

Обзор литературы

1. 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

$$n_i \sin \Theta_i = n_t \sin \Theta_t \quad (1)$$

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. 1А), то разность фаз между ними равна нулю

$$[k_0 n_i \sin \Theta_i dx + (\Phi + d\Phi)] - [k_0 n_t \sin \Theta_t dx + \Phi] = 0, \quad (2)$$

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 (2) приводит к обобщенному закону преломления Снелла

$$n_t \sin \Theta_t - n_i \sin \Theta_i = \frac{\lambda_0}{2\pi} \frac{d\Phi}{dx}. \quad (3)$$

Уравнение (3) показывает, что преломленный луч может иметь произвольное направление при условии, что создан подходящий постоянный градиент фазы $d\Phi/dx$ вдоль границы раздела (Рис. 1Б) [1]. Более того, при ненулевом градиенте фазы два угла падения $\pm\Theta_i$ соответствуют различным углам преломления. Как следствие, существуют два угла полного внутреннего отражения

$$\Theta_c = \arcsin \left(\pm \frac{n_t}{n_i} - \frac{\lambda_0}{2\pi} \frac{d\Phi}{dx} \right) \quad (4)$$

Аналогично, для отражения имеем

$$\sin \Theta_r - \sin \Theta_i = \frac{\lambda_0}{2\pi n_i} \frac{d\Phi}{dx}, \quad (5)$$

где Θ_r — угол отражения. Между Θ_r и Θ_i существует нелинейная связь, которая заметно отличается от известного закона геометрической оптики. Уравнение (5) показывает, что всегда существует критический угол падения

$$\Theta'_c = \arcsin \left(1 - \frac{\lambda_0}{2\pi n_i} \left| \frac{d\Phi}{dx} \right| \right), \quad (6)$$

при котором отраженная волна становится эванесцентной.

Такая возможность управления распространением пучка привела к созданию структур, реализующих различные градиенты фазы — метаповерхностей.

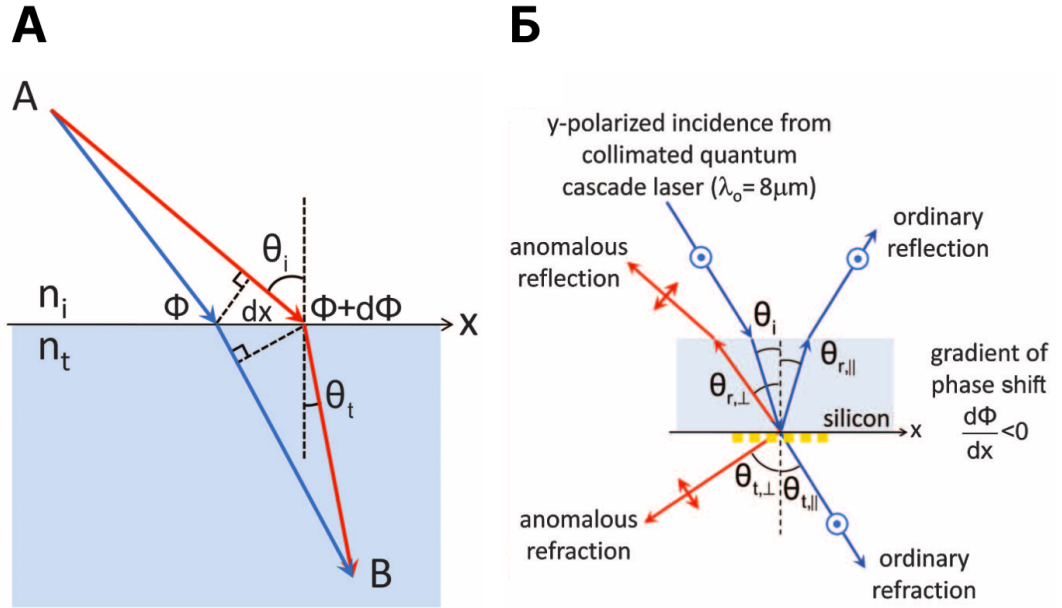


Рис. 1: (А) Рисунок, используемый для вывода обобщенного закона преломления Снелла. Граница между двумя средами искусственно структурирована так, чтобы внести резкий фазовый сдвиг на пути света, который зависит от положения на границе раздела. Φ и $\Phi + d\Phi$ — фазовые сдвиги, при которых два луча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

2. Метаповерхности

Метаповерхности градиента активной фазы (метаповерхности) представляют собой структуры субволновых оптических элементов — антенн, реализующих пространственно изменяющийся фазовый разрыв (т. е. градиент фазы) для падающей плоской волны. Фаза взаимодействующего света определяется геометрией антенн и характеристиками материала изготовления метаповерхности и может иметь вид, например, такой, как на Рис. 2Б. Пример такой метаповерхности из V-образных антенн приведен на Рис. 2А. За счёт наличия градиента фазы, в соответствии с обобщенным законом Снелла, наблюдается как нормальный прошедший пучок, так и аномальный, отклоняющийся на угол, определяемый (3). Для активного управления распространением пучка метаповерхности используются совместно с методом когерентного контроля.

3. 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.

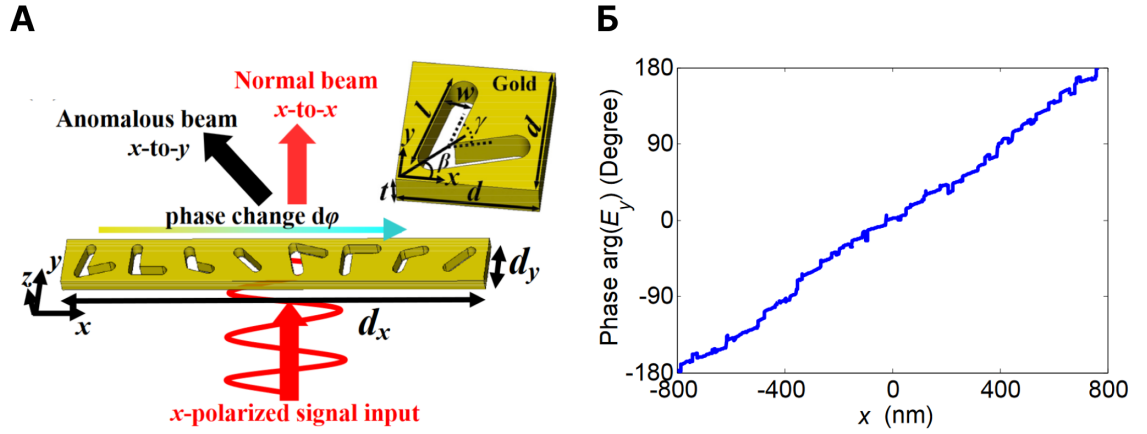


Рис. 2: (А) Рисунок, показывающий наличие и направление распространения нормального и аномального прошедших пучков и их поляризацию. Крупным планом изображены детали конструкции V-образной антенны. [2, Fig. 1A] (Б) Зависимость фазового разрыва от координаты точки падения пучка для структуры из V-образных антенн. [2, Fig. 1D]

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. Структура находится в узле стоячей волны. Тогда неоднородность становится «выключенной» и практически не влияет на распространение излучения.
2. 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. 3) [3].

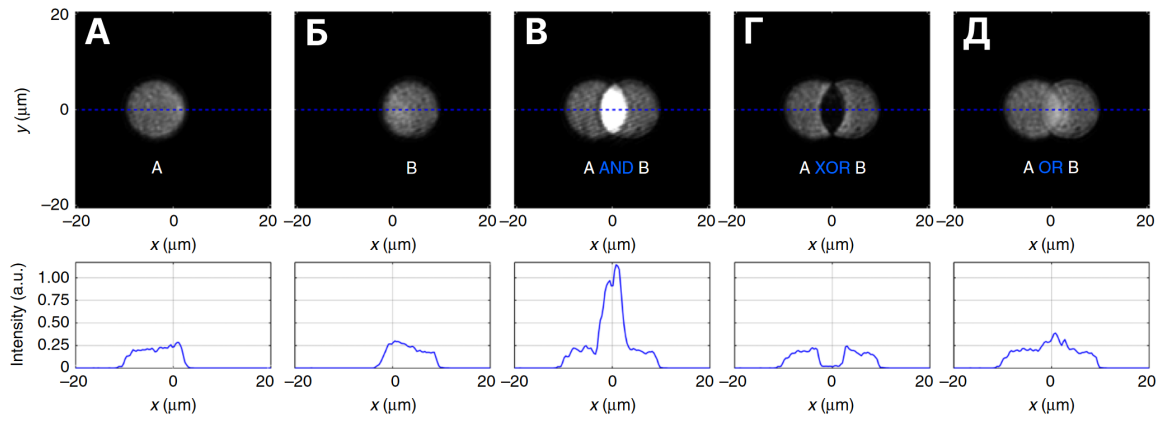


Рис. 3: Оптические базовые логические операции. Изображения метаповерхности, (А) освещенной только лучом А, (Б) только лучом В и (В-Д) обоими лучами А и В. Разным относительным фазам лучей А и В соответствуют разные логические операции: (В) А И В ($\Theta = \pi$), (Г) А «ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ» В ($\Theta =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

Список литературы

- [1] 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.
- [2] Jinhui Shi, Xu Fang, Edward TF Rogers, Eric Plum, Kevin F MacDonald, and Nikolay I Zheludev. Coherent control of snell’s law at metasurfaces. *Optics express*, 22(17):21051–21060, 2014.
- [3] 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.