

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:
м.н.с. Фролов А. Ю.

Введение

Обзор литературы

1. Когерентный контроль

Метод когерентного контроля в общем случае заключается в изучении зависимости интерференционной картины, полученной после взаимодействия двух когерентных пучков, распространяющихся в противоположных направлениях, с оптически неоднородной средой (структурой), от разности фаз этих пучков. При таком взаимодействии в пространстве образуется стоячая электромагнитная волна, и степень влияния неоднородности на интерференционную картину определяется положениями пучностей и узлов относительно структуры. При рассмотрении сред, линейные размеры которых по направлению распространения излучения (толщина) значительно меньше длины волны, можно выделить два предельных случая:

1. Когерентное полное пропускание (CPT, 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 (CRA, англ. “coherent perfect absorption”). Структура находится в пучности. Тогда влияние неоднородности максимально.

За счёт этих двух состояний можно реализовывать полностью оптическое переключение, а рассмотрев другие предельные случаи, даже реализовать базовые логические операции (Рис. 1) [1]. Также когерентный контроль позволяет модулировать интенсивность в широких пределах [2], создавать оптические транзисторы [3], измерять поглощение и другие характеристики материалов неразрушающим путем [4] 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].

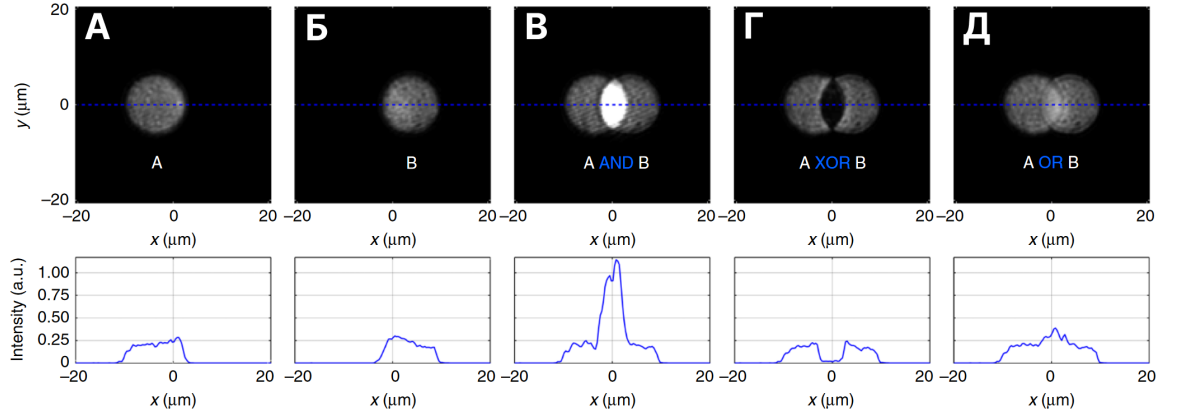


Рис. 1: Оптические базовые логические операции. Изображения метаповерхности, (А) освещенной только лучом А, (Б) только лучом В и (В-Д) обоими лучами А и В. Разным относительным фазам лучей А и В соответствуют разные логические операции: (В) А И В ($\Theta = \pi$), (Г) А «ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ» В ($\Theta = 0$) и (Д) А ИЛИ В ($\Theta = \pm\pi/3$). На 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. [1, Fig. 3]

2. Обобщенный закон Снелла

Пусть каждой точке $M(x)$ границы раздела соответствует значение фазы, равное $\Phi(x)$ и пусть падающая на границу раздела волна, проходящая через заданную точку $M(x)$, претерпевает фазовый разрыв $\Phi(x)$. Для такой границы мы вынуждены пересмотреть классический закон Снелла, 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. 2А), 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 Снелла

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

Уравнение (4) показывает, что преломленный луч может иметь произвольное направление при условии, что создан подходящий постоянный градиент фазы

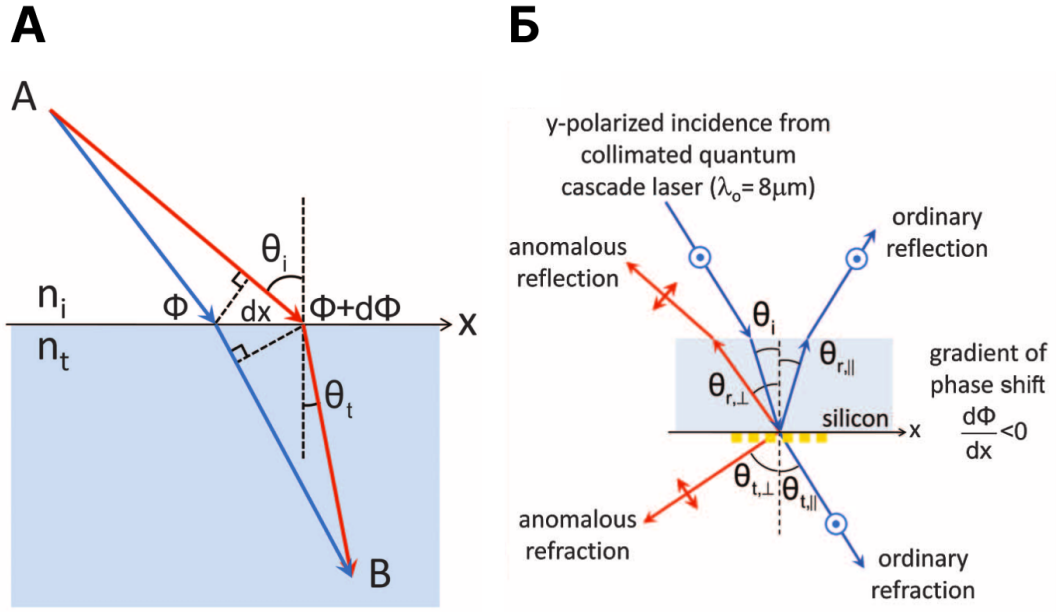


Рис. 2: (А) Рисунок, используемый для вывода обобщенного закона преломления Снелла. Граница между двумя средами искусственно структурирована так, чтобы внести резкий фазовый сдвиг на пути света, который зависит от положения на границе раздела. Φ и $\Phi + d\Phi$ — фазовые сдвиги, при которых два луча (синий и красный) пересекают границу. [6, Fig. 1] (Б) Схема экспериментальной установки, демонстрирующей обобщенный закон Снелла. [6, Fig. 3В]

$d\Phi/dx$ вдоль границы раздела (Рис. 2Б) [6]. 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.

Обобщенный закон Снелла 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.

Характеристики способов управления. Для достижения параметров, необходимых для реальных приложений, системы управления должны обладать определенными характеристиками. А именно, пучок должен быть достаточно узким 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 их подробнее.

Метаповерхности. Метаповерхности представляют собой структуры субволновых оптических элементов — антенн, реализующих пространственно изменяющийся фазовый разрыв для падающей плоской волны. Градиент фазы взаимодействующего света определяется геометрией антенн и характеристиками материала изготовления метаповерхности. В соответствии с обобщенным законом Снелла, за счёт наличия градиента фазы наблюдается как нормальный прошедший пучок, так и аномальный (Рис. 3А), отклоняющийся на угол, определяемый (6). Так, в работе [12] экспериментально осуществлялась «перекачка» интенсивности между нулевым и ± 1 порядками дифракции, распространяющихся под углом 40° к нормали [12].

Медленное световое сканирование.

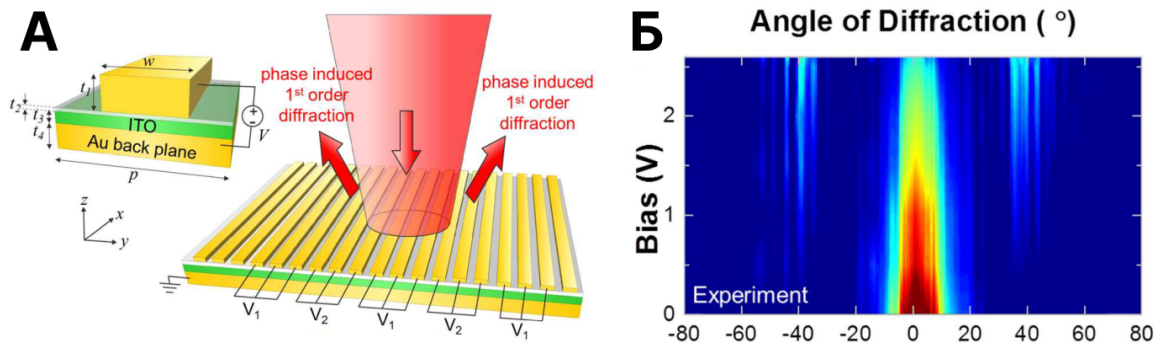


Рис. 3: (А) [12, Fig. 1A] (Б) [12, Fig. 4B]

Оригинальная часть

Оригинальная часть

Заклучение

Заклучение

Список литературы

- [1] 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.
- [2] Jianfa Zhang, Kevin F MacDonald, and Nikolay I Zheludev. Controlling light-with-light without nonlinearity. *Light: Science & Applications*, 1(7):e18–e18, 2012.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] L Baldacci, S Zanotto, G Biasiol, 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 Pedrizzini. 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. In *Technologies for Optical Countermeasures III*, volume 6397, pages 51–64. SPIE, 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.