

DOI: 10.17586/1023-5086-2024-91-05-5-15

УДК 535.323

Нестационарные оптические среды как платформа для аналоговых суперкомпьютеров

ВАЛЕРИЯ МАКСИМОВНА ЛЕВКОВСКАЯ¹, АНТОН ВИКТОРОВИЧ ХАРИТОНОВ²✉,
СЕРГЕЙ СЕРГЕЕВИЧ ХАРИНЦЕВ³

Казанский федеральный университет, Казань, Россия

¹levkovskaya.valeriya@gmail.com <https://orcid.org/0000-0002-6316-5393>

²antonharitonov91@gmail.com <https://orcid.org/0000-0002-0709-421X>

³skharint@gmail.com <http://orcid.org/0000-0002-5367-1356>

Аннотация

Предмет исследования. Новый класс искусственных электромагнитных сред — нестационарные материалы, отличительной особенностью которых является быстрая модуляция оптических параметров среды на сверхкоротких временах, сравнимых или меньших периода волны. **Цель работы.** Разработка новой платформы для реализации аналоговых оптических вычислений. Для этого исследованы зависимости амплитуд и частот волн, образовавшихся в результате взаимодействия падающей электромагнитной волны с нестационарной средой, от длительности переключения диэлектрической проницаемости и спектральной дисперсии. **Метод.** Амплитуды отраженных и преломленных электромагнитных волн рассчитаны путем решения уравнений Максвелла методом конечных элементов во временной области. Для описания нестационарной среды со спектральной дисперсией использована модель Лоренца, в которой плазменная частота является функцией времени. Влияние длительности переключения исследовано с помощью модели сигмоидального временного профиля переключения. **Основные результаты.** Показано, что при наличии в среде лоренцевской дисперсии в спектре отраженных/преломленных электромагнитных волн может возникать не одна, а несколько компонент, сдвинутых относительно частоты падающего излучения. Изменение скорости и глубины переключения диэлектрической проницаемости среды позволяет регулировать амплитуды и частоты образовавшихся волн соответственно. Для наблюдения отраженной волны длительность переключения должна быть сравнима или меньше периода падающей волны. **Практическая значимость.** Полученные в работе результаты могут быть использованы при реализации оптических устройств нового поколения. Возможность гибкого управления амплитудами волн путем настройки временной модуляции пространственно-однородных сред открывает новые перспективы в создании аналоговых оптических компьютеров.

Ключевые слова: нестационарные среды, дисперсия, аналоговые вычисления, метаматериалы

Благодарность: работа выполнена за счет средств Российского научного фонда (грант № 22-72-00091).

Ссылка для цитирования: Левковская В.М., Харитонов А.В., Харинцев С.С. Нестационарные оптические среды как платформа для аналоговых суперкомпьютеров // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 5. С. 5–15. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-05-5-15>

Коды OCIS: 190.7110, 230.4320, 260.7120

Time-varying materials for analog optical computing

VALERIYA M. LEVKOVSKAYA¹, ANTON V. KHARITONOV²✉, SERGEY S. KHARINTSEV³

Kazan Federal University, Kazan, Russia

¹levkovskaya.valeriya@gmail.com <https://orcid.org/0000-0002-6316-5393>

²antonharitonov91@gmail.com <https://orcid.org/0000-0002-0709-421X>

³skharint@gmail.com <http://orcid.org/0000-0002-5367-1356>

Abstract

Subject of study. A new class of artificial electromagnetic media — time-varying materials, the distinctive feature of which is the rapid modulation of optical parameters of the medium at ultra-short times, comparable to or shorter than the wave period. **Aim of study.** This work is aimed at developing a new platform for the implementation of analog optical computers. For this purpose, the dependences of the amplitudes and frequencies of waves formed upon interaction with a time-varying medium on the permittivity switching time and the magnitude of spectral dispersion are investigated. **Method.** The amplitudes of reflected and refracted electromagnetic waves are calculated using the time-domain finite element method. To describe the time-varying medium with spectral dispersion, a Lorentz model with time-dependent plasma frequency is used. The optical response from the medium exhibiting non-instantaneous switching is studied by considering the sigmoidal switching profile. **Main results.** It is shown that using the dispersive time-varying medium it is possible to obtain several spectral components that are shifted from the frequency of the incident light. Controlling the speed and depth of the permittivity switching allows one to adjust the amplitudes and frequencies of the time reflected/refracted waves respectively. To observe the reflected wave, the duration of switching should be comparable or less than the period of the incident wave. **Practical significance.** The results of this work are useful for the development of next-generation optical devices. The ability to flexibly control the amplitude and frequency of light waves by temporal modulation of homogeneous media opens up new possibilities for the realization of analog optical computers.

Keywords: time-varying media, dispersion, analog computing, metamaterials

Acknowledgment: this work was supported by the Russian Science Foundation (№ 22-72-00091).

For citation: Levkovskaya V.M., Kharitonov A.V., Kharintsev S.S. Time-varying media for analog optical computing [in Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2024. V. 91. № 5. P. 5–15. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-05-5-15>

OCIS codes: 190.7110, 230.4320, 260.7120

ВВЕДЕНИЕ

За последние годы достигнуты существенные успехи в области создания и управления оптическими сигналами. Значительную роль в этом сыграло использование искусственных сред — метаматериалов. Путем структуризации метаматериалам могут придаваться необычные свойства, не встречающиеся в природных средах. Наряду с фундаментальными исследованиями большие усилия направлены на поиск новых путей применения данной концепции. Одним из таких применений, вызвавших исключительный интерес, стало использование метаматериалов для реализации аналоговых вычислительных устройств [1–3]. В этом случае метаматериал конструируется та-

ким образом, чтобы отраженный/прошедший через него сигнал являлся результатом выполнения заранее заданной математической операции над падающим (рис. 1а). Под сигналом подразумевается распределение амплитуды электромагнитной волны в пространстве и/или во времени. Вычислительные метаматериалы преимущественно предназначены для работы с сигналами, представляющими собой пространственное распределение — одномерные и двумерные профили амплитуды электромагнитной волны в плоскости, перпендикулярной направлению распространения. Методы управления временными сигналами также являются предметом активных исследований [4–6].

В ряде работ продемонстрировано как теоретически, так и экспериментально, что вычислительные метаматериалы могут выполнять операции дифференцирования и интегрирования, а также решать интегро-дифференциальные уравнения [1–3]. Важно отметить, что вычисления проводятся по аналоговому принципу. Это позволяет на несколько порядков превосходить вычислительную мощность цифровых электронных устройств в ряде задач. Однако технологии, основанные на метаматериалах, имеют ряд недостатков. Для реализации определенной функциональности зачастую требуется чрезвычайно сложная архитектура, которая может оказаться невыполнимой даже с помощью современных методов нанотехнологий. Кроме того, малейшие неточности в изготовлении могут привести к накоплению погрешностей вычисления, свойственным аналоговым устройствам.

Настоящая работа посвящена разработке новой платформы для реализации аналоговых оптических вычислений. Для этой цели предлагается использовать новый класс искусственных материалов — нестационарные среды [7]. В отличие от традиционных пространственно-неоднородных метаматериалов данный класс сред является однородным в пространстве, но имеет неоднородность во временной области. Последнее означает, что один из параметров среды быстро изменяет-

ся во времени: за время, сравнимое или менее периода падающей электромагнитной волны. В случае оптических нестационарных сред модулируется диэлектрическая проницаемость и/или магнитная восприимчивость. Сверхбыстрое изменение параметров среды приводит к возникновению ряда экзотических эффектов [7–9], например, нарушение взаимности [10], усиление волн [11], модификация излучения [12–14].

Одним из наиболее распространенных способов создания нестационарной среды является нелинейно-оптическая модуляция под воздействием сверхкоротких лазерных импульсов [15–17]. В качестве нелинейной среды широко используются прозрачные проводящие оксиды, такие как оксиды алюминия-цинка, индия-олова (ITO), галлия-цинка. Они имеют близкую к нулю диэлектрическую проницаемость благодаря чему обладают чрезвычайно большой нелинейностью [18]. В частности, в работе [19] была продемонстрирована возможность модуляции показателя преломления ITO на $\Delta n \sim 1$. Этот результат в корне отличается от случая стандартных нелинейных сред, глубина модуляции которых, как правило, на несколько порядков ниже. Более того, указанные материалы демонстрируют сверхбыструю динамику модуляции. В недавней работе [15] было показано, что переключение показателя преломления ITO на $\Delta n \approx 0,5$ можно

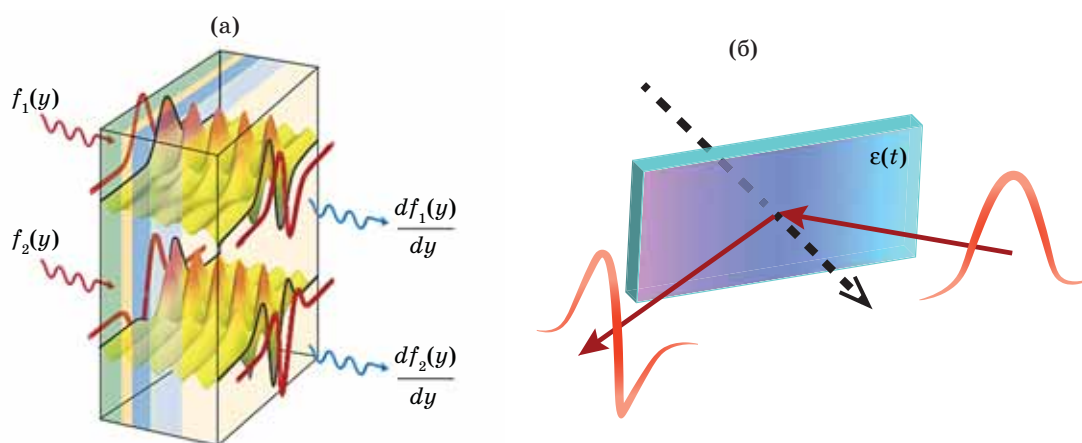


Рис. 1. Вычислительные метаматериалы. Схематические представления аналогового вычислительного устройства на основе пространственно-неоднородного метаматериала [1] (а) и аналогового вычислительного устройства на основе нестационарного метаматериала с простой архитектурой (б)

Fig. 1. Metamaterials for computing. Schematic representations of (a) an analog computing device based on a spatially inhomogeneous metamaterial [1] and (b) an analog computing device based on a non-stationary metamaterial with a simple architecture

осуществить за несколько фемтосекунд, а релаксация происходит за время 10–20 фс. Сочетание этих свойств позволяет экспериментально наблюдать эффекты, свойственные нестационарным средам, в ближнем инфракрасном диапазоне спектра. Также сверхбыстрое переключение (1 фс и меньше) можно осуществлять за счет наведения решеток населенностей путем воздействия на резонансную среду одно- и субцикловыми импульсами [20–22]. Модуляцию свойств среды можно осуществлять также рядом других способов [23], например, путем электрооптической модуляции VO_2 , Ga или GeSbTe, скорость переключения при этом на порядки уступает полностью оптическому методу.

В настоящей работе исследуется возможность использования нестационарных сред для реализации аналоговых оптических вычислений (рис. 1б). Действие вычислительного метаматериала математически можно описать с помощью оператора, действующего на спектр пространственных частот сигнала. Таким образом, для выполнения вычислений необходимо гибко управлять амплитудами волн, а именно амплитудами фурье-компонент сигнала. Для этих целей в работе предлагается использование эффекта отражения/преломления оптического излучения в среде, испытывающей разовое переключение [24]. Подобное переключение называется временной границей — по аналогии с пространственной границей между двумя материалами. Оптические свойства нестационарных сред исследовались в ряде работ (см. обзоры [7–9] и ссылки в них). Однако в большинстве предыдущих работ для описания временных границ использовалась простейшая модель мгновенного переключения [25, 26]. Влияние конечности скорости переключения исследовалось в работе [8] при рассмотрении задачи отражения/преломления излучения от пространственной границы раздела между стационарной и нестационарной средами. В настоящей работе рассматривается задача отражения/преломления оптического излучения от временной границы, когда волна распространяется в пространственно-однородной среде, испытывающей единовременное переключение, и изучается влияние длительности переключения. Рассеяние волн на временных интерфейсах фундаментально отличается от случая пространственных интерфейсов, так

как имеют место другие граничные условия [27]. Нестационарные среды, обладающие конечным характерным временем переключения, также исследовались в работах [28, 29]. Однако в этом случае рассматривался другой тип временной неоднородности, а именно периодическая модуляция. Она приводит к совершенно другим эффектам, рассмотрение которых выходит за рамки настоящей работы. В нестационарных средах происходит преобразование частоты излучения: образовавшиеся волны имеют частоту, отличную от той, которая была у падающей [9, 30]. В большинстве предыдущих работ нестационарные среды рассматривались без учета дисперсии. В работах [8, 28] исследовалось влияние дисперсии в рамках различных моделей, в частности в модели Друде [31]. В настоящей работе показано, что с помощью нестационарных сред с лоренцевской дисперсией можно генерировать волны не на одной, а одновременно на нескольких частотах.

Таким образом, целью настоящей работы является разработка новой платформы для реализации аналоговых оптических вычислений. Для этого исследованы зависимости амплитуд и частот волн, образовавшихся в результате взаимодействия падающей волны с нестационарной средой, от длительности переключения диэлектрической проницаемости и спектральной дисперсии.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЯ

Одно из характерных свойств нестационарных сред заключается в том, что вследствие мгновенного переключения диэлектрической проницаемости среды распространяющаяся в ней волна преобразуется в две другие, которые имеют противоположные направления распространения. По аналогии с пространственной границей раздела эти волны называют отраженной и преломленной, а разовое переключение среды — временной границей.

На рис. 2а представлены спектры электромагнитных волн до и после взаимодействия с временной границей, рассчитанные путем численного решения уравнений Максвелла методом конечных элементов во временной области. Для этого использовался программный пакет Comsol Multiphysics (модуль

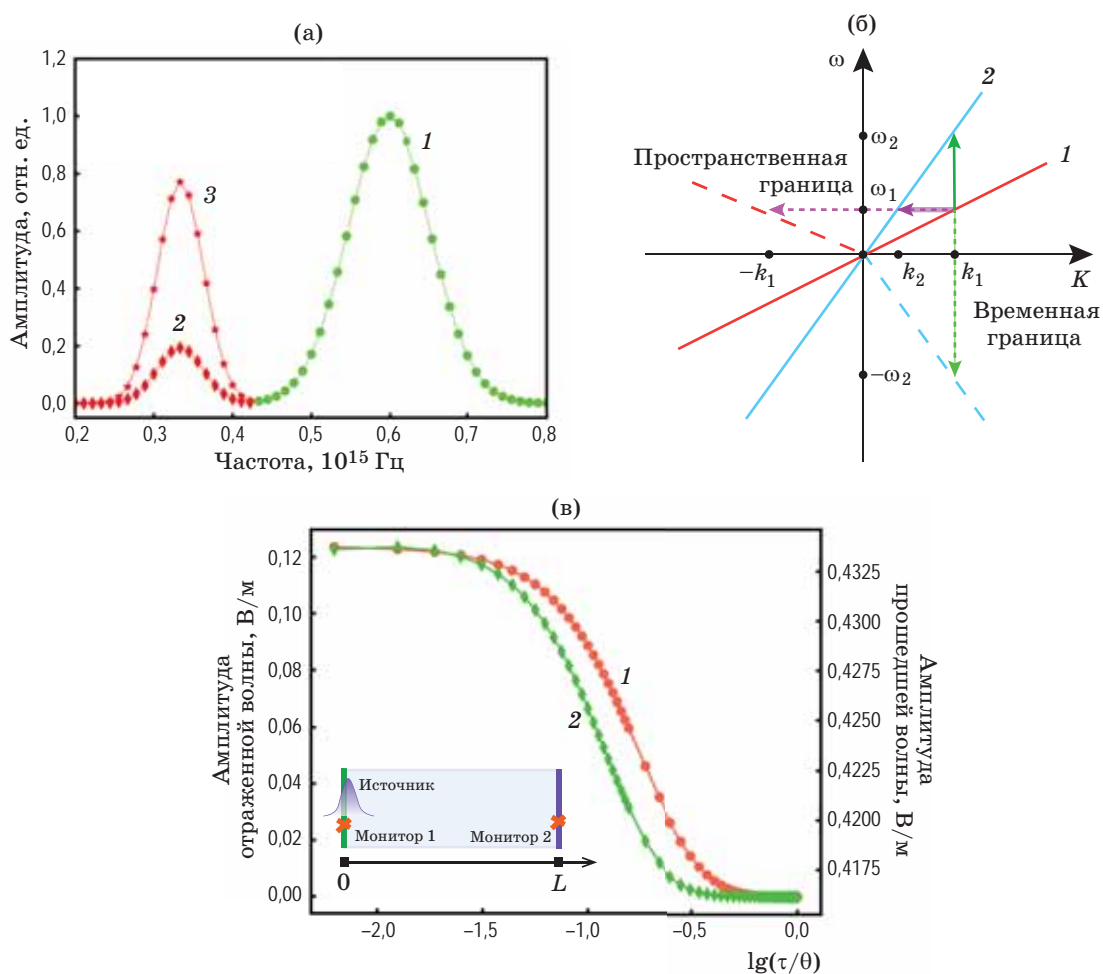


Рис. 2. Результаты численного моделирования среды, не обладающей дисперсией. Спектры падающей (1), а также отраженной (2) и прошедшей (3) волн, полученные в результате взаимодействия электромагнитной волны со средой, испытывающей мгновенное переключение — (а). Дисперсионные кривые при значениях показателя преломления n_1 (1) и n_2 (2). Стрелками обозначены переходы при взаимодействии с пространственной границей (постоянная частота, горизонтальные переходы) и при взаимодействии с временной границей (постоянное волновое число, вертикальные переходы) — (б). Рассчитанные зависимости амплитуды отраженной (1) и преломленной (2) волн от длительности τ переключения диэлектрической проницаемости, θ — период колебания световой волны — (в). Зависимости рассчитаны в точках, указанных на вставке (мониторы 1 и 2)

Fig. 2. Numerical simulation results for a medium without dispersion. (a) Spectra of (1) incident, as well as (2) reflected and (3) transmitted waves, obtained as a result of the interaction of an electromagnetic wave with a medium experiencing instantaneous switching. (б) Dispersion curves for refractive index values (1) n_1 and (2) n_2 . The arrows indicate transitions when light interacts with a spatial boundary (constant frequency, horizontal transitions) and when light interacts with a temporal boundary (constant wavenumber, vertical transitions). (в) Calculated dependences of the amplitude of (1) reflected and (2) refracted waves on the duration τ of switching the dielectric constant, θ is the wave period. The dependencies are calculated at the points indicated in the inset (monitors 1 and 2)

Electromagnetic waves, Transient). В качестве источника использован импульс, огибающая которого во времени являлась функцией Гаусса; импульс имел плоский волновой фронт. Длительность импульса составляла 5 фс, несущая длина волны λ_0 — 500 нм. Область мо-

делирования представляла собой двумерное пространство размером 6,5 мкм \times 10 нм. В направлении, поперечном распространению волны, применялись периодические граничные условия, в продольном — граничные условия рассеяния первого порядка. Использовалась

триангулярная сетка, пространственный шаг не превышал $\Delta x = \lambda_0/25$, временной шаг составлял $\Delta t = 0,1\Delta x/c$, где c — скорость света. В моделировании использовались следующие значения диэлектрической проницаемости: $\varepsilon_1 = 1$ и $\varepsilon_2 = 3$ до и после переключения соответственно. Напряженность электрического поля отраженных/преломленных волн записывалась с помощью двух мониторов, расположенных на противоположных краях рабочей области (см. вставку на рис. 2б). Частотные спектры рассчитывались путем преобразования Фурье данных, полученных с мониторов. Мгновенное переключение задавалось следующим образом. При отсутствии спектральной дисперсии диэлектрической проницаемости связь между вектором напряженности электрического поля \mathbf{E} и вектором поляризации \mathbf{P} имеет локальный характер

$$\mathbf{P}(t) = \varepsilon_0 \chi(t) \mathbf{E}(t), \quad (1)$$

где ε_0 — диэлектрическая проницаемость в вакууме, $\chi(t)$ — функция линейного отклика. В случае нестационарной среды восприимчивость становится функцией времени. Тогда мгновенное переключение задается ступенчатой функцией $\chi(t)$. Из рис. 2а видно, что частоты отраженных/преломленных волн отличаются от частоты падающей волны.

Процессы взаимодействия электромагнитной волны с временной границей и с пространственной фундаментально отличаются. В соответствии с граничными условиями на границе раздела двух диэлектриков тангенциальная компонента электрического поля и нормальная компонента вектора электрического смещения непрерывны. Это приводит к тому, что частота отраженной/преломленной волны не изменяется, в то время как волновой вектор претерпевает разрыв. В результате образуются две противоположно направленные волны. Данный процесс можно изобразить с помощью диаграммы (рис. 2б). Видно, что при переходе из среды с показателем преломления n_1 в среду с n_2 возникают волны с разными знаками проекции волнового вектора. На временной же границе сохраняется вектор электрического смещения, а вектор электрического поля терпит разрыв. В результате волновой вектор падающей волны остается постоянной величиной, следовательно, пере-

ходы на диаграмме (рис. 2б) будут вертикальными. Видно, что частота образовавшихся волн будет отличаться от частоты падающей. Разный знак говорит о противоположном направлении распространения. При мгновенном переключении и отсутствии спектральной дисперсии частота образовавшихся волн определяется следующим образом:

$$\omega'_0 = \omega_0 \sqrt{\varepsilon_1 / \varepsilon_2}, \quad (2)$$

где ω_0 — частота излучения падающего импульса, ε_1 — диэлектрическая проницаемость до переключения, ε_2 — диэлектрическая проницаемость после переключения.

Однако в любой реальной системе скорость переключения является конечной. Для исследования влияния этого фактора на параметры отраженной и преломленной волн в работе рассмотрен сигмоидальный временной профиль переключения

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_1 + \frac{\Delta\varepsilon}{2} \left[1 \pm \tanh\left(\frac{t}{\tau}\right) \right], \quad (3)$$

где $\Delta\varepsilon$ — глубина переключения диэлектрической проницаемости, τ — характерная длительность переключения. В пределе при τ , стремящейся к нулю, $\varepsilon(t)$ будет переходить к ступенчатому виду, рассмотренному ранее. При увеличении длительности переключения, частоты отраженной и преломленной волн остаются неизменными и определяются формулой (2), тогда как амплитуды волн уменьшаются. Рассчитанная зависимость приведена на рис. 2в. При больших значениях τ отраженная волна вовсе отсутствует. Как следует из рис. 2в, для наблюдения эффекта отражения от временной границы длительность переключения среды должна быть достаточно короткой, т.е. меньше периода колебания падающей волны. Данный эффект можно понять, проводя аналогию между временной границей с плавной динамикой переключения и пространственной границей с градиентным переходом. Известно, что при адиабатическом переходе от одной среды ко второй наблюдается уменьшение коэффициента отражения, так как волна при распространении испытывает меньший контраст импедансов. Данный эффект широко используется в антибликовых

покрытиях. В принципе, можно добиться нулевого отражения в широком диапазоне длин волн [32].

Рассмотренные ранее модели не учитывают дисперсию диэлектрической проницаемости. Это приближение справедливо, когда частота падающего излучения находится вдали от линии поглощения. В общем случае при наличии дисперсии поляризация среды P имеет нелокальный характер, ее значение в момент времени t зависит от напряженности электрического поля E во все предыдущие моменты времени t'

$$P(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \chi(t-t') E(t-t') dt'. \quad (4)$$

Если среда испытывает переключение, то ядро свертки в формуле (4) будет зависеть от двух независимых параметров $\chi(t, t')$ [33]. Для исследования данного случая в работе рассмотрена модель дисперсии Лоренца, в которой параметры являются функциями времени

$$\varepsilon(\omega, t) = 1 - \frac{\omega_p^2(t)}{\omega^2 - \Omega_0^2(t) - i\gamma(t)\omega}. \quad (5)$$

В качестве варьируемых параметров, описывающих переключение, могут выступать плазменная частота ω_p , собственная частота Ω_0 и коэффициент затухания γ . Далее в работе рассматривается переключение, вызванное изменением плазменной частоты ω_p (вставка на рис. 3а). При этом переключение считается мгновенным (длительность изменения ω_p много меньше периода падающей волны). Последнее позволяет изучить влияние дисперсии на процесс отражения/преломления излучения на временных интерфейсах отдельно от эффектов, связанных с конечностью скорости переключения. В действительности же оба вклада будут участвовать в формировании электромагнитного отклика. Для исследования связанных с этим эффектов требуется построение более сложных моделей. Временную динамику переключения плазменной частоты можно описать с помощью теории Келдыша [34–36]. Модуляция плазменной частоты в модели Лоренца физически объясняется изменением концентрации N резонирующих диполей (поляризуемых атомов) — $\omega_p = (N(t) e^2 / \varepsilon_0 m^*)^{1/2}$, где e и m^* — заряд и эф-

фективная масса электрона соответственно. Уменьшение плазменной частоты соответствует уменьшению N , что может происходить при межзонных переходах из валентной зоны в зону проводимости под воздействием импульса накачки. Увеличение ω_p связано с релаксационными переходами, которые возникают после возбуждения свободных носителей. Так, при импульсном воздействии наблюдаются оба процесса: уменьшение и увеличение плазменной частоты следуют друг за другом. Результаты, приведенные ниже, обсуждаются на примере уменьшения плазменной частоты. Схожие эффекты будут наблюдаться и при увеличении плазменной частоты.

На рис. 3а изображены дисперсионные кривые двух моделей Лоренца с параметрами ω_{p1} и ω_{p2} . С помощью данного рисунка можно проанализировать отклик такой среды по аналогии с диаграммой на рис. 2б. При переключении в момент времени τ_{switch} свойства системы кардинально меняются, что приводит к переходу от дисперсионной кривой с параметрами $\{\omega_{p1}, \Omega_0, \gamma\}$ к кривой с $\{\omega_{p2}, \Omega_0, \gamma\}$. В результате излучение испытывает эффект отражения/преломления. В соответствии с граничными условиями несущая частота импульса ω_0 меняется, при этом волновой вектор остается постоянным. В результате данного переключения возникают две преломленные волны с разными частотами ω_1 и ω_2 . Этот результат отличается от случая, когда в среде нет дисперсии, в котором образуется только одна смещенная компонента. Также возникают две отраженные волны с частотами ω_1 и ω_2 (нет на рис. 3а). Сдвиг частоты при этом определяется глубиной переключения. Интересно, что количество образовавшихся спектральных компонент также зависит от частоты падающего излучения. Как видно из рис. 3а, при частоте ω_0' возможен всего один переход в точку, соответствующую ω_1' .

Проанализировать спектральный состав при увеличении плазменной частоты можно также с помощью диаграммы на рис. 3а. В этом случае переходы будут осуществляться из состояний, которые соответствуют первой кривой, в состояния, описываемые второй кривой. Видно, что наличие лоренцевской дисперсии будет также приводить к образованию нескольких спектральных компонент в отраженном/преломленном излучении.

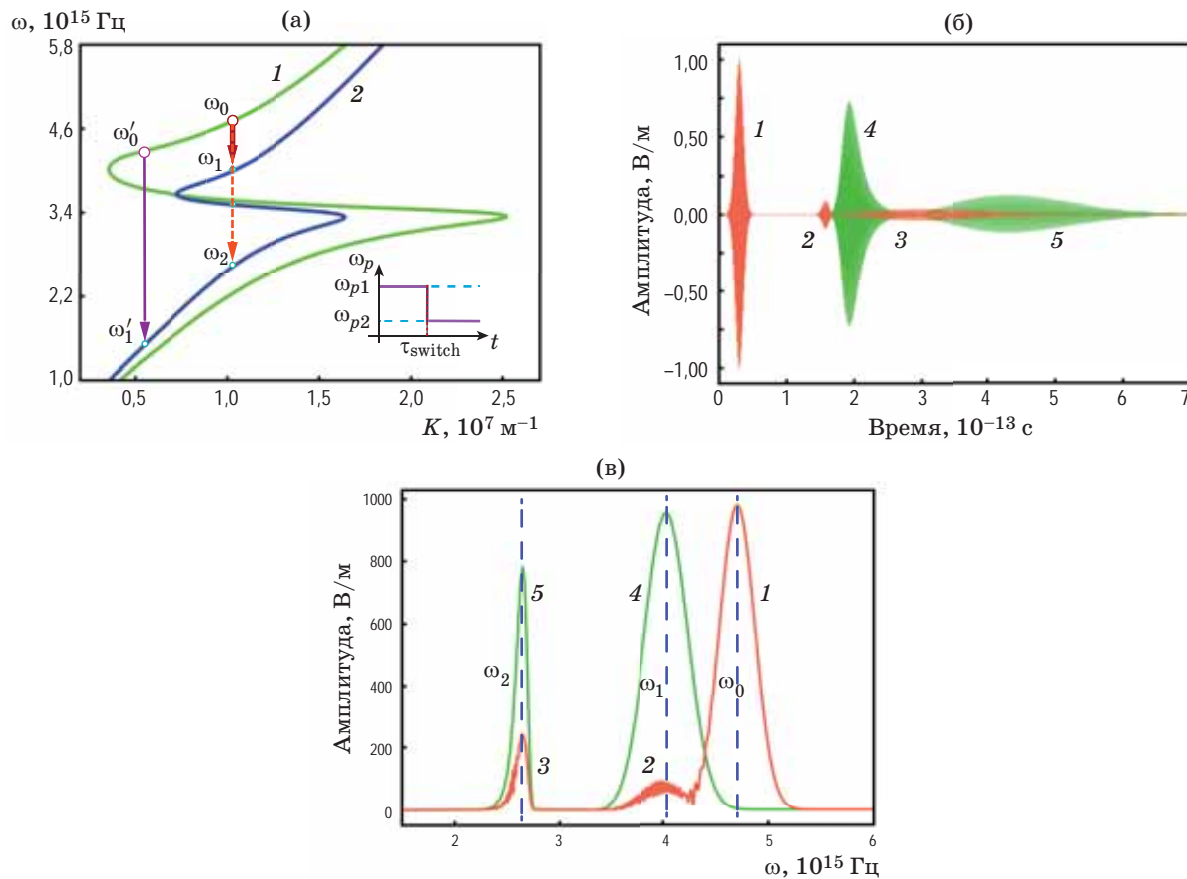


Рис. 3. Результаты численного моделирования среды с дисперсией. (а) Дисперсионные кривые в модели Лоренца, построенные при двух различных значениях плазменной частоты. Стрелками обозначены возможные переходы при постоянном волновом векторе. 1 — состояние среды до переключения плазменной частоты, 2 — после переключения. Зависимости амплитуд волн, распространяющихся в нестационарной среде с разовым переключением, от времени (б) и рассчитанные спектры излучения до и после взаимодействия со средой, испытывающей переключение, как на рис. 2а, (в). 1 — падающая волна, 2 и 3 — волны, отраженные от временной границы, 4 и 5 — волны, преломленные на временной границе

Fig. 3. Numerical simulation results for a medium with dispersion. (a) Dispersion curves plotted for different values of plasma frequency in the Lorentz model. Arrows indicate possible transitions when a wave vector is constant. State of the medium (1) before switching the plasma frequency, (2) after switching. (b) Time dependences of the amplitudes of waves propagating in a medium before and after a single switching event and (c) calculated spectra of light before and after interaction with the medium undergoing switching, as shown in Fig. 2a. (1) is incident wave, (2) and (3) are waves reflected from the temporary boundary, (4) and (5) are waves refracted at the temporary boundary

В случае плавного переключения плазменной частоты можно ожидать, что одним из проявлений увеличения длительности переключения будет уменьшение амплитуды отраженных/преломленных волн. Такой вывод можно сделать на основе анализа рис. 2в.

Также стоит отметить, что групповая скорость отраженной/преломленной волны с ω_1 будет отличаться от волны с частотой ω_2 . Таким образом, контролируя модуляцию оптиче-

ских параметров в системе с помощью внешнего воздействия, можно регулировать частоту электромагнитных волн и их групповые скорости. Схожие эффекты также наблюдаются в результате самовоздействия сверхкоротких лазерных импульсов при их распространении в нелинейной среде, например, в оптических волокнах [37–39]. В зависимости от того, в какой точке дисперсионной кривой находится начальная частота импульса, будут меняться

как частоты отраженных/преломленных на временной границе волн, так и их количество.

Для подтверждения данных выводов в работе проведено моделирование процесса взаимодействия короткого импульса (длительность 10 фс, несущая длина волны 380 нм) с временной границей, возникающей в среде с дисперсией. Численное решение уравнений Максвелла выполнялось методом конечных элементов во временной области. Для этого использовался программный пакет Comsol Multiphysics (модуль Electromagnetic waves, Transient). В основу дисперсионной модели среды легла модель Лоренца (формула (5)) с параметрами $\Lambda_0 = 2\pi c/\Omega_0 = 650$ нм, $\omega_{p1} = 0,8\Omega_0$, $\omega_{p2} = 0,4\Omega_0$, $\gamma = 0,0005\Omega_0$; переключение плазменной частоты от значения ω_{p1} до ω_{p2} задавалось как функция Хевисайда. Область моделирования представляла собой двумерное пространство размером 25 мкм \times 15 нм. В направлении, поперечном распространению волны, применялись периодические граничные условия, в продольном — граничные условия рассеяния первого порядка. Использовалась триангулярная сетка, пространственный шаг сетки составлял $\Delta x = \lambda_0/25$, временной шаг $\Delta t = 0,1\Delta x/c$.

Результат численного моделирования представлен на рис. 3б. Импульс распространяется в однородной среде с описанной лоренцевской дисперсией, в момент времени τ_{switch} происходит изменение дисперсионных свойств. Скачок плазменной частоты приводит к формированию группы волн с частотами ω_1 и ω_2 . На основании результатов (рис. 3б) проведено преобразование Фурье и получены спектры отраженных/прошедший импульсов (рис. 3в). Аналитически полученные частоты находятся в полном соответствии с результатами численного моделирования. Образовавшиеся вол-

ны распространяются с разными групповыми скоростями: отраженные (преломленные) волны достигают входной (выходной) монитор в разное время. Это находится в согласии с проведенным выше теоретическим анализом.

ВЫВОДЫ

Таким образом, в настоящей работе продемонстрирована возможность использования нестационарных сред в качестве платформы для аналоговых оптических компьютеров. Для этого получены зависимости амплитуд и частот волн, образовавшихся в результате взаимодействия падающей волны с нестационарной средой, от длительности переключения диэлектрической проницаемости и спектральной дисперсии. Показано, что при увеличении длительности переключения амплитуды отраженной и преломленной волн уменьшаются. Причем отраженная волна полностью исчезает, если длительность переключения становится сопоставима с периодом колебания падающей волны. Это может быть использовано для гибкой настройки амплитуд волн.

Наличие в нестационарной среде лоренцевской дисперсии может приводить к образованию сразу нескольких компонент в спектре отраженных/преломленных волн, тогда как в случае монотонной дисперсии возможна только одна компонента. В свою очередь, групповые скорости этих волн отличаются друг от друга. Таким образом, нестационарные среды открывают широкие возможности в управлении электромагнитным излучением. Данный факт делает их перспективной платформой для разработки инновационных устройств, таких как аналоговые оптические компьютеры и перестраиваемые преобразователи частоты оптического излучения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Silva A., Monticone F., Castaldi G., et al. Performing mathematical operations with metamaterials // *Science*. 2014. V. 343. № 6167. P. 160–163. <http://doi.org/10.1126/science.1242818>
2. Zangeneh-Nejad F., Sounas D.L., Alù A., et al. Analogue computing with metamaterials // *Nature Rev. Mater.* 2021. V. 6. № 3. P. 207–225. <http://doi.org/10.1038/s41578-020-00243-2>
3. Mohammadi Estakhri N., Edwards B., Engheta N. Inverse-designed metastructures that solve equations // *Science*. 2019. V. 363. № 6433. P. 1333–1338. <http://doi.org/10.1126/science.aaw2498>
4. Li C., Li J., Fang T., et al. The challenges of modern computing and new opportunities for optics // *Photonix*. 2021. V. 2. № 1. P. 1–31. <http://doi.org/10.1186/s43074-021-00042-0>
5. Pakhomov A., Arkhipov R., Arkhipov M., et al. Temporal differentiation and integration of few-cycle pulses by ultrathin metallic films // *Opt. Lett.* 2021. V. 46. № 12. P. 2868–2871. <http://doi.org/10.1364/OL.428238>
6. Pakhomov A.V. Time integration and differentiation of unipolar pulses of unusual shape // *Quantum Electronics*. 2021. V. 51. № 11. P. 1000. <http://doi.org/10.1070/QEL17642>

7. Galiffi E., Tirole R., Yin S., et al. Photonics of time-varying media // *Advanced Photonics*. 2022. V. 4. № 1. P. 014002–014002. <http://doi.org/10.1117/1.AP.4.1.014002>
8. Шварцбург А.Б. Оптика нестационарных сред // *УФН*. 2005. Т. 175. № 8. С. 833–861. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0175.200508c.0833>
Shvartsburg A.B. Optics of nonstationary media // *Physics-Uspekhi*. 2005. V. 48. № 8. P. 797. <https://doi.org/10.1070/PU2005v048n08ABEH002119>
9. Caloz C., Deck-Leger Z.L. Spacetime metamaterials — part II: Theory and applications // *IEEE Trans. Antennas and Propagation*. 2019. V. 68. № 3. P. 1583–1598. <http://doi: 10.1109/TAP.2019.2944216>
10. Sounas D.L., Alù A. Non-reciprocal photonics based on time modulation // *Nature Photonics*. 2017. V. 11. № 12. P. 774–783. <http://doi.org/10.1038/s41566-017-0051-x>
11. Martínez-Romero J.S., Halevi P. Parametric resonances in a temporal photonic crystal slab // *Phys. Rev. A*. 2018. V. 98. № 5. P. 053852. <http://doi.org/10.1103/PhysRevA.98.053852>
12. Болотовский Б.М., Давыдов В.А., Рок В.Е. Излучение электромагнитных волн в случае плавного изменения параметров излучающей системы // *УФН*. 1982. Т. 136. № 3. С. 501–517. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0136.198203e.0501>
Bolotovskii B.M., Davydov V.A., Rok V.E. The emission of electromagnetic waves in the case of a smooth variation of parameters of a radiating system // *Soviet Physics Uspekhi*. 1982. V. 25. № 3. P. 167. <https://doi.org/10.1070/PU1982v025n03ABEH004521>
13. Silveirinha M.G. Optical instabilities and spontaneous light emission by polarizable moving matter // *Phys. Rev. X*. 2014. V. 4. № 3. P. 031013. <http://doi.org/10.1103/PhysRevX.4.031013>
14. Mencagli M.J., Sounas D.L., Fink M., et al. Static-to-dynamic field conversion with time-varying media // *Phys. Rev. B*. 2022. V. 105. № 14. P. 144301. <http://doi.org/10.1103/PhysRevB.105.144301>
15. Lustig E., Segal O., Saha S., et al. Time-refraction optics with single cycle modulation // *Nanophotonics*. 2023. V. 12. № 12. P. 2221–2230. <http://doi.org/10.1515/nanoph-2023-0126>
16. Liu C., Alam M.Z., Pang K., et al. Tunable Doppler shift using a time-varying epsilon-near-zero thin film near 1550 nm // *Opt. Lett.* 2021. V. 46. № 14. P. 3444–3447. <http://doi.org/10.1364/OL.430106>
17. Pang K., Alam M.Z., Zhou Y., et al. Adiabatic frequency conversion using a time-varying epsilon-near-zero metasurface // *Nano Lett.* 2021. V. 21. № 14. P. 5907–5913. <http://doi.org/10.1021/acs.nanolett.1c00550>
18. Jaffray W., Saha S., Shalaev, et al. Transparent conducting oxides: From all-dielectric plasmonics to a new paradigm in integrated photonics // *Advances in Optics and Photonics*. 2022. V. 14. № 2. P. 148–208. <http://doi.org/10.1364/AOP.448391>
19. Alam M.Z., De Leon I., Boyd R.W. Large optical nonlinearity of indium tin oxide in its epsilon-near-zero region // *Science*. 2016. V. 352. № 6287. P. 795–797. <http://doi.org/10.1126/science.aae0330>
20. Arkhipov R.M., Arkhipov M.V., Babushkin I., et al. Ultrafast creation and control of population density gratings via ultraslow polarization waves // *Opt. Lett.* 2016. V. 41. № 21. P. 4983–4986. <http://doi.org/10.1364/OL.41.004983>
21. Arkhipov R.M., Pakhomov A.V., Arkhipov M.V., et al. Population density gratings induced by few-cycle optical pulses in a resonant medium // *Sci. Rep.* 2017. V. 7. № 1. P. 12467. <http://doi.org/10.1038/s41598-017-12267-w>
22. Zhang S., Li S., Bai Y., et al. Analysis of laser-induced transient population gratings by different types of exciting pulse // *J. Nanophotonics*. 2023. V. 17. № 1. P. 016013. <http://doi.org/10.1117/1.JNP.17.01601>
23. Shaltout A.M., Shalaev V.M., Brongersma M.L. Spatiotemporal light control with active metasurfaces // *Science*. 2019. V. 364. № 6441. P. eaat3100. <http://doi.org/10.1126/science.aat3100>
24. Mendonça J.T., Shukla P.K. Time refraction and time reflection: Two basic concepts // *Physica Scripta*. 2002. V. 65. № 2. P. 160. <http://doi.org/10.1238/Physica.Regular.065a00160>
25. Pacheco-Peña V., Engheta N. Antireflection temporal coatings // *Optica*. 2020. V. 7. № 4. P. 323–331. <http://doi.org/10.1364/OPTICA.381175>
26. Mendonça J.T., Martins A.M., Guerreiro A. Temporal beam splitter and temporal interference // *Phys. Rev. A*. 2003. V. 68. № 4. P. 043801. <http://doi.org/10.1103/PhysRevA.68.043801>
27. Cirone M., Rzaz-Dotewski K., Mostowski J. Photon generation by time-dependent dielectric: A soluble model // *Phys. Rev. A*. 1997. V. 55. № 1. P. 62. <http://doi.org/10.1103/PhysRevA.55.62>
28. Harfoush F., Taflove A. Scattering of electromagnetic waves by a material half-space with a time-varying conductivity // *IEEE Trans. Antennas and Propagation*. 1991. V. 39. № 7. P. 898–906. <http://doi: 10.1109/8.86907>
29. Zurita-Sánchez J.R., Abundis-Patiño J.H., Halevi P. Pulse propagation through a slab with time-periodic dielectric function $\epsilon(t)$ // *Opt. Exp.* 2012. V. 20. № 5. P. 5586–5600. <http://doi.org/10.1364/OE.20.005586>
30. Morgenthaler F.R. Velocity modulation of electromagnetic waves // *IRE Trans. Microwave Theory and Techniques*. 1958. V. 6. № 2. P. 167–172. <http://doi: 10.1109/TMTT.1958.1124533>
31. Felsen L., Whitman G. Wave propagation in time-varying media // *IEEE Trans. Antennas and Propagation*. 1970. V. 18. № 2. P. 242–253. <http://doi: 10.1109/TAP.1970.1139657>
32. Klopfenstein R.W. A transmission line taper of improved design // *Proc. IRE*. 1956. V. 44. № 1. P. 31–35. <http://doi: 10.1109/JRPROC.1956.274847>
33. Hayran Z., Khurgin J.B., Monticone F. $\hbar\omega$ versus $\hbar k$: Dispersion and energy constraints on time-varying photonic materials and time crystals // *Opt. Mater. Exp.* 2022. V. 12. № 10. P. 3904–3917. <http://doi.org/10.1364/OME.471672>
34. Переломов А.М., Попов В.С., Терентьев М.В. Ионизация атомов в переменном электрическом поле // *ЖЭТФ*. 1966. Т. 50. № 5. С. 1393–1409.
Perelomov A.M., Popov V.S., Terent'ev M.V. Ionization of atoms in an alternating electric field // *Sov. Phys. JETP*. 1966. V. 23. № 5. P. 924–934.
35. Желтиков А.М. Теория фотоионизации Келдыша: сквозь барьеры // *УФН*. 2017. Т. 60. № 11. P. 1087. С. 1087–1120. <http://dx.doi.org/10.3367/UFNr.2017.08.038198>
Zheltikov A.M. Keldysh photoionization theory: Through the barriers // *Physics-Uspekhi*. 2017. V. 60. № 11. P. 1087. <https://doi.org/10.3367/ufne.2017.08.038198>
36. Bogatskaya A., Gulina Y., Smirnov N., et al. An experimental study of multiphoton ionization in fused silica

- at IR and visible wavelengths // Photonics. — MDPI. 2023. V. 10. № 5. P. 515. <http://doi.org/10.3390/photonics10050515>
37. Savitsky I.V., Voronin A.A., Stepanov E.A., et al. Sub-cycle pulse revealed with carrier-envelope phase control of soliton self-compression in anti-resonant hollow-core fiber // Opt. Lett. 2023. V. 48. № 17. P. 4468–4471. <http://doi.org/10.1364/OL.499008>
38. Travers J.C. Optical solitons in hollow-core fibres // Opt. Commun. 2023. P. 130191. <http://doi.org/10.1016/j.optcom.2023.130191>
39. Fedotov A.B., Serebryannikov E.E., Zheltikov A.M. Ionization-induced blueshift of high-peak-power guided-wave ultrashort laser pulses in hollow-core photonic-crystal fibers // Phys. Rev. A. 2007. V. 76. № 5. P. 053811. <http://doi.org/10.1103/PhysRevA.76.053811>

АВТОРЫ

Валерия Максимовна Левковская — студент, лаборант, Институт физики Казанского федерального университета, Казань, 420008, Россия; <https://orcid.org/0000-0002-6316-5393>; levkovskaya.valeriya@gmail.com

Антон Викторович Харитонов — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, ассистент, Институт физики Казанского федерального университета, Казань, 420008, Россия; Scopus ID: 56720165500; <https://orcid.org/0000-0002-0709-421X>; antonharitonov91@gmail.com

Сергей Сергеевич Харинцев — доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой, Институт физики Казанского федерального университета, Казань, 420008, Россия; Scopus ID: 6603562847; <http://orcid.org/0000-0002-5367-1356>; skharint@gmail.com

Статья поступила в редакцию 15.11.2023
Одобрена после рецензирования 22.01.2024
Принята к печати 27.03.2024

AUTHORS

Valeriya M. Levkovskaya — Student, Laboratory Assistant, Institute of Physics of the Kazan Federal University, Kazan, 420008, Russia; <https://orcid.org/0000-0002-6316-5393>; levkovskaya.valeriya@gmail.com

Anton V. Kharitonov — PhD (Physics and Mathematics), Senior Researcher, Institute of Physics of the Kazan Federal University, Kazan, 420008, Russia; Scopus ID: 56720165500; <https://orcid.org/0000-0002-0709-421X>; antonharitonov91@gmail.com

Sergey S. Kharintsev — Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Full Professor, Head of the Department, Institute of Physics of the Kazan Federal University, Kazan, 420008, Russia; Scopus ID: 6603562847; <http://orcid.org/0000-0002-5367-1356>; skharint@gmail.com

The article was submitted to the editorial office 15.11.2023
Approved after review 22.01.2024
Accepted for publication 27.03.2024