный адрес, краткую аннотацию, ключевые слова. В аннотации не следует использовать формулы и ссылки на текст работы или список литературы; в конце она должна содержать индекс УДК (к английской версии аннотации можно добавить индексы зарубежных рубрикаторов).
- Объем кратких сообщений 4-8 страниц, исследовательских статей, как правило, до 20 страниц, а обзоров — более 20 страниц. Верхняя граница согласуется с редколлегией. При подсчете объема нужно ориентироваться на страницы формата А4, шрифт 12, знаков в строке 80, интервалов между строками 1.
- Авторы не должны злоупотреблять сокращениями, составленными из заглавных начальных букв терминов. Предпочтительней каждый раз использовать полное наименование объекта. Возможно использование только устоявшихся аббревиатур.

Требования к файлам Word

- Рекомендуемый шрифт — Times New Roman.
- Строки в пределах абзаца не должны разделяться символом возврата каретки (Enter).
- Нельзя использовать автоматическое создание сносок, автоматический перенос или автоматический запрет переносов, создание списков, автоматический отступ и т.п.
- Ссылки на список литературы даются цифрами в квадратных скобках: [1], [5–7], [1–9].
- Все без исключения формулы и обозначения размерности, даже состоящие из одной латинской буквы, и в тексте и вынесенные в отдельную строку, всегда набираются в формульном редакторе и никогда — в обычном текстовом редакторе.

- При создании таблицы рекомендуется использовать возможности Word или MS Excel. Таблицы, набранные вручную (с помощью большого числа пробелов), не принимаются.

Требования к иллюстрациям

- Иллюстрации представляются в отдельных файлах, черно-белыми. Они должны иметь разрешение не менее 600 dpi.
- Форматы файлов — TIFF, EPS, PSD, JPEG.

Требования к списку литературы

- Ф.И.О. авторов или редакторов выделяются курсивом.
- Для статей приводится название. Названия отделяются от выходных данных знаком //. Расположение выходных данных указано на образце ниже. Номер тома выделяется жирным шрифтом, номер выпуска дается в скобках. Указываются номера первой и последней страниц статьи, либо уникальный номер статьи и ее объем. Для книг желательно указывать их объем. Если известна ссылка на электронный архив или сайт, то ее желательно указать.

Фамилия И.О. Название статьи // Название журнала. 2000. **1** (1). С. 1–6.

Surname Initials et al. Title of the paper // Name of the Journal. 2006. **73** (154). P. 5–7.

Фамилия И.О. Название книги. СПб. : Наука, 1999. 176 с.

Surname Initials. Title of the paper // In book: Title of the collection / ed. by J. Doe et al. Publisher : Boston, 2005. P. 5–7.

Surname Initials (ed.). Title of the collection. Publisher : New York, 2005. 324 p.

Фамилия И.О. Название доклада // Доклад на конференции «Название конференции (место и дата проведения)». URL: ссылка на электронный ресурс (дата обращения: 17.11.2024).

Surname Initials. Title of the report // Name of the conference (Location and date). URL: link (Accessed at: January 1, 2025).

Наноструктуры. Математическая физика и моделирование

Журнал зарегистрирован

в Министерстве РФ по делам печати,
телерадиовещания и средств массовых коммуникаций.
Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС77-34934 от 29 декабря 2008 г.

Учредители

Московский институт электроники и математики (МИЭМ),
Европейский центр по качеству

Издатель

ООО Сенсор Микрон
Журнал входит в перечень ВАК РФ
Статьи рецензируются
Журнал индексируется в РИНЦ

Контакты для представления статей и деловой переписки

Ответственный секретарь А.В. Махиборода
+7 (916) 578-95-27
makhiboroda@yandex.ru

ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛ НМФМ

Подписной индекс журнала в каталоге агентства «Урал-Пресс» 70017.
Электронный подписной каталог и контакты всех представительств «Урал-Пресс»
на сайте www.ural-press.ru.