

Импульсный волоконный иттербиевый лазер с комбинированным модулятором на основе одностенных углеродных нанотрубок

Д.В.Худяков, А.А.Бородкин, А.С.Лобач, С.К.Вартапетов

Исследован импульсный иттербиевый волоконный лазер с кольцевым резонатором, в котором синхронизация мод происходит с помощью нелинейного комбинированного модулятора на основе одностенных углеродных нанотрубок. На выходе лазера, все образующие элементы которого имеют нормальную дисперсию, получены импульсы длительностью 1.7 пс на длине волны 1.04 мкм с частотой следования 35.6 МГц; импульсы сжались на выходе до 180 фс. Рассмотрен внутрирезонаторный нелинейный модулятор, использующий эффект нелинейного вращения эллипса поляризации совместно с действием насыщающегося поглотителя; в качестве последнего применялась пленка из полимерного композитного материала с одностенными углеродными нанотрубками.

Ключевые слова: волоконный лазер, ультракороткие импульсы, иттербий, насыщающийся поглотитель, одностенные углеродные нанотрубки.

1. Введение

В настоящее время волоконные лазеры ультракоротких импульсов (УКИ) широко используются во многих областях науки и технологии, где требуются компактные и надежные источники излучения, достаточно дешевые и не требующие регулярного обслуживания. Концепции волоконных лазерных систем УКИ за последние несколько десятилетий претерпели значительные изменения – от солитонных лазеров с дисперсионно-управляемой схемой резонатора и энергией в импульсе в несколько десятков пикоджоулей до схем резонатора с полностью нормальной дисперсией образующих элементов, позволяющих при относительно простом исполнении получать импульсы с энергией до нескольких десятков наноджоулей [1]. В ультрадлинных волоконных резонаторах с синхронизованными модами получена генерация импульсов с энергией в несколько микроджоулей [2]. Для реализации и стабилизации импульсного режима во всех этих схемах используют внутрирезонаторный нелинейный модулятор интенсивности излучения. Таким модулятором может быть насыщающийся поглотитель, работающий на эффекте фотоиндуцированных переходов в органических соединениях или в полупроводниковых гетероструктурах (SESAM) [3]. Такой модулятор может также использовать эффект нелинейного вращения эллипса поляризации (НВП) при распространении излучения в нелинейной среде в комбинации с поляризатором [4–6]. Поскольку нелинейное вращение поляризации импульса происходит в оптическом во-

локне значительной длины, модулятор на эффекте НВП нестабилен и работа его зависит от внешних условий. В последнее время в качестве материалов оптических нелинейных модуляторов интенсивно изучаются композитные материалы с одностенными углеродными нанотрубками (ОУНТ). Быстрое время релаксации (менее 1 пс) и поглощение в области 1–1.7 мкм позволяют использовать ОУНТ как насыщающий поглотитель для синхронизации мод в импульсных волоконных и твердотельных лазерах [7–15]. Матрицами для ОУНТ могут быть жидкие и твердые среды. Устройства с ОУНТ легко выполнить в виде тонких пленок или полимерных блоков, что делает их более привлекательными для использования, чем нелинейные полупроводниковые зеркала. Насыщающийся пленочный поглотитель из композитного полимерного материала на основе полимера карбоксиметилцеллюлозы с одностенными углеродными нанотрубками (КМЦ-ОУНТ) успешно применялся в импульсных волоконных лазерах на длине волны 1.55 мкм [16]. Основное преимущество полимерных пленок с ОУНТ перед SESAM заключается в относительно простой технологии их изготовления, а также в возможности использования таких пленок в кольцевых схемах лазеров, где требуется насыщающийся поглотитель, работающий в режиме пропускания излучения.

С другой стороны, в отличие от синхронизации мод на эффекте НВП, синхронизация мод в лазере с насыщающимся поглотителем более стабильна и отличается самозапуском. Полимерные композитные материалы с ОУНТ применяют в основном для генерации УКИ в эрбиевых волоконных лазерах. Одной из причин такого использования является попадание длины волны генерации (1.55 мкм) в максимум спектра поглощения ОУНТ. Вторая причина – это наличие стандартных (не фотонно-кристаллических) одномодовых волокон, у которых на этой длине волны дисперсия групповых скоростей аномальная. В волоконном резонаторе с аномальной дисперсией обычно получают режим солитонного распространения импульсов в условиях баланса действия дисперсии и нелинейности в прозрачной среде. Выходная мощность таких солитон-

Д.В.Худяков, А.А.Бородкин, С.К.Вартапетов. Центр физического приборостроения Института общей физики им А.М.Прохорова РАН, Россия, 142190 Москва, Троицк; e-mail: khudyakov@pic.troitsk.ru, borodkin_andrey@mail.ru, svart@pic.troitsk.ru

А.С.Лобач. Институт проблем химической физики РАН, Россия, Московская обл., 142432 Черноголовка, просп. Акад. Семенова, 1; e-mail: lobach@icp.ac.ru

Поступила в редакцию 11 марта 2015 г., после доработки – 21 мая 2015 г.

ных лазеров невысока, и пленочные модуляторы с ОУНТ могут применяться в этих условиях без опасности деградации из-за термического разрушения.

Ситуация меняется, когда мы переходим в область генерации иттербиевых волоконных лазеров, излучающих на длине волны вблизи 1 мкм, и солитонный режим генерации УКИ трудно реализуем в связи с отсутствием стандартных одномодовых волокон с аномальной дисперсией в области $\lambda \sim 1$ мкм. Поэтому для иттербиевых лазеров УКИ предпочтительней схема резонатора с полностью нормальной дисперсией образующих элементов. В этом случае также возможна импульсная генерация в режиме диссипативного солитона при условии компенсации фазовой самомодуляции и дисперсионного уширения импульса спектральным селективным элементом [17–20]. Энергия импульсов на выходе такого генератора обычно высока и может достигать нескольких микроджоулей. В связи с этим при использовании полимерных пленок с ОУНТ в качестве внутрирезонаторных модуляторов встает проблема лучевой стойкости и режимов их долговременной работы.

В настоящей работе предложена схема комбинированного внутрирезонаторного модулятора для синхронизации мод волоконных импульсных лазеров с использованием пленочного насыщающегося поглотителя типа КМЦ-ОУНТ в комбинации с эффектом НВП. Такой вариант комбинированной синхронизации мод, с одной стороны, обеспечивает самозапуск генерации УКИ, а с другой стороны, обеспечивает пиковую интенсивность на пленке КМЦ-ОУНТ ниже порога ее разрушения. Необходимо отметить, что схемы волоконных лазеров УКИ с внутрирезонаторными модуляторами на основе ОУНТ, где синхронизация мод частично поддерживалась эффектом НВП, известны [21–24]. В настоящей работе (мы полагаем, впервые) рассматривается механизм взаимодействия насыщающегося поглотителя и нелинейного вращения поляризации для стабилизации внутрирезонаторной энергии импульса вдали от порога разрушения пленочного насыщающегося поглотителя.

2. Импульсный волоконный лазер

Компонентами полимерного композитного материала для изготовления пленочных модуляторов были карбоксиметилцеллюлоза (натриевая соль карбоксиметилцеллюлозы средней вязкости, Sigma) и ОУНТ (Carbon Nanotechnologies, Inc.) с диаметром нанотрубок 1.05 ± 0.15 нм. Тонкая пленка КМЦ-ОУНТ получалась по методике [16] поливом суспензии ОУНТ в водном растворе полимера КМЦ на гладкую поверхность и последующим испарением воды в условиях термостатирования при 40°C в течение суток.

В экспериментах использовалась пленка толщиной 10 мкм, коэффициент пропускания которой на длине волны 1.04 мкм в режиме слабого сигнала составлял 88%. Схема импульсного волоконного иттербиевого лазера с кольцевым резонатором представлена на рис.1. Для пассивных волоконных сегментов резонатора использовались одномодовые волокна с диаметрами сердцевины и оболочки 6 и 125 мкм. В активном сегменте длиной 2 м использовалось волокно типа «двойка» (GT-wave), состоящее из активного волокна и волокна накачки, совмещенных на всей длине в полимерной оболочке. Диаметры оболочек активного и накачивающего волокон составляли 125 и 100 мкм соответственно, диаметр сердцевины актив-

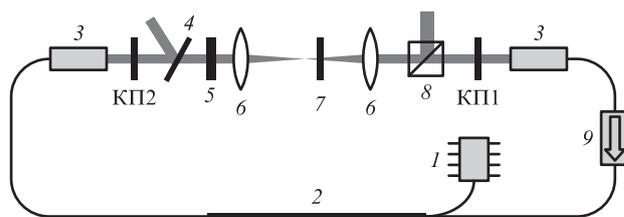


Рис.1. Схема иттербиевого волоконного лазера с кольцевым резонатором:

1 – лазерный диод накачки ($\lambda_p = 976$ нм); 2 – активное иттербиевое волокно; 3 – коллиматор; 4 – стеклянная пластинка; 5 – спектральный фильтр; 6 – линза; 7 – композитная пленка КМЦ-ОУНТ; 8 – поляризатор; 9 – изолятор; КП1 и КП2 – четвертьволновая и полу-волновая фазовые пластинки.

ного волокна был равен 6 мкм. В волокно накачки вводилось излучение многомодового лазерного диода с максимальной средней мощностью 9 Вт на $\lambda_p = 976$ нм. Полной длине волоконной части резонатора 4.6 м соответствовала полная дисперсия групповых скоростей 0.13 пс². Излучение выводилось и вновь вводилось в волокно посредством коллиматоров 3. Состояние поляризации контролировалось при помощи одной четвертьволновой фазовой пластинки в тракте КП1, одной полуволновой фазовой пластинки в тракте КП2 и поляризатора Глана–Томсона. В воздушной части осциллятора находился пленочный спектральный фильтр с полной шириной пропускания на полувысоте 10 нм, позволяющий изменять центральную длину волны генерации в диапазоне 1.03–1.05 мкм.

Полимерная пленка КМЦ-ОУНТ помещалась на линейном трансляторе с возможностью перемещения вдоль оптической оси между двумя линзами ($f = 3.5$ см), формирующими телескопическую систему. При перемещении пленки изменялся диаметр пятна падающего на образец излучения и, соответственно, изменялась интенсивность излучения. Пленка КМЦ-ОУНТ размещалась между двумя стеклянными пластинками толщиной 150 мкм в среде иммерсионного масла с целью воздушной и водной изоляции. Кроме того, такой способ размещения пленки улучшает оптическое качество и однородность образца, что увеличивает лучевую стойкость пленочного модулятора. Однонаправленная генерация в кольцевом резонаторе формировалась при помощи волоконного изолятора. В отсутствие в резонаторе пленки КМЦ-ОУНТ режим импульсной генерации достигался благодаря эффекту НВП при поглощенной мощности накачки 500 мВт. Последовательность импульсов имела небольшую гармоническую модуляцию с частотой 1.4 МГц (рис.2,а), частота следования импульсов составляла 35.6 МГц. В этом режиме отсутствовал самозапуск импульсной генерации при кратковременном прерывании излучения. Генерация УКИ восстанавливалась только после небольшого поворота оптических осей фазовых пластинок либо увеличения мощности накачки.

При помещении пленки КМЦ-ОУНТ внутри резонатора вблизи зоны перетяжки телескопической системы модуляция импульсной последовательности исчезала (рис.2,б) и появлялся самозапуск импульсной генерации. Осциллограмма самозапуска режима импульсной генерации при кратковременном прерывании лазерного пучка в резонаторе показана на рис.3. Видно, что время запуска генерации после открытия резонатора составляет всего ~ 300 мкс и выход на стабильный уровень генерации УКИ происходит сразу после первого интенсивного выброса

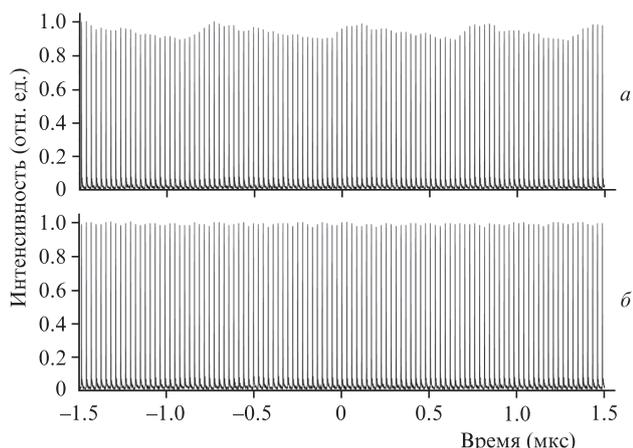


Рис.2. Осциллограммы выходного импульсного излучения волоконного лазера без модулятора (*a*) и с модулятором КМЦ-ОУНТ в резонаторе (*б*).

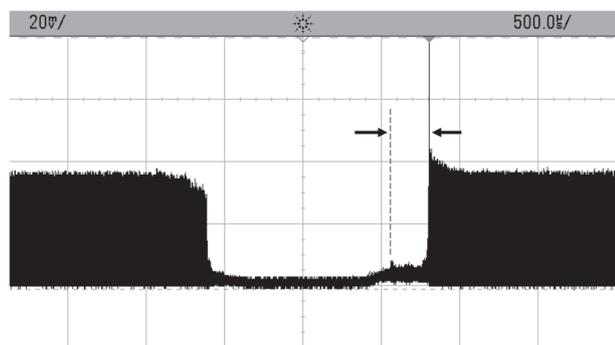


Рис.3. Осциллограмма импульсной генерации на выходе волоконного лазера, демонстрирующая процесс самозапуска импульсной генерации при кратковременном прерывании излучения в резонаторе. Диапазон времени от открытия резонатора до запуска импульсной генерации указан стрелками. Момент открытия резонатора показан прерывистой линией. Заметен резкий интенсивный выброс в конце процесса инициации импульсов.

без длительных переходных колебаний. В этом режиме генерация импульсов наименее зависима от изгибов волокна и изменений температуры окружающей среды. Установленный в резонаторе поляризатор использовался также для вывода излучения, средняя мощность которого составляла 24 мВт, что соответствует энергии в импульсе 0.7 нДж.

Оптические спектры выходного излучения в режиме импульсной генерации при отражении от стеклянной пластинки 4 и на выходе поляризатора (рис.4) измерялись спектрометром Yokogawa AQ6370C. Как видно из рисунка, спектры имеют резкие края, что говорит о работе лазера в режиме нормальной дисперсии. Центральная длина волны и ширина спектра на полувысоте составляли 1043 и 19 нм соответственно. Автокорреляционная функция импульса измерялась на выходе поляризатора методом неколлинеарной генерации второй гармоники в нелинейном кристалле. Полная ширина импульса на полувысоте в предположении гауссовой формы была 1.7 пс. На выходе осциллятора осуществлялось сжатие импульса на двух дифракционных решетках с плотностью штрихов 600 мм^{-1} . Расстояние между решетками для оптимальной компрессии составляло 68 мм, что соответствует аномальной дисперсии -0.11 пс^2 . Длительность сжатого импульса, определенная по автокорреляционной функции, была 183 фс, что соответствует коэффициенту компрессии ~ 9 . Авто-

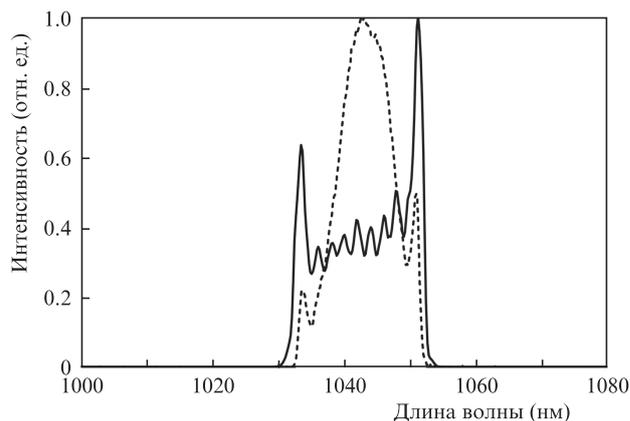


Рис.4. Спектры излучения волоконного лазера в режиме импульсной генерации при отражении излучения от стеклянной пластинки (сплошная линия) и на выходе поляризатора (штриховая линия).

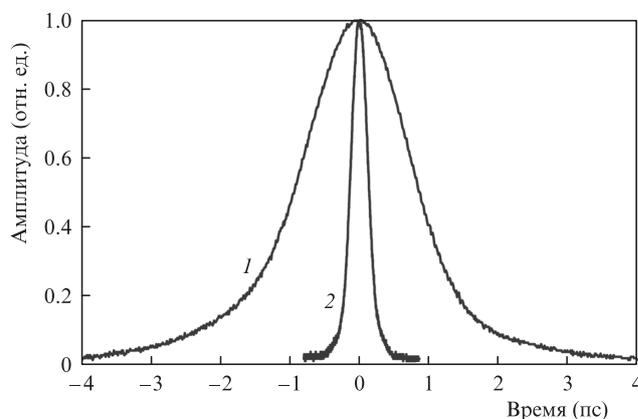


Рис.5. Автокорреляционная функция импульсов волоконного лазера до компрессии (1) и после компрессии (2).

корреляционные функции импульсов до и после компрессии представлены на рис.5. Сжатый импульс практически не имеет пьедестала, что говорит о линейности chirpa и незначительном вкладе высших порядков дисперсии и нелинейной фазовой самомодуляции при прохождении импульса по резонатору волоконного лазера.

Ранее мы изучали оптические нелинейные свойства композитных пленок КМЦ-ОУНТ с помощью метода продольного сканирования [25]. Установлено, что интенсивность насыщения поглощения $I_{sa} = 52 \text{ МВт/см}^2$ и порог оптического пробоя композитной пленки $I_d = 800 \text{ МВт/см}^2$. Как было показано в [26], для стабильной генерации УКИ в лазерах с быстрым насыщающимся поглотителем необходимо, чтобы поглотитель работал при интенсивностях, превышающих интенсивность насыщения примерно в 10 раз, что в нашем случае соответствует интенсивности 520 МВт/см^2 , близкой к порогу разрушения I_d . Следует отметить, что импульсная генерация в первый момент инициируется несколькими колебаниями большой амплитуды, интенсивность которых иногда в несколько раз превышает пиковую интенсивность, характерную для стабильной генерации. По этой причине пленка модулятора разрушается в момент инициации импульсов тогда, когда пиковая интенсивность стабильной генерации ниже порога пробоя в 3–4 раза. При размещении образца в центре перетяжки телескопической системы с диаметром лазерного пятна 26 мкм (пиковая интенсивность на образце 187 МВт/см^2) образец разрушался в момент про-

цесса инициации импульсов. При диаметре пучка 40 мкм (пиковая интенсивность на образце 79 МВт/см²) разрушение образца прекращалось и наблюдалась стабильная генерация импульсов с быстрым самозапуском. С увеличением диаметра пучка время, необходимое для самозапуска, увеличивалось. Самозапуск отсутствовал при диаметре пучка 152 мкм (пиковая интенсивность 5.5 МВт/см²). Таким образом, используя в лазере комбинированный модулятор, мы имеем стабильную генерацию УКИ при пиковых интенсивностях, падающих на пленку поглотителя, более чем на порядок ниже порога оптического пробоя. Обнаруженный эффект связан с влиянием НВП и проявляется в уменьшении коэффициента пропускания при увеличении пиковой интенсивности, что более подробно рассматривается в следующем разделе.

3. Обсуждение результатов

Световой импульс с эллиптической поляризацией при распространении в нелинейном оптическом волокне испытывает нелинейное вращение эллипса поляризации. Следуя формализму матриц Джонса и предполагая изотропную среду, можно записать матричный оператор для эффекта НВП в волокне [27]:

$$\text{NPR}^C = \begin{pmatrix} e^{i\Phi_{\pm}} & 0 \\ 0 & e^{i\Phi_{\mp}} \end{pmatrix}, \tag{1}$$

где $\Phi_{\pm} = 2/3\gamma L(|A_{\pm}|^2 + 2|A_{\mp}|^2)$ – нелинейный фазовый сдвиг; L – длина волокна; $\gamma = 2\pi n/(\lambda A_{\text{eff}})$ – коэффициент нелинейности; n_2 – нелинейный показатель преломления; A_{eff} – эффективная площадь излучения; λ – длина волны излучения. Амплитуду поля удобно представить в линейном (L) и циркулярном (C) базисах. Переход от базиса к базису дается матрицами унитарного преобразования:

$$A^L = \begin{pmatrix} A_x \\ A_y \end{pmatrix}, A^C = \begin{pmatrix} A_+ \\ A_- \end{pmatrix}, A^C = U \begin{pmatrix} A_x \\ A_y \end{pmatrix}, A^L = U^+ \begin{pmatrix} A_+ \\ A_- \end{pmatrix},$$

где

$$U = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & i \\ 1 & -i \end{pmatrix}, U^+ = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ -i & i \end{pmatrix}. \tag{2}$$

Матрица преобразования универсальной фазовой пластинки в линейном базисе записывается как

$$\text{WP}(\Delta, \theta) = \begin{pmatrix} \cos^2\theta + e^{-i\Delta}\sin^2\theta & (1 - e^{-i\Delta})\sin\theta\cos\theta \\ (1 - e^{-i\Delta})\sin\theta\cos\theta & e^{-i\Delta}\cos^2\theta + \sin^2\theta \end{pmatrix}, \tag{3}$$

где углы $\Delta = \pi$ и $\pi/2$ соответствуют полуволновой и четвертьволновой пластинке соответственно, а θ – угол между оптической осью фазовой пластинки и осью поляризатора. Матрица преобразования поляризатора, ось которого сонаправлена с x -компонентой поля, имеет вид

$$P = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}. \tag{4}$$

Общее выражение для преобразования компонент поля получается при обходе резонатора по кругу от выхода поляризатора и далее по часовой стрелке:

$$A_{\text{out}}^L = PWP(\pi, \theta_2)U^+\text{NPR}^C UWP\left(\frac{\pi}{2}, \theta_1\right)A_{\text{in}}^L. \tag{5}$$

Коэффициент пропускания вследствие НВП в волокне

$$T_{\text{NPR}} = I_{\text{out}}/I_{\text{in}}, \tag{6}$$

где $I = (|A_x|^2) + (|A_y|^2)$.

На рис.6 показаны графики зависимости пропускания модулятора НВП при разных углах θ_1 четвертьволновой фазовой пластинки, которое периодически изменяется с ростом пиковой интенсивности в волокне. Изменение последней при переходе от минимума пропускания к максимуму соответствует повороту эллипса поляризации светового импульса на 90°. При этом глубина модуляции и период изменяются в зависимости от эллиптичности вводимого в волокно излучения, которое задается углом θ_1 четвертьволновой фазовой пластинки. Заданием угла θ_2 полуволновой фазовой пластинки можно выставлять положение максимума либо минимума пропускания при нуле интенсивности. Необходимо отметить, что зависимости на рис.6 получены в предположении постоянства пиковой интенсивности излучения при распространении импульса по волокну. Численное моделирование с учетом потерь излучения на оптических элементах и усиления в активной части резонатора выявило погрешность аналитического подхода, не превышающую 15% для положений экстремумов на зависимостях пропускания модулятора НВП от пиковой интенсивности импульса на входе в волокно. Найденная погрешность для дальнейшего анализа является допустимой.

Выделение одиночного импульса из стохастического фона импульсов свободной генерации происходит, когда с ростом интенсивности импульса пропускание модулятора возрастает, поэтому угол θ_2 выставлялся в положение минимума пропускания при нуле интенсивности. В этом случае на участке кривой от минимума пропускания до максимума модулятор работает как насыщающийся поглотитель с возможностью инициировать генерацию импульсов. Во избежание нестабильности генерации импульсов, связанной с модуляцией добротности, угол θ_1 четвертьволновой фазовой пластинки устанавливался так, чтобы глубина модуляции от НВП не превышала 2%, что соответствует поляризации импульса, близкой к круговой.

Зависимость коэффициента поглощения пленочного модулятора КМЦ-ОУНТ от интенсивности падающего

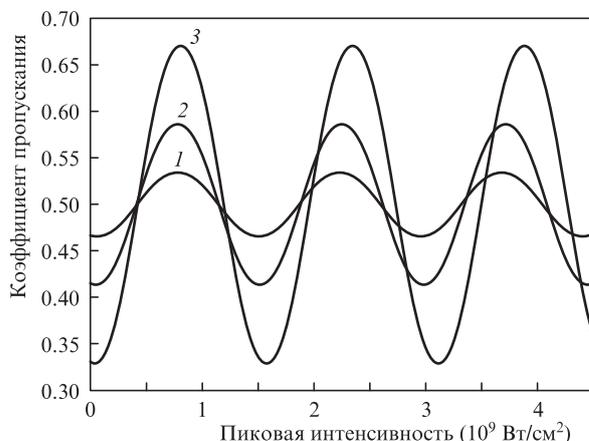


Рис.6. Зависимости коэффициента пропускания от пиковой интенсивности импульса в волокне для эффекта НВП, полученные с использованием выражений (5) и (6), при различных значениях углов θ_1 и θ_2 фазовых пластинок КП1 и КП2: $\theta_1 = -43^\circ$ и $\theta_2 = 20^\circ$ (1); -40° и 22° (2); -35° и 25° (3).

излучения вследствие эффекта насыщения описывается выражением

$$\alpha(I) = \frac{A_0}{1 + III_s} + B, \quad (7)$$

где A_0 и B – линейный насыщаемый и ненасыщаемый компоненты поглощения соответственно [28]. В приближении слабого поглощения выражение для коэффициента пропускания $T_{nt}(I) = \exp[-\alpha(I)L]$ записывается в виде

$$T_{nt}(I) = T_{ns} - \frac{\Delta T}{1 + III_{sa}}, \quad (8)$$

где ΔT – изменение коэффициента пропускания вследствие насыщающегося поглощения; T_{ns} – ненасыщаемая часть коэффициента пропускания; L – толщина образца. В эксперименте использовалась пленка КМЦ-ОУНТ с параметрами $T_{ns} = 0.9$, $\Delta T = 0.02$, $I_{sa} = 52$ МВт/см².

На рис.7 показана зависимость $T_{nt}(I)$ для используемой пленки КМЦ-ОУНТ, а также указана зона стабильной импульсной генерации в условиях комбинированного модулятора, когда отсутствовал оптический пробой и сохранялся самозапуск. Коэффициент пропускания комбинированного модулятора

$$T = T_{NPR} T_{nt}. \quad (9)$$

На рис.8 представлены зависимости нелинейного пропускания от пиковой интенсивности для пленки КМЦ-ОУНТ, для модулятора на основе НВП и комбинированного модулятора. Для построения зависимостей были взяты углы фазовых пластинок $\theta_1 = -44.5^\circ$ и $\theta_2 = 18^\circ$, которые использовались в нашем импульсном волоконном лазере. Пиковая мощность стабильной генерации импульсов показана вертикальной штриховой линией, которая проходит вблизи максимума зависимости пропускания комбинированного модулятора. Уменьшение пропускания при увеличении пиковой интенсивности справа от линии стабильной генерации не позволяет развиваться режиму неустойчивости в результате модуляции доброт-

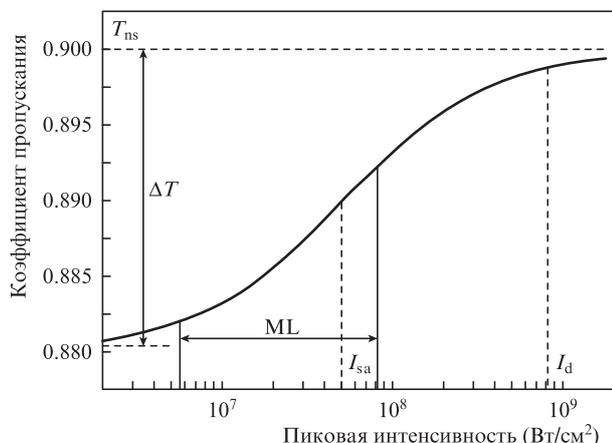


Рис.7. Зависимость коэффициента пропускания пленочного модулятора КМЦ-ОУНТ от падающей на пленку пиковой интенсивности: ML – зона стабильной генерации импульсов с самозапуском. Граница зоны ML со стороны высокой интенсивности определяется оптическим пробоем пленки в момент инициации импульсов, а со стороны низкой интенсивности – срывом режима самозапуска импульсной генерации.

ности. Аналогичный эффект стабилизации генерации УКИ происходит при двухфотонном поглощении падающего излучения на больших интенсивностях в SESAM [29]. Кроме того, пиковая мощность излучения, падающая на пленку КМЦ-ОУНТ в режиме стабильной генерации импульсов, значительно ниже порога разрушения пленочного модулятора, что увеличивает его долговременную надежность.

Как уже отмечалось, для вывода излучения из резонатора в схеме лазера используется поляризатор. В описанной выше конфигурации лазера поляризация излучения на выходе КПП близка к круговой, в результате поляризатор отводит почти половину падающей мощности. Если поляризатор не используется для вывода излучения и необходимо значительно сократить внутрирезонаторные потери, то можно применить другую схему для контроля поляризации. В этом случае в тракте КПП используют две фазовых пластинки – четвертьволновую и полуволновую, выставленные под углами θ_1 и θ_2 относительно оси поляризатора. В тракте КПП устанавливается одна четвертьволновая пластинка, выставленная под углом θ_3 . При соотношении между углами $\theta_3 - \theta_1 = \pi/2$ и $\theta_2 - \theta_1 = \pi/4$ модулятор на основе эффекта НВП работает как насыщающийся поглотитель при минимуме потерь в тракте поляризатора. Как и ранее, глубина модуляции и эллиптичность циркулирующего в резонаторе излучения задается углом θ_1 четвертьволновой фазовой пластинки. При использовании такой альтернативной схемы излучение может выводиться из резонатора через волоконный ответвитель. Предлагаемый метод комбинированной синхронизации мод применим также для пленочных насыщаю-

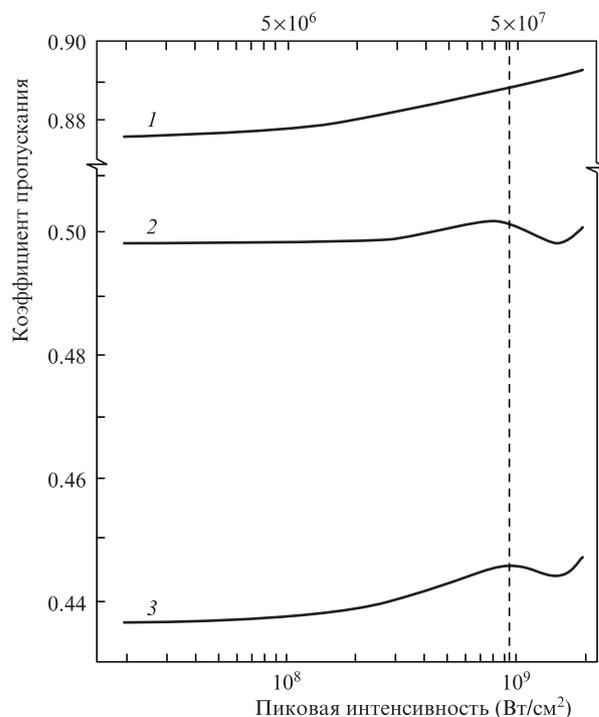


Рис.8. Зависимости коэффициента пропускания от пиковой интенсивности импульса в волокне для модулятора КМЦ-ОУНТ (1), НВП-модулятора (2) и комбинированного модулятора (3). Значения 5×10^6 и 5×10^7 Вт/см² соответствуют пиковой интенсивности на пленке модулятора КМЦ-ОУНТ. Зависимость для НВП-модулятора соответствует углам фазовых пластинок $\theta_1 = -44.5^\circ$ и $\theta_2 = 18^\circ$. Штриховая линия – пиковая интенсивность стабильной генерации импульсов.

щихся поглотителей на основе полимерных композитных материалов с графеном и MoS_2 .

4. Заключение

Представлен импульсный волоконный иттербиевый лазер с длительностью импульсов 1.7 пс на длине волны 1.04 мкм. Волоконная схема резонатора выполнена полностью на волокнах с нормальной дисперсией групповой скорости. Для синхронизации мод использовался пленочный модулятор с ОУНТ в комбинации с эффектом нелинейного вращения эллипса поляризации. Предложена модель работы комбинированного модулятора, при которой интенсивность излучения, необходимая для стабильной генерации импульсов, существенно ниже порога разрушения композитной пленки с ОУНТ, что открывает возможности использования гибкой и простой технологии получения пленок с ОУНТ для генерации УКИ в волоконных лазерах. Другим отличительным свойством такого комбинированного модулятора является наличие самозапуска генерации УКИ, в отличие от схемы генерации, основанной только на эффекте вращения эллипса поляризации в волокне, при которой самозапуск отсутствует. На ранних стадиях формирования импульса насыщающийся поглотитель с ОУНТ помогает выделять наиболее интенсивный импульс из стохастического шума свободной генерации, ускоряя режим самозапуска.

Авторы глубоко благодарны М.Н.Герке за ценные обсуждения и поддержку в процессе работы над статьей.

- Fermann M.E., Galvanauskas A., Sucha G., Harter D. *Appl. Phys. B*, **65**, 259 (1997).
- Kobtsev S., Kukarin S., Fedotov Y. *Opt. Express*, **16**, 21936 (2008).
- Okhotnikov O., Grudinin A., Pessa M. *New J. Phys.*, **6**, 177 (2004).
- Stolen R.H., Botineau J., Ashkin A. *Opt. Lett.*, **7**, 512 (1982).
- Kobtsev S.M., Smirnov S.V. *Laser Phys.*, **21**, 272 (2011).
- Kobtsev S., Kukarin S., Smirnov S., Turitsyn S., Latki A. *Opt. Express*, **17**, 20707 (2009).
- Fong K.H., Kikuchi K., Goh C.S., Set S.Y., Grange R., Haiml M., Schlatter A., Keller U. *Opt. Lett.*, **32**, 38 (2007).
- Schmidt A., Rivier S., Steinmeyer G., Yim J.H., Cho W.B., Lee S., Rotermund F., Pujol M.C., Mateos X., Aguilo M., Diaz F., Petrov V., Griebner U. *Opt. Lett.*, **33**, 729 (2008).
- Cho W.B., Yim J.H., Choi S.Y., Lee S., Griebner U., Petrov V., Rotermund F. *Opt. Lett.*, **33**, 2449 (2008).
- Schibli T.R., Minoshima K., Kataura H., Itoga E., Minami N., Kazaoui S., Miyashita K. *Opt. Express*, **13**, 8025 (2005).
- Khudyakov D.V., Lobach A.S., Nadtochenko V.A. *Appl. Opt.*, **48**, 1624 (2009).
- Khudyakov D.V., Lobach A.S., Nadtochenko V.A. *Opt. Lett.*, **35**, 2675 (2010).
- Yamashita S., Inoue Y., Maruyama S., Murakami Y., Yaguchi H., Jablonski M., Set S.Y. *Opt. Lett.*, **29**, 1581 (2004).
- Rozhin A.G., Sakakibara Y., Namiki S., Tokumoto M., Kataura H., Achiba Y. *Appl. Phys. Lett.*, **88**, 051118 (2006).
- Sakakibara Y., Rozhin A.G., Kataura H., Achiba Y., Tokumoto M. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **44**, 1621 (2005).
- Таусенев А.В., Образцова Е.Д., Лобач А.С., Конов В.И., Кнященко А.В., Крюков П.Г., Дианов Е.М. *Квантовая электроника*, **37**, 847 (2007).
- Chong A., Buckley J., Renninger W., Wise F. *Opt. Express*, **14**, 10095 (2006).
- Chong A., Buckley J., Renninger W., Wise F. *Opt. Lett.*, **32**, 2408 (2007).
- Kharenko D.S., Shtyrina O.V., Yarutkina I.A., Podivilov E.V., Fedoruk M.P., Babin S.A. *Laser Phys. Lett.*, **9**, 662 (2012).
- Mortag D., Wandt D., Morgner U., Kracht D., Neumann J. *Opt. Express*, **19**, 546 (2011).
- Liu Y., Zhao X., Liu J., Hu G., Gong Z., Zheng Z. *Opt. Express*, **22**, 21012 (2014).
- Kobtsev S., Kukarin S., Fedotov Y. *Laser Phys.*, **21**, 283 (2011).
- Kelleher E.J.R., Travers J.C., Sun Z., Rozhin A.G., Ferrari A.C., Popov S.V., Taylor J.R. *Appl. Phys. Lett.*, **95**, 111108-3 (2009).
- Castellani C. E. S., Kelleher E.J.R., Travers J.C., Popa D., Hasan T., Sun Z., Flahaut E., Ferrari A.C., Popov S.V., Taylor J.R. *Opt. Lett.*, **36**, 3996 (2011).
- Khudyakov D.V., Borodkin A.A., Lobach A.S., Ryzhkov A.V., Vartapetov S.K. *Appl. Opt.*, **52**, 150 (2013).
- Honninger C., Paschotta R., Morier-Genoud F., Moser M., Keller U. *J. Opt. Soc. Am. B*, **16**, 46 (1999).
- Haus H.A., Ippen E.P., Tamura K. *IEEE J. Quantum. Electron.*, **30**, 200 (1994).
- Rozhin A.G., Sakakibara Y., Kataura H., Matsuzaki S., Ishida K., Achiba Y., Tokumoto M. *Chem. Phys. Lett.*, **405**, 288 (2005).
- Thoen E.R., Koontz E.M., Joschko M., Langlois P., Schibli T.R., Kartner F.X., Ippen E.P., Kolodziejs L.A. *Appl. Phys. Lett.*, **74**, 3927 (1999).