

# Квазирегенеративная синхронизация мод в компактном цельноволоконном лазере с сохранением поляризации

Б.Н.Нюшков, А.В.Иваненко, С.М.Кобцев, В.С.Пивцов,  
С.А.Фарносов, П.В.Покасов, И.И.Корель

*Разработана и предварительно исследована оригинальная схема синхронизации мод в цельноволоконном эрбиевом лазере с сохранением поляризации. Предложенная нами «квазирегенеративная» схема объединяет в себе преимущества обычной активной синхронизации мод (когда внутрирезонаторный модулятор управляется сигналом от независимого радиочастотного генератора) и регенеративной синхронизации мод (когда модулятор управляется сигналом межмодовых биений самого лазерного излучения). Такая схема основывается на использовании задающего радиочастотного генератора в режиме фазовой автоподстройки его частоты по фактической межмодовой частоте лазерного излучения с возможностью работы на кратных частотах и реализации гармонических режимов синхронизации мод.*

**Ключевые слова:** волоконный лазер, синхронизация мод, модулятор интенсивности.

## 1. Введение

Волоконные лазеры с синхронизацией мод, генерирующие регулярную последовательность ультракоротких импульсов, могут успешно применяться для решения многих фундаментальных и прикладных задач. Особенно привлекательны с практической точки зрения лазеры с цельноволоконной, сохраняющей поляризацию конструкцией резонатора, не использующие прецизионно юстируемые оптомеханические элементы. В зависимости от способа достижения синхронизация мод в цельноволоконных лазерах бывает пассивной и активной.

Пассивная синхронизация может быть реализована с помощью различных типов насыщающихся поглотителей в резонаторе (например, на основе полупроводников [1], углеродных наночастиц [2] и других веществ [3]). Недостатком такого подхода является то, что невысокая лучевая стойкость поглотителей и их динамические характеристики существенно ограничивают достижимые вре-

менные и энергетические параметры импульсной генерации.

Другим подходом к реализации пассивной синхронизации мод является использование нелинейных эффектов, возникающих непосредственно в волоконных световодах резонатора. Типичным способом является использование нелинейного двулучепреломления в резонаторе с поляризационным дискриминатором [4, 5] либо нелинейного фазового сдвига импульсов в резонаторе с нелинейным петлевым зеркалом [6]. Такой подход свободен от некоторых недостатков, присущих применению насыщающихся поглотителей, но требует использования резонаторов несколько более сложной конструкции и элементов прецизионной юстировки. Разъюстировка резонатора или незначительный уход параметров накачки могут приводить к ухудшению или даже срыву режима синхронизации мод в подобных лазерах. Запуск режима синхронизации мод в таких лазерах (от включения к включению) может требовать подстройки юстировочных элементов резонатора и (или) мощности накачки.

Отметим, что не все из перечисленных способов синхронизации мод позволяют использовать цельноволоконные резонаторы, полностью предотвращающие эволюцию состояния поляризации излучения генерации. Кроме того, пассивная синхронизация мод ограничивает возможность реализации стабильных гармонических (многимпульсных) режимов генерации.

В связи с вышесказанным активно исследуются и применяются различные способы активной синхронизации мод (АСМ) в волоконных лазерах. В большинстве случаев для этого используется внутрирезонаторный модулятор (обычно – волоконный электрооптический модулятор интенсивности, реализованный по схеме интерферометра Маха–Цендера). На модулятор с внешнего задающего радиочастотного (РЧ) генератора подается периодический сигнал, который в общем случае должен обеспечивать амплитудную модуляцию с частотой  $f_{\text{mod}}$ , кратной фундаментальной межмодовой частоте резонатора  $f_{\text{im}}$ :

**Б.Н.Нюшков.** Институт лазерной физики СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 15Б; Новосибирский государственный университет, Россия, 630090 Новосибирск, ул. Пирогова, 2; Новосибирский государственный технический университет, Россия, 630073, Новосибирск, просп. К.Маркса, 20; e-mail: nyushkov@laser.nsc.ru

**А.В.Иваненко, С.М.Кобцев.** Новосибирский государственный университет, Россия, 630090 Новосибирск, ул. Пирогова, 2; e-mail: ivanenko.aleksey@gmail.com, kobtsev@lab.nsu.ru

**В.С.Пивцов.** Институт лазерной физики СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 15Б; Новосибирский государственный технический университет, Россия, 630073, Новосибирск, просп. К.Маркса, 20; e-mail: pivtsov@laser.nsc.ru

**С.А.Фарносов, П.В.Покасов.** Институт лазерной физики СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 15Б; e-mail: sergfar@ngs.ru, pokasov@laser.nsc.ru

**И.И.Корель.** Новосибирский государственный технический университет, Россия, 630073, Новосибирск, просп. К.Маркса, 20; e-mail: ikorel@gmail.com

Поступила в редакцию 20 сентября 2017 г., после доработки – 23 октября 2017 г.

$$f_{\text{mod}} = n f_{\text{im}} = nc/L,$$

где  $c$  – скорость света;  $L$  – оптическая длина полного оборота резонатора (на длине волны генерации);  $n = 1, 2, 3, \dots$

Таким образом, можно получить либо режим синхронизации мод с фундаментальной частотой следования импульсов ( $f_{\text{rep}} = f_{\text{im}}$ ), либо гармоническую синхронизацию мод с частотой следования импульсов, многократно превышающей фундаментальную частоту ( $f_{\text{rep}} = n f_{\text{im}}$ ). Такие способы активной синхронизации мод исследовались и в волоконных лазерах с небольшой длиной резонатора и высокой частотой следования импульсов [7, 8], и в волоконных лазерах со сверхдлинными резонаторами и низкой (субмегагерцевой) фундаментальной частотой их следования [9].

Основным фактором, ограничивающим долговременную стабильность (устойчивость) режима активной синхронизации мод, является случайное рассогласование модулирующей частоты  $f_{\text{mod}}$  (частота задающего генератора) и межмодовой частоты резонатора  $f_{\text{im}}$ . Величина рассогласования частот может накапливаться со временем из-за дрейфа частоты недостаточно стабильного задающего генератора и дрейфа оптической длины резонатора волоконного лазера вследствие изменения условий окружающей среды (температуры, давления), а также механических релаксационных процессов в элементах резонатора.

Известно, однако, что в резонаторе с ненулевой хроматической дисперсией такое рассогласование частоты модуляции и межмодовой частоты компенсируется до определенной степени за счет так называемого эффекта затягивания частоты. Этот эффект состоит в том, что при небольшой плавной отстройке частоты модулирующего РЧ сигнала от начального значения, при котором была достигнута устойчивая синхронизация мод, происходит плавная перестройка центральной длины волны генерации без срыва режима синхронизации. В результате изменения длины волны генерации при ненулевой внутрирезонаторной хроматической дисперсии происходит изменение величины групповой задержки в резонаторе, а значит и периода/частоты следования импульсов вслед за изменением модулирующей частоты  $f_{\text{mod}}$ .

Эффект автоподстройки длины волны и частоты следования импульсов вслед за изменением модулирующей частоты исследовался ранее как в волоконных лазерах с высокочастотной (в том числе гармонической) АСМ [7, 8], так и в сверхдлинных волоконных лазерах с низкочастотной АСМ [9].

Экспериментально было установлено, что затягивание частоты и сопутствующая дисперсионная автоподстройка длины волны генерации и частоты следования импульсов позволяют поддерживать качественный режим синхронизации мод без существенного ухудшения параметров генерации лишь при незначительном рассогласовании частоты модуляции (частоты задающего генератора) с межмодовой частотой резонатора или с кратной ей частотой. Как правило, предельное относительное рассогласование модулирующей частоты и частоты следования, определяемой оптической длиной резонатора, не превышает  $\sim 10^{-5}$ .

Для долговременного поддержания высокостабильного режима АСМ возможно применение такого метода активной стабилизации, как одновременная автоподстройка межмодовой частоты резонатора лазера (посред-

ством автоподстройки оптической длины резонатора с помощью пьезокерамического актюатора) и частоты сигнала управляющего внутрирезонаторным модулятором по внешнему высокостабильному опорному РЧ генератору (стандарту частоты) с использованием электронных систем фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). Этот метод позволяет достичь высокой долговременной стабильности частотно-временных параметров генерации [10], однако техническая реализация такой системы достаточно сложна и не всегда оправдана (избыточна для большинства применений, не связанных с системами прецизионной частотно-временной метрологии [11, 12]).

Другим подходом к долговременному поддержанию устойчивого режима АСМ в волоконном лазере без использования схем автоподстройки оптической длины резонатора и высокостабильных опорных РЧ генераторов является простая регенеративная синхронизация мод. При таком способе синхронизации управляющий РЧ сигнал (частота модуляции) для внутрирезонаторного модулятора интенсивности формируется непосредственно из сигнала межмодовых биений, детектируемых с помощью фотодиода на выходе лазера [13]. При регенеративной синхронизации в волоконных лазерах в схему детектирования и формирования задающего РЧ сигнала, помимо фотоприемника, обычно входят высокочастотный диэлектрический (керамический) фильтр и маломощный усилитель с высоким коэффициентом усиления, а также регулируемый фазовращатель. Схема настраивается на работу на какой-то определенной высшей гармонике межмодовой частоты  $f_{\text{im}}$  и обеспечивает устойчивую гармоническую синхронизацию мод с соответствующей частотой следования импульсов (как правило, очень высокой, до  $\sim 10$  ГГц) [14]. Такой подход обеспечивает хорошее соответствие между частотой модуляции и соответствующей гармоникой межмодовой частоты без необходимости какой-либо стабилизации оптической длины резонатора. Кроме того, не требуется применение внешнего высокостабильного задающего опорного РЧ генератора. К недостаткам подобной регенеративной синхронизации мод можно отнести потенциальную возможность переноса амплитудного шума (флуктуаций амплитуды) межмодовых биений в модулирующий сигнал, что может приводить к ухудшению шумовых характеристик лазера. Данная проблема обычно решается использованием в схеме формирования задающего РЧ сигнала усилителя-ограничителя (усилитель в режиме насыщения) [15]. Это несколько усложняет схему и обуславливает дополнительные требования к учету и коррекции фазового набега в схеме регенеративной синхронизации мод. Кроме того, поскольку подобная регенеративная схема обычно изготавливается под определенную весьма высокую гармонику межмодовой частоты (частоты следования импульсов), она не может быть быстро перестроена для работы на других гармониках или фундаментальной частоте без изменения элементной базы.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование возможности создания компактного цельноволокномного эрбиевого лазера с сохранением поляризации, в котором устойчивый режим синхронизации мод поддерживался бы автоматически с помощью простого схемотехнического решения, сочетающего в себе методы обычной АСМ и регенеративной синхронизации мод. Предложенное решение должно также предусматривать возможность синхронизации мод как на фундамен-

тальной межмодовой частоте, так и на ее гармониках (гармонический режим синхронизации мод). Требуемый диапазон перекрытия частот следования импульсов, для которого предназначена разрабатываемая схема, составляет от 10 до 100 МГц. Подобный лазерный источник с предельно устойчивым режимом синхронизации мод, с сохранением поляризации и высоким качеством пучка может использоваться для решения различных экспериментальных задач в фотонике и метрологии [16], а также при разработке новых телекоммуникационных, медицинских и промышленных технологий.

## 2. Эксперимент

Предлагаемая конструкция основана на использовании цельноволокнового кольцевого резонатора, все световоды и элементы которого сохраняют поляризацию. Схема реализованного волоконного эрбиевого лазера и блока формирования задающего РЧ сигнала для автоматического поддержания режима активной синхронизации мод изображена на рис. 1.

Кольцевой резонатор сформирован из сохраняющего поляризацию эрбиевого волоконного усилителя на основе коммерческого, сохраняющего поляризацию волокна, легированного ионами эрбия (Nufern PM-ESF-7/125), накачка которого осуществляется лазерным диодом на длине волны 980 нм. Однонаправленный режим генерации поддерживается в резонаторе с помощью сохраняющего поляризацию волоконно-оптического изолятора. Для вывода излучения генерации из резонатора используется сохраняющий поляризацию 20%-ный волоконно-оптический ответвитель (ОВ1), после которого часть выходного излучения с помощью еще одного ответвителя (ОВ2) перенаправляется в оптоэлектронный блок формирования задающего РЧ сигнала для внутррезонаторного модулятора (обозначен как «драйвер режима синхронизации

мод»). В нем с помощью быстродействующего фотоприемника (на основе точечного InGaAs-фотодиода) и электронных цепей фильтрации и усиления выделяется опорный РЧ сигнал, частота которого определяется частотой межмодовых биений лазерного излучения. Задающий РЧ сигнал для внутррезонаторного модулятора формируется с помощью генератора, управляемого напряжением (ГУН), интегрального исполнения (Mini-circuits, серия JTOS). Его частота сравнивается с детектируемой фотодиодом частотой межмодовых биений (опорной частотой) в цифровом фазочастотном детекторе (ФЧД) на основе интегральной схемы AD9901KQ. При ненулевом сигнале ошибки с помощью замкнутой петли обратной связи (ОС) происходит фазовая автоподстройка частоты ГУН по фактической частоте межмодовых биений. Для настройки и оптимизации ФАПЧ ГУН и для реализации возможности гармонической синхронизации мод (на различных высших гармониках межмодовой частоты) схема драйвера содержит ряд дополнительных элементов. К ним относятся регулируемые делители частоты ( $1/N$ ) на входе ФЧД, регулируемое интегральное звено в цепи ОС, регулируемый фазовращатель (ФВ), а также сумматор напряжения на входе ГУН, позволяющий задавать начальную частоту генератора. Последнее осуществляется подачей на сумматор регулируемого с помощью потенциометра опорного напряжения  $U_{ref}$ .

В качестве модулятора в резонаторе использовался телекоммуникационный электрооптический модулятор интенсивности, реализованный по схеме Маха–Цендера (Photline MX-LN-40). Модулятор имеет волоконный вход и выход с сохранением поляризации. Полуволновое напряжение по радиочастотному входу модулятора составляет около 5 В, полуволновое напряжение по входу смещения – около 6 В. Подаваемое на модулятор напряжение смещения  $U_{bias}$  в разработанной схеме регулируется с помощью потенциометра. В предварительных экспери-

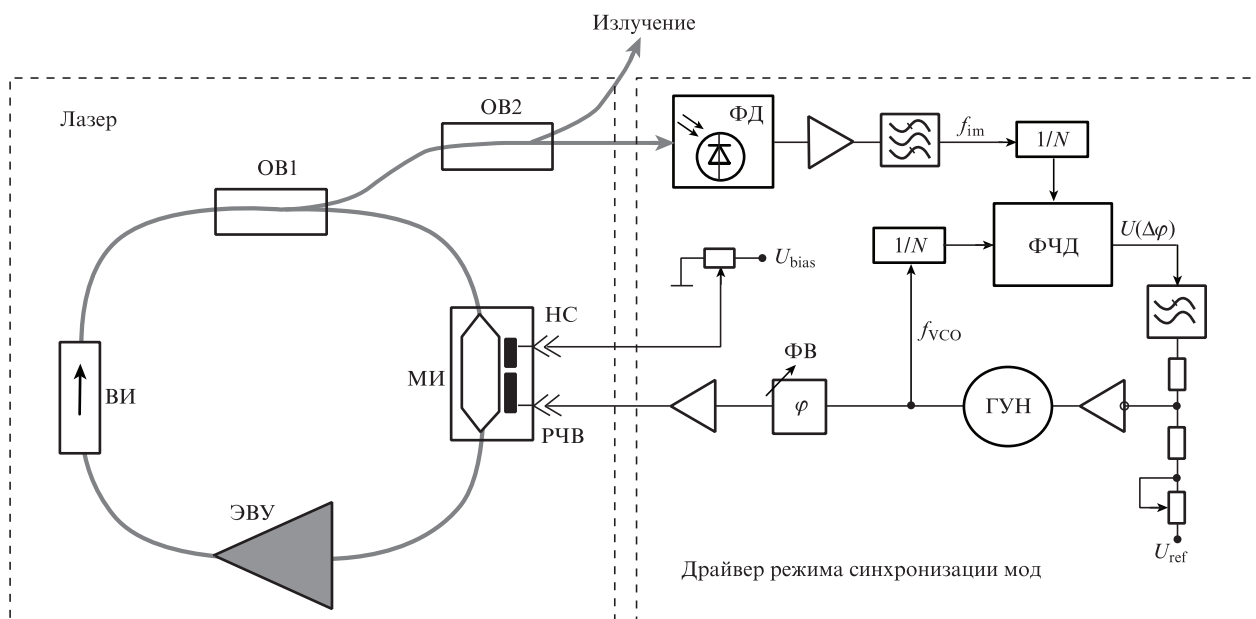


Рис. 1. Схема резонатора волоконного лазера и электронного драйвера режима синхронизации мод:

МИ – модулятор интенсивности излучения (НС – вход для подачи напряжения смещения; РЧВ – радиочастотный вход модулятора); ЭВУ – эрбиевый волоконный усилитель; ВИ – волоконно-оптический изолятор; ОВ1, ОВ2 – ответвители волоконно-оптические; ФД – фотодиод для детектирования межмодовых биений;  $1/N$  – регулируемые делители радиочастоты; ФЧД – фазочастотный детектор; ГУН – генератор управляемый напряжением;  $U_{ref}$  – регулируемое опорное напряжение для ГУН; ФВ – регулируемый фазовращатель;  $U_{bias}$  – регулируемое напряжение смещения для модулятора интенсивности;  $f_{VCO}$  – частота выходного сигнала ГУН.

ментах устанавливалось такое напряжение смещения, чтобы рабочая точка находилась вблизи половины максимума передаточной функции модулятора. Амплитуда радиочастотного сигнала на входе модулятора также регулировалась. Она подбиралась экспериментальным путем для достижения наилучшей синхронизации мод с учетом неизбежного компромисса между увеличением глубины модуляции и возрастанием ее нелинейности.

Суммарная оптическая длина всего резонатора соответствовала фундаментальной межмодовой частоте  $\sim 13.8$  МГц (для длин волн вблизи 1.56 мкм).

### 3. Результаты и их обсуждение

Для запуска режима синхронизации мод достаточно было с помощью подстроечного потенциометра установить такое опорное напряжение для ГУН ( $U_{ref}$ ), чтобы частота модуляции стала приблизительно равной фундаментальной межмодовой частоте лазера или кратной ей (для случая гармонической синхронизации). После этого требовалось с помощью тумблера замкнуть петлю ОС для запуска автоподстройки частоты ГУН. Широкий диапазон захвата системы ФАПЧ ГУН допускает достаточно грубую установку начальной частоты ГУН, с погрешностью до 10% от фактического значения межмодовой частоты лазера.

При запуске режима синхронизации мод происходило существенное уширение оптического спектра излучения лазера (рис.2). Измерение проводилось с помощью оптического анализатора спектра Yokogawa AQ6370 с разрешением 0,02 нм.

Кроме того, с помощью быстродействующего точечного InGaAs-фотодиода и широкополосного радиочастотного анализатора спектра Tektronix RSA3308B регистрировался радиочастотный спектр межмодовых биений лазера. На рис.3 приведен РЧ спектр гребенки частот межмодовых биений в режиме синхронизации мод, полученной при осуществлении модуляции с частотой, равной фундаментальной межмодовой частоте. Даже высокочастотные компоненты спектра межмодовых биений имели в данном режиме высокое отношение сигнал/шум ( $\sim 60$  дБ), что свидетельствовало о надлежащем качестве синхронизации мод. Осциллограмма генерируемой при этом регулярной последовательности импульсов с фундаментальной частотой следования приведена на рис.4. Для измерения использовался осциллограф Tektronix DPO7254 с временным разрешением  $\sim 0.4$  нс. Средняя выходная мощность излучения генерации в представленном режиме до-

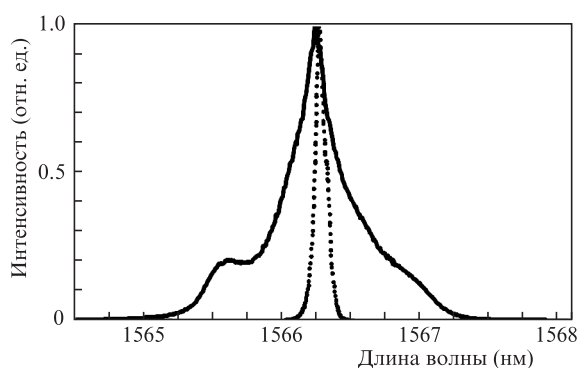


Рис.2. Оптические спектры излучения лазера в режиме свободной генерации (пунктир) и в режиме синхронизации мод (сплошная кривая).

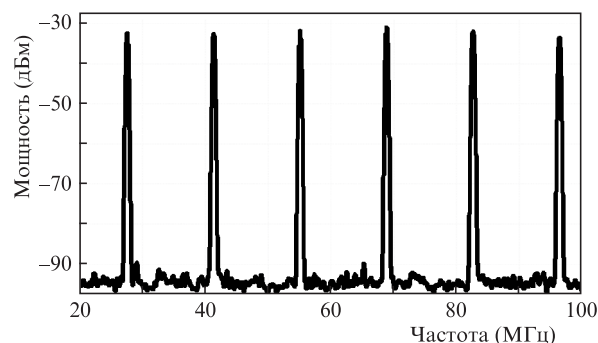


Рис.3. Радиочастотный спектр межмодовых биений лазера в режиме синхронизации мод при модуляции на фундаментальной межмодовой частоте ( $f_{mod} = f_{im}$ ); разрешение анализатора 300 кГц.

стигала  $\sim 25$  мВт, что соответствует энергии импульсов  $\sim 1.8$  нДж. Грубая оценка длительности импульсов по ширине оптического спектра (в спектрально-ограниченном приближении  $\text{sech}^2$ -импульса) дает величину около 6 пс.

Было установлено, что благодаря фазовой автоподстройке частоты ГУН (при оптимальной настройке фазовращателя и амплитуды сигнала на РЧ входе модулятора) режим синхронизации мод может поддерживаться в лазере непрерывно практически неограниченное время. Тестирование проводилось на протяжении суток без применения каких-либо мер дополнительной пассивной или активной стабилизации резонатора лазера в лабораторных условиях со значительным (на несколько градусов Цельсия) суточным изменением температуры окружающей среды. Дополнительные механические воздействия на резонатор лазера (вибрация, изгибы волокна) также не приводили к срыву синхронизации мод.

Было проведено предварительное тестирование запуска режима гармонической синхронизации. Для этого с помощью регулировочного потенциометра опорное напряжение ГУН устанавливалось таким, чтобы частота ГУН в режиме разомкнутой петли ОС была приблизительно равна удвоенному значению фундаментальной межмодовой частоты (т.е.  $\sim 27.6$  МГц). Для выделения этой частоты в схеме детектирования межмодовых биений устанавливался соответствующий фильтр, после чего с целью автоподстройки частоты ГУН замыкалась петля ОС. Для оптимизации режима подстраивались фазовращатель и амплитуда задающего РЧ сигнала на входе модулятора. В результате был получен устойчивый режим синхронизации мод с двумя импульсами на периоде обхода резонатора. Так же как и режим синхронизации с фун-

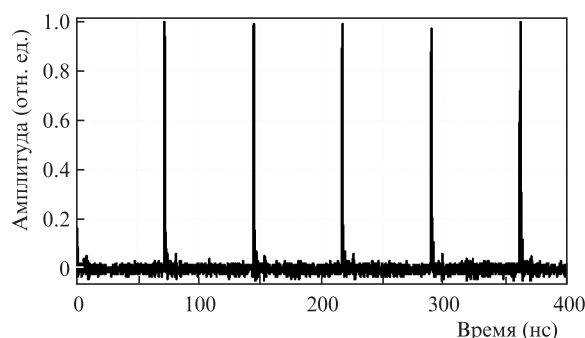


Рис.4. Осциллограмма генерируемой последовательности импульсов с фундаментальной частотой следования ( $f_{rep} = f_{im}$ ).

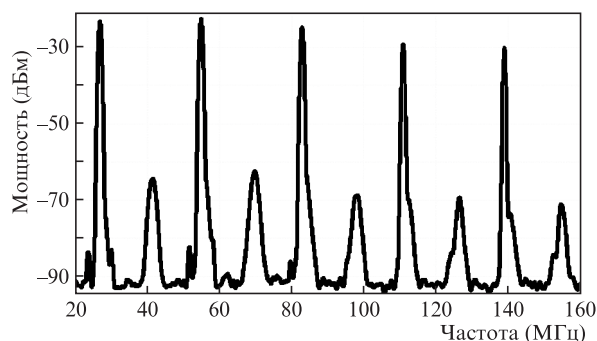


Рис.5. Радиочастотный спектр межмодовых биений в режиме гармонической синхронизации мод ( $f_{\text{mod}} = 2f_{\text{im}}$ ); разрешение анализа 500 кГц.

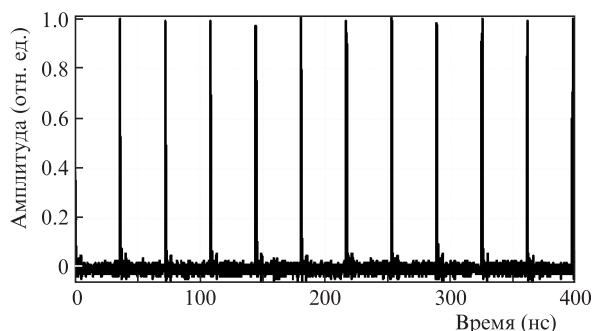


Рис.6. Осциллограмма регулярной последовательности импульсов, генерируемой в режиме гармонической синхронизации мод ( $f_{\text{rep}} = 2f_{\text{im}}$ ).

даментальной частотой следования импульсов, режим гармонической синхронизации демонстрировал устойчивость и стабильность своих характеристик в течение продолжительного времени без применения каких-либо специальных мер стабилизации лазера. На рис.5 и 6 приведены результаты измерений некоторых характеристик данного режима, а именно радиочастотного спектра межмодовых биений (подавление биений на основной частоте составляет  $-35$  дБ) и осциллограммы генерируемой регулярной последовательности импульсов (частота следования импульсов в два раза превышает фундаментальную).

В дальнейшем предполагается более подробное исследование гармонических режимов синхронизации мод с помощью предложенной схемы на частотах, многократно превышающих фундаментальную межмодовую частоту. Кроме того, планируется поиск оптимальных настроек драйвера для различных режимов синхронизации мод. Это потребует регулирования параметров всего контура ФАПЧ ГУН и установления оптимального режима модуляции, который зависит от положения рабочей точки на передаточной функции модулятора и от амплитуды модулирующего сигнала.

#### 4. Заключение

В настоящей работе реализован и предварительно исследован компактный цельноволокнный эрбиевый лазер с сохранением поляризации, в котором применена оригинальная оптоэлектронная схема, автоматически поддерживающая режим синхронизации мод посредством внутривибрационной амплитудной модуляции. Разработанная схема сочетает принцип прямой регенера-

тивной синхронизации мод с использованием простого задающего генератора на основе ГУН с фазовой автоподстройкой по фактической межмодовой частоте лазера. Такая «квазирегенеративная» схема проста в исполнении и обеспечивает поддержание устойчивого режима синхронизации неограниченное время без применения каких-либо специальных средств стабилизации оптической длины резонатора и защиты его от существенных изменений условий окружающей среды.

В отличие от традиционной схемы регенеративной синхронизации мод, реализованная схема исключает фактор привнесения амплитудных шумов в задающий РЧ сигнал, в целом способна обеспечить более чистую модуляцию, а значит, меньший уровень шумов в выходном излучении лазера. Кроме того, реализованная схема отличается гибкостью конфигурирования, позволяя легко переключаться с фундаментальной межмодовой частоты на гармонические режимы синхронизации. Подобный лазерный источник коротких импульсов может использоваться для решения широкого круга прикладных задач благодаря предельно высокой устойчивости режима синхронизации мод.

С.М.Кобцев выполнял работу при поддержке Российского научного фонда (грант № 17-12-01281), А.В.Иваненко – при поддержке РФФИ (гранты № 16-32-60160 мод\_а\_дк и 16-02-00104), И.И.Корель – при поддержке Министерства образования и науки РФ (проект № 3.8051.2017/8.9). Работа остальных авторов выполнялась в рамках госзадания (регистрационный номер АААА-А17-117030310294-3) и при поддержке гранта Президента РФ государственной поддержки ведущих научных школ РФ № НШ-6689.2016.2. В работе использовалось оборудование ЦКП «Фемтосекундный лазерный комплекс».

- Keller U., Weingarten K.J., Kartner F.X., Kopf D., Braun B., Jung I.D., Fluck R., Honninger C., Matuschek N., Aus der Au J. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **2**, 435 (1996).
- Kobtsev S., Ivanenko A., Gladush Y.G., Nyushkov B., Kokhanovskiy A., Anisimov A.S., Nasibulin A.G. *Opt. Express*, **24**, 28768 (2016).
- Wang Z., Zhan L., Wu J., Zou Z., Zhang L., Qian K., He L., Fang X. *Opt. Lett.*, **40**, 3699 (2015).
- Tamura K., Ippen E.P., Haus H.A., Nelson L.E. *Opt. Lett.*, **18**, 1080 (1993).
- Тausenev A.B., Крюков П.Г. *Квантовая электроника*, **34**, 106 (2004) [*Quantum Electron.*, **34**, 106 (2004)].
- Duling I.N. *Opt. Lett.*, **16**, 539 (1991).
- Pan S.L., Zhao X.F., Yu W.K., Lou C.Y. *Opt. Laser Technol.*, **40**, 854 (2008).
- Wang R., Dai Y., Yan L., Wu J., Xu K., Li Y., Lin J. *Opt. Express*, **20**, 6406 (2012).
- Коляда Н.А., Нюшков Б.Н., Иваненко А.В., Кобцев С.М., Харпер П., Турицын С.К., Денисов В.И., Пивцов В.С. *Квантовая электроника*, **43**, 95 (2013) [*Quantum Electron.*, **43**, 95 (2013)].
- Yoshida M., Hirayama T., Nakazawa M., Hagimoto K., Ikegami T. *Opt. Lett.*, **32**, 1827 (2007).
- Gubin M.A., Kireev A.N., Konyashchenko A.V., Kryukov P.G., Shelkovnikov A.S., Tausenev A.V., Tyurikov D.A. *Appl. Phys. B*, **95**, 661 (2009).
- Пивцов В.С., Нюшков Б.Н., Корель И.И., Коляда Н.А., Фарносов С.А., Денисов В.И. *Квантовая электроника*, **44**, 507 (2014) [*Quantum Electron.*, **44**, 507 (2014)].
- Turi L., Krausz F. *Appl. Phys. Lett.*, **58**, 810 (1991).
- Nakazawa M., Yoshida E., Kimura Y. *Electron. Lett.*, **30**, 1603 (1994).
- Bekal A., Vijayan K., Srinivasan B. *Opt. Laser Technol.*, **67**, 98 (2015).
- Beverini N., Carelli G., De Michele A., Maccioni E., Nyushkov B., Sorrentino F., Moretti A. *Opt. Lett.*, **30**, 32 (2005).