

03

Метаматериалы с временной неоднородностью для управления оптическими полями

© А.И. Минибаев, А.В. Харитонов[¶], С.С. Харинцев

Институт физики, Казанский федеральный университет,
420008 Казань, Россия

[¶] e-mail: antvharitonov@kpfu.ru

Поступила в редакцию 19.05.2023 г.

В окончательной редакции 15.08.2023 г.

Принята к публикации 30.10.2023 г.

Исследовано взаимодействие электромагнитной волны с нестационарной средой. Рассчитаны коэффициенты отражения и пропускания света через материал, который испытывает разовое переключение показателя преломления. Показано, что путем настройки параметров временного профиля переключения можно управлять амплитудами отраженной и прошедшей волн. Установлено, что для эффективного преобразования света с помощью данного класса сред длительность переключения должна быть на порядок меньше периода волны.

Ключевые слова: фотоника, метаматериалы, нестационарные среды, пространственно-временная неоднородность.

DOI: 10.61011/OS.2023.11.57006.5005-23

Введение

Метаматериалы (искусственные структурированные среды [1]) предоставляют уникальные возможности управления светом. За последние годы в метаматериалах был обнаружен ряд необычных эффектов, например отрицательное преломление [2], бездифракционное огибание препятствий и др. Благодаря этому данные среды находят широкие применения в фотонике и оптоэлектронике. Недавно слоистые структуры метал-диэлектрик были предложены для радиационного охлаждения [3]. Необычные свойства метаматериалов обусловлены наличием в них пространственной неоднородности, которая определяется геометрией структурных элементов и их взаимным расположением. В качестве материала, из которого изготавливаются структурные элементы, все чаще используются настраиваемые плазмонные среды [4], что позволяет дополнительно оптимизировать оптический отклик. В последнее время большую популярность приобретает другой класс искусственных сред, которые однородны в пространстве, но неоднородны во временной области [5]. Это достигается путем модуляции свойств среды во времени с помощью внешнего воздействия.

Проиллюстрировать свойства нестационарных сред можно с помощью сравнения с материалом, имеющим пространственную неоднородность. Простейшим примером пространственной неоднородности является плоская граница раздела двух сред (пространственный интерфейс) (рис. 1, *a*). При прохождении света через данную структуру образуются две волны: отраженная и прошедшая. Схожий эффект наблюдается и для случая временного интерфейса (рис. 1, *b*). При резком

переключении показателя преломления всей среды распространяющаяся в ней волна конвертируется в две другие, которые имеют противоположные направления распространения. По аналогии со случаем пространственной неоднородности эти волны принято называть отраженной и прошедшей. При этом частота этих волн изменяется, тогда как волновой вектор сохраняется [6,7]. Это свойство является диаметрально противоположным случаю пространственного интерфейса.

На данный момент большинство опубликованных работ [8,9] используют приближение сверхбыстрых переключений, когда свойства среды изменяются мгновенно. Однако в любой реальной системе скорость переключения является конечной, что связано с наличием инерции.

В настоящей работе исследуется влияние параметров временного интерфейса, таких как длительность и временной профиль переключения диэлектрической проницаемости, на процессы отражения и преломления света.

Результаты и обсуждение

Для описания прохождения света через временной интерфейс вводятся коэффициенты пропускания (T) и отражения (R) в следующем виде:

$$R = \left| \frac{\mathbf{E}^R}{\mathbf{E}^0} \right|, \quad T = \left| \frac{\mathbf{E}^T}{\mathbf{E}^0} \right|, \quad (1)$$

где \mathbf{E}^0 , \mathbf{E}^R и \mathbf{E}^T — напряженности электрического поля падающей, отраженной и прошедшей волн соответственно. В приближении мгновенного переключения

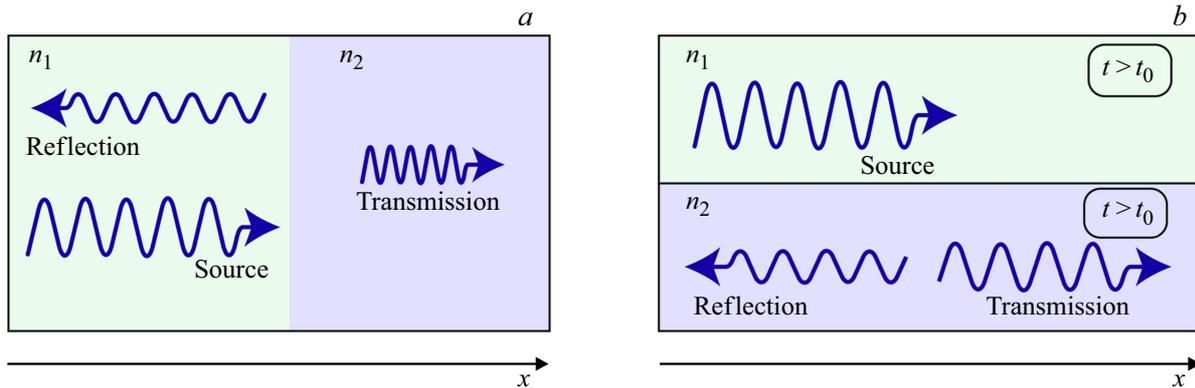


Рис. 1. Иллюстрация пространственного (а) и временного (б) интерфейсов. (а) Граница раздела двух сред с показателями преломления n_1 и n_2 , (б) показан случай переключения показателя преломления из n_1 в n_2 в момент времени t_0 .

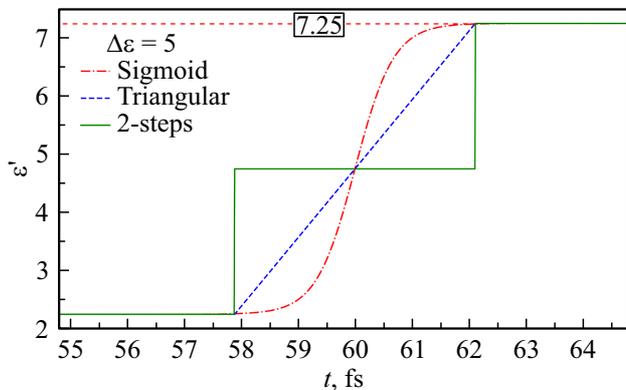


Рис. 2. Зависимости действительной части диэлектрической проницаемости ϵ' от времени t для различных профилей переключения: штрихпунктирная линия — сигмоидальный, штриховая линия — треугольный, сплошная линия — двухступенчатый.

коэффициенты R и T связаны следующим образом:

$$T^2 - R^2 = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3, \tag{2}$$

где n_1 и n_2 — коэффициенты преломления до и после переключения соответственно.

В работе исследовано влияние временного профиля переключения диэлектрической проницаемости $\epsilon(t)$ на коэффициенты R и T . Для этого рассмотрены следующие случаи (рис. 2): сигмоидальный (штрихпунктирная линия), треугольный (штриховая линия) и двухступенчатый (сплошная линия) профили.

Сигмоидальный профиль задавался в следующем виде:

$$\epsilon(t) = \epsilon_0 + \frac{\Delta\epsilon}{1 + e^{-\frac{(t-t_0)}{\tau}}}. \tag{3}$$

Здесь ϵ_0 — значение диэлектрической проницаемости до переключения, $\Delta\epsilon$ — изменение диэлектрической проницаемости в результате переключения (глубина

переключения), t_0 — момент времени, к которому среда переключилась наполовину. Параметр τ описывает характерную длительность переключения.

Коэффициенты отражения и пропускания света через временной интерфейс были рассчитаны путем численного моделирования с помощью метода конечных разностей во временной области. Использовался коммерческий программный пакет Ansys Lumerical FDTD. Для исследования электромагнитных явлений в нестационарных средах был создан компьютерный код, выполненный в виде плагина к используемому программному обеспечению. Код представляет собой динамическую библиотеку, с помощью которой можно изменять диэлектрическую проницаемость среды на каждом временном шаге в конечно-разностной схеме. Расчеты были выполнены в приближении, что исходный материал не имеет дисперсии и поглощения. Глубина переключения диэлектрической проницаемости $\Delta\epsilon$ для всех профилей задавалась равной 5. В результате проведенных исследований получены зависимости квадрата коэффициентов пропускания и отражения от длительности переключения (рис. 3). Данные были получены для различных профилей переключения, характерный вид которых показан на рис. 2. Отметим, что каждой точке на графике (рис. 3) соответствует отдельное моделирование, где рассчитывались коэффициенты R и T для конкретного профиля и длительности переключения.

Как следует из полученных данных (рис. 3,а), при малых длительностях переключения (на порядки меньших периода волны) значения рассчитанных коэффициентов R и T согласуются с результатами предыдущих работ, в которых рассматривались мгновенные переключения. Однако коэффициенты R и T уменьшаются при увеличении длительности переключения. В частности, коэффициент отражения приобретает значение, близкое к нулю, что происходит уже на временах, сравнимых с периодом колебания волны. Таким образом, для наблюдения отраженной волны в материалах с временной неоднородностью длительность переключения должна быть на порядок меньше периода колебания волны.

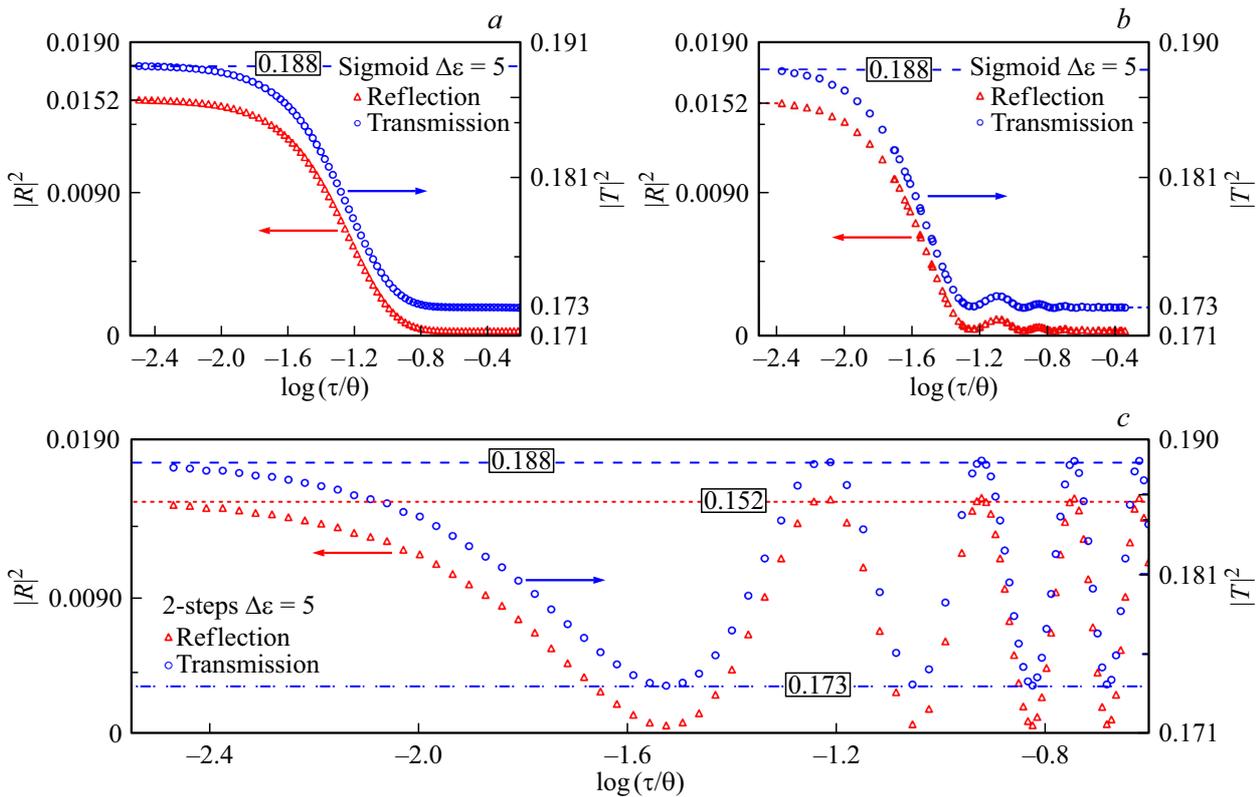


Рис. 3. Зависимость квадратов коэффициентов пропускания $|T|^2$ и отражения $|R|^2$ от $\log(\tau/\theta)$, где τ — длительность переключения, θ — период колебания падающей волны. Сигмоидальный (a), треугольный (b) и двухступенчатый (c) профили.

Для заданной длительности переключения амплитуды отраженных и преломленных волн сильно зависят от временного профиля переключения. Также можно сделать вывод, что соотношение (2) выполняется для любой длительности переключения.

В случае треугольного профиля (рис. 3, b) для длительных переключений наблюдаются осцилляции в графиках зависимостей R и T . Данный эффект еще более ярко выражен для двухступенчатого переключения (рис. 3, c). Такое поведение можно объяснить следующим. В обоих профилях существует два скачка производной показателя преломления по времени. При каждом скачке образуются отраженная и преломленная волны. В результате пара отраженных (преломленных) волн интерферирует друг с другом. Разность фаз между последовательно отраженными (преломленными) волнами определяется временем между переключениями. Таким образом, волны могут усиливать или ослаблять друг друга. Такой эффект можно использовать для создания антиотражающих покрытий и идеальных поглотителей.

Заключение

В настоящей работе исследовано прохождение света в среде, обладающей неоднородностью во временной области. Были рассчитаны коэффициенты отражения и пропускания через временные интерфейсы, представ-

ляющие собой разовое переключение показателя преломления. Изучено влияние длительности и профиля переключения. Установлено, что для наблюдения отраженной волны длительность переключения должна быть меньше или сравнима с периодом падающей волны. Показано, что при фиксированной длительности переключения амплитуды отраженных и преломленных волн сильно зависят от временного профиля переключения. Важной задачей является разработка метода расчета оптимальных параметров профилей переключения, которые зависят от конкретной задачи. Таким образом, создание в среде временных неоднородностей открывает новые степени свободы в управлении оптическими полями. Это позволит осуществить переход от наноструктурированных метаматериалов к оптическим устройствам с простой геометрией.

Финансирование работы

Работа выполнена за счет средств Российского научного фонда (номер гранта 22-72-00091), <https://grant.rscf.ru/site/user/forms?number=22-72-00091>.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] K. Du, H. Barkaoui, X. Zhang, L. Jin, Q. Song, S. Xiao. *Nanophotonics*, **11** (9), 1761 (2022).
DOI: 10.1515/nanoph-2021-0684
- [2] J.B. Pendry. *Contemp. Phys.*, **45** (3), 191 (2004).
DOI: 10.1080/00107510410001667434
- [3] A.R. Gazizov, M.Kh. Salakhov, S.S. Kharintsev. *Bull. Rus. Acad. Sci.: Physics*, **86** (1), 71 (2022).
DOI: 10.3103/S1062873822700411
- [4] A.V. Kharitonov, S.S. Kharintsev. *Bull. Rus. Acad. Sci.: Physics*, **86** (1), 92 (2022). DOI: 10.3103/S1062873822700459
- [5] E. Galiffi, R. Tirole, S. Yin, H. Li, S. Vezzoli, P.A. Huidobro, J.B. Pendry. *Advanced Photonics*, **4** (1), 014002 (2022).
DOI: 10.1117/1.AP4.1.014002
- [6] J.T. Mendonça, P.K. Shukla. *Phys. Scr.*, **65** (2), 160 (2002).
DOI: 10.1238/Physica.Regular.065a00160
- [7] V. Pacheco-Peña, N. Engheta. *Optica*, **7** (4), 323 (2020).
DOI: 10.1364/OPTICA.381175
- [8] H. Li, S. Yin, E. Galiffi, A. Alú. *Phys. Rev. Lett.*, **127** (15), 153903 (2021). DOI: 10.1103/PhysRevLett.127.153903
- [9] E. Lustig, Y. Sharabi, M. Segev. *Optica*, **5** (11), 1390 (2018).
DOI: 10.1364/OPTICA.5.001390