

Генерация высокоэнергетических одиночных импульсов и импульсных кластеров в волоконных иттербиевых лазерах с квазисинхронной модуляцией мощности накачки

А.В.Иваненко, Б.Н.Нюшков, С.В.Смирнов

Исследованы дополнительные возможности разработанного авторами метода квазисинхронной модуляции мощности накачки для наносекундной высокоэнергетической импульсной генерации в волоконных лазерах с долгоживущим (порядка 1 мс) верхним лазерным уровнем. На примере волоконного Yb-лазера показано, что квазисинхронная модуляция мощности накачки позволяет генерировать не только периодическую последовательность одиночных наносекундных импульсов, но и регулярные импульсные кластеры с контролируемым количеством наносекундных субимпульсов, составляющих кластер. Кроме того, исследованы возможности масштабирования энергии лазерных импульсов, получаемых методом квазисинхронной модуляции мощности накачки, при переходе к использованию активных волокон с двойной оболочкой и более мощных многомодовых источников накачки. В конфигурации лазера с сохранением линейной поляризации излучения получены импульсы с энергией до 430 нДж. Полученные результаты значительно расширяют возможности применения метода квазисинхронной модуляции мощности накачки в традиционных волоконных лазерах на основе вынужденной эмиссии.

Ключевые слова: волоконные лазеры, квазисинхронная модуляция мощности накачки, импульсные кластеры.

1. Введение

Синхронная накачка лазеров является энергоэффективным и сравнительно простым методом получения импульсного режима генерации, который может быть совмещен с активной синхронизацией мод. Такая накачка нашла свое применение в различных типах лазеров, в первую очередь в полупроводниковых лазерах [1], жидкостных лазерах на красителях [2] и некоторых типах объемных твердотельных лазеров [3]. Синхронная накачка также широко применяется в гибридных лазерах с волоконным резонатором и полупроводниковой активной средой [4, 5], а также в волоконных ВКР-лазерах [6, 7]. Однако применение синхронной накачки в традиционных волоконных лазерах на основе вынужденной эмиссии (ВЭ) до недавних пор было весьма ограничено. Непосредственное использование синхронной накачки в лазерах с такими инерционными активными средами, как Yb- или Er-волокно (характеризующиеся гораздо более медленным восстановлением усиления по сравнению, например, с полупроводниковым оптическим усилителем), представлялось неэффективным с точки зрения возможности формирования коротких и ультракоротких импульсов. Кроме того, классический подход к реализации синхронной накачки в таких лазерах с целью формирования предельно коротких импульсов требовал бы быстрой

($\tau \leq 1$ нс) и глубокой (близкой к 100%) модуляции достаточно мощных лазерных диодов накачки, что осуществить технически сложно. Поэтому синхронная накачка до недавних пор была реализована только в менее инерционных волоконных Tm-лазерах с использованием сложных источников накачки, состоящих из импульсного (или модулируемого) задающего генератора и отдельного усилителя мощности [8, 9].

Лишь недавно нами был предложен [10] и исследован [11] новый подход к синхронной накачке традиционных волоконных лазеров с ВЭ, который позволяет существенно упростить ее техническую реализацию и осуществлять формирование предельно коротких лазерных импульсов, несмотря на инерционность активной среды. Новый метод позволяет формировать в волоконных Yb-лазерах стабильную регулярную последовательность наносекундных и, в перспективе, субнаносекундных импульсов когерентного излучения даже при относительно медленной ($\tau > 1$ мкс) и неглубокой (~50%) модуляции мощности излучения накачки. Метод основан на внесении небольшого (не более 0.1%) рассогласования между периодом синусоидальной модуляции мощности накачки и групповой задержкой лазерного импульса при обходе волоконного резонатора, что при определенных условиях приводит к эффективному укорочению циркулирующего импульса в активном волокне лазера за счет дискриминации усиления заднего фронта импульса. Из-за нестройной синхронизации модуляции накачки с собственным (не навязанным) временем обхода резонатора импульсом излучения генерации метод получил название квазисинхронной модуляции накачки [11]. Данный метод обеспечивает высокую стабильность параметров генерации и низкий уровень шумов, сравнимые с достигаемыми при использовании классических методов активной синхронизации мод; при этом он отличается простотой реализации, высокой надежностью и энергоэффективностью благодаря отсутствию каких-либо внутривибраторных модуляторов.

А.В.Иваненко, С.В.Смирнов. Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Россия, 630090 Новосибирск, ул. Пирогова, 1

Б.Н.Нюшков. Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Россия, 630090 Новосибирск, ул. Пирогова, 1; Новосибирский государственный технический университет, Россия, 630073 Новосибирск, просп. К.Маркса, 20; e-mail: borisn@ngs.ru

В настоящей работе впервые исследуются дополнительные возможности метода квазисинхронной накачки в волоконных Yb-лазерах. В частности, демонстрируется возможность стационарной генерации регулярной последовательности высокоэнергетичных импульсных кластеров с контролируемым количеством наносекундных субимпульсов в кластере. Кроме того, впервые исследуется возможность применения метода квазисинхронной накачки в лазерах, использующих волокна с двойной оболочкой и мощные многомодовые источники накачки. Показано, что в таких лазерах можно значительно (как минимум до 430 нДж) увеличить энергию наносекундных лазерных импульсов, формируемых с помощью квазисинхронной накачки.

2. Эксперимент

2.1. Лазер с сохранением поляризации и накачкой в сердцевину активного волокна

Нами исследовались две конфигурации волоконных Yb-лазеров с кольцевыми резонаторами, состоящими полностью из волокон и волоконно-оптических элементов с сохранением линейного состояния поляризации (polarization maintaining, PM).

В первой из рассматриваемых лазерных конфигураций применялся кольцевой резонатор (рис.1), аналогичный используемому в работе [11] для исследования механизма формирования коротких одиночных импульсов за счет квазисинхронной модуляции мощности накачки. Такая схема обеспечивает встречное распространение волн накачки и генерации, предотвращая попадание непоглощенного в активном волокне излучения накачки в выходной ответвитель.

В этом лазере использовалось активное сохраняющее поляризацию волокно длиной 0.55 м, легированное ионами Yb, с накачкой в сердцевину (ЛЕККИ Yb700-6/125-PM). Вывод излучения из резонатора обеспечивал 30%-ный сплавной ответвитель. Также в резонаторе лазера использовался узкополосный (2 нм) спектральный

фильтр с центром полосы пропускания вблизи 1064 нм. Фильтр был установлен для блокировки паразитного излучения (усиленной спонтанной эмиссии и вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР)). Кроме того, фильтр обеспечивал селекцию и стабилизацию длины волны генерации. Резонатор был удлинен путем вставки пассивного одномодового волокна длиной ~ 0.9 км, сохраняющего поляризацию (Fujikura, 980 nm band PANDA fiber). Результирующая оптическая длина резонатора соответствовала фундаментальной частоте следования импульсов, равной ~ 230.5 кГц. Для накачки использовался источник излучения с длиной волны 980 нм на основе лазерных диодов с одномодовым волоконным выводом. Максимальная мощность излучения накачки, выводимого в лазер, составляла ~ 1.05 Вт. Для ввода излучения накачки в резонатор применялся волоконный спектральный мультиплексор. Мощность накачки модулировалась посредством модуляции тока лазерных диодов источника накачки. Для этого на модуляционный вход драйверов тока подавался сигнал от радиочастотного генератора сигналов произвольной формы.

В соответствии с концепцией квазисинхронной накачки [11] импульсная генерация запускается при синусоидальной модуляции мощности накачки с частотой, незначительно (примерно на 0.1%) превышающей фундаментальную частоту следования импульсов (~ 230.5 кГц), которая задается оптической длиной резонатора. Для получения импульсов наименьшей длительности требуется плавное уменьшение изначально завышенной частоты модуляции и ее приближение к фундаментальной частоте. В эксперименте шаг изменения частоты составлял 5 Гц с временным интервалом 0.5 с. При такой перестройке частоты модуляции происходит плавный переход от неглубокой синусоидальной модуляции мощности непрерывного излучения генерации к формированию дискретных наносекундных импульсов (рис.2,a). Соответствующая эволюция оптического спектра излучения представлена на рис.2,б, а на рис.3 приведены осциллограммы мощностей накачки и генерации для выделенных значений частоты модуляции. Необходимо отметить, что в данном

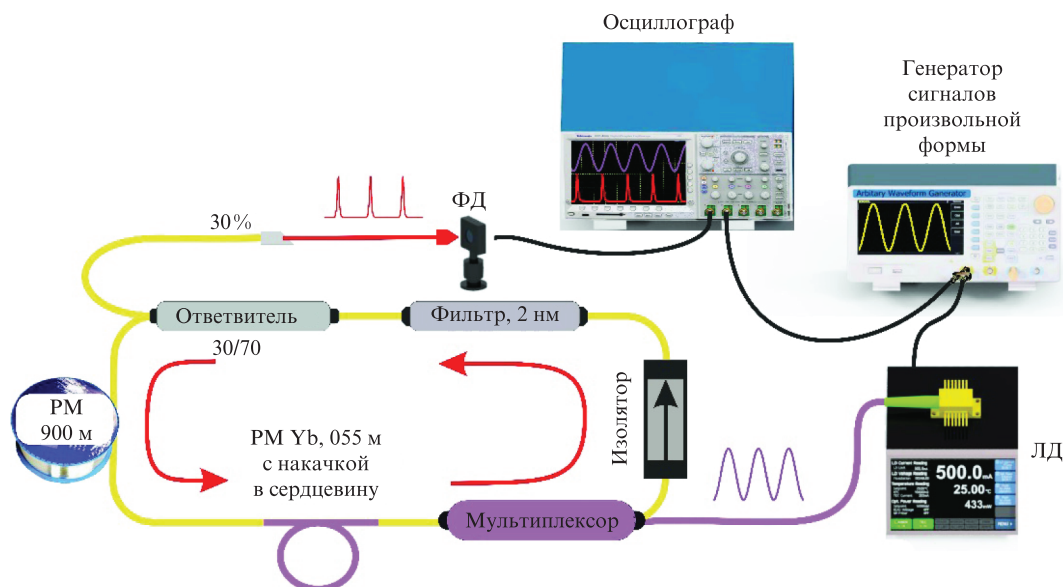


Рис.1. Схема волоконного Yb-лазера с накачкой в сердцевину одномодового активного волокна:

ЛД – лазерный диод накачки с одномодовым волоконным выводом; PM Yb – одномодовое иттербиевое волокно, сохраняющее поляризацию; PM 900 м – катушка пассивного волокна, сохраняющего поляризацию.

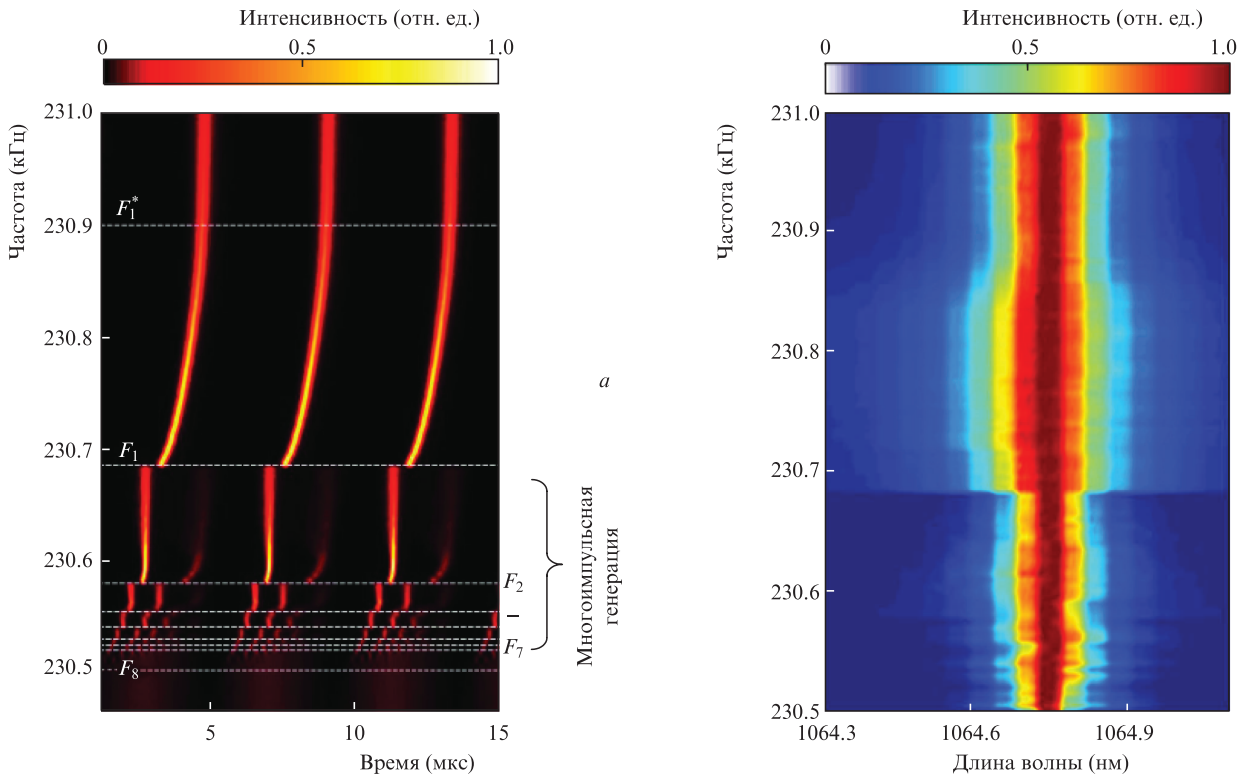


Рис.2. Частотно-временные распределения интенсивности генерации при перестройке (понижении) частоты модуляции накачки в окрестности фундаментальной частоты следования импульсов (а) и соответствующая эволюция спектрального распределения интенсивности генерации (б); $F_1, F_1^*, F_2, \dots, F_8$ – выделенные частоты модуляции, для которых на рис.3 приведены осциллограммы результирующих лазерных импульсов.

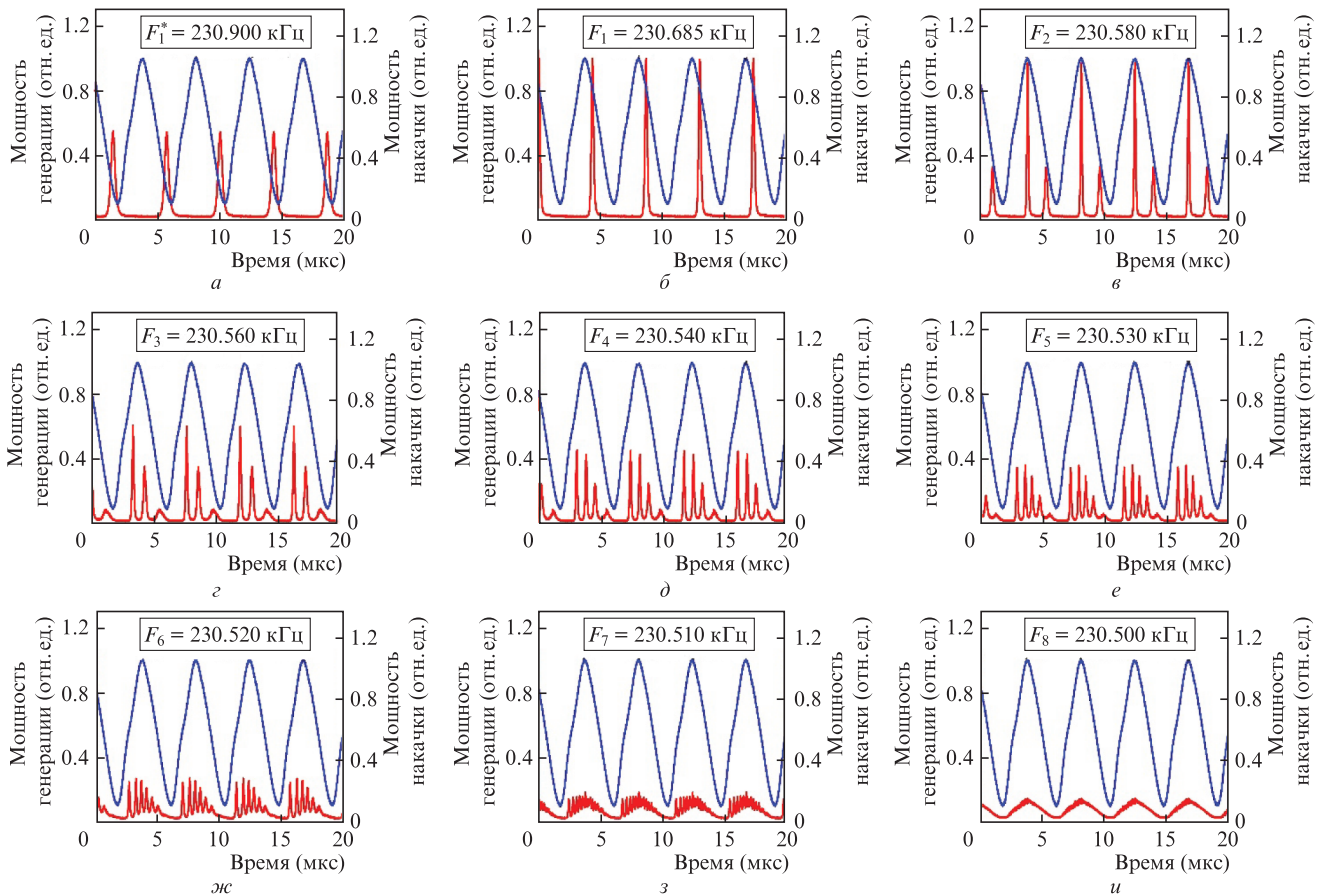


Рис.3. Осциллограммы мощностей накачки (синие кривые) и генерации (красные кривые) для выделенных значений частоты модуляции.

исследовании при установленной глубине модуляции $\sim 83\%$ мгновенное значение мощности накачки всегда оставалось выше порога генерации (больше 90 мВт).

Как следует из результатов измерений, минимальная длительность одиночного импульса (~ 205 нс) достигается при частоте модуляции $F_1 = 230.685$ кГц. При этом контраст в генерируемой последовательности лазерных импульсов составил $\sim 99\%$, а их энергия (с учетом контраста) была ~ 130 нДж. Как показано в работе [11], возможность дальнейшего уменьшения длительности одиночного импульса ограничивается в первую очередь чрезмерным нелинейным набегом оптической фазы импульса, обусловленным ростом пиковой мощности импульса при уменьшении его длительности. Поэтому дальнейшее плавное уменьшение частоты модуляции до значений ниже 230.685 кГц приводит к переходу лазера в многоимпульсный режим генерации, о чем свидетельствуют частотно-временные распределения интенсивности генерации на рис.2,а и осциллограммы на рис.3.

Исследование частотной области многоимпульсной генерации позволило установить, что режим генерации имеет не стохастический, а детерминированный (воспроизводимый) характер и предоставляет возможность управления количеством субимпульсов, составляющих регулярный импульсный кластер. На рис.3,в-з показаны осциллограммы импульсных кластеров с числом субимпульсов от 2 до 7, которые получаются при перестройке частоты модуляции от $F_2 = 230.580$ кГц до $F_7 = 230.510$ кГц. Кластер формируется в пределах временного интервала, соответствующего периоду модуляции мощности накачки. С увеличением числа субимпульсов в кластере их длительность уменьшается вплоть до ~ 100 нс (в случае семи субимпульсов). Суммарная энергия субимпульсов в кластере неизменно равна 130 нДж. Указанные многоимпульсные режимы устойчивы так же, как одноимпульсный режим генерации, и поддерживаются лазером в лабораторных условиях на протяжении всего рабочего дня. Полученная генерация импульсных кластеров соответствует стационарным режимам генерации, предсказанным нами в численной модели [11] для случая бесконечно малой положительной отстройки частоты модуляции от фундаментальной частоты следования импульсов (230.5 кГц, задаваемой оптической длиной резонатора).

На рис.4 представлена полученная в настоящей работе экспериментальная зависимость длительности лазерных импульсов от частоты модуляции мощности накачки в окрестности фундаментальной частоты следования им-

пульсов (при уменьшении частоты модуляции). При дальнейшем уменьшении частоты модуляции до фундаментальной частоты и ниже лазер переходит в режим непрерывной генерации с неглубокой синусоидальной модуляцией мощности излучения (см. рис.3,и).

Продемонстрированная возможность генерации регулярных высокоэнергетичных импульсных кластеров с электронно-управляемым количеством наносекундных субимпульсов может быть востребована в лидарных технологиях [12], а также при исследовании комплексных эффектов нелинейного взаимодействия излучения с веществом [13].

2.2. Лазер с сохранением поляризации и мощной многомодовой накачкой через оболочку активного волокна

Для исследования возможности масштабирования энергии лазерных импульсов, формируемых с помощью метода квазисинхронной модуляции мощности накачки, нами была апробирована модифицированная конфигурация лазера, в которой применялось легированное итербием волокно с двойной оболочкой (double-clad Yb-fiber) и мощный многомодовый источник накачки.

Вторая из рассматриваемых лазерных конфигураций имела аналогичную первой схему резонатора (рис.5), различие заключалось главным образом в применении высоколегированного сохраняющего поляризацию Yb-волокна с двойной оболочкой (LIEKKI Yb1200-6/125DC-PM). Длина активного волокна составляла 5 м. В модифицированной конфигурации вместо спектрального мультиплексора использовался специальный волоконный объединитель для ввода многомодового излучения накачки от мощного (10 Вт) источника во внутреннюю оболочку активного волокна. В качестве источника накачки применялся лазерный диод с многомодовым волоконным выводом излучения на длине волны 980 нм. (Остальные элементы лазера не претерпели изменений.) За счет небольшого увеличения оптической длины резонатора (из-за использования более длинного активного волокна) фундаментальная частота следования импульсов (задаваемая длиной резонатора) уменьшилась и составила ~ 228.1 кГц. В отличие от исходной конфигурации, в рассматриваемой системе драйвер тока лазерного диода накачки позволял осуществлять только импульсную модуляцию мощности накачки со скважностью, примерно равной 2. Из-за ограниченной полосы пропускания драйвера тока оптический сигнал накачки имел искаженную h-образную форму (вместо прямоугольной формы задающих электрических импульсов).

Импульсная генерация запускалась подачей на драйвер тока лазерного диода накачки тактового сигнала с частотой, незначительно (на 0.1%) превышающей фундаментальную частоту следования импульсов (~ 228.1 кГц).

Несмотря на заметные искажения в форме оптического сигнала накачки (короткий выброс на переднем фронте и затягивание заднего фронта импульса), при плавном уменьшении изначально завышенной частоты модуляции и ее приближении к фундаментальной частоте происходило формирование регулярной последовательности коротких одиночных лазерных импульсов колоколообразной формы. В эксперименте шаг изменения частоты составлял 10 Гц с временным интервалом 0.5 с. Частотно-временные распределения интенсивности генерации на

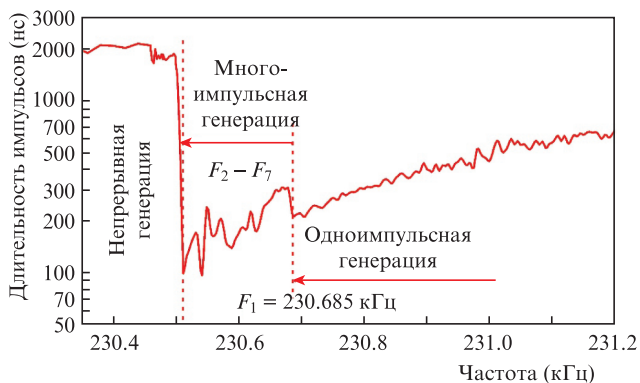


Рис.4. Зависимость длительности лазерных импульсов от частоты модуляции мощности накачки в окрестности фундаментальной частоты следования импульсов.

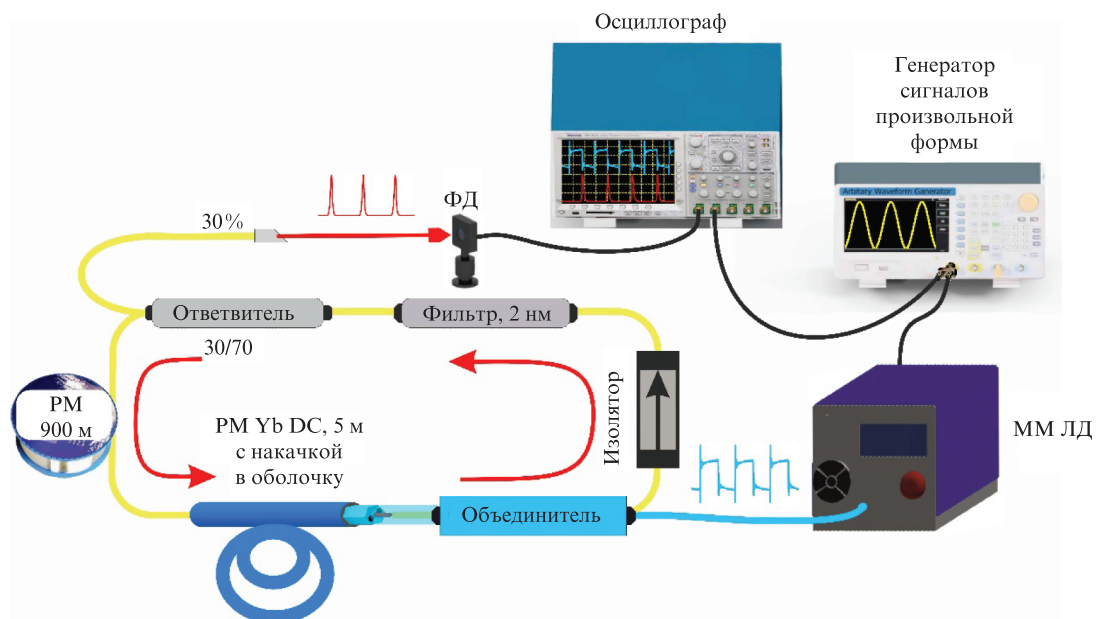


Рис.5. Схема высокоэнергетического волоконного Yb-лазера с сохранением поляризации и накачкой через внутреннюю оболочку активного волокна:

ММ ЛД – мощный лазерный диод накачки с многомодовым волоконным выводом; PM Yb DC – сохраняющее поляризацию Yb-волокно с двойной оболочкой; PM 900 м – катушка пассивного волокна, сохраняющего поляризацию.

рис.6,*a* демонстрируют плавный переход от неглубокой квазисинусоидальной модуляции непрерывного излучения к формированию дискретных наносекундных импульсов. Соответствующая эволюция оптического спектра излучения показана на рис.6, *b*, а на рис.7 приведены осциллограммы мощностей накачки и генерации для выделенных значений частоты модуляции.

Как следует из результатов измерений, минимальная длительность одиночного импульса (~330 нс) достигается при частоте модуляции $F_1 = 228.680$ кГц. При этом контраст в генерируемой последовательности лазерных импульсов превышал 98%, а их энергия (с учетом контраста) равна ~430 нДж. Шумовые характеристики были близки к таковым для типичных волоконных лазеров с

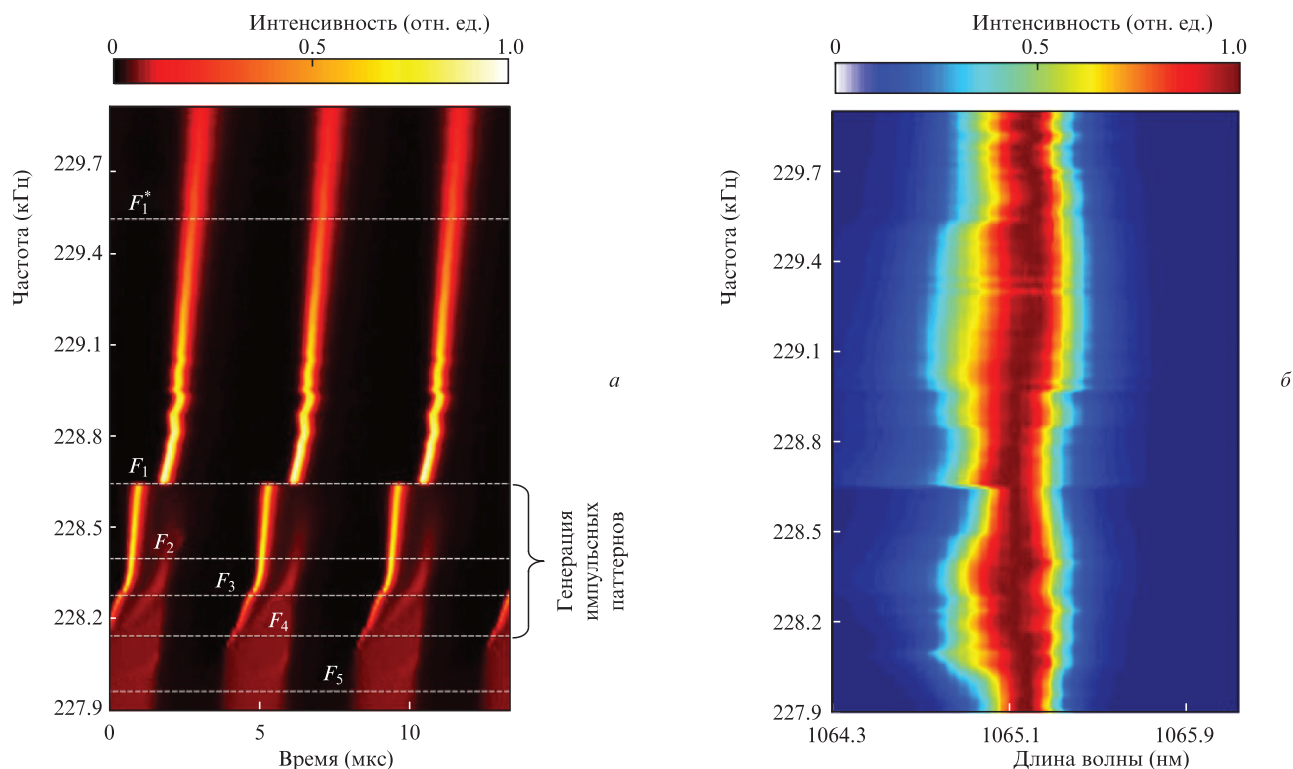


Рис.6. Частотно-временные распределения интенсивности генерации при перестройке (понижении) частоты модуляции мощности накачки в окрестности фундаментальной частоты следования импульсов (*a*) и соответствующая эволюция спектрального распределения интенсивности генерации (*b*); $F_1, F_1^*, F_2, \dots, F_5$ – выделенные частоты модуляции, для которых на рис.7 приведены осциллограммы результирующих лазерных импульсов.

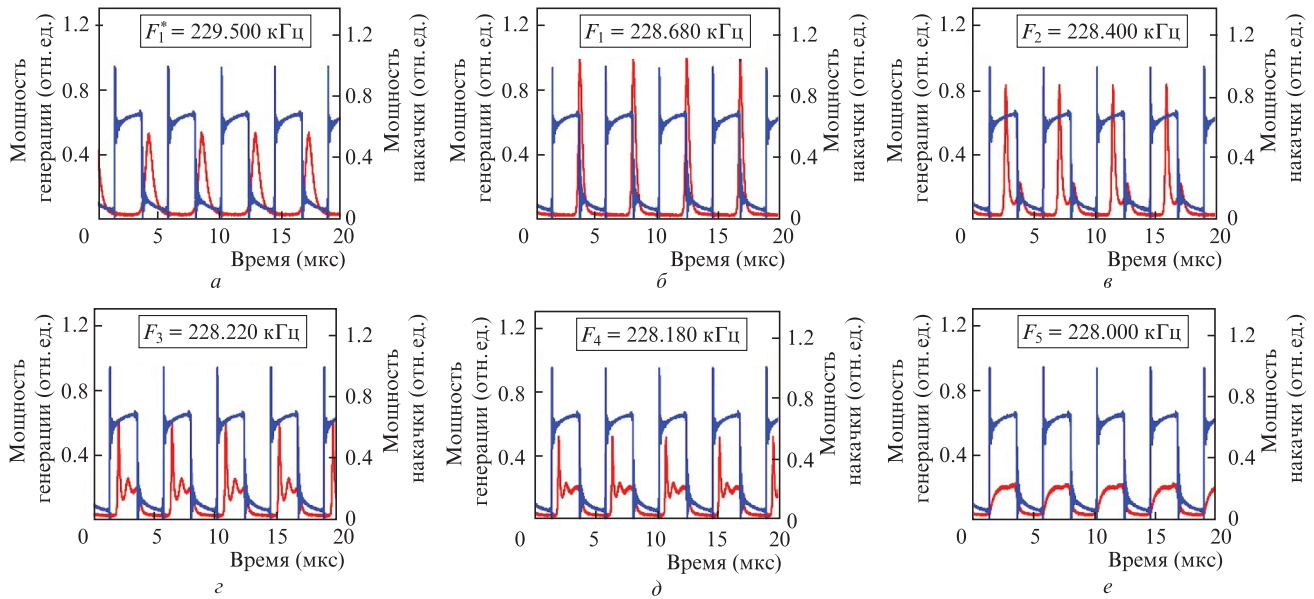


Рис. 7. Осциллограммы мощностей накачки (синие кривые) и генерации (красные кривые) для выделенных значений частоты модуляции.

синхронизацией мод: отношение сигнал/шум в радиочастотном спектре в окрестности фундаментальной частоты следования превышало 46 дБ, а амплитудные флуктуации от импульса к импульсу составляли менее 2% (рис.8).

При дальнейшем плавном уменьшении частоты модуляции до значений ниже 228.680 кГц происходит переход лазера в режим генерации так называемых импульсных паттернов, форма которых коррелирует с h-образной формой импульсов накачки, о чем свидетельствуют частотно-временные распределения мощности генерации на рис.6,а и осциллограммы на рис.7. Суммарная энергия генерируемых импульсных паттернов неизменно равна ~ 430 нДж. Генерация специфических импульсных паттернов вместо генерации импульсных кластеров, имевшей место в исходной конфигурации лазера, может быть объяснена существенным различием формы модуляции мощности накачки. Полученные импульсные паттерны устойчивы так же, как одноимпульсный режим генерации, и поддерживаются лазером в лабораторных условиях на протяжении всего рабочего дня. При дальнейшем уменьшении частоты модуляции до фундаментальной частоты и ниже лазер переходит в режим непрерывной генерации с не-

глубокой квазисинусоидальной модуляцией мощности излучения (рис.7,е). На рис.9 приведена полученная экспериментальная зависимость длительности лазерных импульсов от частоты модуляции мощности накачки в окрестности фундаментальной частоты следования импульсов.

Экспериментально продемонстрированная возможность увеличения энергии лазерных импульсов, получаемых методом квазисинхронной модуляции накачки, до 430 нДж и более открывает широкие перспективы для внедрения этого метода в мощных и высокоэнергетических волоконных лазерных системах, включая системы, предназначенные для лазерной обработки материалов [14]. Необходимо однако отметить, что потенциал дальнейшего увеличения энергии импульсов (при сопутствующем увеличении пиковой мощности) может быть ограничен такими факторами, как накопление импульсом чрезмерного нелинейного набега фазы и достижение порога ВКР, как было показано в работе [11]. Тем не менее в представленных наносекундных лазерных системах пиковая мощность излучения на входе в 900-метровый пассивный волоконный участок резонатора была существенно ниже рассчитанной критической мощности ($P_{cr} \approx 8$ Вт),

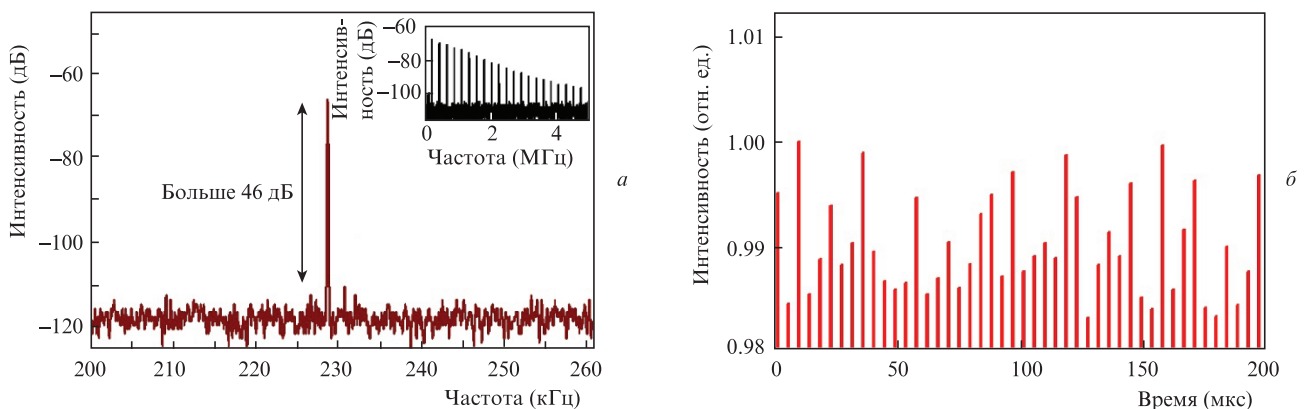


Рис.8. Радиочастотный спектр регулярной последовательности одиночных наносекундных лазерных импульсов (а) и осциллограмма флуктуации их амплитуды (б).

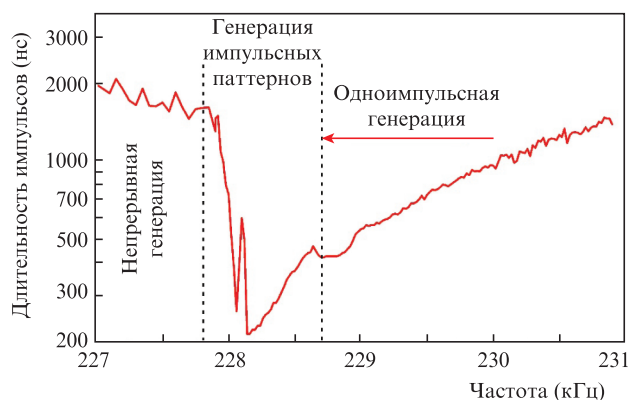


Рис.9. Зависимость длительности лазерных импульсов от частоты модуляции мощности накачки в окрестности фундаментальной частоты следования импульсов.

соответствующей порогу ВКР [15]. Кроме того, в обеих конфигурациях лазеров перед выходным ответвителем был установлен узкополосный спектральный фильтр, препятствующий возможному попаданию стоксовых компонент ВКР в выходное излучение.

В то же время интерес может представлять и потенциальная возможность одновременной генерации импульсов на основной и на стоксовой длинах волн, которая, вероятно, может быть реализована при соответствующей модификации резонатора лазера по аналогии с работой [16].

3. Заключение

В работе представлены дополнительные возможности метода квазисинхронной накачки в волоконных Yb-лазерах. В частности, впервые получена стационарная генерация регулярной последовательности высокоэнергетических импульсных кластеров с контролируемым количеством наносекундных субимпульсов в кластере. Переход в такой режим возможен в условиях предельно малой (менее 0.1%) положительной отстройки частоты модуляции от фундаментальной частоты следования импульсов, задаваемой оптической длиной резонатора, при достижении критической пиковой мощности. Приближение к указанной частоте обеспечивает последовательное увеличение числа связанных субимпульсов в генерируемых регулярных импульсных кластерах. Суммарная энергия субимпульсов в кластере при этом остается неизменной и достигает 130 нДж на выходе простой экспериментальной конфигурации лазера с накачкой в сердцевину иттербиевого волокна, сохраняющего поляризацию.

Экспериментально продемонстрирована применимость метода квазисинхронной накачки в мощных и высокоэнергетических волоконных лазерных системах, использующих активные волокна с двойной оболочкой и мощные многомодовые источники накачки. Переход к подобной архитектуре лазера (мощная накачка через оболочку активного волокна) позволил получить с помощью метода квазисинхронной накачки наносекундные

импульсы с энергией 430 нДж; при этом остается потенциал для дальнейшего увеличения энергии импульсов.

Полученные результаты открывают новые перспективы для широкого применения метода квазисинхронной накачки в традиционных волоконных лазерах на основе вынужденной эмиссии для решения различных научных и прикладных задач, связанных, в частности, с лидарными измерениями, обработкой материалов, исследованием комплексных нелинейных эффектов, возникающих при взаимодействии лазерного излучения с различными оптическими материалами и метаматериалами. Исследованные лазеры пополняют ряды новых типов волоконных лазерных генераторов с активным электронным управлением параметрами импульсной генерации [17–19]. Благодаря сверхдлинному волоконному резонатору с сохранением поляризации они также представляют интерес как базис для исследования перспектив создания активной телекоммуникационной линии с возможностью криптографической защиты на физическом уровне.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ и Новосибирской области (проекты № 20-42-543007 и 19-42-540013), а также Министерства науки и высшего образования РФ (проект FSUN-2020-0007).

1. AuYeung J.C., Johnston A.R. *Appl. Phys. Lett.*, **40**, 112 (1982).
2. Peter D.S., Beaud P., Hodel W., Weber H.P. *Opt. Lett.*, **16**, 405 (1991).
3. Granados E., Pask H.M., Spence D.J. *Opt. Express*, **17**, 569 (2009).
4. Pedersen N.V., Jakobsen K.B., Vaa M. *J. Lightwave Technol.*, **14** (5), 833 (1996).
5. Nyushkov B., Ivanenko A., Smirnov S., Kobtsev S. *Laser Phys. Lett.*, **16** (11), 115103 (2019).
6. Kobtsev S., Ivanenko A., Kokhanovskiy A., Gervaziev M. *Opt. Express*, **26**, 29867 (2018).
7. Kharenko D.S., Efremov V.D., Evmenova E.A., Babin S.A. *Opt. Express*, **26**, 15084 (2018).
8. Li G., Zhou Y., Li S.-J., Yao P., Gao W., Gu C., Xu L.-X. *Chin. Phys. Lett.*, **35** (11), 114203 (2018).
9. Wang Y., Set S.Y., Yamashita S. *APL Photonics*, **1**, 071303 (2016).
10. Smirnov S.V., Nyushkov B.N., Ivanenko A.V., Kolker D.B., Kobtsev S.M. *J. Opt. Soc. Am. B*, **37** (10), 3068 (2020).
11. Nyushkov B., Ivanenko A., Smirnov S., Kobtsev S. *Opt. Fiber Technol.*, **66**, 102650 (2021).
12. Di Teodoro F., Belden P., Ionov P., Werner N. *Opt. Fiber Technol.*, **20** (6), 688 (2014).
13. Нюшков Б.Н., Трашкев С.И., Клементьев В.М., Пивцов В.С., Кобцев С.М. *Квантовая электроника*, **43** (2), 107 (2013) [*Quantum Electron.*, **43** (2), 107 (2013)].
14. Davis W.P., Hendow S.T., Kovacevic R. *Proc. Int. Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics* (Orlando, Florida, USA, 2011, pp 1131 – 1136).
15. De la Cruz-May L., Alvarez-Chavez J.A., Mejia E.B., Flores-Gil A., Mendez-Martinez F., Wabnitz S. *Opt. Fiber Technol.*, **17** (3), 214 (2011).
16. Babin S., Podivilov E., Kharenko D., et al. *Nat. Commun.*, **5**, 4653 (2014).
17. Nyushkov B., Kobtsev S., Ivanenko A., Smirnov S. *J. Opt. Soc. Am. B*, **36** (11), 3133 (2019).
18. Nyushkov B., Ivanenko A., Smirnov S., Shtyrina O., Kobtsev S. *Opt. Express*, **28** (10), 14922 (2020).
19. Nakazawa M., Hirooka T. *IEEE J. Quantum Electron.*, **57** (6), 1 (2021). DOI: 10.1109/JQE.2021.3114173.