

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

Фемтосекундные лазеры для астрофизики

П.Г. Крюков

Лазеры непрерывного действия с пассивной синхронизацией мод обладают уникальной особенностью: они испускают строго периодическую последовательность совершенно одинаковых импульсов фемтосекундной длительности, а спектр их излучения представляет собой гребёнку эквидистантно расположенных узких спектральных линий, интервал между которыми определяется частотой непрерывного следования импульсов. Таким образом, фемтосекундный непрерывный лазер является источником регулярной гребёнки оптических частот (ГОЧ), значения которых можно сопоставить с цезиевым стандартом частоты (эталоном секунды), что предоставило возможность прецизионного измерения частоты в оптическом диапазоне, чрезвычайно важную для создания сверхточных атомных часов, прецизионной спектроскопии и метрологии. Одним из основных применений ГОЧ на основе непрерывных лазеров фемтосекундных импульсов является прецизионное измерение с помощью астрономических спектрометров доплеровских смещений в спектрах звёзд, которые возникают вследствие радиального движения звёзд по отношению к наблюдателю. Для того чтобы обеспечить высокую точность измерений, требуемую для поиска и исследований экзопланет, необходим прецизионный калибратор астрономического спектрометра. Такой калибратор может быть основан на фемтосекундной лазерной гребёнке спектральных линий. Рассматриваются лазерные системы, предназначенные для астрономических исследований, в том числе фемтосекундные лазеры для исследований в космосе. Предполагается, что развитие рассматриваемых методов сделает возможными прямые измерения ускорения расширения Вселенной.

Ключевые слова: лазерные гребёнки частоты, фемтосекундный волоконный лазер, космический лазер, астрономические инструменты

PACS numbers: 42.62. – b, 97.82. – j, 98.80. – k

DOI: 10.3367/UFNr.0185.201508b.0817

Содержание

1. Введение (817).
 2. Лазерная гребёнка оптических частот (818).
 3. Типы фемтосекундных лазеров-генераторов гребёнки оптических частот (819).
 - 3.1. Твердотельные лазеры.
 - 3.2. Полупроводниковые лазеры.
 - 3.3. Волоконные лазеры.
 4. Особенности астрономической спектроскопии. Поиск экзопланет (822).
 5. Системы лазерных калибраторов на основе гребёнки оптических частот для астрономических спектрометров (823).
 6. Возможность других астрофизических исследований (825).
 7. Фемтосекундный лазер для исследований в космосе (825).
 8. Заключение (826).
- Список литературы (827).

П.Г. Крюков. Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Ленинский просп. 53, 119991 Москва, Российская Федерация; Научный центр волоконной оптики РАН, ул. Вавилова 38, 119333 Москва, Российская Федерация
Тел. (499) 135 75 30
E-mail: kryukov@fo.gpi.ru

Статья поступила 10 марта 2015 г.,
после доработки 9 июня 2015 г.

1. Введение

Появление нового источника света — лазера — и упорные обстоятельные исследования лазеров привели к возникновению новых научных направлений: нелинейной оптики и волоконной оптики. В свою очередь успехи в этих науках способствовали созданию лазеров новых типов, в частности лазеров с пассивной синхронизацией мод, работающих в непрерывном режиме. Эти лазеры генерируют строго непрерывную последовательность импульсов фемтосекундной длительности. Уникальной особенностью лазеров данного типа является их спектр. Он состоит из гребёнки чрезвычайно узких, эквидистантно расположенных линий, причём интервал между линиями равен частоте повторения импульсов (f_{rep}), а полная ширина спектра соответствует длительности фемтосекундного импульса, согласно преобразованию Фурье, и может быть достаточно велика (до 1000 см^{-1}) (рис. 1). Частоты этих спектральных линий можно сопоставить со стандартом частоты радиодиапазона (Cs-эталон секунды) и, следовательно, измерить их с высокой точностью. Таким образом, непрерывный лазер фемтосекундных импульсов как источник лазерного излучения обладает одновременно двумя важными достоинствами: чрезвычайно короткими импульсами (до нескольких фемтосекунд) и чрезвычайно узкими спектральными линиями (шириной до нескольких десятков

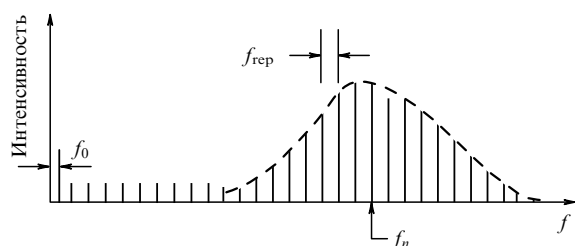


Рис. 1. Спектр излучения непрерывного фемтосекундного лазера (ради наглядности показано малое число линий, в действительности их число может достигать 1 млн).

мГц). Эта уникальная особенность инициировала обширные исследования, которые привели к многим весьма важным применениям (см., например, [1–8] и приведённые там ссылки).

Прецизионное измерение оптических частот является основой исследований, направленных на создание сверхточных оптических часов. Поскольку гребёнка оптических частот (ГОЧ) на основе фемтосекундного лазера позволяет синтезировать оптическую частоту, точно связанную с цезиевым стандартом секунды, появление такой возможности стало гигантским революционным шагом на пути создания оптических часов. Впервые на возможность использования уникальной особенности непрерывных лазеров ультракоротких импульсов в проблеме сверхточных оптических часов указал В.П. Чеботаев [9]. Быстрая реализация и развитие фемтосекундных лазеров привели к замечательным результатам, в том числе к тем, которые были отмечены Нобелевской премией, присуждённой Дж.Л. Холлу [10] и Т.В. Хэншу [11].

Различные применения требуют разных характеристик ГОЧ, таких как спектральный диапазон и интервал между спектральными линиями. Принцип пассивной синхронизации мод универсален, и он может быть реализован с разными лазерными материалами и в разных лазерных системах. В результате было разработано довольно много разных типов фемтосекундных лазеров. В настоящей статье рассматриваются лазерные системы, которые могут использоваться в области оптической астрономии и космических исследованиях. Статья построена по следующему плану.

В разделе 2 обсуждаются принципы и особенности лазерной гребёнки оптических частот фемтосекундного лазера непрерывного действия. Рассматриваются способы регулирования параметров ГОЧ и определения точного значения частоты отдельной спектральной линии. Особое значение имеет величина интервала между спектральными линиями. Для работы в оптическом диапазоне необходимо выделить доступными спектроскопическими методами отдельных линий ГОЧ. Но поскольку этот интервал определяется длиной резонатора лазера, стремление увеличить спектральный интервал требует уменьшения его размеров, что связано с определёнными трудностями.

В разделе 3 обсуждаются фемтосекундные лазеры различных типов: твердотельные, полупроводниковые и волоконные.

В разделе 4 рассматриваются особенности астрономической спектроскопии, требующей высокой точности измерений, и возможные применения лазерных методов.

Обсуждается проблема поиска и исследований экзопланет. Методика поиска и исследований экзопланет включают в себя измерения радиальных скоростей звёзд. При этом важное значение имеет прецизионная калибровка астрономического спектрометра. Использование лазерной ГОЧ позволяет решить эту проблему.

В разделе 5 обсуждаются результаты конкретных работ по калибровке спектрометров с использованием лазерных систем ГОЧ. Показано их успешное применение для исследований экзопланет.

В разделе 6 рассматриваются принципиальные возможности увеличения точности спектральных измерений до уровня, позволяющего проводить прямое измерение величины ускорения разлёта Вселенной.

В разделе 7 обсуждаются новейшие результаты работы фемтосекундного волоконного лазера, запущенного в космос. Показана возможность работы лазерной ГОЧ на спутнике.

В разделе 8 обобщаются результаты исследований в астрофизике с применением новейших фемтосекундных лазеров и обосновывается перспективность таких исследований.

2. Лазерная гребёнка оптических частот

Важнейшим параметром непрерывного фемтосекундного лазера является частота непрерывного следования импульсов $f_{\text{гр}}$. От $f_{\text{гр}}$ зависят энергия импульса и, следовательно, интенсивность лазерного излучения, а также интенсивность излучения в спектральной линии ГОЧ. Чем выше $f_{\text{гр}}$, тем меньше энергия импульса, но выше интенсивность в отдельной линии ГОЧ. Поэтому в приложениях, требующих высокой интенсивности фемтосекундного импульса, стремятся использовать лазер с большой длиной резонатора и, следовательно, относительно малой частотой повторения импульсов. Напротив, в спектроскопии с использованием ГОЧ стремятся использовать лазер с малой длиной резонатора, что даёт относительно большой интервал между линиями ГОЧ. Однако уменьшение размеров фемтосекундного лазера связано со значительными трудностями. Помимо технологических проблем уменьшения размеров лазера необходимо считаться с зависимостями выходных параметров лазера от частоты непрерывного следования импульсов. Режим пассивной синхронизации мод осуществляется с помощью нелинейного просветляющегося поглотителя. Для реализации необходимого действия нелинейного просветляющегося поглотителя требуется определённая величина интенсивности излучения. Поэтому лазеры ультракоротких импульсов имеют два порога: обычной лазерной генерации и режима синхронизации мод. Поскольку при увеличении частоты следования импульсов интенсивность излучения в импульсе пропорционально уменьшается, при высокой частоте $f_{\text{гр}}$ режим генерации ультракоротких импульсов может вообще не состояться при данной мощности накачки. Однако увеличение мощности накачки связано со значительными техническими трудностями.

Частота f_n каждой линии ГОЧ (рис. 1) определяется как

$$f_n = n f_{\text{гр}} + f_0, \quad (1)$$

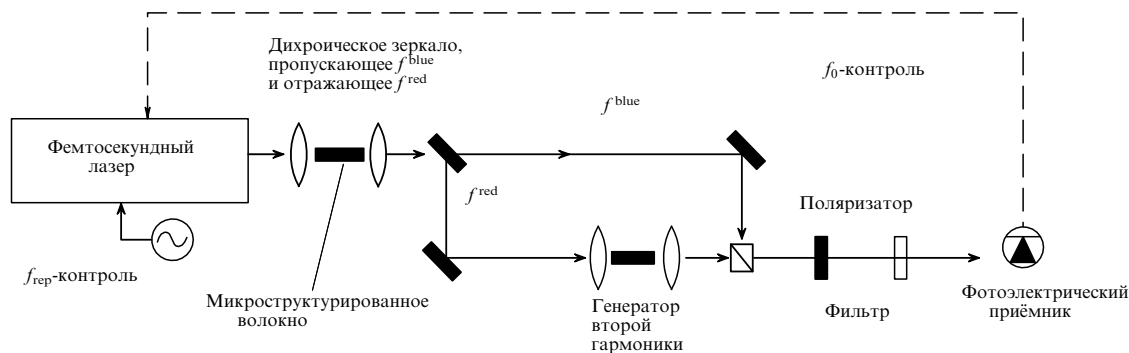


Рис. 2. Схема измерения частоты f_0 .

где $f_{\text{гер}}$ — частота повторения импульсов в последовательности, n — номер линии (моды лазера), причём n может пробегать значения до 10^6 , а f_0 — сдвиг всей гребёнки как целого относительно нуля частоты. Значение частоты f_0 определяется разностью фазовой скорости на длине волны максимума спектра и групповой скорости импульса в активной среде лазера, т.е. значением внутрирезонаторной дисперсии групповых скоростей (ДГС). По известным значениям n , $f_{\text{гер}}$ и f_0 можно определить оптическую частоту линии гребёнки f_n . Замечательно, что обе частоты, $f_{\text{гер}}$ и f_0 , лежат в радиодиапазоне, допускают точное и плавное регулирование и сопоставление их значений с частотой эталона секунды (Cs-стандарт). Таким образом, появляется возможность прямого и исключительно точного определения оптической частоты.

Для того чтобы определить n , достаточно измерить длину волны, соответствующую положению линии f_n , с точностью, лучшей, чем величина интервала между соседними линиями гребёнки. Это вполне осуществимо с помощью стандартных спектроскопических методов. При известной длине волны и скорости света с существующей точностью можно получить значение частоты, близкое к частоте f_n . Разделив это значение на величину интервала гребёнки, получаем n . Частоту повторения $f_{\text{гер}}$ можно плавно регулировать, изменяя длину резонатора лазера с помощью пьезоэлектрического регулятора, и измерять, используя быстрый фотодиод и осциллограф или радиочастотный спектроанализатор.

Регулирование и измерение f_0 , величина которой, как видно из рис. 1, составляет некоторую часть $f_{\text{гер}}$, сложнее. Поскольку f_0 зависит от дисперсии вещества в резонаторе, её можно регулировать изменением внутрирезонаторной ДГС, причём требуется весьма малое, но строго контролируемое изменение. Так как внутрирезонаторным веществом является активная среда лазера, ДГС в ней зависит от величины инверсной населённости, которая в свою очередь зависит от мощности источника накачки лазера. Таким образом, малым изменением мощности накачки лазера можно регулировать величину f_0 . Для точного определения f_0 используется особая методика интерферометрического сравнения частот краёв ГОЧ [12]. Для этого требуется, чтобы полная ширина спектра ГОЧ была не менее октавы, т.е. удвоенная частота низкочастотного края гребёнки должна быть меньше частоты высокочастотного края. Обычно ширина ГОЧ фемтосекундного лазера близка к ширине полосы усиления активной среды, что значительно меньше,

чем требуется. Поэтому для получения ширины ГОЧ, превышающей октаву, используется специальный эффект нелинейной оптики — генерация суперконтинуума [13], а в качестве нелинейной среды с высокой нелинейностью — микроструктурированное оптическое волокно типа фотонных кристаллов [14, 15]. Излучение суперконтинуума направляется в так называемый f – $2f$ -интерферометр (рис. 2), в одном плече которого генерируется вторая гармоника низкочастотного края ГОЧ. В результате возникает интерференция излучения высокочастотного края ГОЧ (f^{blue}) и удвоенного по частоте излучения низкочастотного края ГОЧ ($2f^{\text{red}}$), что даёт на фотоприёмнике частоту биений f^{beat} , которая регистрируется радиочастотным спектроанализатором. Используя (1) для интерферирующих частот, получаем значение частоты f^{beat} :

$$f^{\text{beat}} = 2f^{\text{red}} - f^{\text{blue}} = 2(nf_{\text{гер}} + f_0) - (2nf_{\text{гер}} + f_0) = f_0. \quad (2)$$

Как видим, в результате такой операции находим значение искомой частоты f_0 .

Использование ГОЧ для точного определения оптических частот позволило установить частоты вторичных эталонов оптических частот (узкие линии газов: метана, ацетилена, йода). Используя эти линии, удаётся создавать лазеры с определённой (опорной) очень узкой частотой излучения f_{ref} . Если частота f_{ref} попадает в спектр ГОЧ, то её можно использовать для стабилизации гребёнки и тогда отпадает необходимость в привлечении f – $2f$ -интерферометра.

Итак, генератор ГОЧ на основе непрерывного фемтосекундного лазера является синтезатором оптических частот с прецизионными значениями. С точки зрения оптической спектроскопии важно увеличить интервал между линиями ГОЧ. В том случае, когда интервал между линиями превышает несколько ГГц, возможно использование стандартных спектроскопических устройств, разрешающих эти линии. Для увеличения интервала между линиями ГОЧ используются фемтосекундные лазеры различного типа, в которых предусмотрена возможность уменьшения длины резонатора и тем самым увеличения интервала между линиями ГОЧ.

3. Типы фемтосекундных лазеро-генераторов гребёнки оптических частот

Эффект пассивной синхронизации мод универсален, и он может быть реализован в лазерах различных типов.

3.1. Твердотельные лазеры

Попытка уменьшить размеры классического фемтосекундного лазера на сапфире, принцип работы которого основан на эффекте "керровской линзы", была предпринята в работе [16]. Использовалась кольцевая схема, причём для управления ДГС, требующегося для сокращения длительности импульсов, на одно из зеркал резонатора наносилось так называемое чирпирующее покрытие. В результате была создана уникальная конструкция с настолько малыми размерами, что она могла быть размещена на монете 2 евроцента (или, что то же самое по диаметру, 50 копеек) [17]. Частота повторения импульсов составляла 10 ГГц, что позволило разрешить спектрометром линии ГОЧ после генерации суперконтинуума. Однако для работы со столь значительной частотой потребовалось использование для накачки дорогостоящей и относительно громоздкой лазерной системы типа Verdi (Coherent) с непрерывной мощностью ≈ 10 Вт. Это усложняет всю установку. Недостатком данной системы является практическая невозможность усиления импульсов, что затрудняет её практическое применение в астрофизических исследованиях.

В твердотельных фемтосекундных лазерах используется кроме сапфира материал типа керамики. Так, сообщается об успешном создании миниатюрного твердотельного лазера с керровской линзой, генерирующего фемтосекундные импульсы с частотой повторения 15 ГГц [18]. Схема лазера показана на рис. 3. Замена кристалла сапфира лазерной керамикой с ионами иттербия даёт весьма существенные преимущества. Вместо сложной и дорогостоящей системы накачки с мощностью 10 Вт используется лазерный диод с мощностью 1,1 Вт в волоконно-оптическом оформлении. Соотношение длин волн накачки (976 нм) и генерации (≈ 1080 нм) обеспечивает меньший переход в тепло, чем в случае сапфира, а теплопроводность керамики выше, чем у сапфира. Это облегчает проблему охлаждения. Наконец, поскольку длина волны лазера совпадает с длиной волны Yb:волокна, можно использовать эффективный волоконный усилитель. Авторы [18] отмечают, что в принципе конструкция позволяет ещё более значительно уменьшить размеры и увеличить частоту повторения до 30 ГГц. Главная трудность заключается в изготовлении сферических зеркал с радиусами кривизны менее 5 мм и высокими коэффициентами отражения.

3.2. Полупроводниковые лазеры

Для накачки непрерывных фемтосекундных лазеров, как правило, используются полупроводниковые инжекционные лазеры (лазерные диоды). Помимо замечательных эксплуатационных характеристик: компактности, высо-

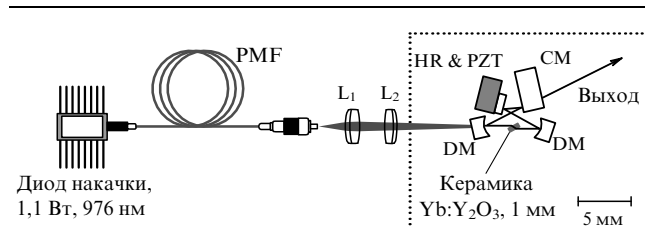


Рис. 3. Твердотельный фемтосекундный лазер с частотой 15 ГГц [18]. PMF — волокно с сохранением поляризации, L_1 , L_2 — ахроматические линзы, HR&PZT — зеркало с высоким отражением на пьезоподвижке, CM — выходное зеркало, DM — дихроичное зеркало.

кого коэффициента полезного действия (к.п.д.), сравнительно низкой стоимости и спектра, близкого к полосам поглощения лазерного материала фемтосекундного лазера, полупроводниковые инжекционные лазеры обладают принципиально важной особенностью — предоставляют возможность плавного прецизионного регулирования, необходимого для стабилизации ГОЧ.

Полупроводниковые материалы с большим успехом также используются в качестве насыщающихся поглотителей с характеристиками, необходимыми для обеспечения режима пассивной синхронизации мод. Имеется в виду специальная многослойная структура SESAM (Semiconductor Saturable Absorber Mirror) [19] и аналогичные системы, которые позволяют значительно снизить порог возникновения режима генерации фемтосекундных импульсов, что способствует уменьшению размера лазера. Полупроводниковые структуры можно также использовать в качестве активной среды с оптической накачкой излучением лазерного диода. Всё это способствует созданию компактных и эффективных лазеров.

В работе [20] сообщается о дисковом лазере, в котором полупроводниковые материалы служат в качестве активной среды и просветляющегося поглотителя. Конструкция дискового лазера позволяет уменьшить размеры резонатора и достичь частоты повторения вплоть до 50 ГГц. Однако остаётся проблема повышения выходной мощности, необходимой для нелинейных преобразований, которые требуются для получения желательных спектральных характеристик ГОЧ.

3.3. Волоконные лазеры

Развитие волоконной оптики привело к созданию лазеров нового типа — волоконных лазеров, в которых используются одномодовые волокна с сердцевинной, активированной редкоземельными ионами. Эти лазеры обладают рядом уникальных особенностей. Поскольку свет в них распространяется в волноводе, отпадает необходимость жёсткого и точного расположения элементов лазера, благодаря чему волоконный лазер практически не подвержен внешним механическим воздействиям. В волоконных лазерах естественным образом реализуется одномодовый режим генерации. Полосы поглощения редкоземельных ионов (Nd, Er, Yb, Tm, Ho) совпадают с линиями излучения полупроводниковых лазерных диодов, что позволяет их использовать для накачки с высоким к.п.д., причём нужный режим генерации фемтосекундных импульсов может быть достигнут при сравнительно малых мощностях накачки (< 1 Вт). Поскольку сердцевина одномодовых волоконных световодов окружена толстой оболочкой из плавленного кварца, через неё осуществляется эффективный теплоотвод, поэтому отпадает необходимость в особых системах охлаждения. В конструкциях волоконных лазеров удастся широко использовать элементы, разработанные для систем волоконно-оптической связи. В результате получается эффективный, компактный и удобный в эксплуатации лазер.

Лазерное излучение обладает широким спектром, и режим пассивной синхронизации мод удастся осуществлять с помощью специфического механизма — нелинейного вращения поляризации [21]. Волоконные фемтосекундные лазеры во многих отношениях превзошли традиционные лазеры на сапфире. Преимущества генераторов ГОЧ на основе волоконных фемтосекундных

лазеров подробно описаны в работе [22]. Всё это привело к тому, что фемтосекундные волоконные лазеры получили широкое развитие, вплоть до появления индустриального направления — возникли фирмы, освоившие выпуск таких лазеров (IMRA (США), Menlo Systems (ФРГ), "Авеста" (Россия)).

В качестве примера применения ГОЧ на основе волоконного фемтосекундного лазера для прецизионных измерений оптических частот можно указать работы [23, 24], в которых Er:волоконный фемтосекундный лазер использовался в компактной схеме оптических часов (стабильность на уровне 10^{-14}) на основе He-Ne/CH₄-стандарта частоты (длина волны 3,39 мкм). В разделе 2 упоминалось, что частоту f_0 ГОЧ можно измерять и контролировать, не прибегая к сложной методике $f-2f$ -интерферометра, в которой требуется генерация суперконтинуума с шириной спектра свыше октавы. Измерение f_0 можно провести, если имеются оптические стандарты частоты, в частности He-Ne/CH₄-стандарт. С помощью оптического стандарта можно стабилизировать ГОЧ посредством генерации разностной частоты от лежащих в разных частях ГОЧ линий f_n и f_m , но разделённых интервалом, меньшим октавы. Такую генерацию можно получить с помощью подходящего нелинейного кристалла (в частности, PPLN — Periodically Poled Lithium Niobate). В результате получается новая гребёнка, но уже на разностной частоте, в которую попадает частота оптического стандарта:

$$f_m - f_n = (mf_{\text{rep}} + f_0) - (nf_{\text{rep}} + f_0) = (m - n)f_{\text{rep}}. \quad (3)$$

Таким образом, частота f_0 исключается и необходимо лишь регулировать f_{rep} . В работе [24] регулирование частоты f_{rep} производилось посредством пьезоэлектрического изменения длины волокна резонатора. Схема установки показана на рис. 4. Использовался кольцевой лазер на Er:волокне (длина волны $\approx 1,55$ мкм), в котором регулирование частоты повторения импульсов (в диапазоне 62 МГц) производилось с помощью пьезоэлектрического изменения длины резонатора по двум каналам: "медленному" и "быстрому". В разрыв волокна вводились два линзовых коллиматора, расстояние между которыми регулировалось пьезоэлектрической подвижкой. Это позволяло получать достаточно большое, но сравнительно медленное изменение длины резонатора.

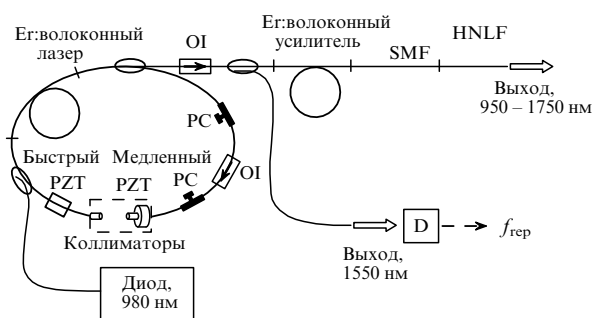


Рис. 4. Er:волоконная фемтосекундная лазерная система [24]. PZT — пьезоэлектрические элементы, OI — оптический изолятор, PC — контроллер поляризации, SMF — одномодовое волокно, HNL — волокно с высокой нелинейностью, D — приёмник.

Для быстрого малого изменения длины резонатора к секции волокна длиной 5 мм непосредственно приклеивался пьезоэлектрический элемент. После усиления в Er:волоконном усилителе производилась генерация суперконтинуума в оптическом волокне с высокой нелинейностью. В результате получалась ГОЧ в диапазоне длин волн 950–1750 нм. Итак, с помощью фемтосекундного волоконного лазера можно получить компактную и эффективную (полные мощности источников накачки менее 1 Вт) систему генерации ГОЧ с широкой полосой спектра.

Однако у волоконных фемтосекундных лазеров-генераторов ГОЧ наряду с несомненными достоинствами имеется существенный недостаток. Поскольку оптические волокна представляют собой протяжённые, по своей сути, структуры, трудно уменьшить длину резонатора до размеров, необходимых для увеличения частоты повторения свыше 1 ГГц. Так, конструкция фирмы Menlo Systems, используемая в спектральных исследованиях, имеет частоту повторения 250 МГц. Однако указанный недостаток удаётся преодолеть остроумным способом — фильтрацией излучения ГОЧ с помощью эталона Фабри–Перо, обладающего высоким пропусканием на резонансных частотах (модах), значения которых определяются расстоянием между зеркалами. Это открывает возможность нужной фильтрации пропускаемого излучения по частоте. Если толщина эталона Фабри–Перо меньше длины резонатора лазера в n раз, то через эталон будут пропускаться линии ГОЧ с разрежением в n раз (рис. 5). Ширина характеристики пропускания эталона зависит от коэффициента отражения зеркал. Особенности фильтрации и конфигурация зеркал эталонов описаны в работе [25]. Доступные зеркала не имеют коэффициента отражения, необходимого для выделения одной линии ГОЧ. Поэтому в реальных условиях для фильтрации с подавлением соседних линий приходится использовать последовательно два или даже три эталона.

Волоконные фемтосекундные лазеры имеют ещё одну особенность, чрезвычайно важную для реального использования ГОЧ. Как отмечалось, увеличение частоты повторения неизбежно влечёт за собой соответствующее уменьшение пиковой мощности импульса. Фильтрация ГОЧ также приводит к уменьшению пиковой мощности в n раз. Тем самым снижается эффективность нелинейного преобразования (генерация суперконтинуума и гар-

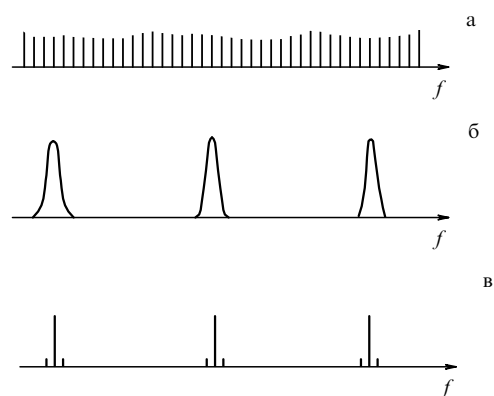


Рис. 5. Фильтрация излучения ГОЧ эталоном Фабри–Перо: (а) спектр фемтосекундного лазера, (б) пропускание эталона Фабри–Перо, (в) спектр после фильтрации.

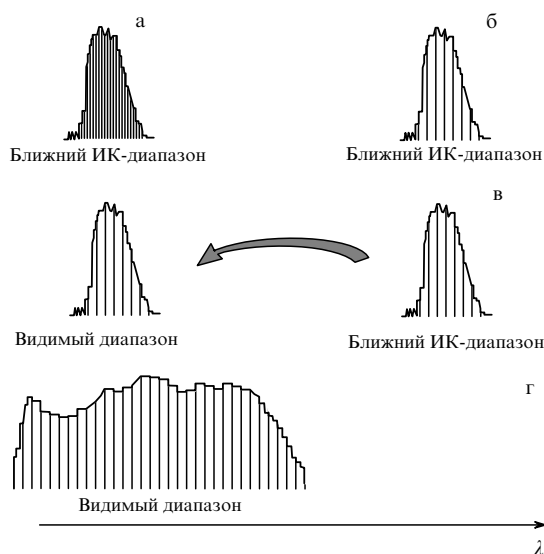


Рис. 6. Изменения спектров при преобразованиях излучения фемтосекундного лазера. (а) Гребёнка волоконного фемтосекундного лазера в ближнем ИК-диапазоне ($\approx 1,1$ мкм, $\approx 1,54$ мкм) с шириной в несколько нанометров и интервалом в диапазоне ≈ 250 МГц, устанавливаемым по атомным часам. (б) Увеличение интервала гребёнки до ≈ 18 ГГц посредством фильтрации эталонами Фабри–Перо. (в) Переброс спектра в видимый диапазон с помощью генерации второй гармоники. (г) Уширение спектра гребёнки на весь видимый диапазон путём генерации суперконтинуума.

моник), необходимого для получения достаточно широкого спектра ГОЧ, в связи с чем требуется усиление для компенсации ослабления. Усиление можно эффективно реализовать с помощью волоконного усилителя с таким же волокном, которое используется в лазере. Стандартная схема эффективной накачки активного волокна с двойной оболочкой (active double-clad fiber) позволяет уверенно достигать выходной мощности на уровне 10 Вт [7]. Уширение импульса из-за его протяжённого распространения в усилительном волокне, обладающем дисперсией, можно компенсировать подсоединением отрезка волокна с дисперсией противоположного знака. Технология изготовления оптических волокон позволяет создавать такие волокна. Итак, получается ГОЧ с большим интервалом и интенсивностью импульсов, допускающей нелинейные преобразования: генерацию второй гармоники и генерацию суперконтинуума. На рисунке 6 показаны изменения спектра при преобразованиях излучения ГОЧ волоконного фемтосекундного лазера.

4. Особенности астрономической спектроскопии. Поиск экзопланет

Уникальной особенностью астрономических исследований являются долговременные наблюдения с доступной точностью. Это относится и к спектральным измерениям, которые предусматривают сравнения спектров, зарегистрированных в течение продолжительных периодов наблюдений. Спектр астрономического объекта даёт возможность определить его скорость по эффекту Доплера. Изменение спектра во времени позволяет выявить динамику астрономического объекта. В частности, методика измерений скоростей звёзд по эффекту

Доплера используется для обнаружения и исследований планет, обращающихся вокруг других звёзд, — экзопланет.

Поскольку планеты светят отражённым светом, для обнаружения планет, обращающихся вокруг отдалённых звёзд (экзопланет), применяются косвенные методы. К таким методам относится так называемый транзитный метод. Если экзопланта при своём обращении вокруг звезды проходит на фоне диска звезды, то свет звезды будет изменяться. В излучении звезды будут наблюдаться регулярные изменения интенсивности с периодом, равным периоду обращения экзопланеты. Продолжительность стадии уменьшенной интенсивности определяется временем прохождения экзопланеты по диску звезды, а величина изменения интенсивности — размером экзопланеты. Ясно, что этот метод требует высокой точности регистрации яркости излучения звезды при весьма продолжительном сеансе измерений. Недостаток метода очевиден. Удаётся обнаруживать лишь те экзопланеты, плоскость орбиты (эклиптика) которых совпадает с направлением на звезду. Тем не менее благодаря этому методу, успешно использовавшемуся на спутнике "Кеплер" Национального аэрокосмического агентства США, было открыто множество экзопланет.

Используется также и другой метод, основанный на спектральных измерениях скоростей звёзд по эффекту Доплера. Дело в том, что планета при движении по орбите вызывает движение самой звезды относительно общего центра масс (рис. 7). Изменение скорости этого периодического движения по отношению к наблюдаемой радиальной скорости (radial velocity — RV) можно измерить по доплеровскому смещению спектральных линий звезды. В качестве примера изучения экзопланеты таким методом на рис. 8 приведён результат исследований, проведённых Крымской астрофизической обсерваторией и Корейским институтом астрономии и космических исследований [26]. Показано периодическое (период 592,9 сут) изменение RV звезды-гиганта, обусловленное вращением вокруг неё планеты типа Юпитера.

Следует иметь в виду, что изменения RV, зависящие от отношения масс планеты и звезды, очень малы. Так, вращение Юпитера вокруг Солнца вызывает движение Солнца с максимумом скорости 12 м с^{-1} и периодом около 12 лет, а обращение Земли — лишь с максимумом скорости 9 см с^{-1} и периодом один год. Так что для обнаружения планет с помощью доплеровских сдвигов нужны измерения весьма малых смещений спектров, регистрируемых в течение продолжительного времени.

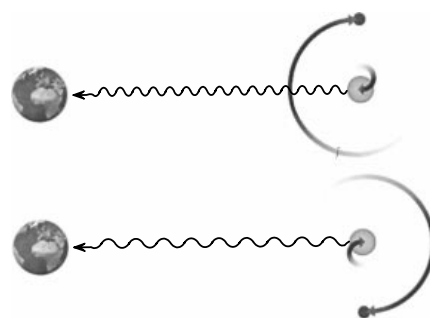


Рис. 7. Свет от звезды, вокруг которой вращается экзопланта. Под действием тяготения экзопланеты звезда совершает небольшие колебательные движения, которые вызывают доплеровское смещение спектра.

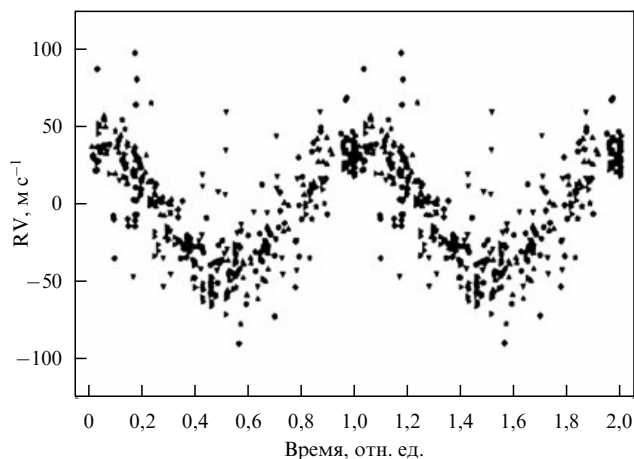


Рис. 8. Периодическое (592,9 сут) изменение RV звезды-гиганта *bet Gem*, обусловленное вращением планеты юпитерианской массы [26].

Требуются высокие спектральное разрешение и точность измерения.

Одной из мотиваций обнаружения и изучения экзопланет является поиск подобных Земле планет, обращающихся на таком расстоянии от звезды, при котором температура на поверхности планеты допускает существование воды в жидкой фазе (так называемая жизненная зона). С целью выяснения различий между планетами типа газовых гигантов (Юпитер, Сатурн) и твердыми планетами (Земля, Марс) следует обеспечить точность измерения доплеровских сдвигов спектра на уровне нескольких сантиметров в секунду, что соответствует точности регистрации частот на уровне 10-го знака. Отметим, что исследования в области лазерных прецизионных измерений частоты позволяют достигать точности более чем до 15-го знака. Но это реализовано с помощью лабораторных устройств. Однако в астрономии приходится иметь дело с исключительно слабыми источниками, для исследований которых создаются гигантские телескопы с площадью зеркала, позволяющего собрать свет таких источников.

Для поиска и исследований экзопланет разработаны уникальные спектрометры, примером которых является HARPS (High Accuracy Radial velocity Planet Searcher) [27]. В таких спектрометрах используются дифракционные решетки типа эшелле большого размера. Разрешающая сила $R = \lambda/\Delta\lambda = v/\Delta v$ может достигать 10^5 . Это сложные и громоздкие стационарные устройства, в которых предусмотрена высокая механическая и термическая стабильность. Для связи спектрометра с движущимся телескопом приходится использовать особую волоконно-оптическую линию. Применяемые в обычных широко распространенных линиях связи одномодовые волокна с сердцевинной диаметром 5–7 мкм здесь не годятся, поскольку они не способны передавать широкий спектр без искажений. В данном случае используются специальные волоконные световоды с сердцевинной особой конфигурации с размерами в несколько сотен микрометров [28, 29], в которых полностью исключены модовая структура распространяемого излучения и тем самым искажения спектра.

Обычно разрешающая сила спектрометра определяется способностью разрешить две соседние спектральные линии (критерий Рэлея) при их *одновременной* реги-

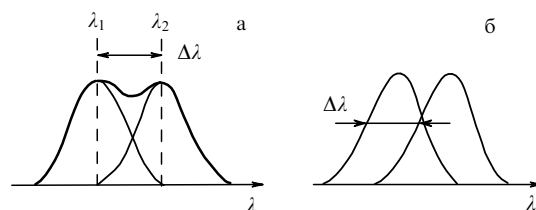


Рис. 9. Регистрация спектров двух линий: (а) одновременная регистрация (разрешение по Рэлею); (б) раздельная регистрация.

страции, суть которой иллюстрирует рис. 9а. Для этого необходима *относительная* калибровка шкалы длин волн (частот) спектрометра. В случае измерения доплеровского смещения спектры регистрируются *раздельно* в течение продолжительного времени (до нескольких лет!). При точной и, самое главное, *абсолютной* привязке положения линий спектра к шкале длин волн (частот) можно определить смещение спектра даже относительно широких линий (рис. 9б). Поэтому астрономические спектрометры, предназначенные для исследований, основанных на измерениях весьма малых доплеровских смещений, должны обладать, помимо высоких чувствительности и разрешающей способности, весьма точной калибровкой, привязанной к стандарту частоты (атомные часы). Обычно калибровку спектрометров производят регистрацией излучения спектральной лампы (например, типа полого катода), излучение которой соответствует спектральным линиям вещества, наполняющего лампу. В частности, для калибровки астрономических спектрометров используется лампа типа полого катода с Th-Ag-наполнением. Недостатком такой методики является ограниченная точность значений спектральных линий (не более чем до 7-го знака), их неравномерное распределение по спектру и интенсивности, а также влияние внешних условий и старение лампы. Для этой цели также используют узкие линии поглощения. Например, данные, представленные на рис. 8, получены с помощью йодных ячеек. Однако предел точности при применении этих спектральных методик составляет около 1 м с^{-1} . Лазерная ГОЧ, являясь синтезатором прецизионных оптических частот, способна заменить спектральные линии атомов и молекул. По существу, ГОЧ представляет собой искусственный атом с регулярным расположением спектральных линий. Применение ГОЧ для калибровки позволит преодолеть недостатки, свойственные спектральным лампам и йодным ячейкам. Поэтому вполне естественно стремление использовать ГОЧ для калибровки астрономических спектрометров высокой точности [30].

5. Системы лазерных калибраторов на основе гребёнки оптических частот для астрономических спектрометров

Непосредственное применение лазерной ГОЧ для точной калибровки астрономических спектрометров встречает значительные трудности. Во-первых, все современные лазеры фемтосекундных импульсов не работают в требуемой, видимой, области спектра (лазер на сапфире имеет длину волны $\approx 0,8 \text{ мкм}$, а длина волны волоконных лазеров $\approx 1,1 \text{ мкм}$ и $\approx 1,5 \text{ мкм}$). Также следует иметь в виду, что протяжённость спектра ГОЧ ограничена. Во-

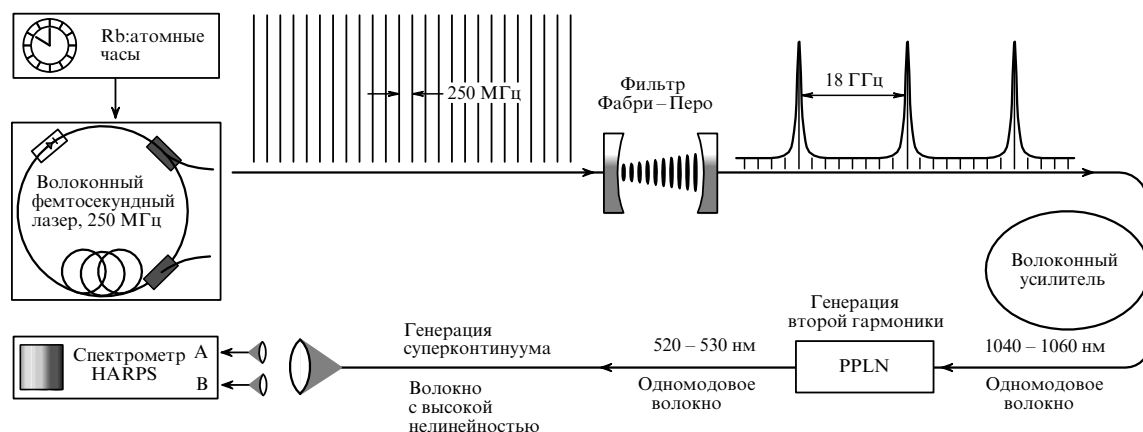


Рис. 10. Принципиальная схема калибратора астрономического спектрометра.

вторых, интервал между линиями ГОЧ равняется частоте повторения импульсов и обычно составляет около 100 МГц, что определяется длиной (несколько дециметров) резонатора лазера. При разрешающей силе 10^5 спектральный разрешаемый интервал спектрометра в видимом диапазоне составляет около 6 ГГц. Это означает, что линии ГОЧ типичных фемтосекундных лазеров сольются в сплошной спектр. Первая трудность в принципе может быть преодолена с помощью методов нелинейной оптики (генерация второй гармоники, генерация суперконтинуума). Это существенно облегчается благодаря тому, что источником ГОЧ являются фемтосекундные импульсы, принципиально обладающие высокой пиковой мощностью и интенсивностью. Как было указано в разделе 2, с помощью генерации суперконтинуума можно получить ширину спектра ГОЧ протяжённостью свыше октавы. Преодоление второй трудности осуществляется фильтрацией лазерной ГОЧ эталонами Фабри–Перо.

Работы по использованию лазерных методов калибровки проводились двумя группами исследователей. Группа Теодора Хэнша из Института квантовой оптики им. Макса Планка и из фирмы Menlo Systems (ФРГ) в кооперации с Европейской южной обсерваторией проводили и продолжают проводить исследования в Обсерватории Ла-Силья в Чили на 3,6-метровом телескопе со спектрографом HARPS ($R = 115000$) [31, 32]. Группа Скотта Диддамса из Национального института стандартов и технологии (США) проводила исследования в Обсерватории Макдональда (Техас, США) на 9,2-метровом телескопе Хобби–Эберли с использованием спектрометра Pathfinder, работающего в ближнем инфракрасном (ИК) диапазоне ($R = 50000$) [33].

На рисунке 10 показана принципиальная схема лазерной установки немецкой группы. Кольцевой Yb:волоконный фемтосекундный лазер производства Menlo Systems с длиной волны $\approx 1,1$ мкм работает с частотой повторения 250 МГц, причём точное значение частоты стабилизируется с помощью пьезоэлектрического регулятора по опорной частоте Rb-атомных часов. При фильтрации эталонами Фабри–Перо интервал ГОЧ увеличивается до 18 ГГц. Потери из-за фильтрации компенсируются Yb:волоконным усилителем с компенсацией дисперсии. Используется специальная конструкция с накачкой через оболочку волокна (double-clad). Затем с

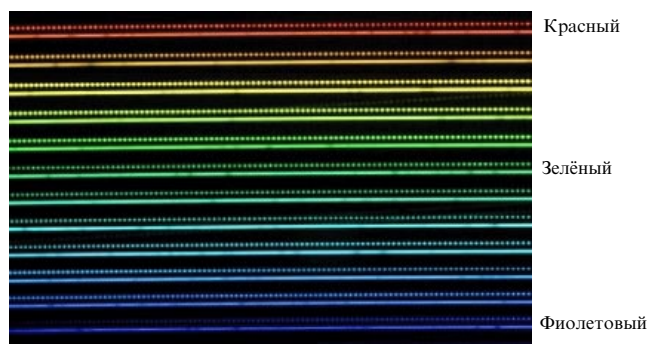


Рис. 11. Спектр гребёнки калибратора, зарегистрированный спектрометром.

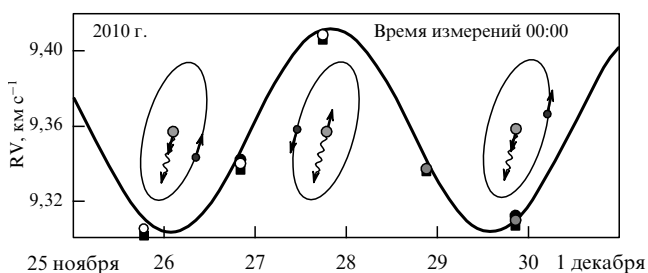


Рис. 12. Результат измерений RV звезды с экзопланетой [32].

помощью нелинейного элемента генерации второй гармоники типа PPLN и генерации суперконтинуума в волокне с высокой нелинейностью осуществляется преобразование спектра в спектр видимого диапазона. В результате получается строго регулярная и стабильная гребёнка спектральных линий, охватывающих весь видимый диапазон (рис. 11). Созданная система использовалась в астрономических исследованиях. Для демонстрации возможности калибровки с помощью лазерной ГОЧ проводились измерения RV звезды, имеющей экзопланету [33]. Результаты показаны на рис. 12. Хотя точность измерений в этих первых экспериментах была на уровне около 1 м с^{-1} , в лабораторных условиях она составляет $2,5 \text{ см с}^{-1}$, что даёт надежду на существенное повышение точности астрономических измерений.

Американская группа использовала аналогичную схему, но с кольцевым волоконным лазером (также производства Menlo Systems) (длина волны $\approx 1,55$ мкм) [32]. Частота повторения лазера увеличивалась посредством фильтрации эталоном Фабри – Перо до 25 ГГц. В итоге получалась калибровочная ГОЧ в ближнем ИК-диапазоне. Авторы [32] отмечают, что есть веские причины проводить наблюдения не только в видимом, но и в ближнем инфракрасном диапазонах. Очевидно, что чем меньше звезда, тем сильнее эффект доплеровского смещения и тем легче его обнаружить и измерить. Звёзды типа М-карликов, в особенности М4 (исследованная в работе [32]), слабо светят в видимой области спектра, но достаточно ярки в ближнем ИК-диапазоне. Эти звёзды составляют более 60 % звёзд, расположенных в области 10 пк от Земли, а из-за их малых массы и светимости сигнал RV, вызываемый подобной Земле планетой, принадлежащей "обитаемой зоне с жидкой водой", может более чем на порядок превышать сигнал, который вызывает Земля, вращающаяся вокруг Солнца. В лабораторных измерениях частоты была достигнута точность не менее 2×10^{-10} в диапазоне длин волн от 1450 нм до 1630 нм, что соответствует точности RV около 6 см с^{-1} . В реальных астрономических измерениях точность RV пока составляет $\approx 5 \text{ м с}^{-1}$.

В России исследования экзопланет проводятся в Специальной астрофизической обсерватории РАН на уникальном телескопе БТА (Большой телескоп азимутальный) с диаметром зеркала 6 м. В настоящее время рассматривается проект существенного улучшения точности измерений с использованием новейших достижений волоконной оптики и лазерной технологии [34].

6. Возможность других астрофизических исследований

Прецизионные спектральные измерения позволяют проводить не только поиск и изучение экзопланет, но и исследование других весьма важных проблем астрофизики. Так, в принципе посредством прецизионных измерений красных смещений удалённых космических объектов можно детально исследовать один из важнейших вопросов современной науки — эволюцию Вселенной, в частности непосредственно измерить величину ускорения расширения Вселенной. Для этого следует произвести в течение определённого интервала времени точные измерения скорости разлёта удалённых космических объектов по красному смещению спектральных линий и определить изменение скорости (ускорение) за этот промежуток времени.

Эта идея была выдвинута [35] в 1962 г. В то время полагали, что разлёт Вселенной происходит с замедлением из-за всемирного тяготения. Однако оценки показали, что при той точности спектральных измерений, которой обладали астрономические спектрометры в то время, потребовался бы интервал наблюдений в несколько сотен лет. В 2011 г. была присуждена Нобелевская премия С. Перлмуттеру [36], Б.П. Шмидту [37] и А.Дж. Риссу [38] за открытие ускоренного расширения Вселенной по наблюдению далёких сверхновых звёзд. Согласно их исследованиям величина этого ускорения составляет несколько сантиметров в секунду за несколько лет.

Точность астрономических спектральных измерений RV по доплеровским сдвигам, достигаемая с помощью описанных лазерных методик калибровки спектрометров, позволяет в принципе проводить прямое измерение величины ускорения разлёта Вселенной. Предполагается измерение RV от излучения квазаров с большим красным сдвигом в линиях поглощения межгалактических облаков. Для достижения этой цели разрабатывается международный проект CODEX (COsmic Dynamics EXperiment) [39, 40]. Предполагается также использование следующего поколения гигантских телескопов с усовершенствованными спектрометрами, в которых будет проводиться прецизионная абсолютная калибровка на основе совершенных лазерных систем.

Астрофизические исследования проводятся в Европейской южной обсерватории в Чили. Новейший телескоп VLT (Very Large Telescope), который представляет собой комплекс из четырёх отдельных 8,2-метровых оптических телескопов, эквивалентен телескопу с 16-метровым зеркалом. Утверждён проект сооружения ещё большего телескопа — E-ELT (European Extremely Large Telescope) с зеркалом диаметром 39 м, которое состоит из множества шестиугольных сегментов, позволяющих осуществить адаптивную оптическую систему. Спектрометры с $R \approx 150000$ в диапазоне длин волн 350–720 нм с калибровкой на основе лазерной ГОЧ позволяют измерять RV с точностью $1\text{--}2 \text{ см с}^{-1}$ на протяжении нескольких десятков лет.

Главной целью проекта CODEX является проведение впервые прямого измерения космической динамики с беспрецедентно высокой точностью. Это будет осуществлено посредством наблюдения многих линий квазаров с Z от $\sim 1,5$ до ~ 4 , в том числе линий $\text{Ly}\alpha$, сдвинутых в видимый диапазон за счёт красного смещения. Кроме измерений изменения скорости расширения Вселенной предполагается исследовать ряд весьма важных научных вопросов:

- 1) обнаружение двойников Земли в "жизненной зоне" звёзд, подобных Солнцу;
- 2) изучение истории образования Млечного Пути;
- 3) изучение взаимодействия галактик и межгалактической среды, из которой они образовались;
- 4) проведение улучшенных проверок стабильности фундаментальных физических констант.

Таким образом, работы по созданию новейших телескопов со спектрометрами прецизионного измерения внесут огромный вклад в важные области астрофизики.

7. Фемтосекундный лазер для исследований в космосе

Фемтосекундные лазерные ГОЧ, которые успешно применяются в астрофизических спектральных измерениях, начинают также играть важную роль в различных других космических исследованиях, планируемых на ближайшее будущее [41, 42]. В связи с этим необходимым условием является создание надёжных фемтосекундных лазерных систем, способных выдержать условия перегрузок и вибраций при ракетном запуске и работать в условиях температур и вакуума космического пространства под воздействием космических излучений. В этом отношении волоконные фемтосекундные лазеры предпочтительны ввиду их высокой стабильности оптической настройки, малых размеров и веса, большого к.п.д.

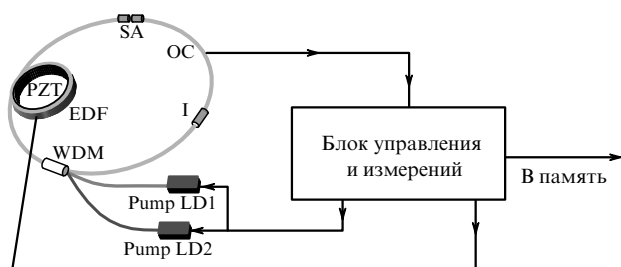


Рис. 13. Схема волоконного фемтосекундного лазера, запущенного в космос [43]. SA — полупроводниковый просветляющий поглотитель, PZT — пьезоэлектрический регулятор длины волокна, OC — выходной ответвитель, I — изолятор, EDF — эрбиевое волокно, WDM — ответвитель для накачки, Pump LD1 и Pump LD2 — лазерные диоды накачки.

Замечателен успех специалистов Корейского ведущего научно-технического института (Korea Advanced Institute of Science and Technology, KAIST), впервые осуществивших запуск в космос фемтосекундного лазера, продемонстрировавшего успешную работу в космосе в течение года [43]. Лазер был спроектирован в соответствии с требованиями работы в космосе, прошёл наземные испытания и был запущен на орбиту 30 января 2013 г. Лазерная установка весом 2,5 кг при запуске выдержала вибрации и перегрузки на уровне 10g.

На рисунке 13 показана традиционная схема кольцевого фемтосекундного лазера на Er:волокне с использованием полупроводникового просветляющего поглотителя с насыщением (Saturable Absorber, SA). Накачка производилась диодом на длине волны 980 нм с выходной мощностью 600 мВт. Выходная мощность системы составляла ≈ 14 мВт. Под действием космического излучения она снизилась за год на 8,6%. С помощью пьезоэлектрического элемента производилось регулирование частоты повторения импульсов. На рисунке 14 показаны характеристики лазера. Частота повторения импульсов составляла 25 МГц (рис. 14а). На рисунке 14б показан профиль автокорреляционной функции интенсивности, которой соответствует длительность импульса 350 фс. Спектр с максимумом на длине волны 1590 нм приведён на рис. 14в. Стабильность частоты, соотносённая с Rb:часами, характеризуется параметром Аллана (рис. 14г). Хотя эти данные довольно обычны для таких установок, тот факт, что они относятся к лазеру, работающему на космической орбите, весьма впечатляет!

8. Заключение

Знаменитый специалист в области лазеров Артур Шавлов говорил: "Если вы хотите измерить какую-либо физическую величину с высокой точностью, то постарайтесь сделать так, чтобы её измерение сводилось к измерению частоты". Астрономические измерения радиальной скорости движения звёзд являются прекрасной иллюстрацией этой мысли. Точные измерения движения звёзд сводятся к измерениям частот доплеровских смещений, причём высочайшая точность измерений обеспечивается новейшими достижениями лазерной физики. Разумеется, имеется существенная специфика. Долговременные измерения требуют надёжных эксплуатационных характеристик аппаратуры. Неудивительно

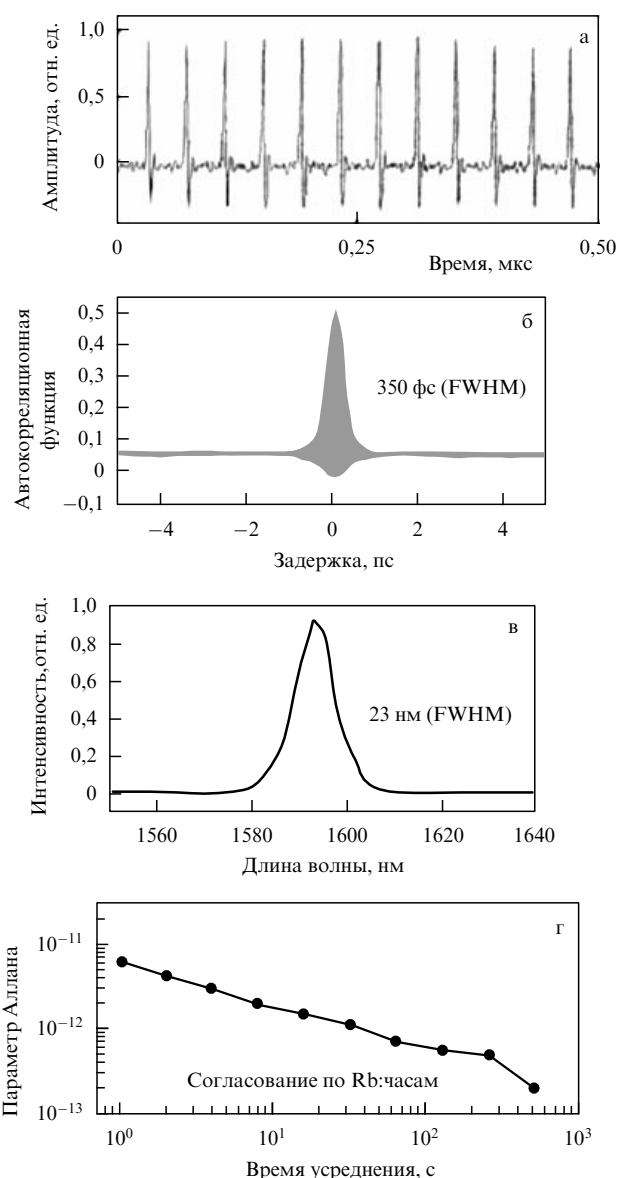


Рис. 14. Характеристики лазера: (а) последовательность импульсов, (б) длительность импульса, характеризующая автокорреляционной функцией интенсивности, (в) спектр, (г) стабильность частоты. FWHM (Full Width at Half Maximum) — полуширина на половине высоты.

использование в современных лазерных системах новейших достижений волоконной оптики, поскольку именно волоконные лазерные системы отличаются высокими эксплуатационными качествами. Последнее подтверждается успешным запуском фемтосекундного лазера в космос и его долговременной работой на орбите.

Калибратор астрономического спектрометра на основе фемтосекундного лазера является довольно сложным устройством. Поэтому его разработчики должны принимать непосредственное участие в продолжительных сеансах измерений в обсерваториях. Благодаря этому они получают возможность принимать участие в исследованиях, результаты которых представляют исключительную важность для фундаментальной науки. Есть все основания полагать, что работа в этой области является привлекательной для молодых исследователей.

Отметим, что работы в области разработки лазерных систем для астрофизических исследований не требуют создания больших установок и привлечения больших коллективов исследователей. Эти лазерные системы являются достаточно компактными и обладают отличными эксплуатационными характеристиками. Новейшие достижения в области лазерной физики, нелинейной оптики и волоконной оптики позволяют с успехом создавать такие системы.

Список литературы

1. Diddams S A et al. *Opt. Lett.* **25** 186 (2000)
2. Diddams S A et al. *Phys. Rev. Lett.* **84** 5102 (2000)
3. Holzwarth R et al. *Phys. Rev. Lett.* **85** 2264 (2000)
4. Hall J L et al. *IEEE J. Quantum Electron.* **37** 1482 (2001)
5. Udem T, Holzwarth R, Hänsch T W *Nature* **416** 233 (2002)
6. Fermann M E, Galvanauskas A, Sucha G (Eds) *Ultrafast Lasers: Technology and Applications* (Optical Engineering, Vol. 80) (New York: Marcel Dekker, 2003)
7. Крюков П Г *Лазеры ультракоротких импульсов и их применения* (Долгопрудный: Интеллект, 2012)
8. Крюков П Г *УФН* **183** 897 (2013); Kryukov P G *Phys. Usp.* **56** 849 (2013)
9. Бакланов Е В, Чеботаев В П *Квантовая электроника* **4** 1252 (1977); Baklanov E V, Chebotaev V P *Sov. J. Quantum Electron.* **7** 1252 (1977)
10. Холл Дж Л *УФН* **176** 1353 (2006); Hall J L *Rev. Mod. Phys.* **78** 1279 (2006)
11. Хэнш Т В *УФН* **176** 1368 (2006); Hänsch T W *Rev. Mod. Phys.* **78** 1297 (2006)
12. Jones D J et al. *Science* **288** 635 (2000)
13. Alfano R R, Shapiro S L *Phys. Rev. Lett.* **24** 584 (1970)
14. Knight J C et al. *Opt. Lett.* **21** 1547 (1996)
15. Ranka J K, Windeler R S, Stentz A J *Opt. Lett.* **25** 25 (2000)
16. Spence D E, Kean P N, Sibbett W *Opt. Lett.* **16** 42 (1991)
17. Bartels A, Heinecke D, Diddams S A *Science* **326** 681 (2009)
18. Endo M, Ito I, Kobayashi Y *Opt. Express* **23** 1276 (2015)
19. Keller U et al. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **2** 435 (1996)
20. Hoffmann M et al. *Opt. Express* **19** 8108 (2011)
21. Haus H A et al. *IEEE J. Quantum Electron.* **31** 591 (1995)
22. Newbury N R, Swann W C J *Opt. Soc. Am. B* **24** 1756 (2007)
23. Губин М А и др. *Квантовая электроника* **38** 613 (2008); Gubin M A *Quantum Electron.* **38** 613 (2008)
24. Gubin M A et al. *Appl. Phys. B* **95** 661 (2009)
25. Steinmetz T et al. *Appl. Phys. B* **96** 251 (2009)
26. Baklanova D et al. *Astron. Nachr.* **332** 939 (2011)
27. Mayor M et al. *The Messenger* (114) 20 (2003)
28. Parry I R *New Astron. Rev.* **50** 301 (2006)
29. Osterman S N et al. *Proc. SPIE* **9147** 91475C (2014)
30. Murphy M T et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **380** 839 (2007)
31. Wilken T et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **405** L16 (2010)
32. Wilken T et al. *Nature* **485** 611 (2012)
33. Ycas G G et al. *Opt. Express* **20** 6631 (2012)
34. Валявин Г Г и др. *Астрофиз. бюлл.* **69** 239 (2014); Valyavin G G et al. *Astrophys. Bull.* **69** 224 (2014)
35. Sandage A *Astrophys. J.* **136** 319 (1962)
36. Перлмуттер С *УФН* **183** 1060 (2013); Perlmutter S *Rev. Mod. Phys.* **84** 1127 (2012)
37. Шмидт Б П *УФН* **183** 1078 (2013); Schmidt B P *Rev. Mod. Phys.* **84** 1151 (2012)
38. Рисс А Дж *УФН* **183** 1090 (2013); Riess A G *Rev. Mod. Phys.* **84** 1165 (2012)
39. Liske J et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **386** 1192 (2008)
40. Pasquini L et al. *Proc. SPIE* **7735** 77352F (2010)
41. Coddington I et al. *Nature Photon.* **3** 351 (2009)
42. Lee J et al. *Nature Photon.* **4** 716 (2010)
43. Lee J et al. *Sci. Rep.* **4** 5134 (2014)

Femtosecond lasers for astrophysics

P.G. Kryukov

Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences,
Leninskii prosp. 53, 119991 Moscow, Russian Federation;
Fiber Optics Research Center, Russian Academy of Sciences,
ul. Vavilova 38, 119333 Moscow, Russian Federation
Tel. +7 (499) 135 75 30
E-mail: kryukov@fo.gpi.ru

Passively mode-locked continuous-wave (cw) lasers offer the unique feature of generating a strictly periodic train of absolutely identical femtosecond pulses, their emission spectrum representing a comb of equidistant narrow spectral lines separated by the interval determined by the pulse repetition rate. Thus, a cw femtosecond laser is a source of a regular optical frequency comb (OFC), which can be compared to a cesium frequency standard (second standard) for the precise measurement of optical frequencies for the development of extremely precise atomic clocks, precision spectroscopy and metrology. One of the main applications of OFCs based on cw femtosecond lasers is precision spectrometric measurements of Doppler shifts in stellar spectra appearing due to the radial motion of stars with respect to the observer. To provide the high measurement accuracy required for the search for and study of exoplanets, a precision calibrator for an astronomical spectrometer is required. Such a calibrator can be based on a femtosecond laser OFC. Laser systems for astronomic investigations, including femtosecond lasers for space studies, are considered. It is assumed that the development of these methods will provide direct measurements of the accelerated expansion of the Universe.

Keywords: laser frequency combs, femtosecond fiber laser, cosmic laser, astronomic instruments

PACS numbers: **42.62. – b, 97.82. – j, 98.80. – k**

DOI: 10.3367/UFNr.0185.201508b.0817

Bibliography — 43 references

Received 10 March 2015, revised 9 June 2015

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **185** (8) 817–827 (2015)

Physics – Uspekhi **58** (8) (2015)