

# Лазер на волокне, легированном тулием, с модуляцией усиления и сверхнизкой частотой следования импульсов излучения на длине волны 2 мкм\*

Чжун Минфэй, Сунь Хайюэ, Лю Тунлин, Хуан Кунь

*Затравочные лазеры со сверхнизкой частотой следования наносекундных импульсов нужны для получения заданных значений как энергии импульса, так и его пиковой мощности в усилителях на основе волокна, легированного редкоземельными элементами. В работе сообщается о генерации наносекундных лазерных импульсов на длине волны 1958 нм с низкой (до 100 Гц) частотой следования полностью волоконным лазером с модуляцией усиления на основе волокна, легированного тулием. Детально изучены временные характеристики генерируемых на длине волны 1958 нм лазерных импульсов с частотой следования от 100 Гц до 10 кГц. Обнаружено, что необходимая пороговая энергия накачки уменьшается с ростом частоты следования импульсов. Экспериментальные результаты находятся в хорошем соответствии с результатами теоретического обсуждения.*

**Ключевые слова:** низкая частота следования, тулиевый волоконный лазер, лазерный импульс, высокая энергия.

## 1. Введение

Наносекундные лазерные импульсы с высокой энергией привлекательны для многих применений [1–3], например таких, как обработка материалов, биомедицина, зондирование окружающей среды. Наносекундные импульсы с высокой энергией, генерируемые на длине волны  $\lambda = 1.5$  мкм с использованием активных сред, легированных ионами эрбия, широко применяются в атмосферных технологиях, безопасных для зрения [4, 5]. Однако катастрофические тепловые эффекты, возникающие при увеличении мощности накачки, разрушают генерирующую на  $\lambda = 1.5$  мкм лазерную систему в силу присущей ей низкой эффективности оптического преобразования. Излучение лазеров на  $\lambda = 2$  мкм также находится в области длин волн, безопасных для зрения, и перекрывает сильные линии оптического поглощения многих молекул, таких как вода, СО и СО<sub>2</sub>, что могло бы быть использовано в газоанализаторах. Такие лазеры интенсивно исследовались в последние годы. Источник лазерного излучения на  $\lambda = 2$  мкм можно создать на основе волокна, легированного тулием (ВЛТ) [6] или гольмием [7]. Волоконные лазеры на  $\lambda = 2$  мкм с высокой энергией и пиковой мощностью импульса, а также с большой площадью моды, характерной для ВЛТ, появились на рынке недавно.

С развитием волоконной компонентной базы генерация наносекундных импульсов на  $\lambda = 2$  мкм была достигнута путем модуляции излучения РОС-лазера (DFB) с одномодовым волоконным выводом (пигтейлом) [8], модуляции добротности [9] или усиления [10] волоконного ла-

зера. Прямая модуляция излучения РОС-лазеров имеет преимущество, состоящее в гибкости выбора формы импульса и частоты следования импульсов (ЧСИ), однако выходные импульсы обладают очень низкими пиковыми и средней мощностями, что усугубляет проблемы усиления этого излучения до уровня, необходимого для реальных применений [8]. Методы модуляции добротности и усиления позволяют получить наносекундные импульсы гауссовой формы [11–13]. В 2007 г. Минь Цзян и др. сообщили о первой демонстрации стабильных коротких (10 нс) импульсов, генерируемых лазером на волокне, легированном тулием (ЛВЛТ), с быстрой модуляцией усиления и ЧСИ от 2.5 до 50 кГц [11]. В 2012 г. детальное теоретическое исследование ЛВЛТ с быстрой модуляцией усиления было выполнено Чжоу и др. [12]. Они сообщили также о создании полностью волоконного ЛВЛТ с модуляцией усиления, генерирующего на безопасной для зрения длине волны 1940 нм импульсы с частотами следования 10, 20 и 30 кГц. Из-за ограничений мощности, обусловленных волоконными компонентами, импульсы, получаемые непосредственно от генератора с модулированным усилением, не удовлетворяли требованиям реальных применений. Для достижения достаточной энергии импульса необходимо усиливать излучение таких лазеров с помощью последующей цепочки усилителей на основе ВЛТ [8, 14].

Однако, если частота следования затравочных импульсов слишком высока, оптический пробой и тепловые эффекты будут ограничивать работу усилительной системы. Поэтому весьма желательно иметь затравочные импульсы с низкой частотой следования (сотни герц) для получения заданных значений энергии импульса при сохранении мощности накачки на низком уровне [15, 16]. Кроме того, когда ЧСИ становится еще меньше (до десятков герц), методы импульсной накачки [15, 16] могли бы быть использованы для подавления возможных шумов усиленного спонтанного излучения и повышения эффективности усилительной системы. Следовательно, при постоянном усилении чем ниже ЧСИ, тем выше будет энер-

\* Перевод с англ. В.Л.Дербова.

гия выходного импульса. Поэтому во многих работах частота следования затравочных импульсов уменьшается с помощью акустооптических модуляторов еще до входа их в усилительную систему. Ценной и сложной задачей представляется реализация импульсов излучения на  $\lambda = 2$  мкм с низкой частотой следования непосредственно в резонаторе волоконного лазера без использования каких-либо внешних устройств отбора импульсов в свободном пространстве.

В настоящей работе мы исследуем наносекундный ЛВЛТ со сверхнизкой (до 100 Гц) ЧСИ. Накачка осуществляется лазером с электрической модуляцией на  $\lambda = 1550$  нм, а излучение выходных импульсов имеет длину волны 1958 нм и наименьшую их длительность 94 нс. Установлено, что пороговая энергия накачки уменьшается с ростом ЧСИ накачки на  $\lambda = 1550$  нм. Мы считаем, что данный лазер можно непосредственно использовать в качестве затравочного в системах для получения заданных значений энергии импульса при импульсной накачке.

## 2. Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки, основными частями которой являются волоконный импульсный лазер на  $\lambda = 1550$  нм и ЛВЛТ с модуляцией усиления, приведена на рис.1. Волоконный импульсный лазер ( $\lambda = 1550$  нм) состоит из РОС-лазера с одномодовым волоконным выводом на  $\lambda = 1550$  нм, эрбиевого волоконного усилителя (ЭВУ) и усилителя на волокне, легированном эрбием и иттербием (ЭИВУ). РОС-лазер на  $\lambda = 1550$  нм – это коммерческий прибор с накачкой электрическими импульсами, генерирующий наносекундные импульсы. Длительность затравочного импульса излучения на  $\lambda = 1550$  нм может устанавливаться в пределах от 15 до 1000 нс при ЧСИ от 100 Гц до 100 кГц. Основой ЭВУ является легированное эрбием волокно длиной 3.5 м с коэффициентом поглощения  $\sim 10$  дБ/м на  $\lambda = 980$  нм. Накачка ЭВУ осуществляется в сердцевину волокна одномодовым излучением лазерного диода мощностью 700 мВт на  $\lambda = 975$  нм через мультиплексор 980/1550 нм с разделением по длине волны. ЭИВУ состоит из одномодового волокна длиной 5.5 м, легированного эрбием и иттербием, и лазерного диода накачки мощностью 7 Вт с длиной волны 975 нм. Диаметры сердцевины и оболочки ЭИВУ составляют соответственно 7 и 130 мкм, а коэффициент поглощения оболочки равен  $\sim 2$  дБ/м на  $\lambda = 975$  нм. Диодный лазер на  $\lambda = 975$  нм осуществляет накачку ЭИВУ в прямом направ-

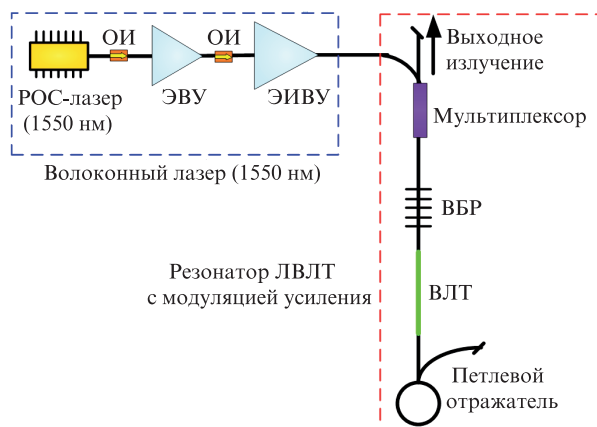


Рис.1. Экспериментальная схема ЛВЛТ с модуляцией усиления.

лении через волоконный объединитель  $(2 + 1) \times 1$ . Для подавления обратного усиленного спонтанного излучения (УСИ) и для защиты РОС-лазера ( $\lambda = 1550$  нм) используются два устройства оптической развязки (ОИ) лазера на  $\lambda = 1550$  нм. После усиления импульсы излучения на  $\lambda = 1550$  нм применяются для накачки ЛВЛТ, генерирующего импульсы в области 2 мкм.

ЛВЛТ с модуляцией усиления состоит из отрезка одномодового ВЛТ длиной 21 см с одной оболочкой, петлевого отражателя и волоконной брэгговской решетки (ВБР). Диаметры сердцевины и оболочки ВЛТ составляют 5 и 125 мкм соответственно при числовой апертуре сердцевины 0.25 и коэффициенте поглощения  $\sim 300$  дБ/м на  $\lambda = 1560$  нм. ВБР, приваренная на один конец ВЛТ, имеет отражательную способность 50% на  $\lambda = 1958$  нм. Другой конец ВЛТ приварен к волоконному петлевому отражателю на основе волоконного разветвителя 50/50 (на  $\lambda = 2$  мкм), используемому как зеркало с высокой отражательной способностью. Полная длина лазерного резонатора составляет около 80 см. ВБР вместе с мультиплексором 1550/2000 нм служит как для ввода излучения накачки на  $\lambda = 1550$  нм в резонатор лазера, так и для вывода излучения на  $\lambda = 1958$  нм, генерируемого лазером с модуляцией усиления. Для измерения лазерных спектров в эксперименте используются два оптических спектроанализатора – Yokogawa AQ6370 и AQ6375. В измерительную систему входит также тепловой измеритель мощности на 3 Вт, высокоскоростной цифровой осциллограф с шириной полосы 1.5 ГГц, а также приемник излучения на  $\lambda = 1550$  нм и детектор фотонов на основе InGaAs для измерения импульсов излучения с  $\lambda = 1958$  нм.

## 3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

### 3.1. Эксперименты по усилению излучения импульсного затравочного лазера на $\lambda = 1550$ нм

В первом эксперименте длительность затравочного импульса излучения на  $\lambda = 1550$  нм устанавливалась равной 1 мкс для достижения максимально возможной энергии импульса. При ЧСИ затравочного лазера  $f$  от 100 Гц до 10 кГц его средняя мощность, измеренная после развязки, изменялась от 0.28 мВт при  $f = 100$  Гц до 5.61 мВт при  $f = 10$  кГц. Затравочный импульс имел прямоугольную огибающую, его длительность составляла примерно 1 мкс, однако из-за истощения усиления импульс становился круче после усиления в ЭИВУ.

На рис.2 приведены зависимости выходной мощности ЭИВУ от мощности накачки и спектральная зависимость интенсивности при различных частотах следования затравочных импульсов. На рис.2,а показана выходная мощность усиляемого излучения на  $\lambda = 1550$  нм в зависимости от мощности диодной накачки на  $\lambda = 975$  нм при частотах следования  $f = 100, 200$  и 500 Гц. При  $f = 100$  Гц рассчитанный наклон аппроксимирующей прямой (дифференциальный КПД  $\eta$ ) составляет всего лишь около 0.6%. Это представляется разумным, поскольку коэффициент заполнения для цуга затравочных импульсов излучения на  $\lambda = 1550$  нм равен только 0.01%, и поэтому затравочная мощность слишком мала и составляет всего лишь 0.05 мВт. С ростом частоты следования затравочных импульсов излучения на  $\lambda = 1550$  нм их мощность и коэффициент заполнения увеличиваются, что приводит к

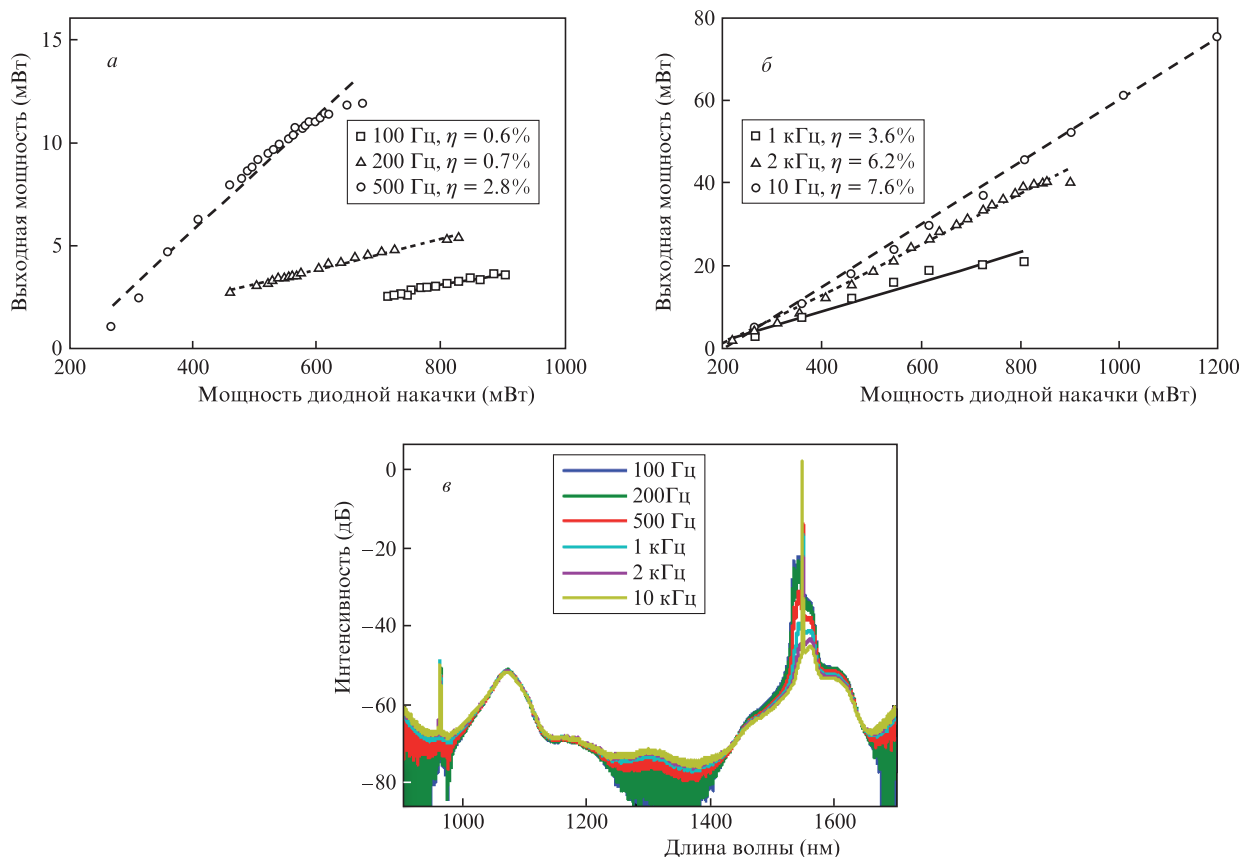


Рис.2. Мощностные характеристики ЭИВУ при различных ЧСИ и дифференциальных КПД (а, б), а также спектры выходного излучения при разных частотах следования (в). Цветной вариант рис.2 помещен на сайте нашего журнала <http://www.quantum-electron.ru>.

росту дифференциального КПД ЭИВУ (рис.2,а). Работу ЭИВУ при  $f = 1, 2$  и  $10$  кГц иллюстрирует рис.2,б. Когда ЧСИ затравочного лазера достигает  $10$  кГц, дифференциальный КПД  $\eta$  увеличивается до  $7.6\%$ , что почти в  $12.7$  раза больше, чем  $\eta = 0.6\%$  при  $f = 100$  Гц.

На рис.2,в приведены измеренные выходные спектры ЭИВУ при различных ЧСИ и неизменной мощности диодной накачки  $810$  мВт. Видно, что выходные спектры в основном состоят из спектров усиленных импульсов излучения на  $\lambda = 1550$  нм, а также из двух спектральных полос УСИ вблизи  $\lambda = 1$  и  $1.5$  мкм. Возникновение этих двух спектральных полос, возможно, связано с присутствием ионов иттербия и эрбия в ЭИВУ.

### 3.2. Генерация лазерных импульсов с модуляцией усиления на $\lambda = 1958$ нм

В следующем эксперименте мы присоединили выходное волокно ЭИВУ к порту на  $\lambda = 1500$  нм мультиплексора с тем, чтобы усиленное излучение лазера на  $\lambda = 1550$  нм могло модулировать усиление ЛВЛТ. Ион тулия имеет широкую полосу поглощения вблизи  $\lambda = 1.5$  мкм; кроме того, мы предполагали, что шум УСИ может поглощаться ВЛТ, поэтому в эксперименте не использовались никакие спектральные фильтры после ЭИВУ. Ожидалась предсказуемая быстрая модуляция усиления, поскольку резонатор ЛВЛТ по схеме накачки внутри полосы был аналогичен описанному ранее в [11]. Населенность энергетического уровня  ${}^3F_4$  ионов тулия можно увеличить почти мгновенно, следуя форме импульса излучения на  $\lambda = 1550$  нм, что является большим преимуществом, обе-

спечивающим исключение релаксационных пиков и генерации стабильных лазерных импульсов на  $\lambda = 2$  мкм.

3.2.1. Частота следования  $10$  кГц. Сначала работа ЛВЛТ изучалась при ЧСИ накачки  $10$  кГц. Пороговая мощность накачки для лазера с модуляцией усиления на ВЛТ составляет  $70$  мВт, что соответствует энергии импульса накачки примерно  $7.6$  мкДж. На рис.3 показан выходной спектр ЛВЛТ с модуляцией усиления при мощности накачки  $92$  мВт, измеренный со спектральным разрешением  $0.2$  нм. На рис.3,а наблюдается узкополосный спектр сигнала на  $\lambda = 1958$  нм с выходной мощностью  $10.7$  мВт при оптическом отношении сигнал/шум лучше  $50$  дБ. Выходная мощность сигнала на  $\lambda = 1958$  нм линейно растет с ростом мощности накачки, причем наклон аппроксимирующей прямой составляет  $48.5\%$  (рис.3,б).

На рис.3,в представлена зависимость энергии и длительности сигнальных импульсов, генерируемых на  $\lambda = 1958$  нм, от мощности накачки на  $\lambda = 1550$  нм. Видно, что энергия импульса линейно растет с увеличением мощности накачки, тогда как длительность импульса экспоненциально убывает, что приводит к росту пиковой мощности выходного импульса. Измеренная энергия импульса возрастает от  $0$  до  $3$  мкДж, а длительность импульса убывает от  $198$  до  $94$  нс, что вызывает увеличение пиковой мощности импульса до  $30$  Вт. Однако дальнейший рост пиковой мощности ограничен, поскольку когда мощность (энергия импульса) накачки становится слишком большой, один сигнальный лазерный импульс не в состоянии использовать всю инверсию населенностей, поэтому генерируется дополнительный субимпульс. Экспери-

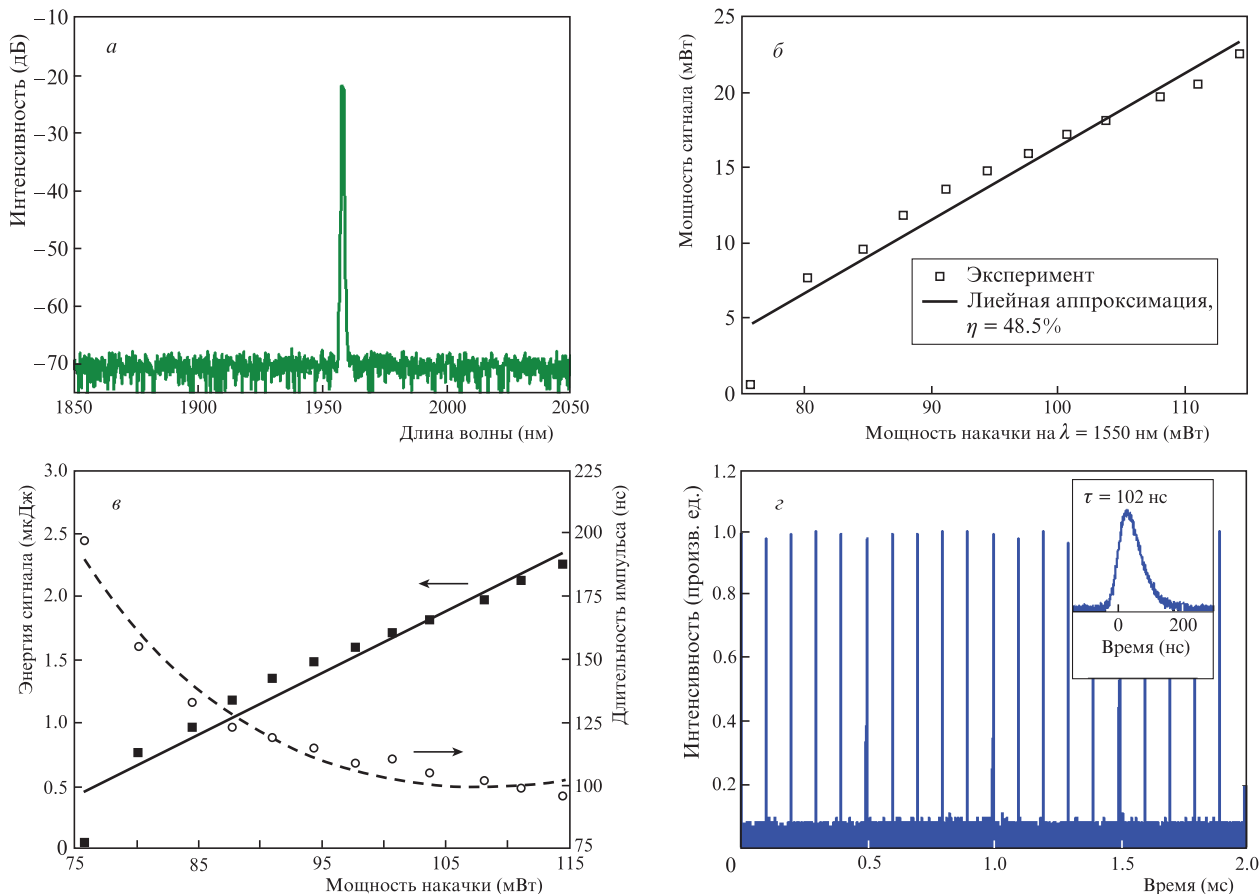


Рис.3. Выходной спектр ЛВЛТ (а), выходная мощность как функция мощности накачки на  $\lambda = 1550$  нм (б), энергия и длительность выходного импульса как функции мощности накачки (в) и цуг импульсов на выходе ЛВЛТ (г) при частоте следования 10 кГц. На вставке на рис.3,г показана форма импульса длительностью  $\tau = 102$  нс.

ментально установлено, что при мощности накачки на  $\lambda = 1550$  нм более 115 мВт генерация второго импульса приводит к временной нестабильности выходных импульсов. Наблюдаемая стабильная генерация цуга выходных импульсов при  $f = 10$  кГц показана на рис.3,г.

3.2.2. *Сверхнизкая частота следования.* Далее мы исследовали работу лазера с модуляцией усиления при сверхнизкой (менее 10 кГц) ЧСИ. Измерялись те же самые характеристики: зависимости энергии выходного импульса и его длительности от мощности накачки на  $\lambda = 1550$  нм. На рис.4 показаны экспериментальные зависимости энергии выходного импульса и его длительности

от мощности накачки лазера с модуляцией усиления на частотах 100 Гц и 1 кГц. Из рис.4,а видно, что энергия генерируемого импульса лежит в интервале от 0 до 2 мкДж, а длительность импульса меняется от 200 до 100 нс. Эти результаты очень сильно зависят от таких параметров лазерного резонатора, как отражательная способность выходного зеркала и полная длина резонатора, но не зависят от ЧСИ накачки. Однако измеренная пороговая энергия цуга импульсов накачки существенно различается для разных частот следования: так, например, для  $f = 100$  Гц, 200 Гц и 10 кГц она составляет 25.8, 15.2 и 7.6 мкДж соответственно.

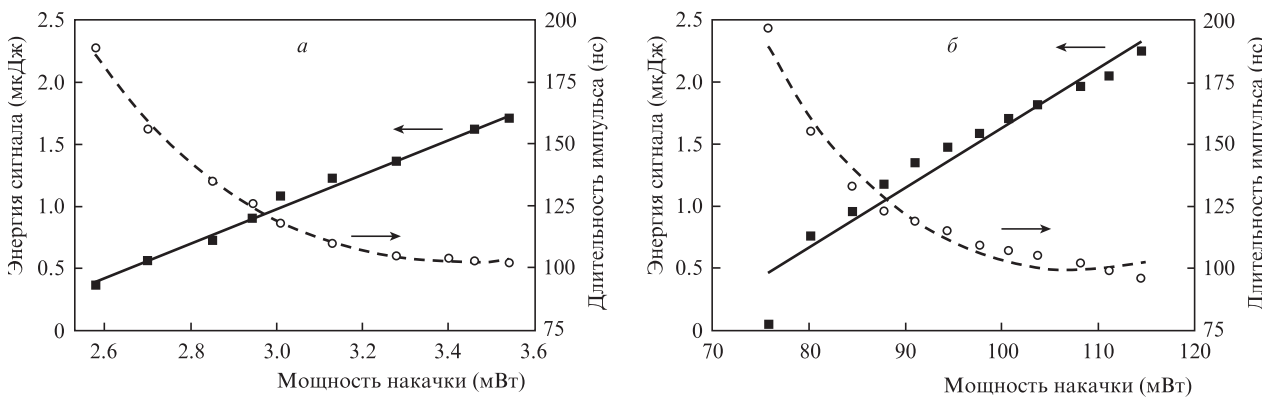


Рис.4. Энергия выходного импульса и его длительность в зависимости от мощности накачки лазера с модуляцией усиления при частотах следования 100 Гц (а) и 1 кГц (б).



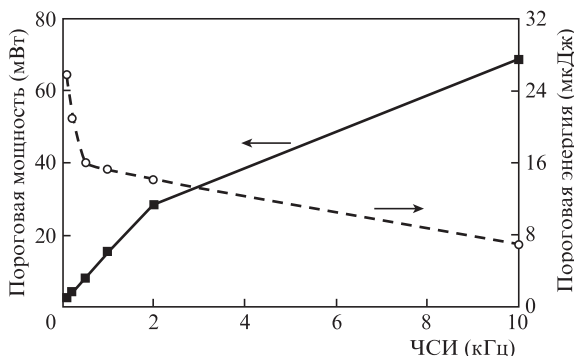


Рис.5. Пороговая мощность (эксперимент) и энергия (расчет) импульса накачки для данного ЛВЛТ с модуляцией усиления при разных ЧСИ.

На рис.5 приведены пороговые мощность и энергия импульса накачки для данного лазера с модуляцией усиления при различных ЧСИ. Видно, что при неизменных параметрах резонатора ЛВЛТ пороговая мощность и энергия импульса различны при разных ЧСИ накачки. Так, с ростом частоты пороговая энергия импульса накачки уменьшается. Считается, что это явление связано с самим принципом модуляции усиления ЛВЛТ. Плотность населенности верхних лазерных уровней может возрастать благодаря поглощению импульса накачки, но она снижается за время пауз между импульсами. Чем ниже ЧСИ, тем дольше происходит релаксация населенностей, и, следовательно, суммарное накопление населенностей возбужденных состояний при низких ЧСИ будет ниже, чем при высоких. Поэтому пороговая энергия импульса накачки ЛВЛТ, равная 25.8 мкДж при ЧСИ накачки 100 Гц, уменьшается с ростом этой частоты. Как отмечалось выше, пороговая энергия импульса накачки составляет 7.6 мкДж при частоте следования 10 кГц.

Цуги выходных сигнальных импульсов излучения на  $\lambda = 1958$  нм показаны на рис.6. Видно, что они весьма стабильны даже при столь низких ЧСИ. Достигнутый нижний предел частоты следования импульсов ЛВЛТ с модуляцией усиления ограничивается возможностями задающей системы на основе импульсного затравочного лазера на  $\lambda = 1550$  нм. Можно получить и существенно более

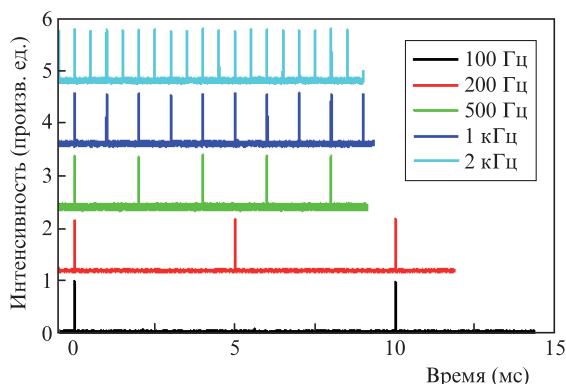


Рис.6. Цуги выходных импульсов со сверхнизкой частотой следования.

низкую частоту следования – до нескольких десятков герц или до нескольких герц, используя модуляцию излучения лазерного диода накачки на  $\lambda = 1550$  нм.

Длительность генерируемых ЛВЛТ с модуляцией усиления импульсов обычно равна нескольким временам жизни фотона в резонаторе  $T_c$ , которое определяется известной формулой:  $T_c = 2nLc^{-1}(-\ln R_1 R_2 + 2\alpha L)$ . Для нашей экспериментальной установки это время составляет примерно 13.8 нс, а измеренная длительность наиболее короткого импульса при стабильной работе ЛВЛТ с модуляцией усиления примерно равна 94 нс, что в 5.8 раза больше  $T_c$ . Одним из возможных эффективных путей дальнейшего уменьшения длительности генерируемого импульса является уменьшение полной длины резонатора лазера  $L$  и потеря излучения  $\alpha$  или изменение коэффициентов отражения  $R_1$  и  $R_2$  с целью уменьшения времени жизни фотонов в резонаторе.

#### 4. Заключение

В настоящей работе продемонстрирован стабильный ЛВЛТ с модуляцией усиления, генерирующий импульсы излучения на длине волны 1958 нм со сверхнизкой ЧСИ. Детально исследованы временные и мощностные характеристики ЛВЛТ при частотах следования от 100 Гц до 10 кГц. Обнаружено, что при накачке ЛВЛТ с низкой ЧСИ пороговая энергия импульса накачки увеличивается из-за огромного затухания инверсии населенностей за время паузы между импульсами. Мы полагаем, что данный ЛВЛТ может быть использован в качестве затравочного в системах для получения заданных значений энергии импульса при прямой импульсной накачке.

- Wei Shi, Qiang Fang, Xiushan Zhu, Norwood R.A., Peyghambarian N. *Appl. Opt.*, **53**, 6554 (2014).
- Geng J., Wang Q., Jiang S. *Proc. SPIE*, **8164**, 816409 (2011).
- Richardson D.J., Nilsson J., Clarkson W.A. *J. Opt. Soc. Am. B*, **27**, B63 (2010).
- Desmoulin S., Di Teodoro F. *Opt. Express*, **16**, 2431 (2008).
- Khitrov V., Shkunov V.V., Rockwell D.A., Zakharenkov Y.A., Strohkind F. *Opt. Lett.*, **37**, 3963 (2012).
- Eichhorn M. *IEEE J. Quantum Electron.*, **41**, 1574 (2005).
- Simakov N., Hemming A., Clarkson W.A., Haub J., Carter A. *Opt. Express*, **21**, 28415 (2013).
- Heidt A.M., Li Z., Sahu J., Shardlow P.C., Becker M., Rothhardt M., Ibsen M., Phelan R., Kelly B., Alam S.U. *Opt. Lett.*, **38**, 1615 (2013).
- Jihong Geng, Qing Wang, Jake Smith, Tao Luo, Farzin Amzajerdian, Shibin Jiang. *Opt. Lett.*, **34**, 3713 (2009).
- Yulong Tang, Lin Xu, Yi Yang, Jianqiu Xu. *Opt. Express*, **18**, 22964 (2010).
- Min Jiang, Parviz Tayebati. *Opt. Lett.*, **32**, 1797 (2007).
- Zhou Ren-Lai, Ju You-Lun, Zhao Jie, Yang Chao, Wang Yue-Zhu. *Chin. Phys. B*, **22** (6), 064208 (2013).
- Ke Yin, Weiqiang Yang, Bin Zhang, Sheng Zeng, Jing Hou. *J. Opt. Soc. Am. B*, **30**, 2864 (2013).
- Xu J., Xu L., Tang Y. *Proc. Lasers and Electro-Optics (CLEO) and Quantum Electronics and Laser Science Conference (QELS) (IEEE, 2010, pp 1, 2)*.
- Peng Wan, Jian Liu, Lih-Mei Yang, Farzin Amzajerdian. *Opt. Express*, **19**, 18067 (2011).
- Chao Zheng, Mali Gong, Haitao Zhang, Ping Yan, Qirong Xiao, Ming Liu. *J. Opt.*, **15**, 052201 (2013).