



УДК 538.9

КОМПРЕССИЯ ПРЕДЕЛЬНО-КОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ СВЕТА И ГЕНЕРАЦИЯ ОДНОПОЛЯРНЫХ ИМПУЛЬСОВ ЗА СЧЕТ КОГЕРЕНТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С РЕЗОНАНСНОЙ НЕЛИНЕЙНОЙ СРЕДОЙ

Р.М. Архипов^{a,b}, М.В. Архипов^b, И.В. Бабушкин^c, Н.Н. Розанов^{b,d}^a Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 198504, Российская Федерация^b Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация^c Университет г. Ганновер, Ганновер, 30167, Германия^d АО «Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова», Санкт-Петербург, 199053, Российская Федерация

Адрес для переписки: m.arkhipov@spbu.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 10.09.16, принята к печати 20.10.16

doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-6-996-1003

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Архипов Р.М., Архипов М.В., Бабушкин И.В., Розанов Н.Н. Компрессия предельно-коротких импульсов света и генерация однополярных импульсов за счет когерентного взаимодействия с резонансной нелинейной средой // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16. № 6. С. 996–1003. doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-6-996-1003

Аннотация

В работе теоретически рассматривается возможность компрессии предельно-коротких биполярных импульсов и их трансформация в однополярные импульсы при когерентном взаимодействии с резонансно-поглощающей средой. Показано, что компрессия длительности одноциклового импульса возникает в случае, когда каждая полуволна начинает вести себя как самостоятельный однополярный солитон. При определенных условиях эти солитоны начинают притягиваться друг к другу, что приводит к появлению одноциклового импульса меньшей длительности. В проведенных расчетах получено сокращение длительности от 3 до 5 раз. Практическое отсутствие потерь света в таком случае позволяет создать пассивную многокаскадную систему из трех резонансных поглотителей, которая даст 125-кратное сокращение длительности импульса. Генерация однополярных импульсов происходит при встречном распространении двух мощных предельно коротких биполярных импульсов в плотной резонансной среде. В этом случае, как показывают численные расчеты, при взаимном воздействии движущихся навстречу солитонов часть их разрушается, а часть – нет. Из среды выходит мощный короткий однополярный импульс и малоинтенсивный биполярный оптический звон.

Ключевые слова

предельно-короткий импульс, самоиндуцированная прозрачность, однополярные импульсы, компрессия импульсов, столкновение солитонов, когерентное взаимодействие, резонансно-поглощающая среда

Благодарности

Работа выполнена при государственной финансовой поддержке ведущих университетов Российской Федерации (субсидия 074-U01) и гранта РФФИ 16-02-00762, а также фонда DFG (Deutsche Forschungsgemeinschaft), грант BA 4156/4-1, и фонда Nieders. Vorab, грант ZN3061.

COMPRESSION OF FEW-CYCLE OPTICAL PULSES AND UNIPOLAR PULSE GENERATION DUE TO COHERENT INTERACTION WITH NONLINEAR RESONANT MEDIUM

R.M. Arkhipov^{a,b}, M.V. Arkhipov^a, I.V. Babushkin^c, N.N. Rosanov^{b,d}^a Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, 198504, Russian Federation^b ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation^c Leibniz University Hannover, Hannover, 30167, Germany^d Vavilov State University, Saint Petersburg, 199053, Russian Federation

Corresponding author: m.arkhipov@spbu.ru

Article info

Received 10.09.16, accepted 20.10.16

doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-6-996-1003

Article in Russian

For citation: Arkhipov R.M., Arkhipov M.V., Babushkin I.V., Rosanov N.N. Compression of few-cycle optical pulses and unipolar pulse generation due to coherent interaction with nonlinear resonant medium. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies,*

Abstract

We study theoretically the possibility of few-cycle short bipolar optical pulse compression and their transformation to unipolar pulses due to coherent interaction with resonance absorbing medium. It is shown that single-cycle pulse compression occurs when each half-wave starts to behave as an independent unipolar soliton. These solitons are attracted to each other under certain conditions, that leads to the emergence of single-cycle pulse of shorter duration. Numerical simulations revealed 3-5 times reduction of the pulse duration. The substantial absence of light loss in this scheme gives the possibility to create a multistage passive system of three resonance absorbers and results in a 125-time reduction of the pulse duration. Generation of unipolar pulses occurs when two powerful extremely short bipolar pulses propagate and collide in a dense resonant medium. In this case, as shown by numerical calculations, the mutual influence of oncoming solitons leads to the fact that some part of them is destroyed and another part is not. A high power unipolar soliton and low intensity bipolar optical ringing are observed in the medium output.

Keywords

single-cycle pulse, self-induced transparency, unipolar pulses, pulse compression, soliton collision, coherent interaction, resonant absorbing medium

Acknowledgements

The study was carried out under financial support of the Russian Federation Government (074-U01), Russian Foundation for Basic Research (16-02-00762), German Research Foundation (DFG) (project BA 4156/4-1), and Nieders. Vorab (project ZN3061).

Введение

Новые возможности генерации предельно-коротких оптических импульсов (ПКИ) фемто- и аттосекундной длительности в настоящее время являются объектом активных исследований. Импульсы с длительностью порядка периода колебаний световой волны, безусловно, найдут многочисленные применения в фундаментальных и прикладных исследованиях [1–4]. Эффективная генерация ПКИ позволила бы применять их для сверхбыстрого управления процессами в веществе, создавать новые типы ускорителей электронов и ионов. Для генерации ПКИ на сегодняшний день обычно используется метод, основанный на суммировании и генерации гармоник лазерного поля высокого порядка, которые возникают при взаимодействии с газовой средой и с границей твердотельной плазмы [4]. Однако такой метод ограничивает невысокая эффективность преобразования лазерного излучения в гармоники высоких порядков. По этой причине поиск новых возможностей генерации ПКИ является актуальным. Иные методы генерации ПКИ рассматривались теоретически различными авторами (см. обзор [5] и [6–14]). В работах [9, 10] была рассмотрена возможность генерации ПКИ непосредственно в лазере при условии когерентного взаимодействия света с веществом, в режиме так называемой когерентной синхронизации мод. Когерентное взаимодействие света с веществом возникает, когда длительность импульса света τ_p меньше времени релаксации поляризации среды T_2 , $\tau_p < T_2$ [15]. Наличие «фазовой памяти» T_2 меняет картину распространения света в резонансной среде. Например, возможна ситуация, когда импульс распространяется в резонансной среде практически без потерь, как 2π -импульс самоиндуцированной прозрачности (СИП) [16]. В работах [11–14] показана возможность компрессии исходного длинного фемтосекундного импульса при распространении в волноводе, содержащем смесь усиливающих и поглощающих частиц. При этом для поглощающих частиц данный импульс распространяется в режиме СИП, а для усиливающих частиц распространение происходит в режиме π -импульса. В рамках концепции диссипативных солитонов исследование трансформации многоциклового фемтосекундного импульса в однополярный импульс дано в монографии [14].

Генерация однополярных импульсов также изучалась теоретически различными авторами [6, 8, 17–20]. В работах [6, 12, 18] показана возможность получения однополярных импульсов при распространении исходно многоциклового биполярного импульса в двухуровневой резонансной среде и в комбинационно-активной среде (КАС) [17]. В [19, 20] был предложен метод генерации однополярных импульсов при «сверхсветовом» возбуждении КАС последовательностью ПКИ. В терагерцовом диапазоне однополярные импульсы были получены экспериментально [21], и они применялись для изучения свойств так называемых «ридберговских» (высоковозбужденных) атомов [22].

В настоящей работе авторы продолжают теоретически изучать возможность использования когерентных эффектов в резонансных средах для получения ПКИ и однополярных (однополярных) импульсов в рамках двухуровневой модели резонансной среды и уравнений Максвелла для распространения поля.

Биполярные и однополярные ПКИ

Рассматривая импульсы излучения с шириной спектра, сравнимой с его центральной частотой, следует сразу сказать, что здесь возможны две ситуации. Импульсы света могут быть биполярными и однополярными. Биполярные импульсы – это привычный классический свет. Короткие лазерные импульсы являются биполярными. Напряженность поля в биполярном импульсе является знакопеременной функцией времени, среднее значение которой в обычных условиях равно нулю.

Однополярные оптические импульсы неизбежно содержат существенную постоянную составляющую электрического поля. Существует мнение, что однополярные импульсы не физичны и их невозможно реализовать практически. Однако это не так. Прежде всего, волновое уравнение допускает однополярное решение, хотя практически получить однополярный световой импульс в оптическом диапазоне не просто. Напомним качественную картину квантового перехода с излучением фотона электроном между двумя стационарными состояниями в атоме в рамках полуклассической теории света и вещества [23]. Первоначально электрон находится на верхнем энергетическом уровне. В этом случае у атома нет переменного электрического дипольного момента. Если происходит переход с излучением света, в течение некоторого времени электрон в атоме находится в суперпозиционном состоянии. Волновая функция электрона может быть представлена в виде суммы волновых функций возбужденного и основного состояний, умноженных на зависящие от времени коэффициенты – амплитуды состояний. В эти моменты времени атом обладает знакопеременным дипольным моментом, который осциллирует на частоте перехода. Его амплитуда нарастает от нуля до максимального значения, когда коэффициенты при волновых функциях верхнего и нижнего уровня равны, а затем падает до нуля к моменту перехода в нижнее энергетическое состояние. Поскольку осциллирующий дипольный момент атома является источником поля, а за время перехода, например, при спонтанном излучении и стимулированном излучении в лазерах, значение дипольного момента многократно меняет знак, то и электрическое поле в световой волне также многократно сменит свой знак. Исходя из этого, практически всегда имеет место биполярное поведение напряженности электрического поля. Однако если предположить, что переход между возбужденным и основным состоянием происходит чрезвычайно быстро, т.е. за время, меньшее чем период колебаний светового поля, испускаемого атомом, то дипольный момент не успевает изменить свой знак, и в этом случае возникнет однополярный световой импульс, содержащий постоянную составляющую.

В рамках двухуровневой модели резонансной поглощающей среды действительно существуют решения в виде однополярных солитонов [6, 8, 11–14, 18]. Такие решения в виде однополярных солитонов и их взаимодействие позволяют при определенных условиях добиться сокращения длительности – компрессии одноцикловых импульсов и генерации коротких однополярных импульсов в ситуациях, теоретически рассматриваемых в следующих разделах публикации.

Теоретическая модель

Теоретический анализ основан на системе уравнений Максвелла–Блоха, описывающей взаимодействия излучения с двухуровневой резонансной средой. Среда описывается с помощью системы уравнений для недиагонального элемента матрицы плотности ρ_{12} и n – разности относительной населенности уровней или для диагональных элементов матрицы плотности двухуровневой среды. Эволюция электрического поля E определяется волновым уравнением. Система уравнений имеет следующий вид:

$$\frac{d\rho_{12}(z,t)}{dt} = -\frac{\rho_{12}(z,t)}{T_2} + i\omega_0\rho_{12}(z,t) - \frac{i}{\hbar}d_{12}E(z,t)n(z,t), \quad (1)$$

$$\frac{dn(z,t)}{dt} = -\frac{n(z,t) - n_0}{T_1} + \frac{4}{\hbar}d_{12}E(z,t)\text{Im}\rho_{12}(z,t), \quad (2)$$

$$\frac{\partial^2 E(z,t)}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E(z,t)}{\partial t^2} = \frac{4\pi}{c^2} \frac{\partial^2 P(z,t)}{\partial t^2}. \quad (3)$$

Здесь z – пространственная координата, t – время, c – скорость света, ω_0 – частота резонансного перехода среды, d_{12} – дипольный момент перехода, n_0 – равновесная разность диагональных элементов при отсутствии электрического поля ($n_0 = 1$ для поглощающей среды), T_1 – время релаксации разности заселенностей, T_2 – время релаксации поляризации, $P(z,t) = 2d_{12}N_0\text{Re}\rho_{12}(z,t)$ – поляризация среды, N_0 – концентрация двухуровневых атомов.

Система уравнений (1)–(3) написана без использования приближений медленно меняющихся амплитуд и вращающейся волны. В связи с этим она наиболее полно описывает когерентное взаимодействие ПКИ света с резонансно-поглощающим веществом. В данной работе уравнения для матрицы плотности решались численно с использованием метода Рунге–Кутты, а волновое уравнение – методом конечных разностей. Одноцикловый импульс моделировался выражением $E(t) = E_0 e^{-\frac{t^2}{\tau_p^2}} \sin \omega_0 t$, где E_0 – амплитуда импульса, τ_p – длительность импульса, а ω_0 – центральная частота.

Компрессия биполярного одноциклового ПКИ

Приведем пример, показывающий, как возникает сокращение длительности одноциклового импульса, и дадим физическое объяснение полученному результату. На рис. 1 дан результат численного рас-

чета прохождения одноциклового биполярного импульса сквозь оптически плотный слой резонансных двухуровневых частиц. За счет высокой напряженности поля в световой волне из каждой половины цикла происходит формирование однополярных солитонов СИП. При этом длительность каждой половинки цикла в среде при формировании солитонов уменьшается. Расчет показывает, что два солитона не распространяются независимо друг от друга, а начинают притягиваться друг к другу. В результате их сближения перед выходом из поглощающей среды формируется биполярный одноцикловый импульс. Форма импульса на входе в среду, сжатого в три раза импульса на выходе из среды и соответствующие им спектры даны на рис. 2. При увеличении напряженности поля можно получить пятикратное сокращение длительности импульса.

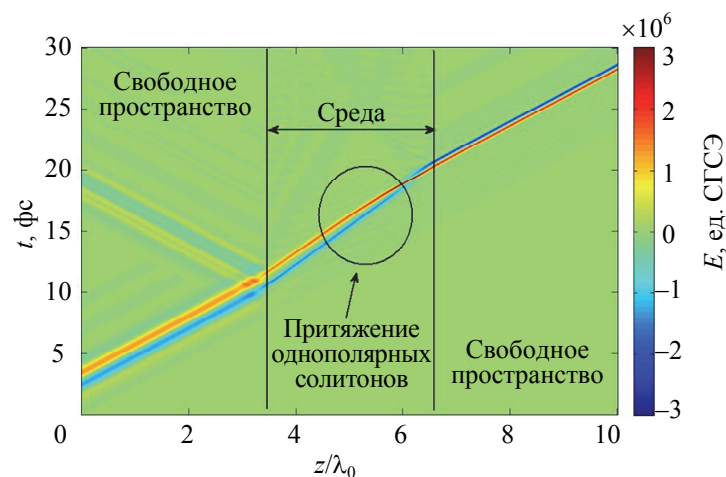


Рис. 1. Эволюция одноциклового импульса в плотной резонансной среде. Слева и справа от Среды длиной $L = 3,2\lambda_0$ (λ_0 – длина волны резонансного перехода) – области свободного пространства.

На рисунке показана зона, где происходит притяжение однополярных солитонов. В расчете использованы следующие параметры: $\omega_0 = 2,69 \cdot 10^{15}$ рад/с, $d_{12} = 5 \cdot 10^{-18}$ ед. СГСЭ, $N_0 = 3 \cdot 10^{21}$ см⁻³, $T_1 = 1$ пс, $T_2 = 10$ фс, $\tau_p = 0,5T_0 = 1,16$ фс, $T_0 = 2\pi / \omega_0$

Результаты расчетов имеют следующее физическое объяснение. Однополярные импульсы являются источником излучения на третьей, пятой и других нечетных гармониках частоты перехода в двухуровневой системе [6]. Излучение происходит как в направлении вперед, так и назад. А так как однополярные импульсы в виде солитонов распространяются медленнее скорости света, то это излучение либо увеличивает поле соседнего солитона, за счет чего увеличивается его скорость, либо ослабляет поле, и тогда скорость солитона замедляется. Исходя из этого, солитоны могут как притягиваться, так и отталкиваться. Если знак напряженности электрического поля в двигающихся друг за другом солитонах различен, такие солитоны притягиваются. Если знак одинаков, то солитоны будут отталкиваться друг от друга. Соответствующие численные расчеты в рамках использованной модели показывают существование отталкивания и притяжения однополярных солитонов СИП. Наконец, сама величина компрессии – трехкратная или пятикратная – зависит от того, насколько «сожмется» половинка цикла биполярного импульса. А величина сокращения зависит в первую очередь от напряженности поля в падающей на среду волне.

Как отмечалось, существует большой интерес к системам, способным значительно сокращать длительности световых импульсов. Для этих целей может быть использован каскад из нескольких резонансных сред, имеющих различные частоты переходов, который позволяет построить эффективную схему компрессора. Важно, что подобное устройство (рис. 3) по своему принципу является полностью пассивным, компактным из-за крайне малой, размером в несколько длин волн, протяженности поглотителей, и поэтому оно должно быть достаточно простым.

Например, в случае трех каскадов оно включает в себя три резонансные среды с частотами переходов, относящихся друг к другу как $\omega_1 : \omega_2 : \omega_3 = 1 : 3 : 9$, что даст 27-кратное сжатие, или $\omega_1 : \omega_2 : \omega_3 = 1 : 5 : 25$, что приведет к 125-кратному сокращению длительности импульса. Между каскадами необходима система фокусировки, частично компенсирующая потери и дающая необходимую напряженность электрического поля для компрессии в каскаде. Если исходный одноциклового импульс ИК-диапазона (длина волны 1,5 мкм) имеет длительность 5 фс, то на выходе такой системы при 27-кратном сокращении получится импульс длительностью 180 аттосекунд. В случае его 125-кратного сокращения длительность составит уже 40 аттосекунд. Это позволит перейти из фемтосекундного в аттосекундный диапазон длительностей одноциклового биполярных импульсов. Система, действующая по та-

кому принципу, может быть весьма эффективной, так как при когерентном взаимодействии практически нет потерь при обмене энергией между полем и средой.

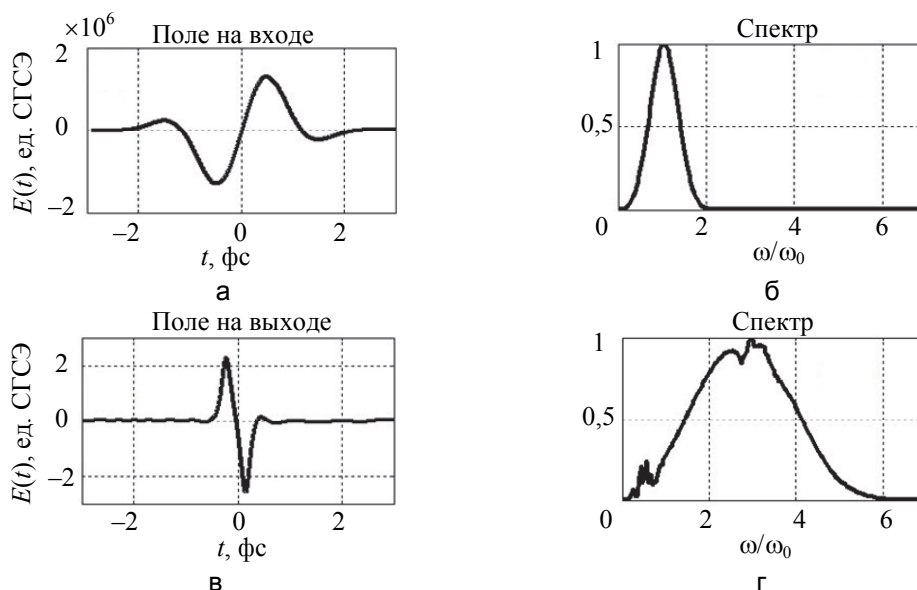


Рис. 2. Пример компрессии одноциклового импульса. Импульс на входе в среду (а) и его спектр (б). Импульс после прохождения среды (в) и его спектр (г). Параметры те же, что и на рис. 1

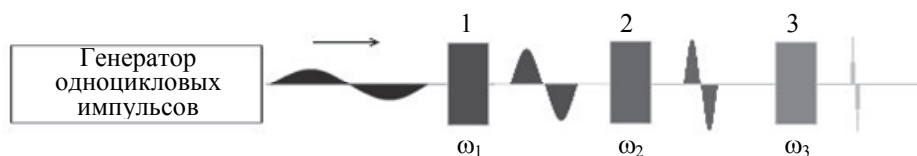


Рис. 3. Схема трехкаскадного компрессора одноцикловых импульсов для получения импульсов аттосекундной длительности. 1, 2 и 3 – тонкие пленки из оптически плотных резонансных сред

Генерация однополярных импульсов света при столкновении одноцикловых импульсов в оптически плотной двухуровневой среде

Получение однополярных импульсов из одноцикловых базируется на простой идее, которую можно реализовать, например, в следующем физическом сценарии. Имея в своем распоряжении оптически плотную резонансную среду и одноцикловый импульс, который в среде превращается в два однополярных солитона СИП, можно попробовать «уничтожить» один из однополярных солитонов и попытаться сохранить второй. Очевидно, что в настоящее время нет технических возможностей методами оптических затворов и переключателей из-за их низкого быстродействия отсечь один из солитонов при крайне малом временном интервале между ними. Но можно попробовать разрушить один из солитонов, направив ему навстречу короткий биполярный импульс, не столь интенсивный, как первый. Встречный импульс должен приготовить среду таким образом, чтобы ослабить один из солитонов, а второй усилить.

Были проведены численные расчеты, которые показали, что такая ситуация действительно возникает. При тех же параметрах, что и на рис. 1 и 2, навстречу импульсу в среду посылался второй одноцикловый импульс с той же длительностью, но на 20% меньшей амплитудой. Второй импульс входил в среду с задержкой и «поджидал» сформировавшиеся из первого импульса однополярные солитоны на выходе из среды. Немаловажно то, что в сталкивающихся импульсах первые циклы имели противоположные знаки поля.

Пример возникновения однополярного импульса в результате столкновения показан на рис. 4. В отсутствии встречного импульса (рис. 4, а) на выходе среды наблюдается одноцикловый импульс с одинаковыми амплитудами разной полярности. При столкновении со встречным импульсом (рис. 4, б) отрицательная составляющая на выходе из среды уменьшается, а положительная сокращается и увеличивает амплитуду. Возникает однополярный импульс. В целом же биполярность поля не нарушается. Отрицательная составляющая с задержкой и малой амплитудой излучается в виде «звона» среды. Также авторы хотят отметить, что в результате численных расчетов при соответствующих параметрах удавалось получать компрессию длительности сталкивающихся импульсов.

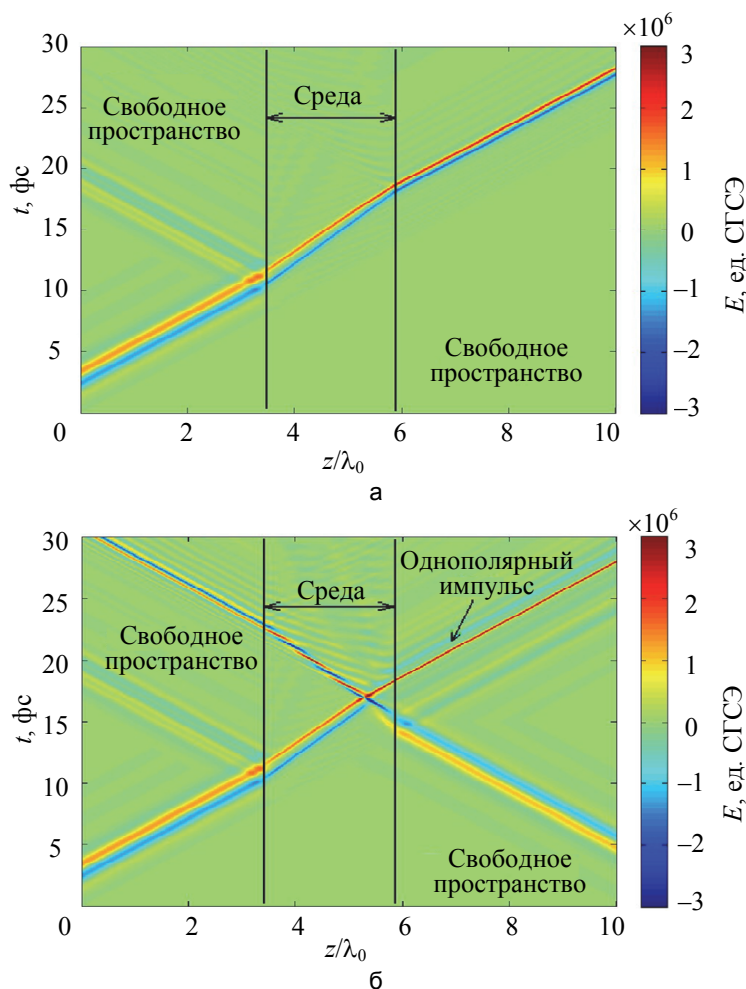


Рис. 4. Эволюция одноциклового импульса в отсутствие встречного импульса (а) и при его наличии (б).

Заключение

Для резонансно-поглощающей оптически плотной среды в рамках двухуровневой модели квантовой системы показана возможность компрессии одноциклового импульса при его распространении в такой среде. Также показана его трансформация в однополярный импульс в случае столкновения с одноцикловым импульсом. Компрессия возникает за счет разбиения одноциклового импульса на два однополярных солитона, которые начинают сокращать свою длительность, а затем притягиваться друг к другу, в результате чего вновь образуется одноцикловый импульс с длительностью в несколько раз меньшей исходной. Однополярный импульс появляется, если навстречу однополярным солитонам, возникшим из одноциклового импульса, движется другой одноцикловый импульс, который разрушает один из двух однополярных солитонов и не действует на второй.

Необходимо отметить, что имеются ограничения, которые накладывает принятая двухуровневая модель среды. В реальных ситуациях при столь быстрых переходах в квантовых системах во взаимодействия будут вовлечены и другие уровни. Однако, как показывают расчеты [13, 14], при учете дополнительного третьего уровня сохраняется возможность формирования предельно коротких однополярных импульсов. Кроме того, по мнению авторов, представленные результаты укладываются в физически понятный сценарий и поэтому имеют эвристическую ценность.

Литература

1. Ramasesha K., Leone S.R., Neumark D.M. Real-time probing of electron dynamics using attosecond time-resolved spectroscopy // *Annual Review of Physical Chemistry*. V. 67. P. 41–63. doi: 10.1146/annurev-physchem-040215-112025
2. Peng L.Y., Jiang W.C., Geng J.W., Xiong W.H., Gong Q. Tracing and controlling electronic dynamics in atoms and molecules by attosecond pulses // *Physics Reports*. 2015. V. 575. P. 1–71. doi: 10.1016/j.physrep.2015.02.002
3. Gallmann L., Cirelli C., Keller U. Attosecond science: recent

References

1. Ramasesha K., Leone S.R., Neumark D.M. Real-time probing of electron dynamics using attosecond time-resolved spectroscopy. *Annual Review of Physical Chemistry*, vol. 67, pp. 41–63. doi: 10.1146/annurev-physchem-040215-112025
2. Peng L.Y., Jiang W.C., Geng J.W., Xiong W.H., Gong Q. Tracing and controlling electronic dynamics in atoms and molecules by attosecond pulses. *Physics Reports*. 2015, vol. 575, pp. 1–71. doi: 10.1016/j.physrep.2015.02.002
3. Gallmann L., Cirelli C., Keller U. Attosecond science: recent

- highlights and future trends // *Annual Review of Physical Chemistry*, 2012. V. 63. P. 447–469. doi: 10.1146/annurev-physchem-032511-143702
4. Стрелков В.В., Платоненко В.Т., Стержантов А.Ф., Рябикин М.Ю. Аттосекундные электромагнитные импульсы: генерация, измерение и применение. Генерация высоких гармоник интенсивного лазерного излучения для получения аттосекундных импульсов // *УФН*. 2016. Т. 186. № 5. С. 449–470. doi: 10.3367/UFN.2015.12.037670
 5. Leblond H., Mihalache D. Models of few optical cycle solitons beyond the slowly varying envelope approximation // *Physics Reports*, 2013. V. 523. N 2. P. 61–126. doi: 10.1016/j.physrep.2012.10.006
 6. Kalosha V. P., Herrmann J. Formation of optical subcycle pulses and full Maxwell-Bloch solitary waves by coherent propagation effects // *Physical Review Letters*, 1999. V. 83. N 3. P. 544–547.
 7. Xie X.-T., Macovei M.A. Single-cycle gap soliton in a subwavelength structure // *Physical Review Letters*, 2010. V. 104. N 7. Art. 073902. doi: 10.1103/PhysRevLett.104.073902
 8. Song X., Yang W., Zeng Z., Li R., Xu Z. Unipolar half-cycle pulse generation in asymmetrical media with a periodic subwavelength structure // *Physical Review A*, 2010. V. 82. N 5. Art. 053821. doi: 10.1103/PhysRevA.82.053821
 9. Kozlov V.V., Rosanov N.N. Wabnitz S. Obtaining single-cycle pulses from a mode-locked laser // *Physical Review A*, 2011. V. 84. Art. 053810. doi: 10.1103/PhysRevA.84.053810
 10. Kozlov V.V., Rosanov N.N. Single-cycle-pulse passively-mode-locked laser with inhomogeneously broadened active medium // *Physical Review A*, 2013. V. 87. N 4. Art. 043836. doi: 10.1103/PhysRevA.87.043836
 11. Высотина Н.В., Розанов Н.Н., Семенов В.Е. Предельно короткие импульсы усиленной самоиндуцированной прозрачности // *Письма в ЖЭТФ*. 2006. Т. 83. № 7. С. 337–340.
 12. Розанов Н.Н., Семенов В.Е., Высотина Н.В. Предельно короткие диссипативные солитоны в активных нелинейных световодах // *Квантовая электроника*. 2008. Т. 38. № 2. С. 137–143.
 13. Высотина Н.В., Розанов Н.Н., Семенов В.Е. Предельно короткие импульсы усиленной самоиндуцированной прозрачности // *Оптика и спектроскопия*. 2009. Т. 106. № 5. С. 793–797.
 14. Розанов Н.Н. Диссипативные оптические солитоны. От микро- к нано и атто-. М.: Физматлит, 2011. 536 с.
 15. Allen L., Eberly J.H. *Optical Resonance and Two-Level Atoms*. NY: Wiley, 1975.
 16. McCall S.L., Hahn E.L. Self-induced transparency // *Physical Review*, 1969. V. 183. N 2. P. 457–485. doi: 10.1103/PhysRev.183.457
 17. Беленов Э.М., Крюков П.Г., Назаркин А.В., Прокопович И.П. Динамика распространения мощных фемтосекундных импульсов в комбинационно-активных средах // *ЖЭТФ*. 1994. Т. 105. №1. С. 28–42.
 18. Kozlov V.V., Rosanov N.N., Angelis C.D., Wabnitz S. Generation of unipolar pulses from nonunipolar optical pulses in a nonlinear medium // *Physical Review A*, 2011. V. 84. N 2. Art. 023818. doi: 10.1103/PhysRevA.84.023818
 19. Архипов Р.М. Особенности излучения комбинационно-активной среды, возбуждаемой со сверхсветовой скоростью // *Оптика и спектроскопия*. 2016. Т. 120. №5. С. 802–806. doi: 10.7868/S0030403416050032
 20. Arkhipov R.M., Arkhipov M.V., Belov P.A., Tolmachev Y.A., Babushkin I. Generation of unipolar optical pulses in a Raman-active medium // *Laser Physics Letters*, 2016. V. 13. N 4. Art. 046001. doi: 10.1088/1612-2011/13/4/046001
 21. Reimann K. Table-top sources of ultrashort THz pulses // *Reports on Progress in Physics*, 2007. V. 70. N 10. P. 1597–1632. doi: 10.1088/0034-4885/70/10/R02
 22. Wetzels A., Gjrtler A., Noordam L.D., Robicheaux F., Dinu C., Muller H.G., Vrakking M.J.J., van der Zande W.J. Rydberg state ionization by half-cycle-pulse excitation: strong kicks create slow electrons // *Physical Review Letters*, 2002. V. 89. N 27. Art. 273003.
 23. Macomber J.D. *The Dynamics of Spectroscopic Transitions*. Wiley, 1976.
 - highlights and future trends. *Annual Review of Physical Chemistry*, 2012, vol. 63, pp. 447–469. doi: 10.1146/annurev-physchem-032511-143702
 4. Strelkov V.V., Platonenko V.T., Sterzhantov A.F., Ryabikin M.Yu. Attosecond electromagnetic pulses: generation, measurement, and application. Generation of high-order harmonics of intense laser field for attosecond pulse production. *Physics-Uspokhi*, 2016, vol. 59, pp. 425–445. doi: 10.3367/UFN.2015.12.037670
 5. Leblond H., Mihalache D. Models of few optical cycle solitons beyond the slowly varying envelope approximation. *Physics Reports*, 2013, vol. 523, no. 2, pp. 61–126. doi: 10.1016/j.physrep.2012.10.006
 6. Kalosha V. P., Herrmann J. Formation of optical subcycle pulses and full Maxwell-Bloch solitary waves by coherent propagation effects. *Physical Review Letters*, 1999, vol. 83, no. 3, pp. 544–547.
 7. Xie X.-T., Macovei M.A. Single-cycle gap soliton in a subwavelength structure. *Physical Review Letters*, 2010, vol. 104, no. 7, art. 073902. doi: 10.1103/PhysRevLett.104.073902
 8. Song X., Yang W., Zeng Z., Li R., Xu Z. Unipolar half-cycle pulse generation in asymmetrical media with a periodic subwavelength structure. *Physical Review A*, 2010, vol. 82, no. 5, art. 053821. doi: 10.1103/PhysRevA.82.053821
 9. Kozlov V.V., Rosanov N.N. Wabnitz S. Obtaining single-cycle pulses from a mode-locked laser. *Physical Review A*, 2011, vol. 84, art. 053810. doi: 10.1103/PhysRevA.84.053810
 10. Kozlov V.V., Rosanov N.N. Single-cycle-pulse passively-mode-locked laser with inhomogeneously broadened active medium. *Physical Review A*, 2013, vol. 87, no. 4, art. 043836. doi: 10.1103/PhysRevA.87.043836
 11. Vysotina N.V., Rozanov N.N., Semenov V.E. Extremely short pulses of amplified self-induced transparency. *JETP Letters*, 2006, vol. 83, no. 7, pp. 279–282. doi: 10.1134/S0021364006070046
 12. Rosanov N.N., Semenov V.E., Vysotina N.V. Few-cycle dissipative solitons in active nonlinear optical fibres. *Quantum Electronics*, 2008, vol. 38, no. 2, pp. 137–143. doi: 10.1070/QE2008v038n02ABEH013568
 13. Vysotina N.V., Rosanov N.N., Semenov V.E. Extremely short dissipative solitons in an active nonlinear medium with quantum dots. *Optics and Spectroscopy*, 2009, vol. 106, no. 5, pp. 713–717.
 14. Rosanov N.N. *Dissipativnye Opticheskie Solitony. Ot Mikro- k Nano- i Atto-* [Dissipative Optical Solitons. From Micro to Nano and Atto]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2011, 536 p.
 15. Allen L., Eberly J.H. *Optical Resonance and Two-Level Atoms*. NY, Wiley, 1975.
 16. McCall S.L., Hahn E.L. Self-induced transparency. *Physical Review*, 1969, vol. 183, no. 2, pp. 457–485. doi: 10.1103/PhysRev.183.457
 17. Belenov E.M., Kryukov P.G., Nazarkin A.V., Prokopovich I.P. Propagation dynamics of high-power femtosecond pulses in Raman-active media. *JETP*, vol. 78, no.1, pp. 15–22.
 18. Kozlov V.V., Rosanov N.N., Angelis C.D., Wabnitz S. Generation of unipolar pulses from nonunipolar optical pulses in a nonlinear medium. *Physical Review A*, 2011, vol. 84, no. 2, art. 023818. doi: 10.1103/PhysRevA.84.023818
 19. Arkhipov R.M. Particular features of the emission of radiation by a superluminally excited Raman-active medium. *Optics and Spectroscopy*, 2016, vol. 120, no. 5, pp. 756–759. doi: 10.1134/S0030400X16050039
 20. Arkhipov R.M., Arkhipov M.V., Belov P.A., Tolmachev Y.A., Babushkin I. Generation of unipolar optical pulses in a Raman-active medium. *Laser Physics Letters*, 2016, vol. 13, no. 4, art. 046001. doi: 10.1088/1612-2011/13/4/046001
 21. Reimann K. Table-top sources of ultrashort THz pulses. *Reports on Progress in Physics*, 2007, vol. 70, no. 10, pp. 1597–1632. doi: 10.1088/0034-4885/70/10/R02
 22. Wetzels A., Gjrtler A., Noordam L.D., Robicheaux F., Dinu C., Muller H.G., Vrakking M.J.J., van der Zande W.J. Rydberg state ionization by half-cycle-pulse excitation: strong kicks create slow electrons. *Physical Review Letters*, 2002, vol. 89, no. 27, art. 273003.
 23. Macomber J.D. *The Dynamics of Spectroscopic Transitions*. Wiley, 1976.

Авторы

Архипов Ростислав Михайлович – Др., ассистент, СПбГУ, Санкт-Петербург, Старый Петергоф, 198504, Российская Федерация; научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация; arkhipovrostislav@gmail.com

Архипов Михаил Викторович – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией, СПбГУ, Санкт-Петербург, Старый Петергоф, 198504, Российская Федерация, m.arkhipov@spbu.ru

Бабушкин Игорь Викторович – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Университет г. Ганновер, Ганновер, 30167, Германия, babushkin@iqo.uni-hannover.de

Розанов Николай Николаевич – доктор физико-математических наук, профессор, профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация; начальник отдела, АО «Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова», Санкт-Петербург, 199053, Российская Федерация, nrosanov@mail.ru

Authors

Rostislav M. Arkhipov – Dr. Rer. Nat. (PhD), assistant, Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, 198504, Russian Federation; scientific researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, arkhipovrostislav@gmail.com

Mikhail V. Arkhipov – PhD, Head of laboratory, Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, 198504, Russian Federation, m.arkhipov@spbu.ru

Ihar V. Babushkin – PhD, Scientific researcher, Leibniz University Hannover, Hannover, 30167, Germany, babushkin@iqo.uni-hannover.de

Nikolai N. Rosanov – D.Sc., Full Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation; Head of department, Vavilov State University, Saint Petersburg, 199053, Russian Federation, nrosanov@mail.ru