

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА
ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
Кафедра нанопотоники

Когерентный контроль распространения света с
помощью микродифракционных решёток

курсовая работа
студента 204 группы
Нецветаева А. А.

научный руководитель:
к.ф.-м.н., м.н.с. Фролов А. Ю.

Москва — 2024

Оглавление

Введение	2
Глава I	
Обзор литературы	3
1. Когерентный контроль	3
2. Обобщенный закон Снеллиуса.....	4
3. Управление распространением света	6
3.1. Характеристики способов управления.	6
3.2. Метаповерхности.	7
3.3. Пространственное сканирование на основе эффекта медленно- го света.	8
3.4. Оптические фазовые антенные решетки.	8
3.5. Сравнительная таблица	9
Глава II	
Оригинальные результаты	10
1. Численное моделирование дифракционной решетки с переменным пе- риодом.	10
1.1. Исследуемый образец	10
1.2. Программное обеспечение	10
1.3. Моделируемая система.....	10
2. Расчет зависимости интенсивности излучения в первом дифракцион- ном порядке от угла дифракции и сдвига фаз между источниками ..	12
3. Результаты	12
Заключение	14
Список литературы	15

Введение

В настоящее время вкладываются большие усилия в развитие таких областей оптики, как интегральная фотоника, оптические коммуникации и вычисления. Ускоренному росту этих сфер способствуют открытия в области нанофотоники, изучающие новые технологии создания устройств управления светом. К числу таких технологий можно отнести и способы контроля направления распространения оптических пучков. Наиболее современные способы представляют собой полностью оптические методы, исследование которых активно продолжается. Важную роль в рамках этих исследований играет поиск взаимодействующих с излучением структур, которые позволяют решить поставленную задачу максимально эффективно.

Данная работа посвящена разработке с помощью численных методов дифракционной решетки с переменным периодом, которая позволит непрерывно перестраивать углы дифракционных порядков при когерентном освещении за счет изменения фазы одного из источников. Были выполнены задачи оптимизации геометрических параметров решетки методом конечных разностей во временной области с целью определения максимальных углов отклонения и наибольшей относительной интенсивности дифракционных порядков.

Глава I

Обзор литературы

1. Когерентный контроль

Метод когерентного контроля в общем случае заключается в изучении интерференционной картины, полученной после взаимодействия двух когерентных пучков, распространяющихся в противоположных направлениях, с оптически неоднородной средой (Рис. 1). При таком взаимодействии в пространстве образуется стоячая электромагнитная волна, и степень влияния неоднородности на интерференционную картину определяется положением пучностей и узлов относительно структуры, которое можно контролировать с помощью изменения фаз одного из источников. При рассмотрении сред, линейные размеры которых по направлению распространения излучения (толщина) значительно меньше длины волны, можно выделить два предельных случая [2]:

1. Когерентное полное пропускание (СПТ, англ. «coherent perfect transmission»). Структура находится в узле стоячей волны. Тогда неоднородность становится «выключенной» и практически не влияет на распространение излучения.
2. Когерентное полное поглощение (СПА, англ. «coherent perfect absorption»). Структура находится в пучности. Тогда влияние неоднородности максимально.

За счёт этих двух состояний можно реализовывать полностью оптическое пере-

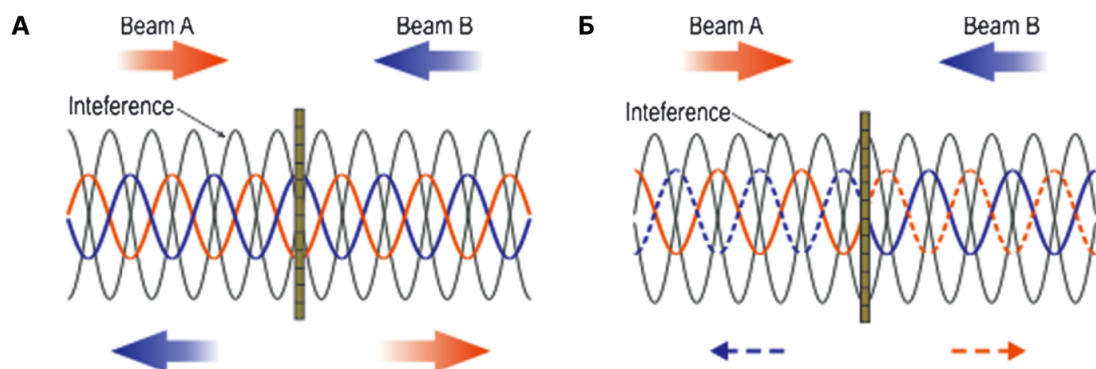


Рис. 1: Принципиальная схема эксперимента, реализующего когерентный контроль. Два когерентных встречных пучка А и В падают на структуру субволновой толщины, например, на пленку плазмонного метаматериала. Существуют два случая, при которых пучки на пленке интерферируют либо деструктивно (А), либо конструктивно (Б), вызывая пропускание или поглощение соответственно [1].

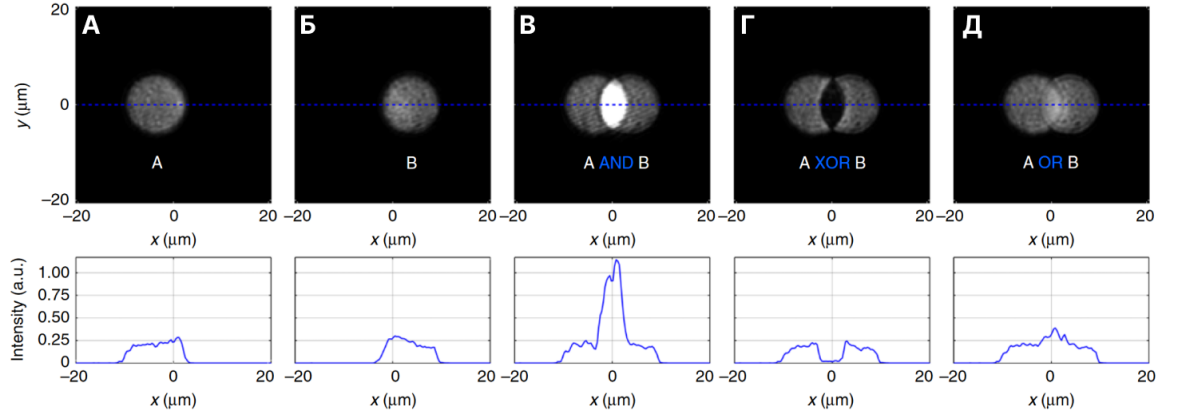


Рис. 2: Оптические базовые логические операции. Изображения метаповерхности, (А) освещенной только лучом А, (Б) только лучом В и (В-Д) обоими лучами А и В. Разным относительным фазам лучей А и В соответствуют разные логические операции: (В) А И В ($\Theta = \pi$), (Г) А «ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ» В ($\Theta = 0$) и (Д) А ИЛИ В ($\Theta = \pm\pi/3$). На нижних графиках показан профиль интенсивности вдоль соответствующей пунктирной синей линии. Уровни интенсивности показаны в одинаковых оттенках серого на всех изображениях и в одном вертикальном масштабе на всех графиках [4].

ключение, а также базовые логические операции: сложение, вычитание и умножение (Рис. 2). Также когерентный контроль позволяет модулировать интенсивность в широких пределах [1], создавать оптические транзисторы [2], измерять поглощение и другие характеристики материалов неразрушающим путем [3] и многое другое.

Теоретически метод когерентного контроля можно описать с помощью комплексной матрицы рассеяния. Пусть два когерентных оптических пучка E_α и E_β , распространяющихся в противоположных направлениях, падают по нормали на некоторый слой материала с линейными оптическими характеристиками и пусть при взаимодействии с материалом сохраняется поляризация излучения. Две результирующие волны (по обе стороны от плоскости материала) обозначим E_δ и E_γ . Тогда соответствующие напряженности электрических полей связаны матрицей рассеяния \mathbf{S} :

$$\begin{bmatrix} E_\delta \\ E_\gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_\alpha \\ E_\beta \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Аналитические выражения для коэффициентов S_{ij} , которые зависят от характеристик материала, приводятся в [5].

2. Обобщенный закон Снеллиуса

В качестве оптически неоднородных сред могут быть использованы структуры, у которых фаза меняется вдоль границы раздела, как показано на Рис. 3А. При-

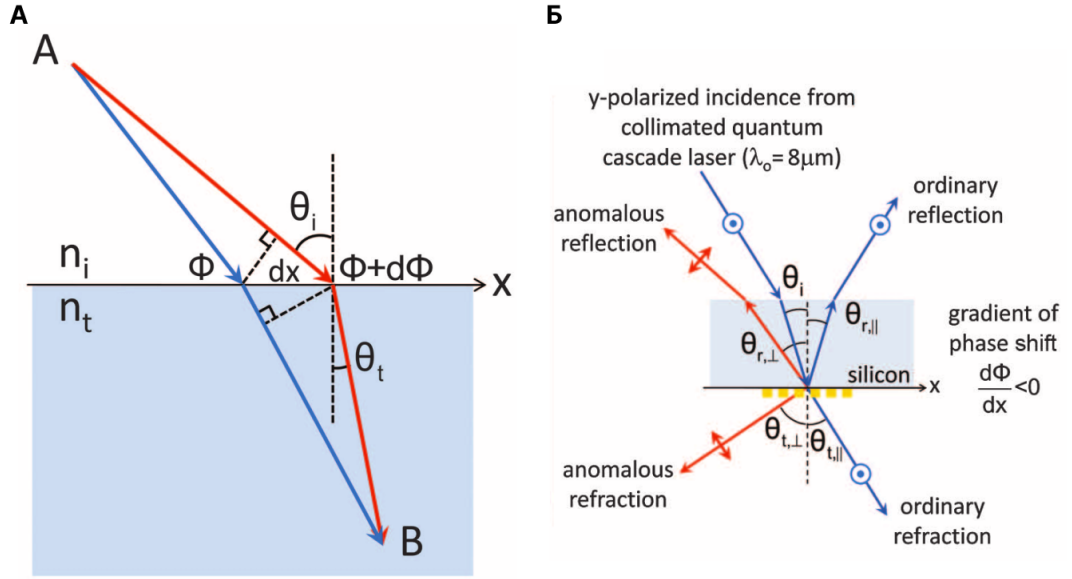


Рис. 3: **(А)** Рисунок, используемый для вывода обобщенного закона преломления Снеллиуса. Граница между двумя средами искусственно структурирована так, чтобы внести резкий фазовый градиент на пути света, который зависит от положения на границе раздела. Φ и $\Phi + d\Phi$ — фазовые сдвиги, при которых два луча (синий и красный) пересекают границу [6]. **(Б)** Схема эксперимента, демонстрирующего обобщенный закон Снеллиуса [6].

ведем теоретические основы физики таких структур.

Пусть каждой точке $M(x)$ границы раздела вдоль оси X соответствует значение фазы, равное $\Phi(x)$ и пусть падающая на границу раздела волна, проходящая через заданную точку $M(x)$, претерпевает фазовый разрыв $d\Phi(x)$. Для такой границы мы вынуждены пересмотреть классический закон Снеллиуса, описываемый формулой:

$$n_i \sin \Theta_i = n_t \sin \Theta_t, \quad (2)$$

в соответствии с принципом Ферма.

Рассмотрим плоскую волну, падающую под углом Θ_i . Если предположить, что два пути бесконечно близки к реальному пути света (Рис. 3А), то разность фаз между ними равна нулю:

$$[k_0 n_i \sin \Theta_i dx + (\Phi + d\Phi)] - [k_0 n_t \sin \Theta_t dx + \Phi] = 0, \quad (3)$$

где Θ_t — угол преломления; Φ и $\Phi + d\Phi$ — разрывы фаз в местах пересечения границы раздела синим и красным путями соответственно; dx — расстояние между точками пересечения; n_i и n_t — показатели преломления двух сред; $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ — волновое число, где λ_0 — длина волны в вакууме. Если градиент фазы $d\Phi/dx$ создан постоянным, предыдущее уравнение (3) приводит к обобщенному закону преломления Снеллиуса [6]:

$$n_t \sin \Theta_t - n_i \sin \Theta_i = \frac{\lambda_0}{2\pi} \frac{d\Phi}{dx}. \quad (4)$$

Выражение (4) показывает, что преломленный луч может иметь произвольное направление при условии, что создан подходящий постоянный градиент фазы $d\Phi/dx$ вдоль границы раздела (Рис. 3Б). Более того, при ненулевом градиенте фазы два угла падения $\pm\Theta_i$ соответствуют различным углам преломления. Как следствие, существуют два угла полного внутреннего отражения:

$$\Theta_c = \arcsin \left(\pm \frac{n_t}{n_i} - \frac{\lambda_0}{2\pi} \frac{d\Phi}{dx} \right). \quad (5)$$

Аналогично, для отражения имеем:

$$\sin \Theta_r - \sin \Theta_i = \frac{\lambda_0}{2\pi n_i} \frac{d\Phi}{dx}, \quad (6)$$

где Θ_r — угол отражения. Между Θ_r и Θ_i существует нелинейная связь, которая заметно отличается от известного закона геометрической оптики. Уравнение (6) показывает, что всегда существует критический угол падения:

$$\Theta'_c = \arcsin \left(1 - \frac{\lambda_0}{2\pi n_i} \left| \frac{d\Phi}{dx} \right| \right), \quad (7)$$

при котором отраженная волна становится эванесцентной.

В настоящее время для создания градиента по фазе используются метаповерхности, представляющие собой двумерные массивы оптических резонансных элементов — антенн (Рис. 3Б). Тонкая настройка размеров и формы антенн позволяет задавать фазовый градиент и тем самым изменять направление распространения пучка. Таким образом обобщенный закон Снеллиуса открывает широкие возможности для управления распространением света.

3. Управление распространением света

Способность направлять оптические лучи имеет решающее значение для современных технологий. Среди них — лидар (англ. LiDAR, Light Detection and Ranging, «обнаружение и определение дальности с помощью света») [7], лазерная визуализация [8], атмосферная оптическая линия связи (АОЛС) [9] и однопиксельная визуализация [10]. Ранние методы предполагали механическое и электрическое управление оптическими элементами: повороты и перемещения зеркал и линз, изменение показателя преломления жидкого кристалла под действием приложенного напряжения и т. д. [11]. Однако такие устройства были громоздкими и ограниченными в скорости и надежности. Развитие технологий изготовления структур нанометровых масштабов и успехи в исследовании взаимодействия света с ними позволяют создавать более эффективные и производительные полностью оптические системы.

3.1. Характеристики способов управления.

Для достижения параметров, необходимых для реальных приложений, системы управления должны обладать определенными характеристиками. А именно, пу-

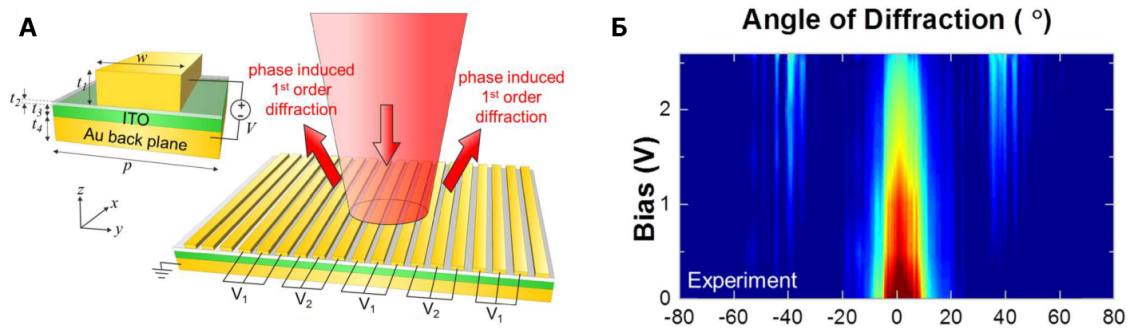


Рис. 4: (А) Схема активной метаповерхности. Структура состоит из кварцевой подложки, золотой пластины-основания, тонкой пленки ITO (англ. «indium tin oxide», оксид индия-олова), за которой следует тонкая пленка Al_2O_3 , на которой создана периодическая структура нанополосок. Напряжение подается между полосчатой антенной и золотым слоем, что приводит к накоплению заряда на границе раздела $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ITO}$ [12]. (Б) Экспериментально измеренный профиль интенсивности дальнего поля для данной метаповерхности [12].

чок должен быть достаточно узким, иметь высокое угловое разрешение и подчиняться управлению в большом диапазоне углов, называемом полем зрения (FOV, field of view): вплоть до 180° для одномерного сканирования и до полусферы для двумерного сканирования. Кроме того, угол излучения должен перенастраиваться в реальном времени на высокой скорости с минимальными потерями интенсивности. В настоящее время существует несколько способов управления пучком, основанных на методе когерентного контроля: активные метаповерхности, медленное световое сканирование и оптические фазовые антенные решетки (ФАР). Рассмотрим эти способы подробнее.

3.2. Метаповерхности.

Как было сказано в параграфе 2, метаповерхности представляют собой структуры субволновых оптических элементов — антенн, реализующих фазовый градиент для падающей плоской волны, определяемый геометрией антенн и характеристиками материала изготовления метаповерхности. В соответствии с обобщенным законом Снеллиуса, за счёт наличия градиента фазы наблюдается как нормальный прошедший пучок, так и аномальный (Рис. 4А), отклоняющийся на угол, определяемый выражением (6). Так, в работе [12] с помощью активной метаповерхности экспериментально осуществлялась «перекачка» интенсивности между нулевым и ± 1 порядками дифракции, распространяющимися под углом 40° к нормали (Рис. 4Б).

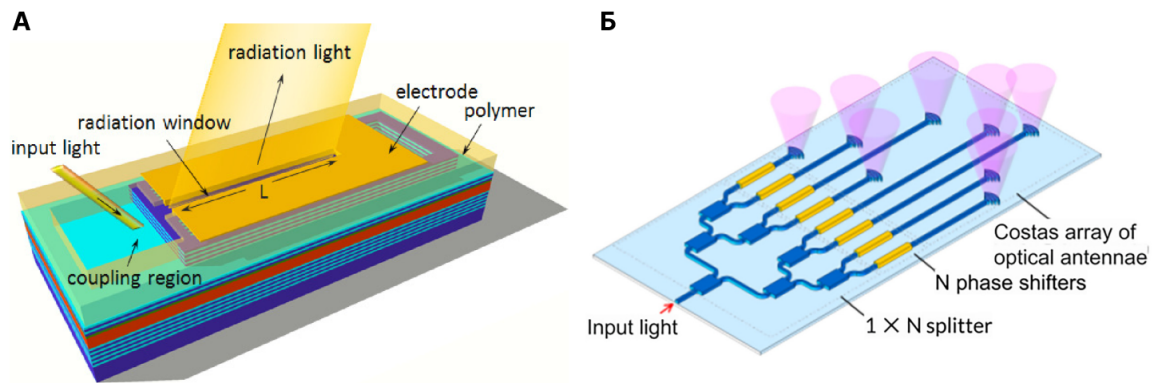


Рис. 5: (А) Схематичное изображение предложенного устройства управления световым пучком с помощью медленного света с VCSEL-резонатором. Свет падает на торец и усиливается вдоль резонатора [13]. (Б) ФАР с использованием титановых нагревателей с линейно возрастающей длиной волноводов по всей решетке, изготовленная на КНИ («кремний на изоляторе») [14].

3.3. Пространственное сканирование на основе эффекта медленного света.

Физические принципы устройств управления с помощью эффекта медленного света проиллюстрированы в работе [13]. Медленный свет — это излучение, фазовая скорость которого сильно меньше, чем в вакууме. Такие состояния обычно реализуются в фотонно-кристаллических волноводах и имеют сильную дисперсию, что используется для контроля направления распространения оптического пучка.

Изначально задуманная архитектура устройства напоминает вертикально излучающий лазер (VCSEL, англ. «vertical-cavity surface emitting laser») (Рис. 5А). Один конец конструкции открыт для прохождения света в брэгговское зеркало. Результирующая волноводная мода ограничена полным внутренним отражением сбоку, а сверху и снизу — брэгговским отражением. Верхнее брэгговское зеркало частично пропускает излучение. Расчеты авторов показали, что благодаря сильной дисперсии моды угол излучения можно регулировать более чем на 70° , изменяя длину волны входного сигнала в диапазоне от 940 до 980 нм.

3.4. Оптические фазовые антенные решетки.

Общий принцип работы устройств, использующих ФАР, заключается в следующем. Свет подается в первичный волновод, и несколько светоделителей поровну перераспределяют энергию по многим вторичным оптическим каналам. В каждом из каналов осуществляется контроль фазы с помощью элементов, наносимых на волноводы. Это могут быть электрооптические и термические материалы, которые позволяют менять показатель преломления под действием внешних воздействий (например, электрического тока). Можно спроектировать архитектуру устройства таким образом, чтобы она создавала фазовый градиент по всей сетке

волноводов, а сдвинутые по фазе моды волновода интерферировали во внешнюю среду через выводные дифракционные решетки (Рис. 5Б). Лучшая разработка имеет возможность осуществлять двумерный контроль распространения пучка и обладает существенным полем зрения в $80^\circ \times 17^\circ$ [15].

3.5. Сравнительная таблица

В Табл. 1 приведены сравнительные характеристики устройств контроля направления распространения оптического излучения, реализованных на практике. К ключевым характеристикам относят: угол обзора (FOV), угловое разрешение, угловую расходимость пучка, скорость изменения направления и энергопотребление.

Представленные активные метаповерхности имеют сложные электрические схемы и могут осуществлять лишь дискретное переключение угла отклонения пучка, что делает их неактуальными для задач непрерывного контроля. В устройствах, основанных на эффекте медленного света необходимо непрерывно изменять длину волны для отклонения пучка, что также существенно ограничивает область их применения. ФАР используют сложные электрооптические схемы и затруднительны в изготовлении. В то же время когерентный контроль представляет простой способ для контроля взаимодействия света с оптической резонансной структурой. С помощью него была показана возможность непрерывного управления углом распространения пучка.

Таблица 1: Сравнительная таблица характеристик устройств контроля направления распространения оптического излучения. Все значения получены экспериментально, за исключением значений в круглых скобках, которые выведены косвенно. Для метаповерхностей потребление указано для всей метаповерхности на максимальной скорости, для других устройств указано потребление *одной* антенны. Адаптировано из [16].

	Ссылка	FOV, °	Разрешение	Расходимость, °	Скорость, МГц	Потребление, мВт
Метаповерхности	[12]	40	-	(2)	>10	(700)
	[17]	44x0	9x1	(2x2)	-	-
	[18]	12	-	(0,8)	-	-
	[19]	6	31	0,2	5,4	(96)
Медленный свет	[13]	70	>1000	0,025	-	-
	[20]	23	100	0,23	-	-
	[21]	21	120	0,2	0,1	1300
	[22]	40x4,4	266x40	0,15x0,15	-	-
ФАР	[23]	23x3,6	(23x6)	1x0,6	0,3	160
	[15]	80x17	570x120	0,140x0,142	-	-
	[24]	16x16	(20x20)	0,8x0,8	0,019	10,6
	[25]	56x15	(1400x375)	0,04x0,04	0,033	0,002
	[26]	70x6	(470x75)	0,15x0,08	0,15	1,7

Глава II

Оригинальные результаты

1. Численное моделирование дифракционной решетки с переменным периодом.

1.1. Исследуемый образец

В качестве исследуемой оптически неоднородной среды для метода когерентного контроля была выбрана дифракционная решетка в виду относительной простоты изготовления и изучения. Для непрерывного управления направлением распространения пучка была разработана трапециевидная форма щелей, такая, что при изменении относительной фазы двух когерентных источников эффективный период решетки непрерывно меняется за счёт сдвига пучности результирующей стоячей волны. В качестве материала был выбран аморфный кремний за его большой показатель преломления $n = 3,48$ и практически нулевой коэффициент поглощения для исследуемой длины волны $\lambda = 1550$ нм. Для расчетов использовались табличные характеристики кремния, представленные на сайте [27]. Полученная структура имеет множество геометрических параметров, а именно: периоды решетки и длины оснований трапеций на верхней и нижней границах d_t , b_t , d_b и b_b соответственно ($d_t < d_b$), число периодов N и высота структуры h , указанные на Рис. 6А.

1.2. Программное обеспечение

Основные результаты данной работы получены при помощи программного пакета **Ansys Lumerical FDTD** версии 2024 R1, позволяющего моделировать поведение различных оптических систем. Его работа основана на численном методе конечных разностей во временной области (FDTD, англ. «finite-difference time-domain»). Характерные графики были построены на языке **Python** с помощью библиотек **numpy** и **matplotlib**. Результаты были структурированы и наглядно представлены с применением веб-технологий на языке **JavaScript**.

1.3. Моделируемая система

Схема моделируемой системы приведена на Рис. 6Б. На одинаковых расстояниях от структуры были расположены когерентные гауссовы источники с длиной волны 1550 нм и длительностью импульса 10 фс. За ними находятся мониторы, которые выполняют Фурье-преобразование электрического поля и показывают профиль интенсивности дальнего поля. Радиус перетяжки $w = 5$ мкм был выбран так, чтобы задействовать максимальное число периодов решетки, но чтобы при этом дифракция на краях структуры была незначительной. Число периодов $10 \leq N \leq 15$ было ограничено из практических соображений сложности изго-

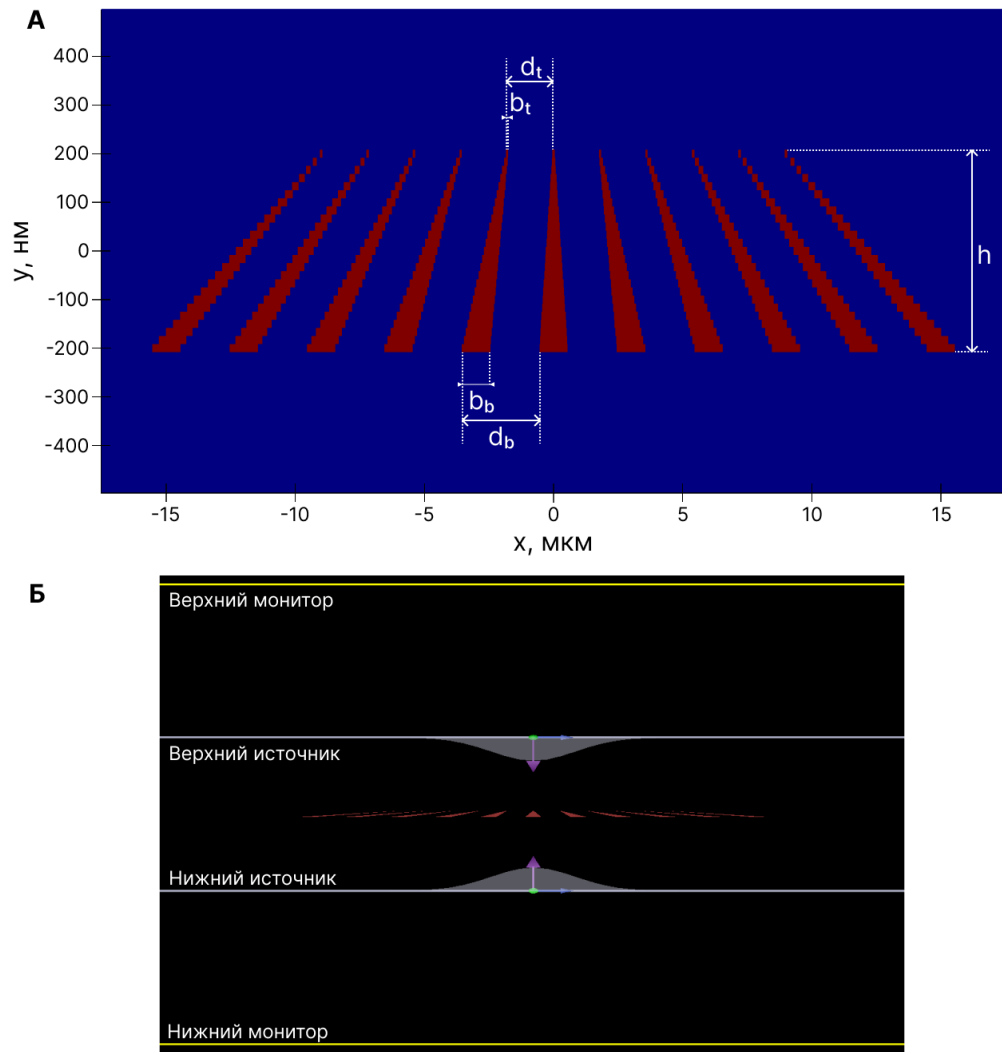


Рис. 6: **(А)** Визуализация показателя преломления структуры с помощью монитора, представленного в пакете Lumerical. Параметры на рисунке: $d_t = 1800$ нм, $b_t = 300$ нм, $d_b = 3000$ нм, $b_b = 1000$ нм, $N = 11$, $h = 400$ нм. Наблюдаемая «лесенка» связана с внутренним представлением области FDTD в программе. **(Б)** Схема моделируемой системы.

товления более протяженной решетки. Толщина $h \approx \lambda/4$ примерно равнялась четверти длины волны, чтобы на структуре при заданной разности фаз находилась только одна пучность, то есть имелся единственный эффективный период.

Время симуляции подбиралось таким образом, чтобы уровень энергии в системе к моменту окончания расчетов был достаточно низким, иначе полученные результаты могли бы оказаться неточными. Использовались граничные условия типа PML (англ. «perfectly matched layer», «идеально поглощающие слои»), которые представляют собой поглощающую границу, моделирующую уход волны на бесконечность. Тем не менее, какая-то часть волн может отражаться от стенок и попадать обратно в область симуляции, приводя к искажениям. Шаг сетки, на которой программа выполняла численные расчеты, подбирался исходя из компромисса между временем симуляции и достаточным разрешением представления структуры.

2. Расчет зависимости интенсивности излучения в первом дифракционном порядке от угла дифракции и сдвига фаз между источниками

Исходя из качественных соображений и простейшего уравнения дифракционной решетки для нормального падения пучка:

$$d \sin \Theta_m = m\lambda, \quad (8)$$

были ограничены d_t и d_b решетки так, чтобы наблюдался только первый порядок дифракции:

$$d_{min} = \lambda = 1550 \text{ нм}, \quad d_{max} = 2\lambda = 3100 \text{ нм}. \quad (9)$$

Приблизительно в данных пределах фиксировались определенные значения d_t и d_b , связанные с углом обзора соотношением

$$\text{FOV} = \Theta_{max} - \Theta_{min} = \arcsin \frac{\lambda}{d_t} - \arcsin \frac{\lambda}{d_b}, \quad (10)$$

и циклично запускалась симуляция, на каждом шаге которой последовательно изменялись b_t и b_b в пределах 100–1500 нм и сохранялись результаты вычислений с обоих мониторов. Таким образом, для каждой пары d_t – d_b было получено $15 \cdot 15 \cdot 2 = 450$ наборов данных, по которым затем строились графики зависимости интенсивности излучения в первом дифракционном порядке от угла дифракции и сдвига фаз между источниками типа «тепловая карта».

3. Результаты

Все полученные графики представлены на [сайте](#). Были найдены конфигурации, позволяющие осуществлять непрерывный контроль распространения пучка в диапазоне 35–55°. В результате оптимизации значений b_t и b_b удалось достичь

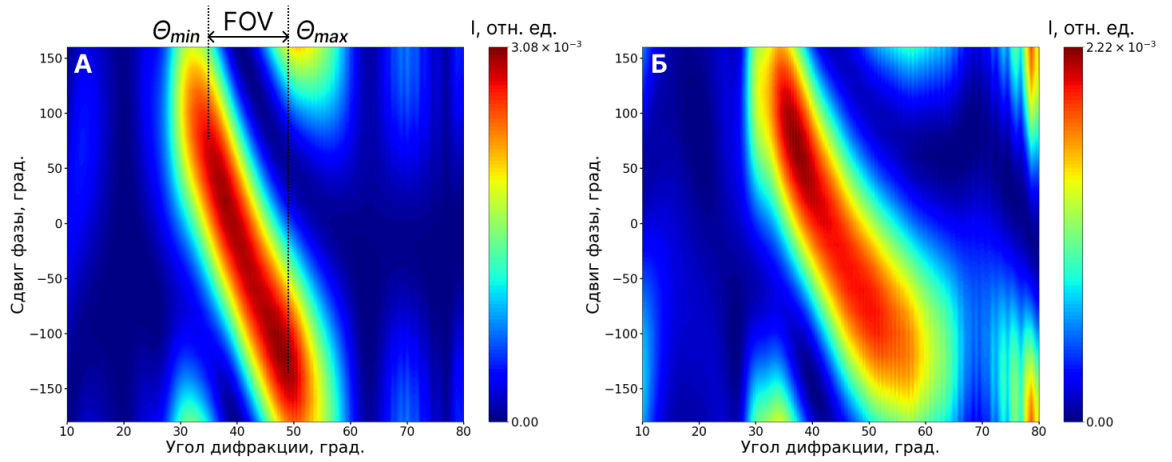


Рис. 7: Избранные графики зависимости интенсивности излучения в первом дифракционном порядке от угла дифракции и сдвига фаз между источниками. (А) Полученная конфигурация с углом обзора 15° : $N = 11$, $d_t = 1800$ нм, $d_b = 3000$ нм, $b_t = 1100$ нм, $b_b = 500$ нм. (Б) Полученная конфигурация с углом обзора 20° : $N = 15$, $d_t = 1550$ нм, $d_b = 3100$ нм, $b_t = 1100$ нм, $b_b = 400$ нм.

равномерной интенсивности дифракционного порядка при изменении фазы одного из источников. В рамки настоящей работы не входило достижение высокого разрешения сканирования, поэтому на графике можно видеть большую угловую расходимость пучка. Однако это можно исправить, направляя на решетку более коллимированное излучение.

Заключение

Методом конечных разностей была проведена оптимизация оригинальной структуры для когерентного контроля распространения света — дифракционной решетки с переменным периодом. Получены достаточные для дальнейшего исследования и экспериментального воплощения характеристики системы: угол обзора в 20° и равномерная интенсивность дифракционного порядка при изменении фазы одного из источников. Стоит отметить, что благодаря отсутствию неоптических элементов в системе скорость устройства определяется только скоростью изменения фазы, и в случае использования электрооптического модулятора света может достигать 100 ГГц.

Список литературы

- [1] Jianfa Zhang, Kevin F MacDonald, and Nikolay I Zheludev. Controlling light-with-light without nonlinearity. *Light: Science & Applications*, 1(7):e18–e18, 2012.
- [2] Xu Fang, Kevin F MacDonald, and Nikolay I Zheludev. Controlling light with light using coherent metadevices: all-optical transistor, summator and inverter. *Light: Science & Applications*, 4(5):e292–e292, 2015.
- [3] Simone Zanotto, F Bianco, V Miseikis, D Convertino, C Coletti, and Alessandro Tredicucci. Coherent absorption of light by graphene and other optically conducting surfaces in realistic on-substrate configurations. *APL Photonics*, 2(1), 2017.
- [4] Maria Papaioannou, Eric Plum, João Valente, Edward TF Rogers, and Nikolay I Zheludev. Two-dimensional control of light with light on metasurfaces. *Light: Science & Applications*, 5(4):e16070–e16070, 2016.
- [5] L Baldacci, S Zanotto, G Biassoli, L Sorba, and Alessandro Tredicucci. Interferometric control of absorption in thin plasmonic metamaterials: general two port theory and broadband operation. *Optics Express*, 23(7):9202–9210, 2015.
- [6] Nanfang Yu, Patrice Genevet, Mikhail A Kats, Francesco Aieta, Jean-Philippe Tetienne, Federico Capasso, and Zeno Gaburro. Light propagation with phase discontinuities: Generalized laws of reflection and refraction. *Science*, 334(6054):333–337, 2011.
- [7] Michel Jaboyedoff, Thierry Oppikofer, Antonio Abellán, Marc-Henri Derron, Alex Loye, Richard Metzger, and Andrea Pedrazzini. Use of lidar in landslide investigations: a review. *Natural Hazards*, 61:5–28, 2012.
- [8] Sven TS Holmström, Utku Baran, and Hakan Urey. Mems laser scanners: A review. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 23(2):259–275, 2014.
- [9] Mohammad Ali Khalighi and Murat Uysal. Survey on free space optical communication: A communication theory perspective. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 16(4):2231–2258, 2014.
- [10] Matthew P Edgar, Graham M Gibson, and Miles J Padgett. Principles and prospects for single-pixel imaging. *Nature Photonics*, 13(1):13–20, 2019.
- [11] Hans Dieter Tholl. Novel laser beam steering techniques. *Technologies for Optical Countermeasures III*, Proc. 6397:639708, 2006.

- [12] Yao-Wei Huang, Ho Wai Howard Lee, Ruzan Sokhoyan, Ragip A Pala, Krishnan Thyagarajan, Seunghoon Han, Din Ping Tsai, and Harry A Atwater. Gate-tunable conducting oxide metasurfaces. *Nano Letters*, 16(9):5319–5325, 2016.
- [13] Xiaodong Gu, Toshikazu Shimada, and Fumio Koyama. Giant and high-resolution beam steering using slow-light waveguide amplifier. *Optics Express*, 19(23):22675–22683, 2011.
- [14] Karel Van Acoleyen, Wim Bogaerts, Jana Jágerská, Nicolas Le Thomas, Romuald Houdré, and Roel Baets. Off-chip beam steering with a one-dimensional optical phased array on silicon-on-insulator. *Optics Letters*, 34(9):1477–1479, 2009.
- [15] David N Hutchison, Jie Sun, Jonathan K Doylend, Ranjeet Kumar, John Heck, Woosung Kim, Christopher T Phare, Avi Feshali, and Haisheng Rong. High-resolution aliasing-free optical beam steering. *Optica*, 3(8):887–890, 2016.
- [16] Sam Lin, Yixin Chen, and Zi Jing Wong. High-performance optical beam steering with nanophotonics. *Nanophotonics*, 11(11):2617–2638, 2022.
- [17] Ghazaleh Kafaie Shirmanesh, Ruzan Sokhoyan, Pin Chieh Wu, and Harry A Atwater. Electro-optically tunable multifunctional metasurfaces. *ACS Nano*, 14(6):6912–6920, 2020.
- [18] Pin Chieh Wu, Ragip A Pala, Ghazaleh Kafaie Shirmanesh, Wen-Hui Cheng, Ruzan Sokhoyan, Meir Grajower, Muhammad Z Alam, Duhyun Lee, and Harry A Atwater. Dynamic beam steering with all-dielectric electro-optic iii–v multiple-quantum-well metasurfaces. *Nature Communications*, 10(1):3654, 2019.
- [19] Junghyun Park, Byung Gil Jeong, Sun Il Kim, Duhyun Lee, Jungwoo Kim, Changgyun Shin, Chang Bum Lee, Tatsuhiko Otsuka, Jisoo Kyoung, Sangwook Kim, et al. All-solid-state spatial light modulator with independent phase and amplitude control for three-dimensional lidar applications. *Nature Nanotechnology*, 16(1):69–76, 2021.
- [20] Keisuke Kondo, Tomoki Tatebe, Shoji Hachuda, Hiroshi Abe, Fumio Koyama, and Toshihiko Baba. Fan-beam steering device using a photonic crystal slow-light waveguide with surface diffraction grating. *Optics Letters*, 42(23):4990–4993, 2017.
- [21] Goro Takeuchi, Yosuke Terada, Moe Takeuchi, Hiroshi Abe, Hiroyuki Ito, and Toshihiko Baba. Thermally controlled si photonic crystal slow light waveguide beam steering device. *Optics Express*, 26(9):11529–11537, 2018.
- [22] Hiroyuki Ito, Yuma Kusunoki, Jun Maeda, Daichi Akiyama, Naoya Kodama, Hiroshi Abe, Ryo Tetsuya, and Toshihiko Baba. Wide beam steering by slow-light waveguide gratings and a prism lens. *Optica*, 7(1):47–52, 2020.

-
- [23] JC Hulme, JK Doylend, MJR Heck, JD Peters, ML Davenport, JT Bovington, LA Coldren, and John E Bowers. Fully integrated hybrid silicon two dimensional beam scanner. *Optics Express*, 23(5):5861–5874, 2015.
 - [24] Reza Fatemi, Aroutin Khachaturian, and Ali Hajimiri. A nonuniform sparse 2-d large-fov optical phased array with a low-power pwm drive. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 54(5):1200–1215, 2019.
 - [25] Christopher Vincent Poulton, Matthew J Byrd, Peter Russo, Erman Timurdogan, Murshed Khandaker, Diedrik Vermeulen, and Michael R Watts. Long-range lidar and free-space data communication with high-performance optical phased arrays. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 25(5):1–8, 2019.
 - [26] Nathan Dostart, Bohan Zhang, Anatol Khilo, Michael Brand, Kenaish Al Qubaisi, Deniz Onural, Daniel Feldkhun, Kelvin H Wagner, and Miloš A Popović. Serpentine optical phased arrays for scalable integrated photonic lidar beam steering. *Optica*, 7(6):726–733, 2020.
 - [27] Mikhail Polyanskiy. Refractive index database — <https://refractiveindex.info>, 2024.