

На правах рукописи



**Головин Николай Николаевич**

**УПРАВЛЕНИЕ СДВИГОМ ГРЕБЕНКИ ЧАСТОТ И ФАЗОЙ МЕЖДУ  
ОГИБАЮЩЕЙ И НЕСУЩЕЙ ИЗЛУЧЕНИЯ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРА**

Специальность 2.2.6 -  
Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Новосибирск – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном  
учреждении высшего образования

«Новосибирский государственный технический университет»

Научный руководитель: **Дмитриев Александр Капитонович**,  
доктор физико-математических наук, профессор.

Официальные оппоненты:

**Кобцев Сергей Михайлович**, доктор физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет», отдел Лазерной физики и инновационных технологий, заведующий отделом;

**Коляда Наталья Александровна**, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Лаборатории оптических часов 1.1, старший научный сотрудник лаборатории.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт оптики атмосферы имени В. Е. Зуева» Сибирского отделения Российской академии наук (г. Томск).

Защита диссертации состоится «29» декабря 2022 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.347.02, созданного на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», по адресу: 630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, 1 корпус, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте [www.nstu.ru](http://www.nstu.ru)

Автореферат разослан «\_\_» ноября 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного  
совета, доктор технических наук, доцент



Максим Андреевич Степанов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследования

В настоящее время во многих стандартах частоты используется фемтосекундный лазер, который в режиме синхронизации мод излучает периодическую последовательность коротких импульсов. Поскольку частота следования импульсов задается эталонным СВЧ генератором, то оптические частоты лазера оказываются строго прокалиброванными в единицах этой частоты. Большое число эквидистантных мод лазера позволяет перекрыть диапазон частот от микроволнового до видимого. Это означает, что по существу имеется оптическая линейка для абсолютного измерения частот в указанном диапазоне. Одна из главных проблем при реализации такой линейки - устранение общего для всех частот сдвига, для обозначения которого часто используется аббревиатура CEO (carrier-envelope offset). Поэтому для точного задания сетки оптических частот необходимо стабилизировать частоту следования импульсов и исключить частотный сдвиг гребенки CEO.

Помимо сдвига частотной гребенки и частоты повторения для сверхкоротких импульсов важно контролировать и фазу между огибающей и несущей (carrier-envelope phase, CEP). Поскольку при коротких импульсах, когда длительность импульса одного порядка с длиной волны, сдвиг фазы между огибающей и несущей существенно влияет на эффективность преобразования частоты в нелинейных оптических процессах, что чрезвычайно важно, например, для получения аттосекундных импульсов. Кроме того, отсутствие сдвига гребенки фемтосекундного лазера упрощает процесс измерения частот, поскольку при этом необходимо определять только частоту повторения импульсов.

### Степень разработанности темы исследования

В исследованиях, посвященных управлению и стабилизации CEP было показано, что когда отношение частоты следования импульсов  $f$  к сдвигу частотной гребенки  $\Delta$  равно целому числу  $k$ , каждый  $k$ -ый импульс будет иметь одинаковую фазу между несущей и огибающей, так что существуют  $k$  различных последовательностей идентичных фемтосекундных импульсов с дискретностью CEP, равной  $2\pi/k$ . Таким образом, для получения таких последовательностей необходимо выполнение следующих условий:

$$\Phi \cdot k = 2\pi \cdot q \text{ и } k/q = f/\Delta,$$

где  $\Phi \cdot k$  - разность фаз между огибающей и несущей для  $(i + k)$ -го и  $i$ -го импульсов,  $k$  и  $q$  - целые числа.

Таким образом, если из фемтосекундного лазерного излучения выделить каждый  $k$ -й импульс, при соблюдении вышеуказанных условий, то получим периодическую последовательность идентичных импульсов с частотой повторения  $F = f/k$ , и  $\Delta = 0$ .

В первых экспериментах по управлению СЕР сама фаза несущей относительно огибающей не измерялась. Измерялось скольжение фазы в одном импульсе относительно фазы другого, выбранного в качестве опорного из той же последовательности. Измерения проводились либо с помощью автокорреляторов, либо с помощью внешнего  $f$ - $2f$ -интерферометра. Фаза несущей относительно огибающей была измерена с помощью  $f$ - $2f$ -интерферометра после калибровки независимым внешним экспериментом, когда результаты численного моделирования генерации гармоник высокого порядка в ионизирующей среде с помощью ультракоротких импульсов с различными СЕР сравнивались с экспериментальными результатами при одновременном измерении скачка фазы. В последнее время появились коммерчески доступные измерители СЕР, реализующие данный метод. Была достигнута точность измерения СЕР, равная 360 мрад. Последовательность идентичных импульсов выделялась с помощью селектора импульсов на основе акустооптического модулятора (АОМ), работавшего в поперечной конфигурации и изменявшего частоту проходящего через него излучения за счет эффекта Доплера. Такое изменение частоты напрямую влияет на частоту сдвига частотной гребенки. Для того чтобы обойти этот эффект, в схему управления АОМ вводилась дополнительная цепочка, смещающая гребенку на значение, кратное частоте повторения импульсов, сохраняя, таким образом, исходную частоту СЕО.

**Целью работы** является разработка новых способов управления сдвигом гребенки частот и фазой между огибающей и несущей излучения фемтосекундного лазера.

Для достижения поставленной цели были поставлены **следующие задачи**:

1. Разработать метод контроля сдвига частотной гребенки с помощью интерферометра Майкельсона.
2. Разработать метод получения последовательности фемтосекундных импульсов без сдвига частотной гребенки с селектируемой с большой дискретностью разностью фаз между несущей и огибающей.
3. Разработать схему формирователя импульсов для управления электрооптическим модулятором с целью селекции фемтосекундных импульсов с одинаковой фазой между несущей и огибающей.
4. Модернизировать блок управления фемтосекундным синтезатором MenloSystems FC1500-250WG с целью изменения сдвига частотной гребенки в широком диапазоне частот (10... 100 МГц).
5. Создать селектор импульсов для получения последовательностей фемтосекундных импульсов без сдвига частотной гребенки с селектируемой разностью фаз между несущей и огибающей.

6. Создать экспериментальную установку для получения последовательностей фемтосекундных импульсов без сдвига частотной гребенки с селективируемой разностью фаз между несущей и огибающей.

7. Провести эксперименты по получению последовательностей фемтосекундных импульсов без сдвига частотной гребенки с селективируемой разностью фаз между несущей и огибающей и знакопеременных по напряженности электрического поля последовательностей импульсов.

#### **Научная новизна:**

1. Предложены метод и схема контроля сдвига частотной гребенки с произвольной шириной спектра с применением интерферометра Майкельсона.

2. Предложен и экспериментально реализован метод получения последовательности идентичных фемтосекундных импульсов без сдвига частотной гребенки с управляемой разностью фаз между огибающей и несущей с использованием селектора импульсов на основе электрооптического модулятора.

3. Предложен и экспериментально реализован метод получения знакопеременных по напряженности электрического поля последовательностей ультракоротких импульсов.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Использование интерферометра Майкельсона позволяет контролировать сдвиг частотной гребенки лазеров с самосинхронизацией мод с шириной спектральной линии менее октавы.

2. Дискретность установления фазы между огибающей и несущей последовательности идентичных фемтосекундных импульсов задается величиной  $2\pi/k$ , где  $k=f \cdot q/\Delta$ , а  $k$  и  $q$  – целые числа. При частоте повторения импульсов фемтосекундного лазера  $f = 250$  МГц и сдвиге частотной гребенки  $\Delta = 21$  МГц дискретность установления перестройки фазы селектором импульсов составляет  $2\pi/250$  при частоте повторения последовательности идентичных фемтосекундных импульсов 1 МГц.

3. Выделение импульсов, отстоящих друг от друга на величину временного интервала  $k/(m \cdot f)$  позволяет получить последовательности импульсов со скольжением СЕР, равным  $2\pi/m$ . При  $m=2$  реализуется значение скольжения фазы несущей относительно огибающей, равное  $\pi$ .

#### **Методология и методы исследования**

Работа включает информационно-аналитические исследования, расчетные работы по оптимизации режима работы формирователя импульсов, экспериментальные исследования по получению последовательностей фемтосекундных импульсов без сдвига частотной гребенки с селективируемой разностью фаз между несущей и огибающей и знакопеременных по напряженности электрического поля последовательностей импульсов.

Расчеты выполнены с помощью математического пакета Matlab.

Экспериментальные исследования проведены на базе экспериментальных и опытных установок, созданных группой специалистов ЦКП «Оптические и лазерные технологии» и лаборатории квантовой криогенной электроники НГТУ под руководством соискателя.

### **Практическая значимость работы**

Предложенная схема управления сдвигом частотной гребенки с помощью интерферометра Майкельсона пригодна для различных ширин спектра излучения лазера, что позволяет распространить рассмотренный метод создания оптического стандарта частоты на лазеры с самосинхронизацией мод нано- и пикосекундного диапазонов.

Кроме того, предложенный в работе метод получения последовательностей фемтосекундных импульсов без сдвига частотной гребенки с селективируемой разностью фаз между огибающей и несущей имеет практическую значимость для таких приложений нелинейной оптики, как получение аттосекундных импульсов и когерентное сложение импульсов.

Получение последовательности фемтосекундных импульсов без сдвига частотной гребенки при измерении длин интерферометрическими методами с помощью установок на основе фемтосекундных лазеров обеспечивает более точное определение длины за счет совпадения максимумов огибающей и полосы интерференционной картины.

Создание знакопеременных по напряженности электрического поля последовательностей импульсов может представлять интерес, для изучения быстропротекающих процессов при взаимодействии излучения с веществом.

### **Реализация результатов работы**

Метод управления сдвигом частотной гребенки с помощью интерферометра Майкельсона был использован при выполнении научно-исследовательской работы по проекту «Лазерные стандарты частоты и длины», выполняемому в рамках государственного задания (проектная часть) в 2014 – 2016 гг.

Метод получения последовательностей фемтосекундных импульсов без сдвига частотной гребенки с селективируемой с малой дискретностью разностью фаз между огибающей и несущей был использован при выполнении научно-исследовательских работ по следующим проектам:

- «Стабилизация фемтосекундного стандарта частоты с когерентным сложением импульсов» (РФФИ);
- «Фемтосекундная интерферометрия» (государственное задание);
- «Прецизионные методы и средства оптического и СВЧ диапазонов» (государственное задание);

- «Квантовая криогенная электроника» (в рамках выполнения стратегического проекта «Проектирование и производство гибридных микросборок энергопреобразующей аппаратуры для аэрокосмического применения» по программе «Приоритет 2030»).

**Достоверность результатов** обеспечивается применением современных теоретических представлений и методов обработки при анализе данных. Положения, выносимые на защиту, сформулированные автором, обоснованы теоретически и подтверждены данными экспериментов. Приведенные в диссертации результаты не противоречат данным, опубликованным в отечественной и зарубежной научной литературе.

#### **Личный вклад**

Все основные результаты, выводы и научные положения, приведенные в диссертационной работе, получены лично соискателем. Вклад соискателя в проведенных исследованиях и публикациях результатов заключается в изобретении методов достижения результатов и повышения характеристик, руководстве разработкой экспериментальных установок, постановке задач, разработке частных технических заданий на узлы и экспериментальных установок, проведении экспериментов и испытаний.

#### **Публикации и апробация работы**

Автором опубликовано 43 печатных работы. Результаты диссертационного исследования Н.Н. Головина опубликованы в 16 научных работах. Из них работ, опубликованных согласно перечню российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук (перечень ВАК РФ) – 6, из них работ в научных журналах, индексируемых базами Scopus и Web of Science – 4, а также в материалах конференции, индексируемой базами Scopus и Web of Science – 3. Автором получены 2 патента Российской Федерации на изобретение и 2 патента на полезную модель.

Промежуточные результаты работы докладывались и обсуждались на многих научных и научно-технических конференциях:

- Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы электронного приборостроения», Новосибирск, 2018 – 2020 гг.
- International Conference on lasers and electro-optics Europe & European quantum electronics conference (CLEO/Europe-EQEC), Germany, Munich, 2019 г.
- Международный симпозиум «Современные проблемы лазерной физики», Новосибирск, 2016 – 2018 гг.
- International Conference on Laser Optics (ICLO), Санкт-Петербург, 2018 г.

## Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, трёх приложений. Объем диссертационной работы – 121 страница, в том числе рисунков – 68, таблиц – 1.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Введение** содержит общую характеристику работы – сведения об актуальности и степени разработанности темы исследования, целях и задачах, научной новизне, теоретической и практической значимости работы, методологии и методах исследования, положениях, выносимых на защиту, апробации результатов и степени их достоверности.

**В первой главе** описаны физические основы генерации фемтосекундного излучения.

Приводится теоретическое описание основных временных и спектральных характеристик излучения лазера с самосинхронизацией мод.

**Во второй главе** рассматриваются методы стабилизации частоты повторения и сдвига частотной гребенки фемтосекундного лазера.

Как правило, эти два параметра стабилизируют с помощью внешнего стандарта частоты. При этом обычно сдвиг частотной гребенки выделяют либо с помощью  $f$ - $2f$ -интерферометра, либо с помощью высокодобротного интерферометра Фабри-Перо.

Стабилизацию частоты повторения осуществляют, как правило, путем управления длиной резонатора лазера с помощью пьезопривода. Данный способ стабилизации является относительно медленным. Для организации быстрого кольца регулирования дополнительно используют привязку одной из мод лазера к оптическому стандарту частоты, имеющему более узкую относительную ширину резонанса, чем у СВЧ стандарта

Соискателем разработан метод стабилизации сдвига частотной гребенки и частоты повторения фемтосекундного лазера с помощью комбинированного рубидиевого стандарта частоты. Схема, реализующая данный метод, показана на рисунке 1.

Схема работает следующим образом. Излучение фемтосекундного лазера 2 с помощью делительного зеркала 3 делится на две части. Отраженное излучение излучение детектируется с помощью фотодетектора 8, на котором выделяется сигнал с частотой повторения импульсов фемтосекундного лазера  $f_{rep}$ . Этот сигнал поступает на блок медленной фазовой автоподстройки частоты повторения 7 (ФАПЧ), куда также с синтезатора частот 10 подается опорный сигнал на частоте  $f_{rep}$ . Сигнал с выхода медленной ФАПЧ управляет сервоприводом одного из зеркал лазерного резонатора, меняя длину резонатора и стабилизируя частоту повторения.



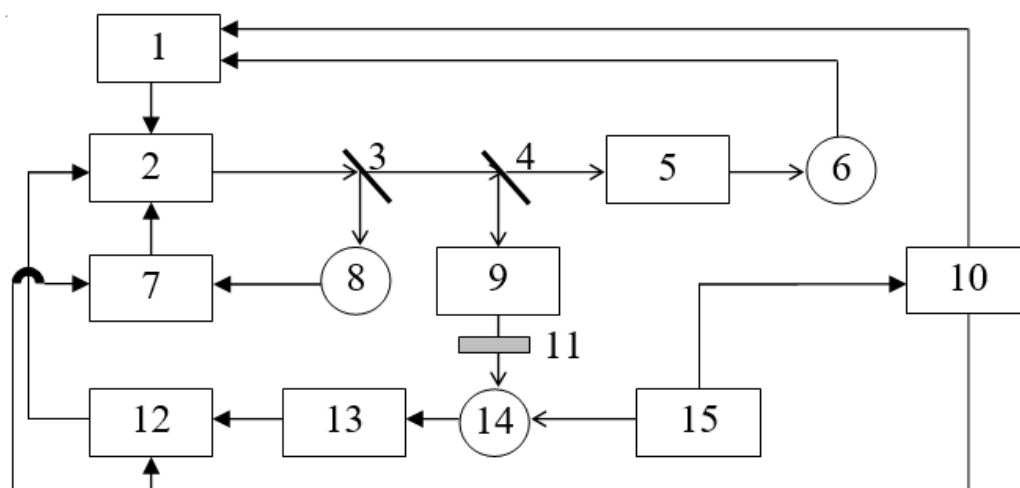


Рисунок 1 – Стабилизация частоты повторения и сдвига частотной гребенки фемтосекундного лазера с помощью комбинированного рубидиевого стандарта частоты. 1– блок фазовой привязки сдвига частотной гребенки; 2 – фемтосекундный лазер; 3, 4 – делительные зеркала; 5 –  $f-2f$  интерферометр; 6, 8, 14 – фотодетекторы; 7 – блок фазовой привязки частоты повторения (медленное кольцо); 9 – генератор второй гармоники, 10 – синтезатор частот; 11 – полосовой оптический фильтр; 12 – блок фазовой привязки частоты повторения (быстрое кольцо); 13 – полосовой РЧ фильтр; 15 – комбинированный рубидиевый стандарт частоты

Излучение, прошедшее через делительное зеркало 3, снова делится на зеркале 4. Оптический спектр отраженного излучения удваивается по частоте с помощью генератора второй гармоники 9. Затем из спектра с помощью оптического полосового фильтра 11 выделяется полоса вблизи длины волны 795 нм, соответствующая длине волны оптической части рубидиевого стандарта частоты. Прошедшее через фильтр излучение на фотодетекторе 14 сбивается с излучением рубидиевого стандарта. Сигнал биений фильтруется с помощью РЧ фильтра 13 и подается на блок быстрой фазовой привязки частоты повторения. Сигнал с выхода быстрой ФАПЧ управляет электрооптическим модулятором фемтосекундного лазера, обеспечивая быструю обработку изменений частоты повторения.

Спектр прошедшего через делительное зеркало 4 уширяется с помощью микроструктурированного волокна до ширины более чем октава, и подается на вход  $f-2f$ -интерферометра 5, с помощью которого на фотодетекторе 6 выделяется сигнал с частотой, равной сдвигу частотной гребенки фемтосекундного лазера  $\Delta$ . Этот сигнал подается на один из входов блока фазовой привязки сдвига частотной гребенки куда также с синтезатора частот 10 подается опорный сигнал на частоте  $\Delta$ . Сигнал с выхода ФАПЧ управляет мощностью диодов накачки фемтосекундного лазера, стабилизируя сдвиг частотной гребенки.

Опорным сигналом для синтезатора частот служит сигнал с СВЧ-выхода (10 МГц) комбинированного рубидиевого стандарта частоты.

Основное преимущество данной схемы заключается в объединении быстродействующего электрооптического модулятора для быстрого управления частотой повторения в ограниченном диапазоне изменения с медленным приводом пьезокерамического преобразователя, который обеспечивает гораздо больший диапазон фазовой привязки частоты повторения.

**В третьей главе** описываются способы устранения сдвига гребенки частот фемтосекундного лазера с помощью внешних интерферометров Майкельсона и Фабри-Перо.

При измерении сигнала от интерференции двух импульсов с помощью интерферометра Майкельсона на детекторе возникает сигнал, пропорциональный

$$U_{\Phi Д} \sim \cos(2\pi\nu_0 t + \delta + \delta_M) \exp\left(-\frac{\Delta t^2}{\tau^2}\right)$$

где  $\tau$  - длительность импульса;  $\delta = \varphi_i - \varphi_k$  - разность фаз импульсов;  $\Delta t$  - временная задержка между импульсами, которая определяется интерферометром. Отметим, что при  $\Delta = 0$  все импульсы одинаковы, а, следовательно,  $\delta=0$ . Поэтому устранение СЕО производится следующим образом. Сначала интерферометр настраивают на максимум сигнала, при котором  $\Delta t = 0$ . Затем управляют дисперсией в резонаторе лазера, чтобы изменить фазовую скорость импульсов и получить  $\delta = 0$ .

На рисунке 2 представлена упрощенная схема устранения сдвига гребенки частот фемтосекундного лазера с помощью интерферометра Майкельсона, предложенная соискателем. Схема включает в себя два кольца регулирования. Первое кольцо является быстрым и обеспечивает стабилизацию частоты повторения импульсов фемтосекундного лазера. Оно работает следующим образом. Излучение фемтосекундного лазера 1, отражаясь от полупрозрачного зеркала 2, поступает на высокочастотный фотодетектор 3, где выделяются межмодовые биения лазера, а затем идет на один из входов блока фазовой привязки частоты (ФАПЧ) 4. На другой вход этого блока поступает сигнал от синтезатора 5, частота которого привязана к СВЧ стандарту 6. Сигнал ошибки с выхода ФАПЧ подается на пьезокерамику лазера 1, которая управляет длиной его резонатора, а значит, и частотой следования импульсов лазера.

Второе кольцо регулирования является медленным по сравнению с первым, оно устраняет СЕО. Часть излучения проходит через делительное зеркало 2 на интерферометр Майкельсона 7, разность плеч которого сканируется вблизи заданного значения на величину порядка длины волны с помощью генератора пилообразного напряжения 8. Сигнал биений интерферометра регистрируется фотодетектором 9, а затем обрабатывается на компьютере 10. Кольцо обратной связи замыкается цифро-аналоговым преобразователем 11 и блоком питания 12, который управляет дисперсией резонатора лазера и, следовательно,  $\Delta$ .

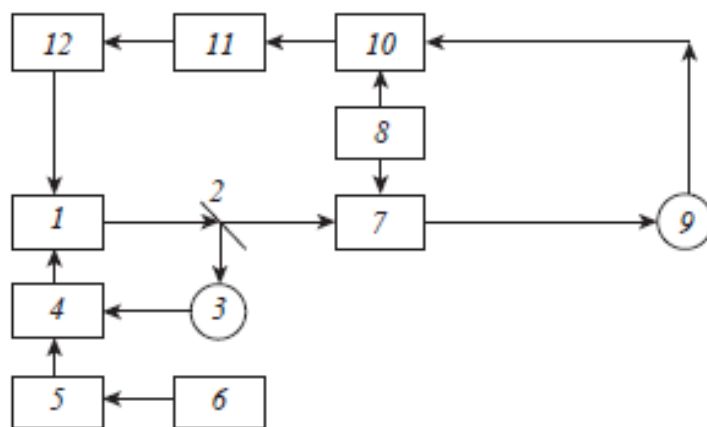


Рисунок 2 – Схема стабилизации гребенки частот фемтосекундного лазера:  
 1 - фемтосекундный лазер; 2 - делительное зеркало; 3 - широкополосный фотодетектор; 4 - блок фазовой привязки частоты; 5 - синтезатор частоты; 6 - СВЧ стандарт частоты; 7 - интерферометр Майкельсона; 8 - генератор пилообразного напряжения; 9 - фотодетектор; 10 - компьютер; 11 - цифро-аналоговый преобразователь; 12 - блок питания лазера

**Четвертая глава** посвящена методам селекции периодических последовательностей идентичных импульсов фемтосекундного лазера с заданной фазой между огибающей и несущей. Описываются принципы и схемы получения последовательностей идентичных фемтосекундных импульсов. Приводятся три схемы.

Соискателем предложена схема получения последовательности идентичных фемтосекундных импульсов с помощью интерферометра Фабри-Перо и электрооптического модулятора (рисунок 3).

Устройство содержит: 1 - синтезатор опорной частоты модулятора интенсивности  $F_0$ ; 2 - фазовращатель; 3 - управляемый формирователь импульсов; 4 - синтезатор опорной частоты повторения импульсов фемтосекундного лазера  $\omega_0$ ; 5 - блок фазовой привязки частоты повторения импульсов фемтосекундного лазера; 6 – фотодетектор для выделения частоты повторения импульсов фемтосекундного лазера  $\omega_0$ ; 7 - задающий синтезатор; 8 - фемтосекундный лазер; 9, 10 - делительные зеркала; 11 - модулятор интенсивности; 12 - синтезатор опорной частоты сдвига гребенки  $\Delta_0$ ; 13 - блок фазовой привязки сдвига частотной гребенки излучения фемтосекундного лазера, 14 - блок сбора и обработки информации; 15 - интерферометр Фабри-Перо; 16 - генератор пилообразного напряжения; и 17 - полосовой оптический фильтр; 18 – фотодетектор для выделения сдвига гребенки  $\Delta$ .

Излучение фемтосекундного лазера 8 поступает от делительного зеркала 9 на фотодетектор 6, где выделяется сигнал на частоте повторения импульсов  $\omega_0$ , который далее подается на блок фазовой привязки частоты повторения импульсов 5, куда поступает также сигнал на частоте  $\omega_0$  от синтезатора 4, для которого в

качестве опорной используется частота с задающего синтезатора 7. Блок фазовой привязки частоты 5 стабилизирует частоту повторения импульсов, так что  $\omega = \omega_0$ .

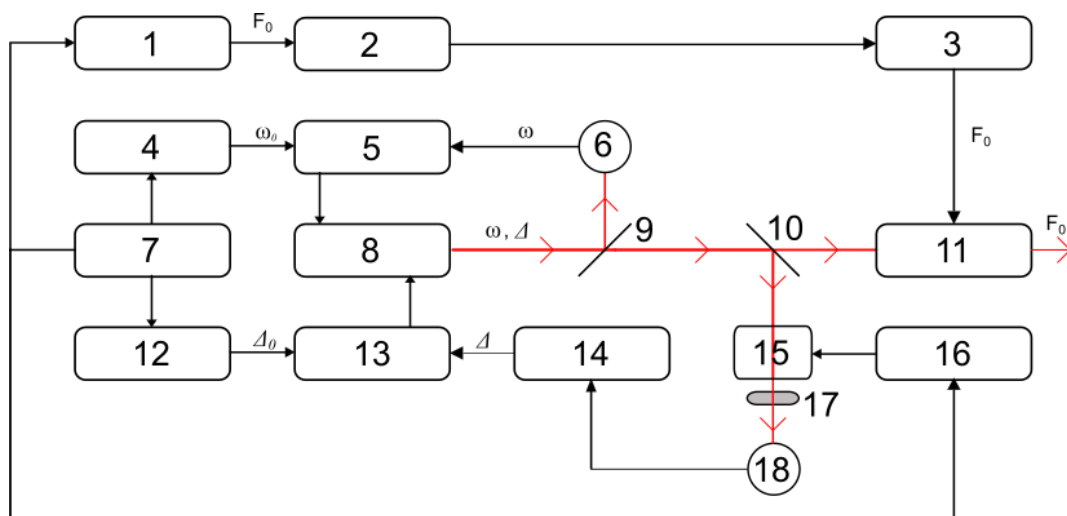


Рисунок 3 – Схема получения последовательности идентичных фемтосекундных импульсов с помощью интерферометра Фабри-Перо и электрооптического модулятора

Излучение фемтосекундного лазера, прошедшее через делительное зеркало 9, падает на делительное зеркало 10, отражаясь от которого проходит через интерферометр Фабри-Перо 15 и полосовой оптический фильтр 17, выделяющий заданную спектральную полосу, и поступает на фотодетектор 18, сигнал с которого поступает на один из входов блока сбора и обработки данных 14, на второй вход которого поступает сигнал с низковольтного выхода генератора пилообразного напряжения 16. Блок сбора и обработки данных 14 обрабатывает интерференционную картину и, согласно выражению (3), формирует на выходе сигнал с частотой, равной сдвигу гребенки частот  $\Delta$ , который подается на один из входов блока фазовой привязки частоты 13, на другой вход которого поступает сигнал на частоте  $\Delta_0$  от синтезатора частоты сдвига гребенки 12, опорный сигнал для которого поступает от задающего синтезатора 7. Таким образом, осуществляется фазовая привязка частотного сдвига  $\Delta$  к частоте  $\Delta_0$ , так что  $\Delta = \Delta_0$ . При этом указанная схема выделения частотного сдвига  $\Delta$  не требует ширины спектра излучения равной октаве или более.

Синтезатор опорной частоты модулятора интенсивности 1 с опорной частотой, задаваемой задающим синтезатором 7, вырабатывает сигнал на частоте  $F_0$ , который удовлетворяет условиям, представленным в выражениях (1) и (2). Этот сигнал через фазовращатель 2 подается на управляемый формирователь импульсов 3 и далее на модулятор интенсивности 11, излучение фемтосекундного лазера на который поступает через делительное зеркало 10. Фазовращатель 2 устанавливает сдвиг фазы несущей относительно огибающей, так что из всех возможных последовательностей идентичных импульсов можно селективировать

различные последовательности с дискретностью сдвига фазы несущей относительно огибающей, равной  $2\pi/k$ .

Особенностью предлагаемой схемы является получение последовательности идентичных импульсов с возможностью селекции заданной разности фаз между несущей и огибающей для излучения лазеров с самосинхронизацией фаз с произвольной шириной спектра.

Соискателем также предложена схема получения последовательности идентичных фемтосекундных импульсов с помощью электрооптического модулятора, приведенная на рисунке 4.

Для стабилизации параметров фемтосекундного лазера и синтезированной последовательности импульсов используются синтезаторы опорной частоты повторения импульсов  $f_{rep}$ , сдвига гребенки  $f_0$  фемтосекундного лазера и частоты повторения синтезированной последовательности импульсов  $F_{rep}$ . В качестве опорной для всех синтезаторов используется частота стандарта. Излучение фемтосекундного лазера поступает от делительного зеркала на фотодетектор, где выделяется сигнал на частоте повторения импульсов  $f_{rep}$ , который далее подается на блок фазовой привязки частоты, куда поступает также сигнал на частоте  $f_{rep}$  от синтезатора. Блок фазовой привязки частоты стабилизирует частоту повторения импульсов.

Излучение фемтосекундного лазера, прошедшее через делительное зеркало, падает на делительное зеркало, отражаясь от которого поступает на  $f$ - $2f$ -интерферометр, откуда выделяемый сигнал на частоте сдвига гребенки фемтосекундного лазера  $f_0$  подается на один из входов блока фазовой привязки частоты, а на другой вход поступает сигнал от синтезатора частоты. Таким образом, осуществляется фазовая привязка частотного сдвига.

Синтезатор вырабатывает сигнал на частоте  $F_{rep}$ . Этот сигнал через фазовращатель подается на формирователь импульсов и далее на модулятор интенсивности, излучение фемтосекундного лазера на который поступает через делительное зеркало. Фазовращатель устанавливает фазу на максимум прошедшего через модулятор интенсивности излучения фемтосекундного лазера.

В главе также описана работа основных блоков схемы, а также приведены экспериментальные результаты по получению идентичных фемтосекундных импульсов с управляемой разностью фаз между огибающей и несущей.

При частоте повторения импульсов фемтосекундного лазера, равной 250 МГц и сдвиге частотной гребенки 50 МГц были синтезированы последовательности идентичных фемтосекундных импульсов с частотой повторения 50 МГц и дискретностью перестройки фазы между огибающей и несущей, равной  $2\pi/5$  (рисунок 5).

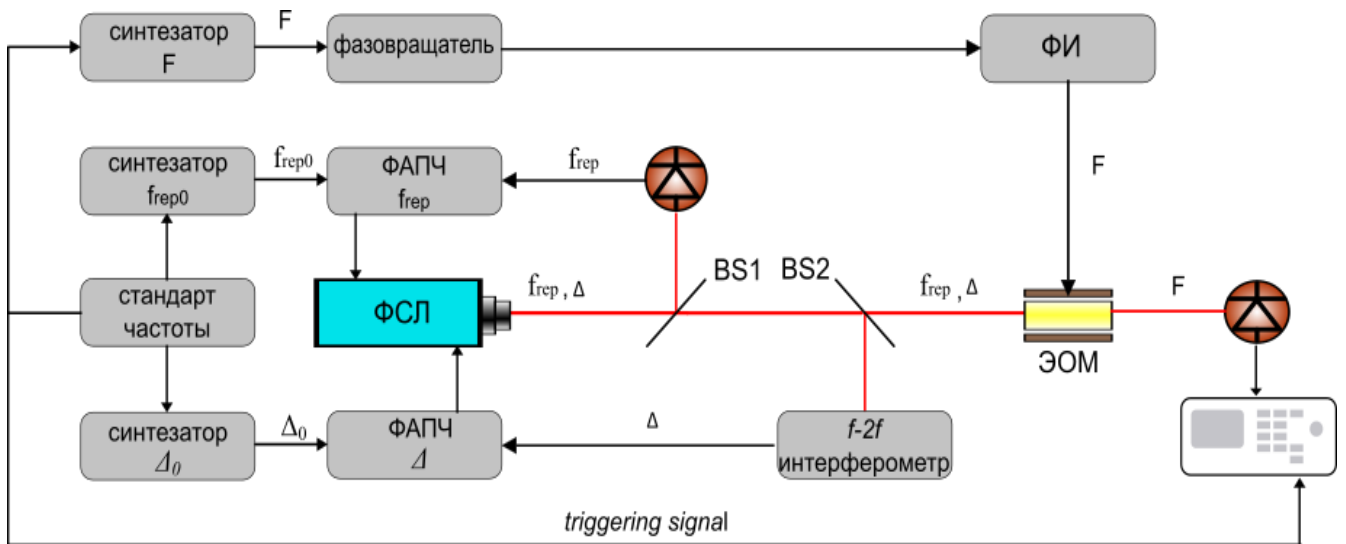


Рисунок 4 – Схема генерации излучения с управляемой CEP. FSL - фемтосекундный лазер, PLL - фазовая автоподстройка частоты, VCO – формирователь импульсов, BS - светоделители, EOM - электрооптический модулятор Маха-Цендера

**Пятая глава** посвящена методам снижения дискретности установки фазы между огибающей и несущей в последовательностях идентичных фемтосекундных импульсов и принципам создания последовательностей ультракоротких импульсов с заданным скольжением фазы между соседними импульсами.

Наиболее очевидный путь создания последовательностей идентичных фемтосекундных импульсов при управлении CEP с малой величиной дискретности связан с уменьшением отношения  $\Delta/f_{rep}$ . При этом  $\Delta$  должно существенно превышать величину флуктуаций скольжения CEP в режиме свободной генерации.

В этом случае можно выбирать различные частоты повторения импульсов синтезированной последовательности:

$$F = f_{rep} / (k \cdot g). \quad (1)$$

Здесь  $g$  (как и  $k$ ) может принимать любые целые значения.

Однако при таком подходе нельзя достичь малой дискретности CEP (больших значений  $k$ ), поскольку возможность варьирования частоты повторения и сдвига гребенки достаточно ограничена. С одной стороны, величина  $f_{rep}$  связана с длиной резонатора и в коммерчески доступных фемтосекундных лазерах частота повторения не превышает величину порядка 1 ГГц.

Радикальный путь увеличения дискретности перестройки CEP связан с использованием отношения  $\Delta/f$ , равного простой дроби. В этом случае дискретность установления фазы  $2\pi/k$  будет задаваться величиной  $2\pi\Delta/(f \cdot q)$ , где  $q$  - целое число, а ее величина будет равна  $k = f \cdot q / \Delta$ .

В то же время возможные частоты повторения синтезированных импульсов  $F$  будут по-прежнему определяться соотношением (1).

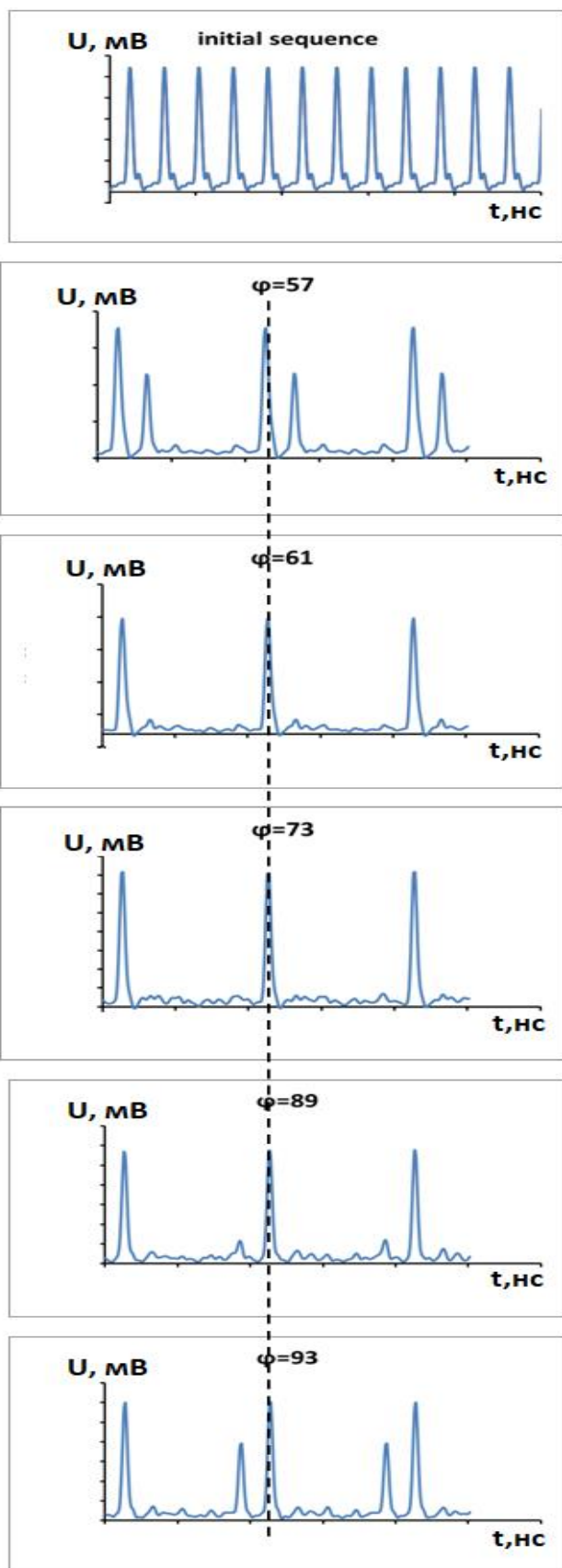


Рисунок 5 – Синтезированные последовательности идентичных фемтосекундных импульсов. Цена деления: по оси абсцисс – 10 нс., по оси ординат – 5 мВ

Схема получения последовательностей идентичных фемтосекундных импульсов с малой дискретностью перестройки фазы несущей относительно огибающей аналогична схеме, описанной в главе 4 (рисунок 5), за исключением того, что в ней генератор, управляемый напряжением, работавший на частоте 50 МГц был заменен на формирователь импульсов, работающий в диапазоне частот 0,5...100 МГц.

При частоте повторения импульсов фемтосекундного лазера, равной 250 МГц и сдвиге частотной гребенки 48 МГц были синтезированы 125 различных последовательностей идентичных фемтосекундных импульсов с частотой повторения 2 МГц и дискретностью перестройки фазы между огибающей и несущей, равной  $2\pi/125$ . При частоте повторения импульсов фемтосекундного лазера, равной 250 МГц и сдвиге частотной гребенки 21 МГц были синтезированы 250 различных последовательностей идентичных фемтосекундных импульсов с частотой повторения 1 МГц и дискретностью перестройки фазы между огибающей и несущей, равной  $2\pi/250$  (рисунок 6).

В главе также описан способ создания последовательностей ультракоротких импульсов, знакопеременных по напряженности электромагнитного поля.

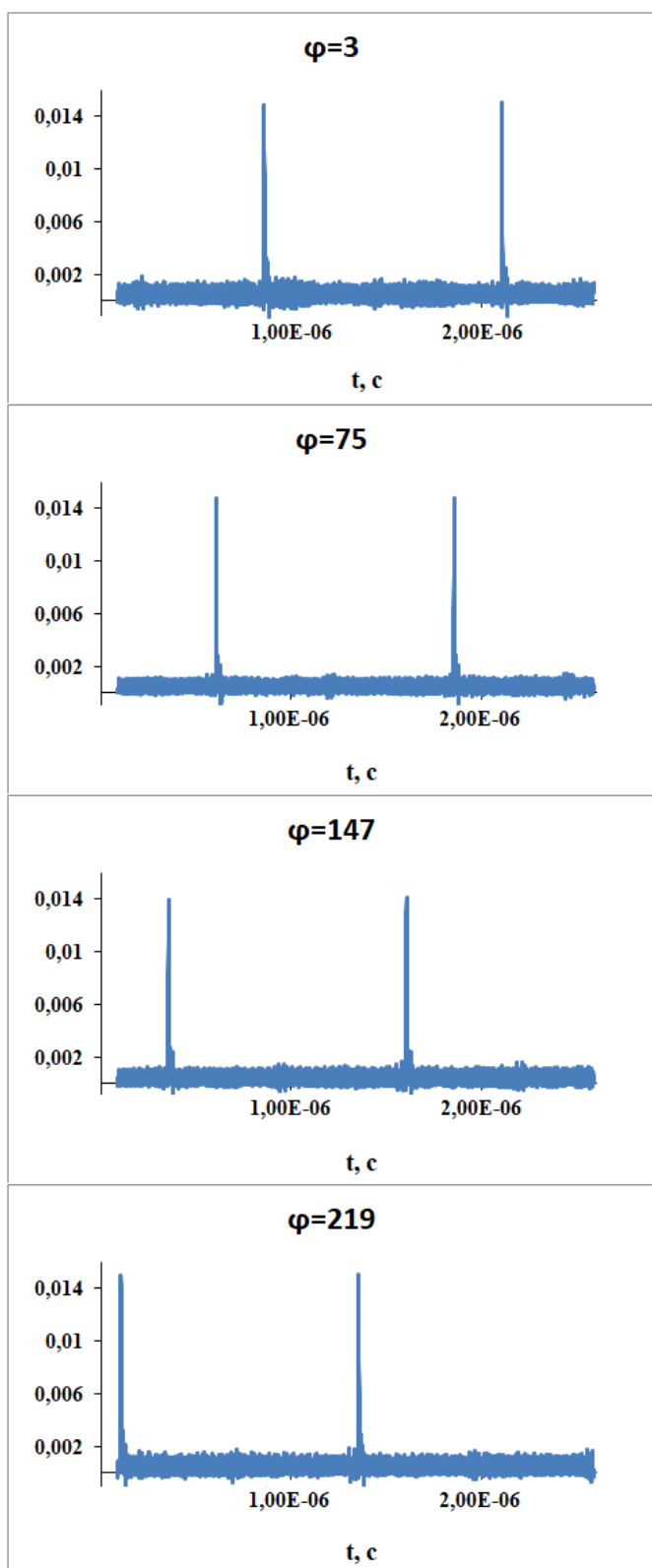


Рисунок 6 – Синтезированные последовательности идентичных фемтосекундных импульсов

Поскольку минимальный временной интервал между идентичными импульсами равен  $k/f$ , то выделяя из излучения лазера импульсы, отстоящие друг от друга на величину временного интервала  $k/(m \cdot f)$ , можно получить последовательность импульсов со скольжением СЕР, равным  $2\pi/m$ . В частности, при  $m=2$  будет иметь место последовательность импульсов со скольжением СЕР, равным  $\pi$ , что для коротких импульсов, длительностью порядка нескольких оптических колебаний приведет к получению их знакопеременных по напряженности электромагнитного поля последовательностей. Создание таких последовательностей может представлять интерес, например, для изучения быстропротекающих процессов.

На рисунке 7а показана одна из последовательностей идентичных фемтосекундных импульсов с частотой повторения 1 МГц, когда временной интервал между соседними импульсами составлял 1 мкс. Выделение импульсов с временным интервалом, равным 0.5 мкс обеспечило получение последовательности фемтосекундных импульсов со скольжением СЕР между соседними импульсами, равным  $\pi$ , с частотой следования 2 МГц (рисунок 7б).



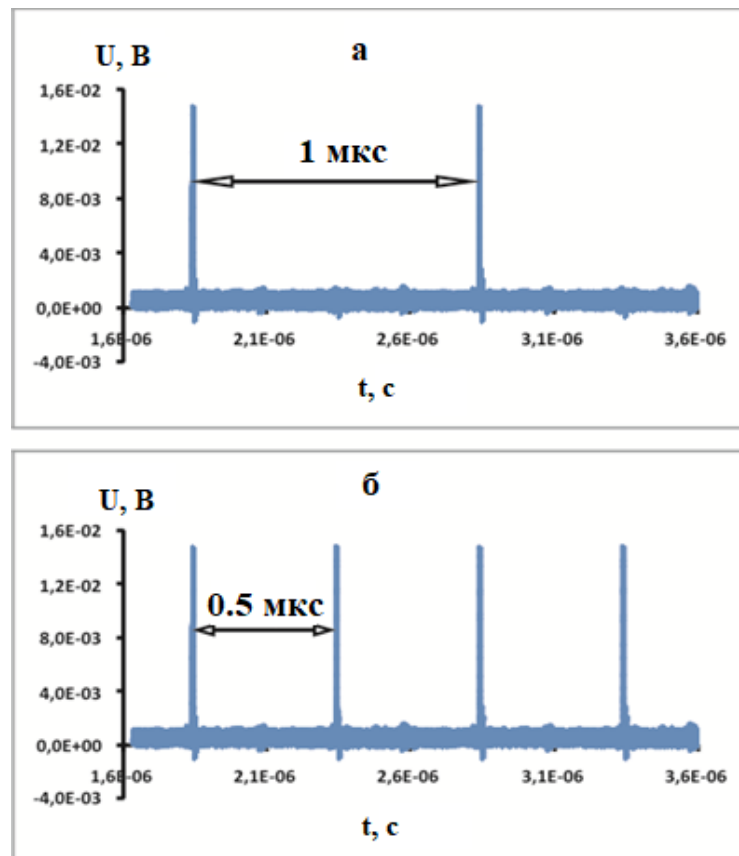


Рисунок 7 – Последовательности идентичных (а) и знакопеременных по напряженности поля (б) импульсов

**В заключении** сформулированы основные результаты диссертации:

Соискателем предложены метод и схема контроля сдвига частотной гребенки с помощью интерферометра Майкельсона.

Предложен и экспериментально реализован метод получения последовательности идентичных фемтосекундных импульсов без сдвига частотной гребенки с управляемой разностью фаз между огибающей и несущей.

Предложен и экспериментально реализован метод получения знакопеременных по напряженности электрического поля последовательностей ультракоротких импульсов.

## СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК:*

1. Головин Н.Н. Селектор импульсов для получения фемтосекундного излучения с управляемой фазой несущей относительно огибающей / **Головин Н.Н.**, Дмитриев А.К. // Системы анализа и обработки данных. – 2022. – Т. 86. – № 2. – С. 121–132.
2. Исакова А.А. Комбинированная СВЧ- и ВЧ-модуляция тока инжекции диодного лазера для многочастотной накачки КПН-резонансов / Исакова А.А., Савинов К.Н., **Головин Н.Н.**, Сабакарь К.М., Дмитриев А.К., Рундау А.А. // Известия

высших учебных заведений. Физика. – 2020. – Т. 63. – № 1. – С. 154–158.

*Переводная версия:* Isakova A.A. Combined microwave and high-frequency modulation of the injection current of a diode laser for multiple-frequency excitation of CPT-resonances / Isakova A.A., Savinov K.N., **Golovin N.N.**, Sabakar K.M., Dmitriev A.K., Rundau A.A. // Russian Physics Journal. – 2020. – V. 63. – Issue 1. – Pp. 171–175. (проиндексирована в **Scopus** и в **Web of Science Core Collection**)

3. Головин Н.Н. Периодическая последовательность фемтосекундных импульсов с селективируемой разностью фаз между огибающей и несущей / **Головин Н.Н.**, Дмитриева Н.И., Горохов Е.А., Дмитриев А.К. // Оптика и спектроскопия. – 2019. – Т. 127. – № 9. – С. 449–452.

*Переводная версия:* N. N. Golovin. A femtosecond pulse train with a selectable carrier-envelope offset phase / **N. N. Golovin**, N. I. Dmitrieva, E. A. Gorokhov, A. K. Dmitriev // Optics and Spectroscopy. - 2019. - Vol. 127, iss. 3. - P. 483–486. (проиндексирована в **Scopus** и в **Web of Science Core Collection**)

4. А. К. Дмитриев. Генерация последовательности идентичных фемтосекундных импульсов с контролируемой фазой несущей относительно огибающей / А. К. Дмитриев, **Н. Н. Головин**, Е. А. Горохов, Ю. П. Бычев, Б. Н. Ньюшков, А. С. Толстикова [и др.] // Фотон-Экспресс. - 2019. - № 6. - С. 409-410.

5. А.А. Исакова. Особенности режимов генерации полупроводникового лазера с внешним резонатором при СВЧ модуляции / А.А. Исакова, К. Н. Савинов, **Н. Н. Головин**, Н. Ж. Алтынбеков, В. И. Вишняков, А. К. Дмитриев // Квантовая электроника. - 2017. - Т. 47. – № 7. - С. 610–613.

*Переводная версия:* Isakova A.A. Specific features of oscillation regimes of an external cavity diode laser under microwave modulation / V Isakova A.A., Savinov K.N., **Golovin N.N.**, Altynbekov N.Zh., Dmitriev A.K., Vishnyakov V.I. // Quantum Electronics. – 2017. – Vol. 47. – Issue 7. – Pp. 610–613. (проиндексирована в **Scopus** и в **Web of Science Core Collection**)

6. Бакланов Е.В. Фемтосекундный стандарт частоты с внешним высокочастотным интерферометром / Бакланов Е.В., **Головин Н.Н.**, Григорьева С.В., Дмитриев А.К. // Оптика и спектроскопия. – 2016. – Т. 121. – № 6. – С. 1001-1004.

*Переводная версия:* E. V. Baklanov. A femtosecond frequency standard with an external high-finesse interferometer / E. V. Baklanov, **N. N. Golovin**, S. V. Grigor'eva, A. K. Dmitriev // Optics and Spectroscopy. - 2016. - Vol. 121. – iss. 6. - Pp. 930–933. (проиндексирована в **Scopus** и в **Web of Science Core Collection**)

*Публикации в сборниках материалов конференций, индексируемых в международных реферативных базах:*

7. N.N. Golovin. Pulse Picker for Generating Femtosecond Radiation with a Selectable Carrier-Envelope Phase / **N.N. Golovin**, A.K. Dmitriev, Y.P. Bychev, K.N. Savinov. // Actual problems of electronic instrument engineering (APEIE–2021):

- proc. of the 15 intern. sci. and techn. conf., Novosibirsk, 19–21 Nov. 2021. – Novosibirsk: Publ. NSTU, 2021. – P. 692-695. (проиндексирована в **Scopus**)
8. N.N. Golovin. Generation of identical femtosecond pulses with adjustable carrier-envelope phase / **N.N. Golovin**, N.I. Dmitrieva, E.A. Gorohov, A.K. Dmitriev // Conference on lasers and electro-optics Europe & European quantum electronics conference (CLEO/Europe-EQEC): [proc.], Germany, Munich, 23–27 June 2019. – [USA]: IEEE, 2019. – paper cf\_p\_8. (проиндексирована в **Scopus**)
9. N.N. Golovin. Femtosecond Radiation without a Shift of the Frequency Comb with a Fixed Carrier Envelope Offset Phase / **N.N. Golovin**, N.I. Dmitrieva, K.M. Sabakar, A.K. Dmitriev // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП–2018) = Actual problems of electronic instrument engineering (APEIE–2018): тр. 14 междунар. науч.-техн. конф., Новосибирск, 2–6 окт. 2018 г.: в 8 т. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. – Т. 1, ч. 2. – С. 314-317. (проиндексирована в **Scopus**)

*Патенты изобретения и полезные модели в РФ:*

10. Способ получения последовательности идентичных фемтосекундных импульсов для излучения с произвольной шириной спектра [Текст]: пат. № 2760624 / **Головин Н.Н.**, Дмитриев А.К., Савинов К.Н. – заявл. 07.12.2020; опубл. 29.11.2021. Бюл. № 34.
11. Способ получения последовательности идентичных фемтосекундных импульсов [Текст]: пат. № 2701209 / Бакланов Е.В., **Головин Н.Н.**, Дмитриев А.К., Дмитриева Н.И. заявл. 12.02.2019; опубл. 25.09.2019; Бюл. № 27.
12. Квантовый стандарт частоты оптического и СВЧ диапазона [Текст]: пат. № 143081 / Бикмухаметов К.А., **Головин Н.Н.**, Дмитриев А.К. – заявл. 22.10.2013; опубл. 10.07.2014; Бюл. № 19.
13. Квантовый стандарт частоты оптического и СВЧ диапазона [Текст]: пат. № 143824 / Бикмухаметов К.А., **Головин Н.Н.**, Дмитриев А.К. – заявл. 30.07.2013; опубл. 27.07.2014; Бюл. № 21.

Отпечатано в типографии  
Новосибирского государственного технического университета  
630073, г. Новосибирск, пр. К.Маркса, 20.  
Тел./факс. (383) 346-08-57  
формат 60×84/16, объем 1.25 п.л., тираж 100 экз.  
заказ № Р-01470, подписано в печать 28.10.2022 г.