

Устройства фотоники с когерентным взаимодействием излучения со средойР. М. Архипов^{1,2,*}, М. В. Архипов^{2,†}, И. Бабушкин^{3,4,‡}, Н. Н. Розанов^{1,5,§}¹Университет ИТМО, кафедра оптики лазеров
Россия, 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр. 49²Санкт-Петербургский государственный университет, физический факультет
Россия, 198504, Санкт-Петербург, Старый Петергоф, ул. Ульяновская, д.3³Institute of Quantum Optics, Leibniz University
Hannover, 30167, Welfengarten 1, Hannover, Germany⁴Max Born Institute, Germany, Berlin, 12489, Max Born Str. 2a⁵Государственный оптический институт имени С.И. Вавилова
Россия, 199053 Санкт-Петербург, Кадетская линия В.О., дом 5, корпус 2

В работе рассматриваются примеры и теоретически анализируются устройства нелинейной фотоники, основанные на когерентном взаимодействии света с веществом. К ним относятся, например, лазеры, генерирующие предельно-короткие световые импульсы в режиме т. н. когерентной синхронизации мод, сверхбыстрый оптический дефлектор лазерного излучения, генератор униполярных импульсов. Такие устройства имеют ряд преимуществ по сравнению со стандартными устройствами, оперирующими в условиях, когда взаимодействие света с веществом некогерентное.

PACS: 42.25.-p, 42.25.Bs, 42.50.Gy, 42.55.-f, 42.65.-k, 42.65.Tg УДК: 535.

Ключевые слова: когерентное взаимодействие света с веществом, предельно-короткие оптические импульсы, униполярные импульсы, синхронизация мод в лазерах, самоиндуцированная прозрачность, нелинейная оптика.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из приоритетных направлений современной фотоники является разработка сверхбыстрых оптических устройств для систем передачи и обработки информации [1, 2]. В докладе рассматриваются принципы для реализации таких устройств на основе когерентного взаимодействия света с веществом. Имеющиеся на сегодняшний день устройства для генерации коротких световых импульсов и управления ими такие, как лазеры и дефлекторы излучения, оперируют в условиях, когда взаимодействие света с веществом не является когерентным, т. е. частота Раби Ω_R не превосходит обратное время релаксации поляризации среды $1/T_2$, $\Omega_R < 1/T_2$ и длительность импульса лазерного излучения $\tau_p > T_2$. Напротив, при когерентном взаимодействии частота Раби превосходит обратное время релаксации поляризации, и длительность импульса оптического излучения существенно меньше времени T_2 , $\tau_p \ll T_2$. Так, наличие «фазовой памяти» T_2 существенно меняет картину распространения импульса в резонансной среде и позволяет реализовать распространение импульса в резонансно-поглощающей среде без потерь в режиме самоиндуцированной прозрачности (СИП) — 2π -импульс [3–5]. Устройства, оперирующие в режиме когерентного взаимодействия света с веществом, будем в дальнейшем называть «устройствами когерентной фотоники» (УКФ). Отличим устройств УКФ от традиционных устройств

является их предельная быстрота, сравнительно малые потери и возможность хранения энергии излучения в среде на временах, сравнимых с T_2 [1, 2]. В данном докладе рассматриваются, а также приводятся результаты теоретического и экспериментального исследования основных примеров УКФ. Обсуждаются лежащие в их основе физические принципы и возможные пути их практической реализации.

1. РЕЖИМ КОГЕРЕНТНОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ МОД В ЛАЗЕРАХ

Лазеры с пассивной синхронизацией мод (ПСМ) активно используются в наши дни для генерации ультракоротких световых импульсов (УКИ) с высокой частотой повторения [6]. Такие лазеры содержат разнесенные в пространстве секцию с усиливающей средой и секцию с насыщающимся поглотителем. В настоящее время механизм генерации УКИ во всех типах двухсекционных лазеров, работающих в режиме ПСМ, основан на эффектах насыщения поглощения в поглотителе и насыщения усиления в усилителе [6]. Поэтому они генерируют импульсы, длительность которых ограничена обратной спектральной шириной профиля усиления и поглощения внутри резонаторных сред $1/T_2$ в условиях, когда взаимодействие импульса излучения с внутрирезонаторными средами некогерентное. Особый интерес представляет возможность реализации ПСМ в условиях, когда взаимодействие импульса с внутрирезонаторными средами является когерентным. Первым примером УКФ, рассматриваемым в данном сообщении, является лазер, оперирующий в режиме так называемой когерентной пассивной синхронизации мод (КСМ) — «self-induced transparency coherent passive mode-locking» [7–15].

*E-mail: arkhipovrostislav@gmail.com†E-mail: arkhipm@mail.wplus.net‡E-mail: babushkin@iqo.uni-hannover.de§E-mail: nnrosanov@mail.ru

В лазерах, оперирующих в режиме КСМ, взаимодействие излучения с усиливающей и поглощающей средой когерентное. В этом случае импульс излучения распространяется в поглотителе без потерь в режиме СИП, как 2π -импульс. В усилителе такой импульс снимает практически полностью всю энергию, запасенную в активной среде (π -импульс). Впервые использовать эффекты когерентного взаимодействия света с веществом для генерации УКИ в лазерах было предложено в работе [7]. В работах [8, 9] было предложено реализовать режим КСМ в квантово-каскадных лазерах. Однако, теоретические исследования, проведенные в этих работах [7–11], базировались на предположении, что смесь из частиц усиливающей и поглощающей среды равномерно распределена в оптическом резонаторе. В такой системе не возможен самостарт генерации и для развития генерации необходима инжекция затравочного импульса от внешнего лазера. В данном докладе мы приводим результаты детального анализа возможности появления режима КСМ в двухсекционных лазерах, учитывая когерентный характер взаимодействия света с веществом в оптическом резонаторе. При этом мы рассматриваем случаи, когда обе среды разнесены в пространстве в кольцевом или линейном резонаторе [12–15]. Показана возможность возникновения самостарта генерации. Проводится качественный анализ режимов КСМ на основе теоремы площадей Мак-Колла и Хана. Данный подход, впервые предложенный нами в работе [15], позволяет предсказать качественно основные особенности режима КСМ, найти предельные циклы в системе и исследовать стабильность режима КСМ. Обсуждаются результаты недавних экспериментов по наблюдению режима синхронизации мод в лазере с когерентным поглотителем [13].

2. ГЕНЕРАЦИЯ ПРЕДЕЛЬНО-КОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ СО СВЕРХВЫСОКОЙ ЧАСТОТОЙ ПОВТОРЕНИЯ

В настоящее время представляет отдельный интерес поиск и реализация новых методов генерации предельно-коротких оптических импульсов (ПКИ), то есть импульсов с длительностью в один период колебаний светового поля (фемто- и аттосекундной длительности) [16]. Такие импульсы, например, позволяют изучать сверхбыстрые процессы в веществе с высоким временным разрешением и следовательно, поиск новых путей генерации ПКИ является актуальным. Имеющиеся на сегодняшний день методы генерации ПКИ требуют дорогостоящего оборудования и сложных экспериментальных установок. Наиболее выгодным являлся бы метод непосредственной генерации ПКИ со сверхвысокой частотой повторения, непосредственно используя компактный двухсекционный лазер, оперирующий в режиме КСМ. Впервые на такую возможность было указано в работах [10, 11] в лазере с кольцевым резонатором. В настоящей работе про-

водится дальнейший анализ генерации ПКИ за счет КСМ в лазерах с линейным резонатором. Теоретический анализ проводится при помощи решения системы уравнений Максвелла-Блоха без использования приближения медленно-меняющихся амплитуд и вращающейся волны.

3. СВЕРХБЫСТРЫЕ ДЕФЛЕКТОРЫ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Другим примером УКФ является сверхбыстрый дефлектор лазерного излучения. Данное устройство позволяет реализовать сверхбыстрое пространственно-угловое сканирование лазерных пучков [17, 18]. Для того, чтобы быстро менять направление распространения лазерных пучков в пространстве, необходимо создавать в среде решетки показателя преломления с быстро изменяющейся пространственной частотой. В традиционном подходе решетки населенностей в среде создаются в результате интерференции квазимонохроматических пучков света, перекрывающихся в пространстве [19]. Однако использование когерентного взаимодействия света с веществом позволяет создавать в среде решетки разности заселенностей при распространении в среде оптических импульсов, **не перекрывающихся в пространстве**, что активно используется в эхо-голографии [20]. В данной работе показана возможность сверхбыстрого наведения, стирания, а также мультиплицирования пространственной частоты решеток разности заселенностей при когерентном распространении ПКИ в резонансной среде **без перекрытия** в пространстве [21].

4. ГЕНЕРАЦИЯ «УНИПОЛЯРНЫХ» ИМПУЛЬСОВ СВЕТА

И наконец, последним примером УКФ, который также будет рассмотрен в данной работе, является генератор униполярных импульсов. Униполярные импульсы (или видеоимпульсы) — это импульсы, содержащие постоянную составляющую электрического поля. Обычные электромагнитные импульсы, как известно, биполярны. На первый взгляд, униполярные являются нефизичными, так как ускорения излучающей связанной системы зарядов не может быть однополярным. Однако генерация униполярных видеоимпульсов была предсказана теоретически различными авторами при распространении исходно биполярного импульса в нелинейной [22, 23] и комбинационно-активной средах (КАС) [24]. Интерес к униполярным импульсам связан с возможностью создания логических элементов в оптике, ускорением заряженных частиц. Ввиду своей «однаправленности», они могут применяться для контроля динамики электронов в веществе [22]. В последнее время интерес к униполярным импульсам

вызван также в связи с возможностью получения аттосекундных импульсов с их помощью [25].

В данном докладе продемонстрирован иной способ получения униполярных импульсов при возбуждении КАС последовательностью из двух или нескольких ПКИ, когда область их воздействия на среду перемещается со сверхсветовой скоростью [26, 27]. Сверхсветовое возбуждение резонансной среды реализуется при

наклонном падении импульса на среду. В этом случае область пересечения импульса со средой перемещается вдоль среды со сверхсветовой скоростью [28, 29].

Работа выполнена при государственной финансовой поддержке ведущих университетов Российской Федерации (субсидия 074-U01) и гранта РФФИ № 16-02-00762.

-
- [1] Zrenner A. et al. Nature. **418**. P. 612 (2002).
 [2] Kolarczik M. et al. Nature communications. **4**. P. 1. (2013).
 [3] McCall S. L., Hahn E. L. Phys. Rev. **183**, P. 457. (1969).
 [4] Крюков П. Г., Летохов В. С. УФН. **99**. С. 169. (1969).
 [5] Аллен Л., Эберли Дж. Оптический резонанс и двухуровневые атомы М.: Мир, 1978.
 [6] Keller U. Appl. Phys. B. **100**. P. 15. (2000).
 [7] Kozlov V. V. Phys. Rev. A. **56**. P. 1607. (1997).
 [8] Talukder M. A., Menyuk C. R. Phys. Rev. Lett. **102**. P. 023903. (2009).
 [9] Talukder M. A., Menyuk C. R. Phys. Rev. A. **79**. P. 063841. (2009).
 [10] Kozlov V. V. et al. Phys. Rev. A. **84**. P. 053810. (2011).
 [11] Kozlov V. V., Rosanov N. N. Phys. Rev. A. **87**. P. 033808. (2013).
 [12] Архипов Р. М. et al. Письма в ЖЭТФ. **101**, № 3. С. 164. (2015).
 [13] Архипов М. В., Архипов Р. М. et al. Письма в ЖЭТФ. **101**, № 4. С. 250. (2015).
 [14] Arkhipov R. M. et al. Opt. Comm. **361**. P. 73. (2016).
 [15] Arkhipov R. M. et al. Opt. Lett. **41**, N 4. P. 737. (2016).
 [16] Gallmann L. et al. Annual review of physical chemistry. **63**. P. 447. (2012).
 [17] Sarantos C. H., Heebner J. E. Opt. Lett. **35**. P. 1389. (2010).
 [18] Arkhipov R. M. et al. Journal of Physics: Conference Series. **643**. P. 1. (2015).
 [19] Eichler H. J., Günter E., Wpohl D. Laser-Induced Dynamic Gratings. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo, 1981.
 [20] Штырков Е. И. Опт. и спектр. **114**, № 1. С. 105. (2013).
 [21] Архипов Р. М., Архипов М. В., Бабушкин И., Розанов Н. Н. Опт. и спектр. **121**, №5. С. 124. (2016).
 [22] Song X. et al. Physical Review A. **82**. N 5. P. 053821. (2010).
 [23] Kozlov V. V., Rosanov N. N. et al. Phys. Rev. A. **84**. P. 023818. (2011).
 [24] Беленов Э. М. et al. ЖЭТФ. **105**, № 1. С. 28. (2002).
 [25] Orlando G. et al. J. Mod. Opt. **56**. P. 1761. (2009).
 [26] Arkhipov R. M. et al. Las. Phys. Lett. **13**, N 4. P. 046001. (2016).
 [27] Архипов Р. М. Опт. и спектр. **120**, № 5. С. 802. (2016).
 [28] Болотовский Б. М., Гинзбург В. Л. УФН. **106**. С. 577. (1972).
 [29] Arkhipov R. M. et al. Phys. Rev. A. **89**. P. 043811. (2014).

Photonic devices based on coherent light–matter interactions

R.M. Arkhipov^{1,a}, M.V. Arkhipov^{2,b}, I. Babushkin^{3,4,c}, N.N. Rosanov^{1,5,d}

¹ITMO University, 197101 St. Petersburg, Russia

²Faculty of Physics, St. Petersburg State University, St. Petersburg 198504, Russia

³Institute of Quantum Optics, Leibniz University Hannover, 30167, Hannover, Germany

⁴Max Born Institute, Germany, 12489, Berlin

⁵Vavilov State Optical Institute, 199053 St. Petersburg, Russia

E-mail: ^aarkhipovrostislav@gmail.com, ^barkhipm@mail.wplus.net, ^cbabushkin@iqo.uni-hannover.de, ^dnnrosanov@mail.ru

In this paper, we consider theoretically some examples of nonlinear photonics devices based on the coherent interaction of light with matter. The examples of these devices are lasers that generate extremely short single-cycle optical pulses based on so-called self-induced transparency coherent passive mode-locking (or coherent mode-locking), ultrafast laser beam deflector, and unipolar pulse generator. Such devices have several advantages compared to standard devices that operate in the regime when the interaction of light with matter is incoherent.

PACS: 42.25.-p, 42.25.Bs, 42.50.Gy, 42.55.-f, 42.65.-k, 42.65.Tg

Keywords: coherent light–matter interactions, extremely short light pulses, unipolar pulses, mode-locking, self-induced transparency, nonlinear optics.

Сведения об авторах

1. Архипов Ростислав Михайлович, PhD, науч. сотрудник; e-mail: arkipovrostislav@gmail.com.
2. Архипов Михаил Викторович — канд. физ.-мат. наук, зав. лабораторией оптических исследований; e-mail: arkipm@mail.wplus.net.
3. Бабушкин Игорь Викторович — канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник; e-mail: babushkin@iqo.uni-hannover.de.
4. Розанов Николай Николаевич — доктор физ.-мат. наук, профессор, член-корреспондент РАН, зав. кафедрой оптики лазеров; e-mail: nnrosanov@mail.ru.