

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ

ISSN 2410-4914



ПРЕПРИНТ

3

П.Г. КРЮКОВ

**ФЕМТОСЕКУНДНЫЕ ЛАЗЕРЫ
ДЛЯ АСТРОФИЗИКИ**

Москва — 2015

ПРЕПРИНТЫ ФИАН им. П. Н. ЛЕБЕДЕВА

ISSN 2410-4914

Главный редактор В. И. Ритус, *зам. главного редактора* А. А. Гиппиус,
научный секретарь С. А. Богачев, *ответственный секретарь* Л. В. Селезнев

Редакционная коллегия: В. С. Бескин, А. А. Горбачевич, О. Д. Далькаров,
Е. И. Демихов, И. Г. Зубарев, К. П. Зыбин, А. А. Ионин, Н. Н. Колачевский,
Е. Р. Корешева, С. Ф. Лихачев, А. С. Насибов, И. Д. Новиков, В. Н. Очкин,
Н. Г. Полухина, В. С. Лебедев, Н. Н. Сибельдин, Д. Р. Хохлов, С. А. Чайковский

Информация

Препринты ФИАН им. П. Н. Лебедева издаются с 1964 г.

Издатель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН)

Адрес редакции: Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53, ФИАН

Тел.: +7 (499) 132-6137, +7 (499) 783-3640;

E-mail: preprins@sci.lebedev.ru, irinakh@sci.lebedev.ru

Страница сборника «Препринты ФИАН им. П. Н. Лебедева» в интернете:

<http://preprints.lebedev.ru/>

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМ. П.Н. ЛЕБЕДЕВА

П. Г. Крюков

ФЕМТОСЕКУНДНЫЕ ЛАЗЕРЫ ДЛЯ АСТРОФИЗИКИ

№ 3

Москва 2015

ФЕМТОСЕКУНДНЫЕ ЛАЗЕРЫ ДЛЯ АСТРОФИЗИКИ

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

Аннотация

Лазеры непрерывного действия с пассивной синхронизацией мод обладают уникальной особенностью: они испускают строго периодическую последовательность совершенно одинаковых импульсов фемтосекундной длительности, а спектр излучения представляет гребёнку эквидистантно расположенных узких спектральных линий. Последнее обстоятельство открыло возможность прецизионного измерения частоты оптического диапазона, что чрезвычайно важно для создания сверхточных атомных часов и прецизионной спектроскопии. Рассматривается возможность использования систем непрерывных лазеров фемтосекундных импульсов для прецизионных измерений с помощью астрономических спектрометров доплеровских смещений за счёт радиальных скоростей. Высокая точность таких измерения требуется для поиска и исследований экзопланет. Предполагается, что в будущем развитие рассматриваемых методов позволит прямые измерения ускорения расширения Вселенной.

Введение

Многолетние, упорные и обстоятельные исследования лазеров привели к созданию лазеров нового типа – лазеров с пассивной синхронизацией мод, работающих в непрерывном режиме. Эти лазеры генерируют строго непрерывную последовательность импульсов фемтосекундной длительности. Уникальной особенностью лазеров этого типа является его спектр. Он состоит из гребёнки чрезвычайно узких, эквидистантно расположенных линий, причём интервал между линиями равен периоду последовательности импульсов, а полная ширина спектра соответствует длительности фемтосекундного импульса согласно преобразованию Фурье и может быть достаточно большой (до сотни нм) (рис. 1).

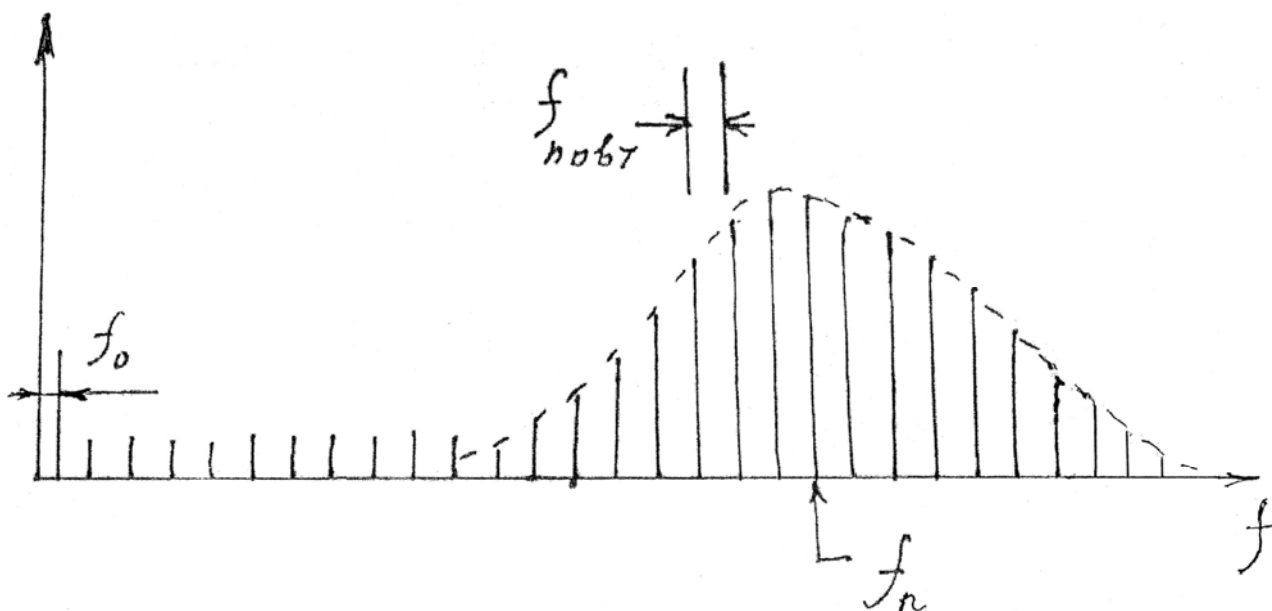


Рис. 1. Спектр излучения непрерывного фемтосекундного лазера (ради наглядности показано малое число линий, в действительности их число может достигать 1 млн.).

Таким образом, непрерывный лазер фемтосекундных импульсов сочетает свойство источника лазерного излучения в виде чрезвычайно коротких импульсов (до единиц фс) со свойствами источника лазерного излучения в виде чрезвычайно узких спектральных линий (с ширинами до десятков мГц). Эта уникальная особенность привела к обширным

исследованиям, и многим, весьма важным применениям, которые изложены во многих статьях, обзорах и монографиях /1-8/.

1. Лазерная гребёнка оптических частот

Как видно на рис. 1, частота f_n каждой линии гребёнки оптических частот (ГОЧ) определяется как

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

где $f_{\text{повт}}$ – частота повторения импульсов в последовательности, n – номер линии (моды лазера), причём он может пробегать значения до 10^6 , а f_0 – сдвиг всей гребёнки, как целого, относительно нуля частоты. Её значение 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). Зная значения n , $f_{\text{повт}}$ и f_0 , можно определить оптическую частоту линии гребёнки f_n . Замечательно, что обе частоты ($f_{\text{повт}}$ и f_0) лежат в радиодиапазоне, допускают точную, плавную регулировку и сопоставление их значений с частотой эталона секунды (Cs-стандарт). Таким образом, появляется возможность прямого и исключительно точного определения оптической частоты. Это обеспечивает существенный прогресс в проблеме лазерных стандартов частоты /9/ и создания компактных схем сверхточных оптических часов /10/.

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. Зная длину волны и скорость света с существующей точностью, можно получить значение частоты, близкое к частоте f_n . Разделив это значение на величину интервала гребёнки, получаем n . Частоту повторения $f_{\text{повт}}$ можно плавно регулировать изменением длины резонатора лазера с помощью пьезоэлектрического регулятора и измерять, используя быстрый фотодиод и осциллограф или радиочастотный спектроанализатор. Регулировка и измерение f_0 , значение которой, как видно на рис. 1, составляет часть $f_{\text{повт}}$, сложнее. Поскольку эта частота зависит от дисперсии вещества в резонаторе, её можно регулировать изменением внутрирезонаторной ДГС, причём требуется весьма малое, но строго

регулируемое изменение. Т.к. внутрирезонаторным веществом является активная среда лазера, её ДГС зависит от величины инверсной населённости, которая, в свою очередь, зависит от мощности источника накачки лазера. Таким образом, малым изменением этой мощности можно регулировать величину f_0 . Для точного определения этой частоты используется особая методика интерферометрического сравнения частот краёв ГОЧ /11/. 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 /12 /. При этом в качестве нелинейной среды с высокой нелинейностью применяется т.н. микроструктурированное оптическое волокно типа фотонных кристаллов /13, 14/. Пример преобразования спектра фемтосекундного лазера за счет генерации суперконтинуума показан на рис. 2. Излучение суперконтинуума направляется в т.н. f - $2f$ интерферометр (рис. 3), в одном плече которого генерируется вторая гармоника низкочастотного края ГОЧ. В результате получается интерференция излучения высокочастотного края ГОЧ ($f^{\text{син}}$) и удвоенного по частоте излучения низкочастотного края ГОЧ ($2f^{\text{крас}}$), что даёт на фотоприёмнике частоту биений $f^{\text{б}}$, которая регистрируется радиочастотным спектроанализатором. Используя (1) для интерферирующих частот, получаем значение частоты биений $f^{\text{б}}$:

$$f^{\text{б}} = 2f^{\text{крас}} - f^{\text{син}} = 2(nf_{\text{повт}} + f_0) - (2nf_{\text{повт}} + f_0) = f_0 \quad (2)$$

Как видим, в результате такой операции получается значение искомой частоты.

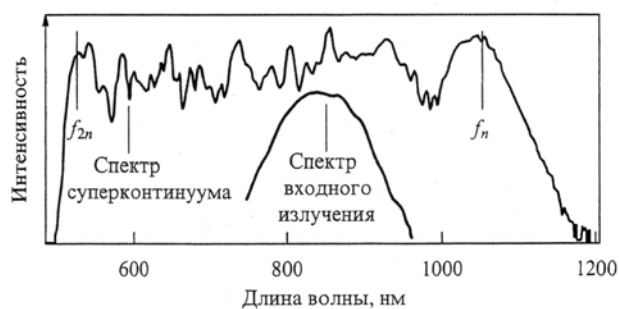


Рис. 2. Уширение спектра ГОЧ при генерации суперконтинуума в микроструктурированном волокне.

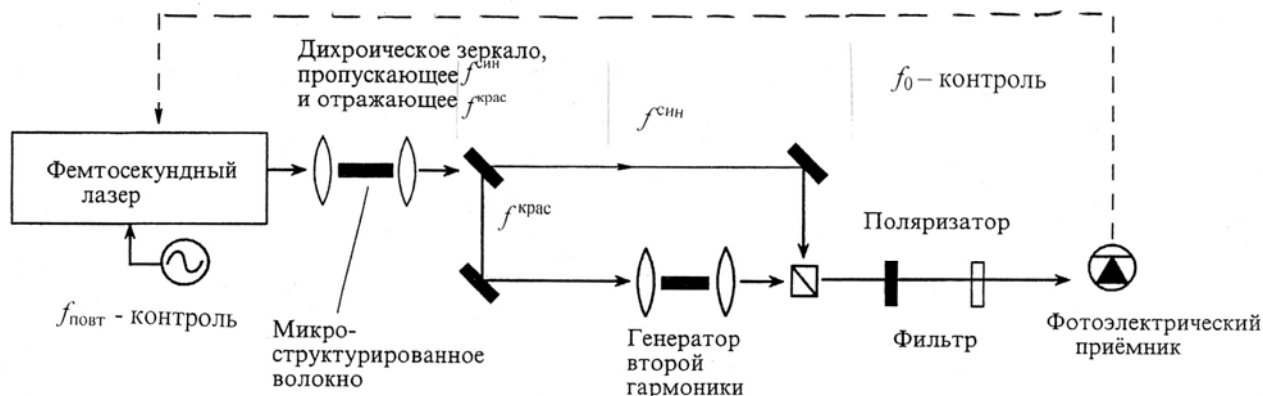


Рис. 3. Схема измерения частоты f_0 .

Эти операции, приводящие к точному определению оптической частоты гребёнки, превращают генератор ГОЧ на основе непрерывного фемтосекундного лазера в *синтезатор* оптических частот, с прецизионно точными значениями. Это открывает возможность получения и прямого измерения оптических частот. Точные измерения оптических частот позволяют иметь вторичные эталоны оптической частоты, например, линии поглощения метана, ацетилена, а также излучения узкополосных лазеров, частота линии которых стабилизируется. Располагая такими вторичными эталонами, можно использовать их для контроля частоты f_0 ГОЧ вместо сложной методики f - $2f$ интерферометра.

Прецизионное измерение оптических частот является основой исследований, направленных на создание сверхточных оптических часов. Поскольку 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 было указано В.П. Чеботаевым /15/. Быстрая реализация и развитие фемтосекундных лазеров привело к замечательным результатам, в том числе и тех, которые были отмечены Нобелевской премией Дж. Л. Холлу и Т.В. Хэншу /16, 17/.

Кроме оптических часов, важным применением лазерной ГОЧ стала прецизионная калибровка спектрометров. Обычно калибровку спектрометров производят регистрацией излучения спектральной лампы (например, типа полый

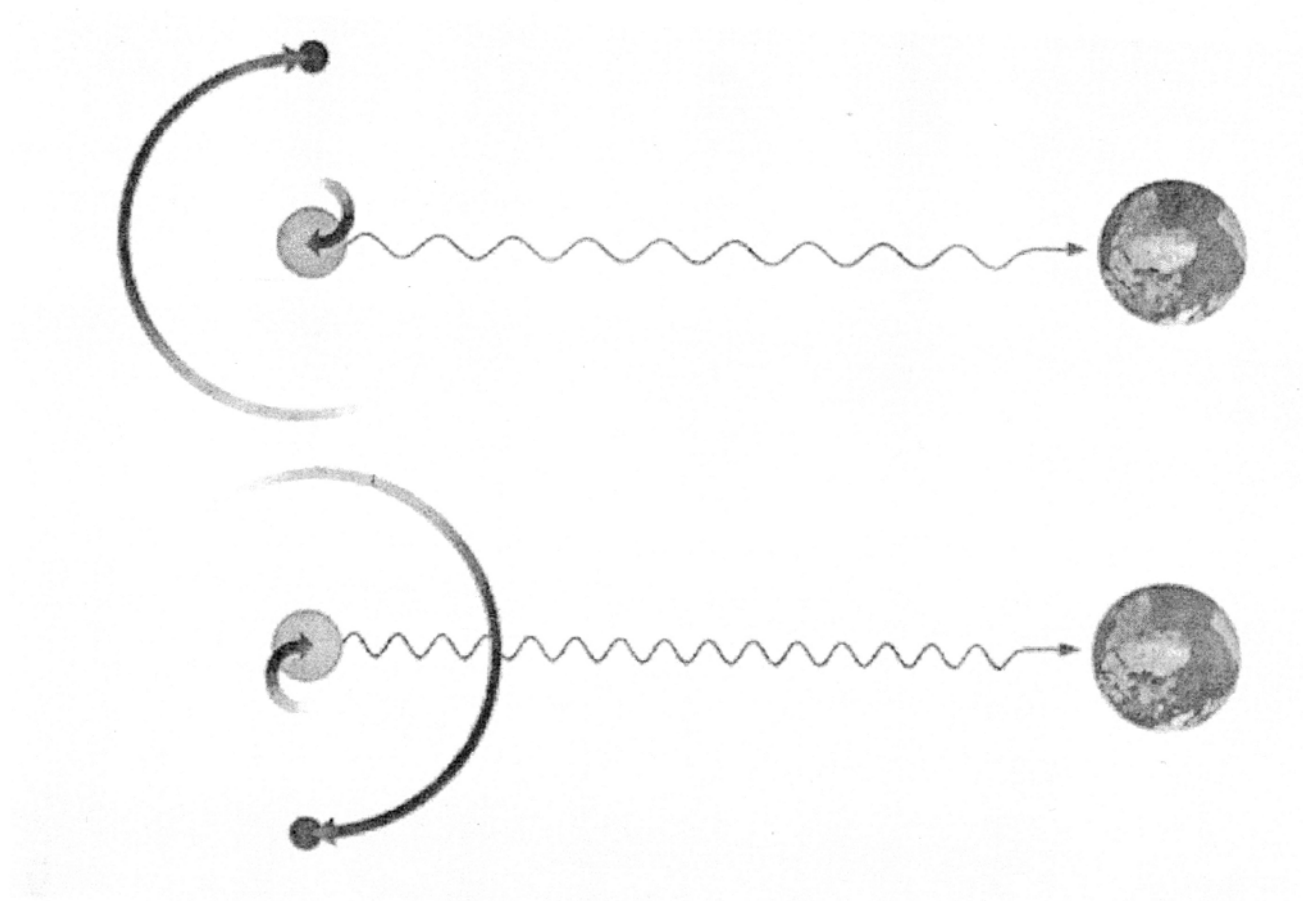
катод), испускающей спектральные линии вещества, наполняющего лампу. В частности, для калибровки астрономических спектрометров используется лампа типа полого катода с Th-Ag наполнением. Недостатком такой методики является ограниченная точность значений спектральных линий (менее 7-го знака), их неравномерное распределение по спектру и по интенсивностям, а также влияние внешних условий и старение лампы. Лазерная ГОЧ, являясь синтезатором прецизионных оптических частот, способна заменить спектральные линии атомов. По существу, она является искусственным «атомом» с регулярным расположением спектральных линий. Её использование для калибровки способно преодолеть недостатки спектральных ламп. Поэтому вполне естественно стремление использовать ГОЧ для калибровки астрономических спектрометров высокой точности /18/.

2. Спектроскопия в астрономии

Как известно, спектроскопия имеет исключительное значение для астрономии, также как и астрономия для оптики и спектроскопии. Значительная, если не преобладающая, часть наших знаний о космосе получена с помощью изучения спектров астрономических объектов. В настоящее время эти спектры исследуются не только в оптической области, но и в диапазонах радиоволн, рентгеновского и гамма-излучения.

Помимо определения состава и свойств космических объектов, спектры позволяют измерять скорости их движения по эффекту Доплера. В частности, методика измерений скоростей звёзд по эффекту Доплера используется для обнаружения и исследований планет, обращающихся вокруг других звёзд, - экзопланет. Дело в том, что планета в своём движении по орбите вызывает движение самой звезды относительно общего центра масс (рис. 4). Это периодическое изменение скорости по отношению к наблюдению (радиальной скорости РС) можно измерить по доплеровскому смещению спектральных линий звезды. Следует иметь в виду, что эти смещения РС, зависящие от отношения масс планеты и звезды, очень малы. Так вращение Юпитера вокруг Солнца вызывает движение Солнца с максимумом скорости 12 м/с и периодом около 12 лет, а Земля – лишь 9 см/с с периодом 1 год. Так что, для обнаружения планет с помощью доплеровских сдвигов требуются измерения весьма малых смещений спектров, регистрируемых в течение продолжительных периодов

времени. Для этого требуется высокое спектральное разрешение и точность измерения. Следует отметить, что одной из мотиваций обнаружения и изучения экзопланет является поиск планет, подобных нашей Земле и обращающихся на таком расстоянии от звезды, при котором температура на поверхности планеты, допускает существование воды в жидкой фазе (т.н. «жизненная зона»). Для этого требуется точность измерения доплеровских сдвигов спектра на уровне ~ 1 см/с, что соответствует точности регистрации частот на уровне 10-го знака. Отметим, что исследования в области прецизионных измерений частоты позволяют достигать точности, превосходящей 15-й знак. Но это достигнуто с помощью лабораторных устройств. В астрономии же приходится иметь дело с исключительно слабыми источниками, для исследований которых создаются гигантские телескопы с площадью зеркала, позволяющего собрать их свет.



*Рис. 4. Свет от звезды, вокруг которой вращается экзопланета.
Под действием её тяготения звезда совершает небольшие колебательные движения,
которые вызывают доплеровское смещение спектра.*

Обычно разрешающая сила спектрометра определяется способностью разрешить две соседние спектральные линии (критерий Рэлея) при их *одновременной* регистрации, как показано на рис. 5а. При этом нужна *относительная* калибровка шкалы длин волн (частот) спектрометра. В случае измерения доплеровского смещения, спектры регистрируются *раздельно* на протяжении значительного времени (до нескольких лет!). При точной, и, что самое главное, *абсолютной* привязке положения линий спектра к шкале длин волн (частот) можно определить смещение спектра даже относительно широких линий, как показано на рис. 5б. Поэтому астрономические спектрометры, предназначенные для исследований, основанных на измерениях весьма малых доплеровских смещений, должны помимо высокой чувствительности и разрешающей способности обладать весьма точной калибровкой, привязанной к стандарту частоты (атомные часы).

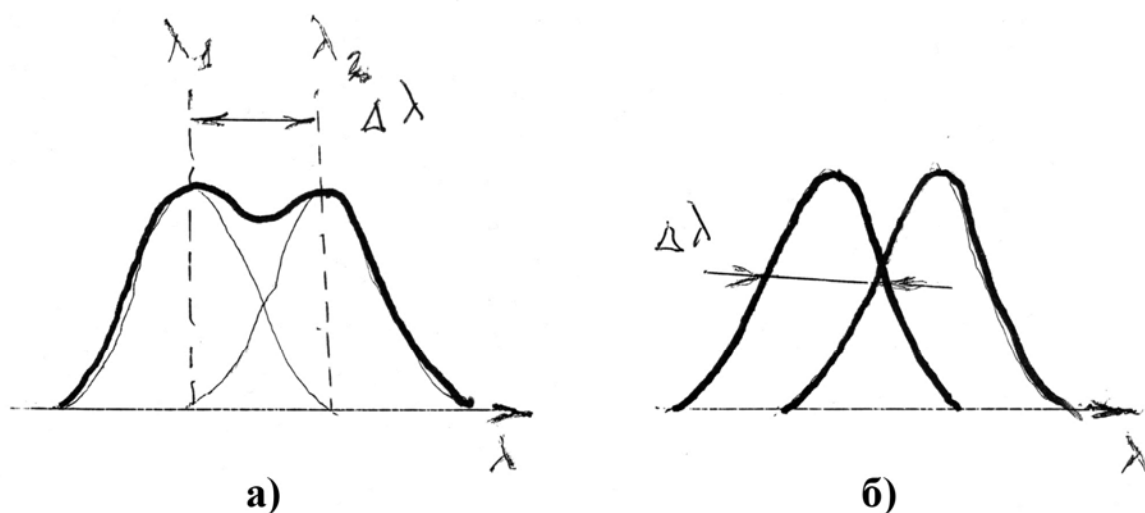


Рис. 5. Регистрация спектров двух линий: а) одновременная регистрация (разрешение по Рэлею); б) раздельная регистрация.

Для поиска и исследований экзопланет разработаны уникальные спектрометры, примером которого является HARPS (High Accuracy Radial velocity Planet Searcher) /19/. В них используются дифракционные решётки типа эшелле большого размера. Разрешающая сила $R = \lambda/\Delta\lambda = v/\Delta v$ может достигать 10^5 . Это сложные, громоздкие, стационарные устройства (рис. 6), в которых предусмотрена высокая механическая и термическая стабильность. Поэтому для связи спектрометра с движущимся телескопом приходится использовать особую

волоконно-оптическую линию связи. В обычных широко распространенных линиях связи используются одномодовые волокна с сердцевинной диаметром 5-7 мкм. Они не годятся, поскольку не способны передавать широкий спектр без искажений. В данном случае используются специальные волоконные световоды с сердцевинной особой конфигурации с размерами в сотни мкм [20, 21]. В них полностью исключена модовая структура распространяемого излучения и, соответственно, исключены искажения спектра.

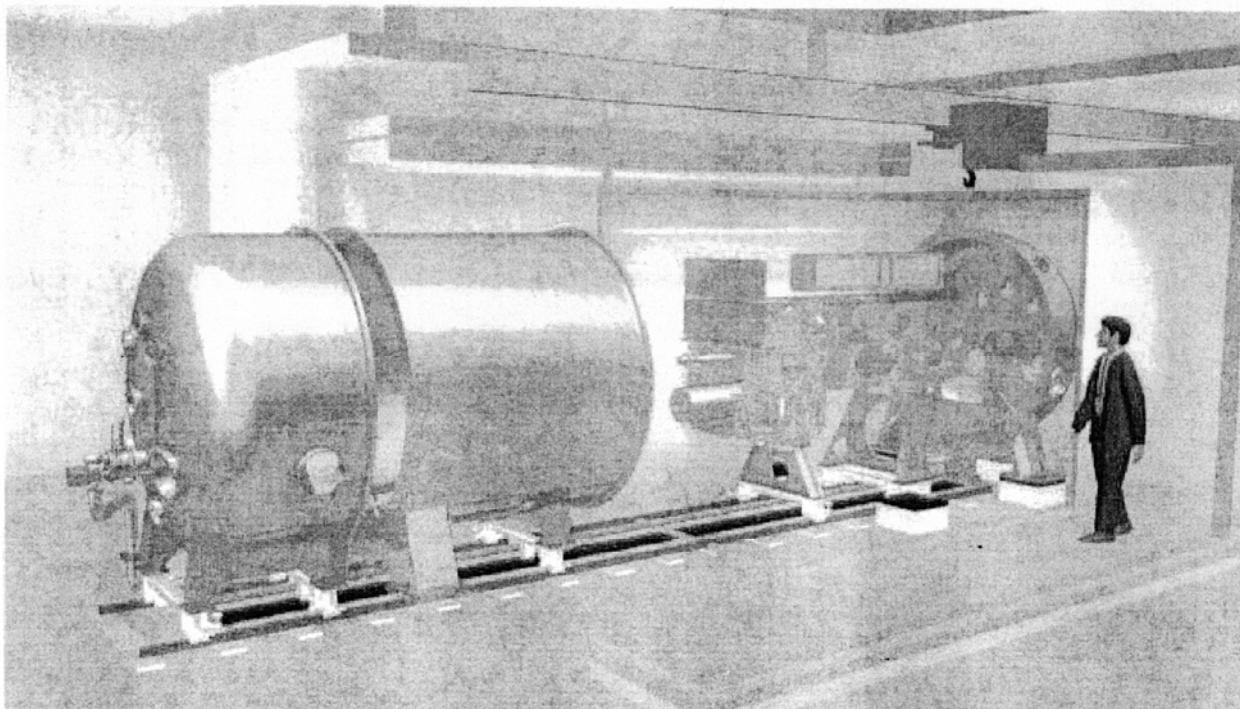


Рис. 6. Спектрометр типа HARPS.

Использование лазерной ГОЧ для точной калибровки таких спектрометров встречает значительные трудности. Во-первых, все современные лазеры фемтосекундных импульсов не работают в нужной, видимой, области спектра (лазер на сапфире $\sim 0,8$ мкм, волоконные лазеры $\sim 1,1$ мкм и $\sim 1,5$ мкм). Также следует иметь в виду, что протяжённость спектра ГОЧ ограничена. Во-вторых, как указано выше, интервал между линиями ГОЧ равен частоте повторения импульсов и обычно составляет около 100 МГц, что определяется размерами длины резонатора (несколько дм) 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.

Для использования лазерной ГОЧ в астрономических исследованиях важнейшей задачей является преодоление этих трудностей. Первая трудность принципиально решается методами нелинейной оптики (генерация второй гармоники, генерация суперконтинуума). Это существенно облегчается тем обстоятельством, что источником ГОЧ являются фемтосекундные импульсы, принципиально обладающие высокой пиковой мощностью и интенсивностью. Как было указано выше с помощью генерации суперконтинуума можно получить ширину спектра ГОЧ протяжённостью свыше октавы. Преодоление второй трудности требует проведения целеустремлённых исследований, направленных на создание специализированных фемтосекундных лазерных систем. Эти исследования привели к замечательным результатам, излагаемым ниже.

3. Фемтосекундные лазеры с высокой (более нескольких ГГц) частотой повторения импульсов

Была предпринята попытка уменьшить размеры классического фемтосекундного лазера на сапфире, который работает за счёт эффекта «керровской линзы» /22/. Использовалась кольцевая схема, причём для управления ДГС, требуемого для сокращения длительности импульсов, одно из зеркал резонатора имело т.н. чирпирующее покрытие. В результате получилась уникальная конструкция столь малых размеров, что она могла быть размещённой на монете 2 евроцента (50 коп) (рис. 7) /23/. Частота повторения импульсов составляла 10 ГГц, что позволило разрешить спектрометром линии ГОЧ после генерации суперконтинуума.

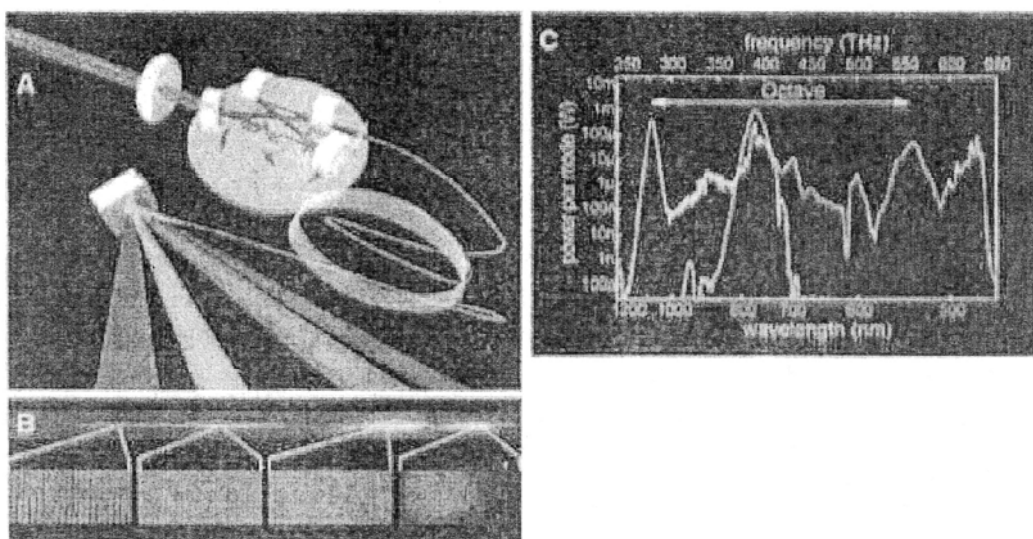


Рис. 7. Лазер с частотой повторения импульсов 10 ГГц; а) для сравнения на монете 0,02 евро; б) спектры после генерации суперконтинуума; с) спектр лазера и суперконтинуума /11/.

Следует иметь в виду, что увеличение частоты повторения импульсов влечёт соответствующее уменьшение энергии импульса и, соответственно, снижение пиковой мощности. Режим пассивной синхронизации мод достигается за счёт нелинейного эффекта просветляющегося поглотителя, требующего достаточной интенсивности. Поэтому лазеры этого типа имеют два порога – обычной генерации и режима генерации фемтосекундных импульсов. Вторым режимом может и не состояться при малой интенсивности излучения при высокой частоте повторения. Тем не менее, в данной конструкции пиковая мощность была достаточной для режима генерации фемтосекундных импульсов, что достигалось использованием для накачки этого лазера дорогостоящей, относительно громоздкой лазерной системы типа Verdi (COHERENT) с непрерывной мощностью ~ 10 Вт, что усложняло всю установку. Недостатком этой системы является практическая невозможность осуществить усиление импульсов, что затрудняет практическую эксплуатацию. В астрономических исследованиях эта лазерная система не использовалась.

Эффект пассивной синхронизации мод универсален и может быть реализован в различных типах лазеров, в частности, в полупроводниковых лазерах, которые принципиально обладают малыми размерами. Поэтому их можно использовать для создания фемтосекундных лазеров с повышенной частотой повторения импульсов. Прежде всего, отметим, что полупроводниковый инжекционный лазер (лазерный диод) является важнейшей частью всех современных фемтосекундных лазерных систем, поскольку именно эти лазеры используются в качестве источника оптической накачки. Преимущества лазерного диода хорошо известны: высокая эффективность прямого преобразования электрической энергии в лазерное излучение, компактность и миниатюрность, сравнительно низкая стоимость, обеспечивающая доступность использования.

Полупроводниковые материалы также с большим успехом используются в качестве насыщающихся поглотителей с характеристиками, нужными для обеспечения режима пассивной синхронизации мод. Имеется в виду специальная многослойная структура – SESAM (Semiconductor Saturable Absorber Mirror) /24/. Полупроводниковые структуры также можно использовать в качестве активной среды с оптической накачкой излучением лазерного диода.

В результате получается дисковый лазер (рис. 8) /25/, конструкция которого позволяет уменьшать размеры резонатора и при этом удаётся достигать частоты повторения вплоть до 50 ГГц. Однако до сих пор такие лазеры не использовались для калибровки астрономических спектрометров.

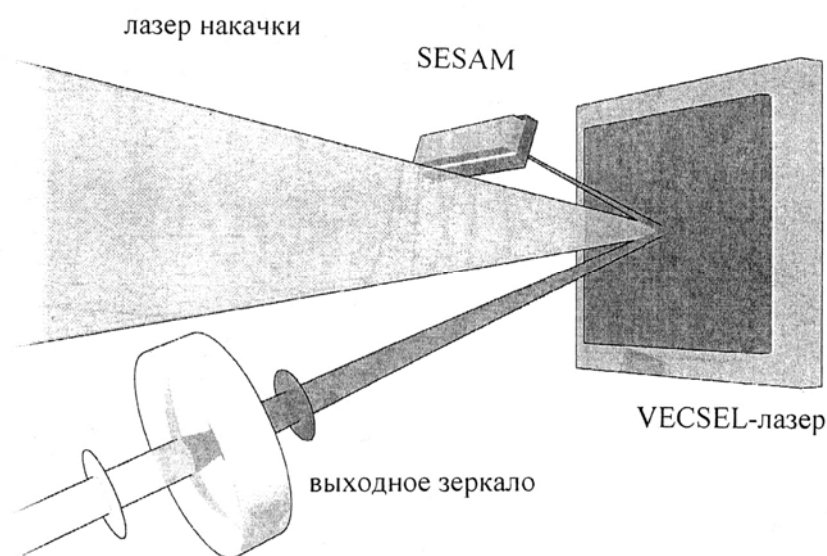


Рис. 8. Фемтосекундный полупроводниковый лазер с оптической накачкой (VECSEL – vertical external cavity surface emitting laser).

Успешное применение фемтосекундных лазеров для калибровки астрономических спектрометров удалось реализовать с помощью волоконных фемтосекундных лазеров. Как известно волоконные лазеры обладают исключительно важными преимуществами. Они имеют высокий КПД благодаря использованию диодной накачки, причём нужный режим генерации фемтосекундных импульсов достигается при сравнительно малых мощностях накачки ($< 1\text{Вт}$), что обеспечивает доступность и удобство эксплуатации. Они компактны и практически не подвержены влиянию внешних воздействий. Поскольку сердцевина одномодовых волоконных световодов, используемых в этих лазерах, окружена толстой оболочкой плавленного кварца, осуществляется эффективный теплоотвод и отпадает необходимость в особых системах охлаждения. В конструкциях удаётся широко использовать элементы, разработанные для систем волоконно-оптической связи. Наконец, режим пассивной синхронизации мод удаётся осуществлять с помощью специфического механизма - нелинейного вращения поляризации /26/. Всё это

привело к тому, что фемтосекундные волоконные лазеры получили огромное развитие, вплоть до того, что возникли фирмы, освоившие выпуск лазеров этого типа (IMRA (США), Menlo Systems (ФРГ), АВЕСТА (Россия)).

Примером использования ГОЧ на основе волоконного фемтосекундного лазера для прецизионных измерений оптических частот являются работы [27, 28]. В этой работе Er:волоконный фемтосекундный лазер использовался в компактной схеме оптических часов (стабильность на уровне 10^{-14}) на основе Ne-Ne/CH₄ (длина волны 3.39 мкм) стандарта частоты. Выше было указано, что частоту f_0 ГОЧ можно измерять и контролировать без сложной методики $f-2f$ интерферометра, для которой требуется генерация суперконтинуума с шириной спектра свыше октавы. Это можно сделать, если имеются оптические стандарты частоты, в частности, Ne-Ne/CH₄ стандарт. С его помощью можно стабилизировать ГОЧ путём генерации разностной частоты от линий ГОЧ (f_n и f_m), лежащих в разных частях ГОЧ, но с интервалом между ними меньшим октавы. Такую генерацию можно получить с помощью подходящего нелинейного кристалла (PPLN). В результате получается новая гребёнка, но уже на разностной частоте, в которую попадает частота оптического стандарта:

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

Таким образом, частота f_0 исключается и остаётся лишь регулировать $f_{\text{повт}}$. В данной работе это производилось путём пьезоэлектрического регулирования длины волокна резонатора. Схема установки показана на Рис. 9. Использовался кольцевой лазер на Er:волокне (длина волны $\sim 1,55$ мкм) с регулировкой частоты повторения импульсов (в диапазоне 62 МГц) с помощью пьезоэлектрического регулирования. Оно производилось по двум каналам: «медленный» и «быстрый». В разрыв волокна включались два линзовых коллиматора, расстояние между которыми регулировалось пьезоэлектрической подвижкой. Это позволяло получать достаточно большое, но сравнительно медленное изменение длины резонатора. Для быстрого изменения малой длины резонатора к секции волокна длиной 5 мм непосредственно приклеивался пьезоэлектрический толкатель. После усиления в Er:волоконном усилителе производилась генерация суперконтинуума в оптическом волокне с высокой нелинейностью. В результате получалась ГОЧ в диапазоне 950-1750 нм. Итак, с помощью

фемтосекундного волоконного лазера получается компактная и эффективная (полные мощности источников накачки менее 1 Вт) система генерации ГОЧ с широкой полосой спектра.

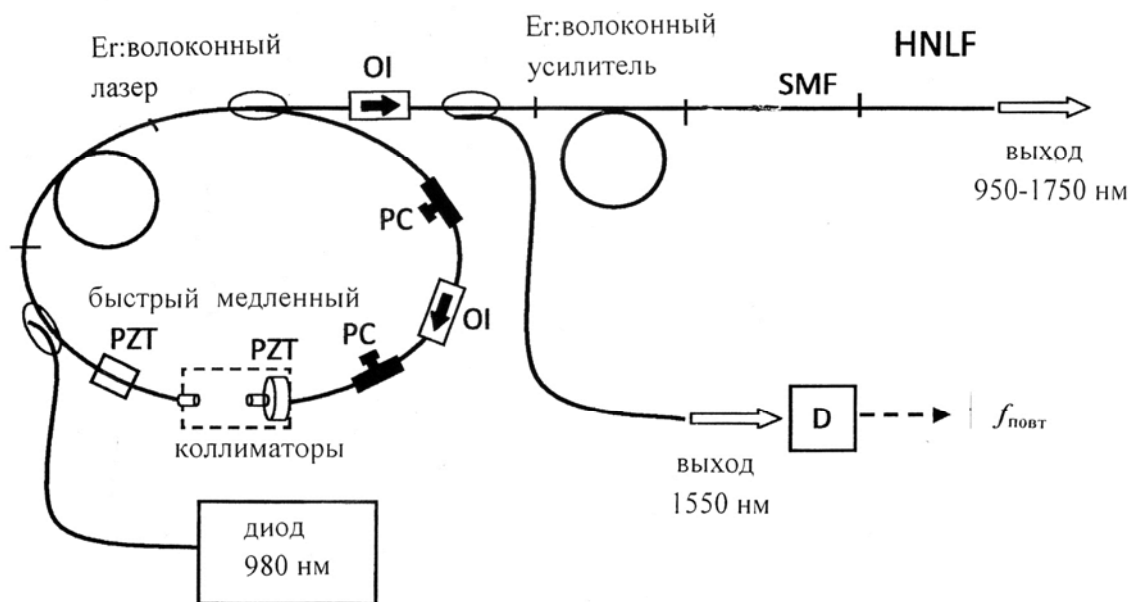


Рис. 9. Er:волоконная фемтосекундная лазерная система. PZT – пьезоэлектрический толкатель, OI – оптический изолятор, PC – контроллер поляризации, SMF – одномодовое волокно, HNLF – волокно с высокой нелинейностью.

Однако наряду с несомненными достоинствами у волоконных фемтосекундных лазеров имеется существенный недостаток. Поскольку оптические волокна – протяжённые, по своей сути, структуры, трудно уменьшить длину резонатора, до размеров, нужных для увеличения частоты повторения свыше 1 ГГц. Так, конструкция фирмы Menlo Systems, разработанная для использования в астрофизических исследованиях, имеет частоту повторения 250 МГц. Однако этот недостаток удаётся преодолеть остроумным способом – фильтрацией излучения ГОЧ [29]. Как известно, эталон Фабри-Перо обладает высоким пропусканием на резонансных частотах (модах), значения которых определяются расстоянием между зеркалами. Это открывает возможность нужной фильтрации пропускаемого излучения по частоте. Если толщина эталона Ф-П меньше длины резонатора лазера в n раз, через него будут пропускаться линии ГОЧ с разряжением в n раз, как показано на рис. 10.

Ширина характеристики пропускания эталона зависит от коэффициента отражения зеркал. Доступные зеркала не имеют коэффициента отражения, нужного для выделения одной линии. Поэтому в реальных условиях для фильтрации с подавлением соседних линий приходится использовать последовательно два и даже три эталона.

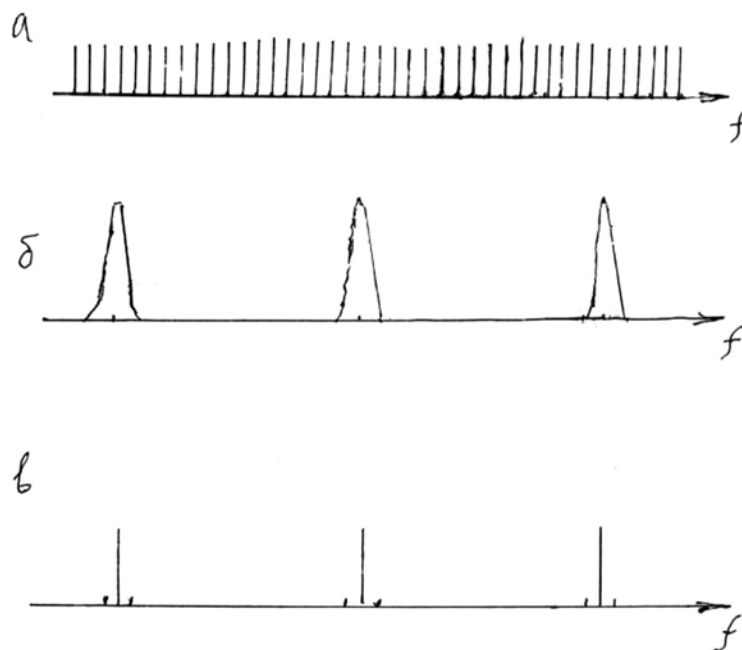


Рис. 10. Фильтрация излучения ГОЧ эталоном Фабри-Перо, а) спектр фемтосекундного лазера, б) пропускание эталона Ф-П, в) спектр после фильтрации.

Волоконные фемтосекундные лазеры имеют ещё одну особенность, чрезвычайно важную для реального использования. Как отмечалось, увеличение частоты повторения автоматически означает соответствующее уменьшение пиковой мощности импульса. Фильтрация ГОЧ также приводит к уменьшению пиковой мощности в n раз. Поэтому необходимо усиление для компенсации ослабления. Его можно эффективно реализовать, используя волоконный усилитель с таким же волокном, которое используется в лазере. Стандартная схема эффективной накачки активного волокна (double-clad) позволяет уверенно достигать выходной мощности на уровне 10 Вт. Уширение импульса за счет протяжённого распространения импульса в усилительном волокне, обладающего дисперсией, можно компенсировать отрезком волокна с дисперсией

противоположного знака. Технология изготовления оптических волокон позволяет создавать такие волокна. Итак, получается ГОЧ с большим интервалом и с интенсивностью импульсов, допускающей нелинейные преобразования: генерация 2-й гармоники и генерация суперконтинуума. На рис. 11 показаны изменения спектра при преобразованиях излучения ГОЧ фемтосекундного лазера.

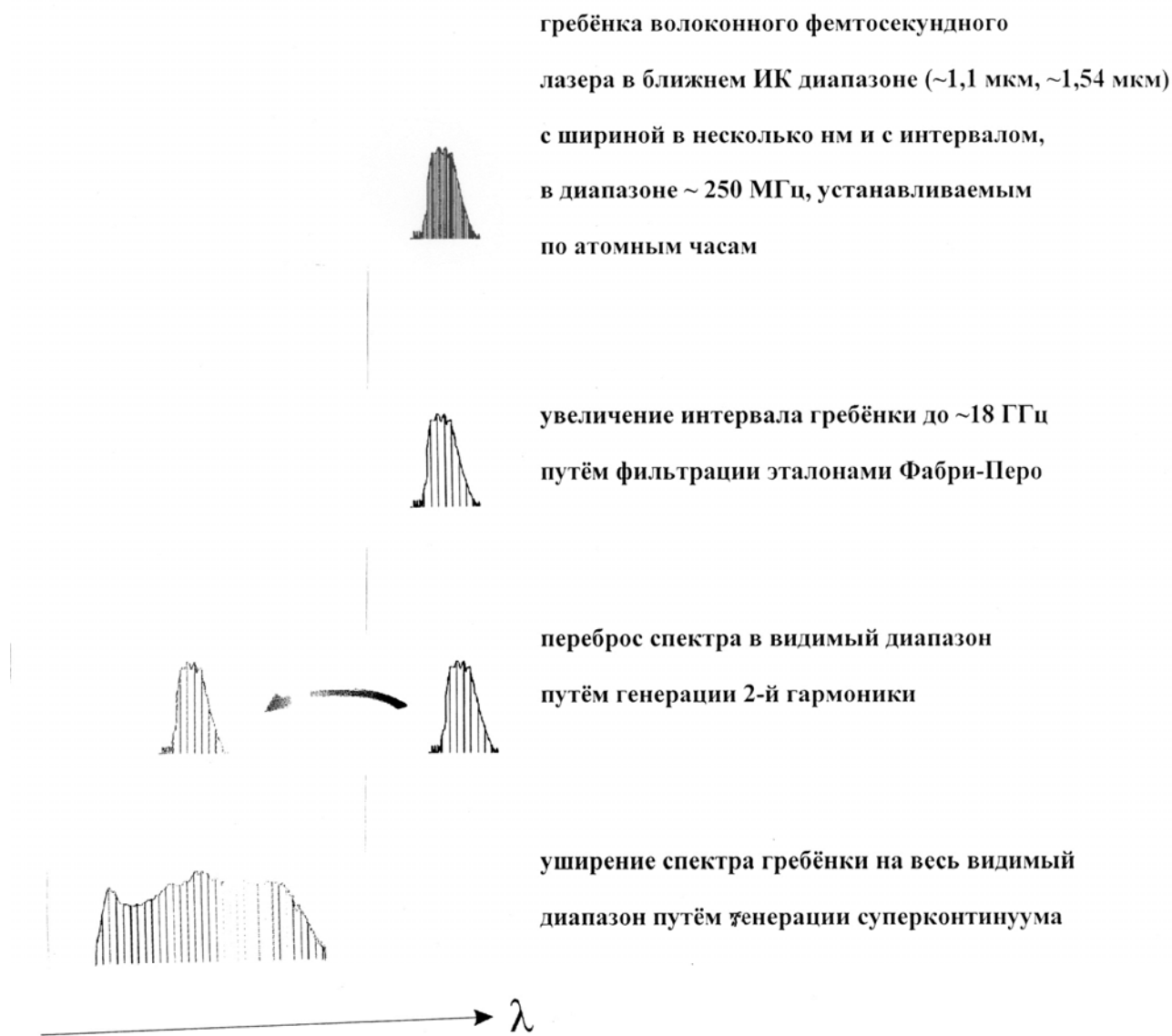


Рис. 11. Изменения спектров при преобразованиях излучения фемтосекундного лазера.

4. Волоконные лазеры для калибровки астрономических спектрометров

Именно волоконные лазерные системы и были с успехом использованы для прецизионной калибровки астрономических спектрометров, предназначенных для поиска и исследований экзопланет. Работы проводились двумя группами исследователей. Группа Теодора Хэнша из Института квантовой оптики им. Макса Планка и из фирмы Менло Системс (ФРГ) в кооперации с Европейской Южной Обсерватории проводила и продолжает проводить исследования в Обсерватории Ла Силла в Чили на телескопе 3,6 м со спектрографом HARPS ($R = 115\,000$) [30, 31]. Другая группа Скотта Диддамса из Национального института стандартов и технологии (США) проводила исследования в обсерватории Мак Дональда (Техас, США) на телескопе Хобби-Эберли 9,2 м с использованием спектрометра Pathfinder, работающего в ближнем ИК диапазоне ($R = 50\,000$) [32].

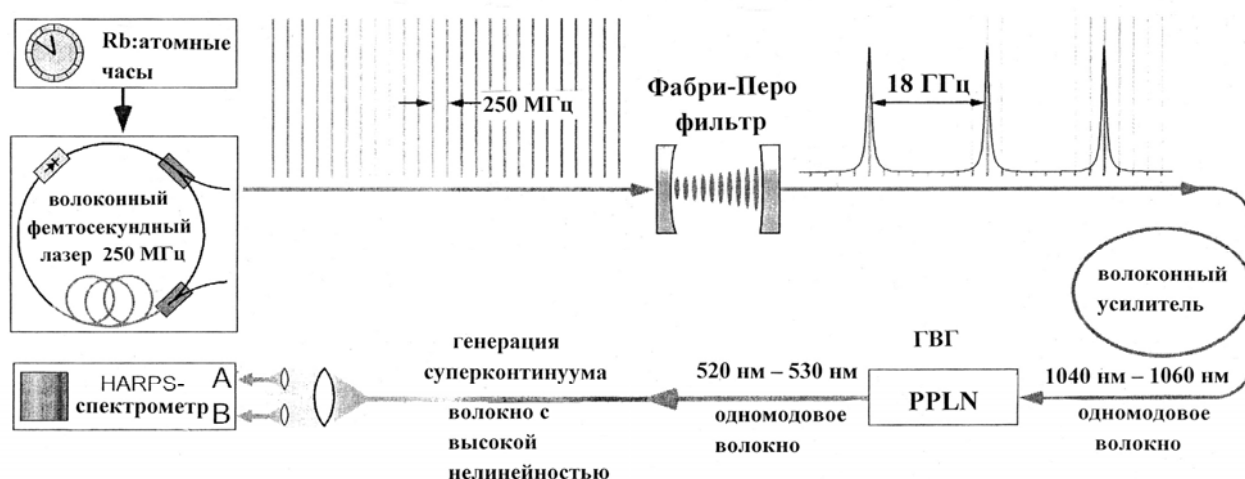


Рис. 12. Принципиальная схема калибратора астрономического спектрометра.

На рис. 12 показана принципиальная схема лазерной установки немецкой группы. Кольцевой Yb:волоконный фемтосекундный лазер (длина волны $\sim 1,1$ мкм) (Менло Системс) работает с частотой повторения 250 МГц, причём точное значение частоты стабилизируется с помощью пьезоэлектрического регулятора по опорной частоте Rb:атомных часов. При фильтрации эталонами Ф-П интервал ГЧ увеличивается до 18 ГГц. Потери из-за фильтрации компенсируются Yb:волоконным усилителем с накачкой типа double-clad и

компенсацией дисперсии. Затем с помощью нелинейного элемента генерации второй гармоники типа PPLN и генерации суперконтинуума в волокне с высокой нелинейностью осуществляется преобразование спектра в видимый диапазон. В результате получается строго регулярная и стабильная гребёнка спектральных линий, охватывающих весь видимый диапазон (рис. 13). Созданная система использовалась в астрономических исследованиях. Для демонстрации возможности калибровки с помощью лазерной ГОЧ проводились измерения РС звезды, имеющей экзопланету /31/. Результаты показаны на рис. 14. Хотя точность измерений в этих первых экспериментах была на уровне $\sim$ м/с, в лабораторных условиях она составляет 2,5 см/с, что даёт надежду на улучшение астрономических измерений.



Рис. 13. Спектр гребёнки калибратора, зарегистрированный спектрометром (простирается на весь видимый диапазон).

Американская группа использовала аналогичную схему, но с кольцевым Er:волоконным лазером (длина волны $\sim$ 1,55 мкм) (также Менло Системс). Его частота повторения увеличивалась путём фильтрации Ф-П до 25 ГГц. В конечном итоге получалась калибровочная ГОЧ в ближнем ИК диапазоне. Авторы работы отмечают, что есть веские причины проводить наблюдения не только в видимом,

но и в ближнем ИК диапазоне. Очевидно, что чем меньше звезда, тем сильнее эффект доплеровского смещения, и тем легче его обнаружить и измерить. Звёзды типа М-карликов, в особенности М4, слабо светят в видимой области спектра, но достаточно ярки в ближнем ИК диапазоне. Эти звёзды занимают более 60% звёзд, расположенных в области 10 парсеков от Земли, а из-за их малой массы и светимости, сигнал РС, вызываемый планетой, подобной Земле в «обитаемой зоне с жидкой водой», может быть более, чем на порядок большим, чем тот сигнал, который вызывает Земля, вращающаяся вокруг Солнца. В лабораторных измерениях достигнута точность не менее 2×10^{-10} в диапазоне длин волн от 1450 нм до 1630 нм, что соответствует точности РС ~ 6 см/с. В реальных астрономических измерениях точность РС пока составила ~ 5 м/с.

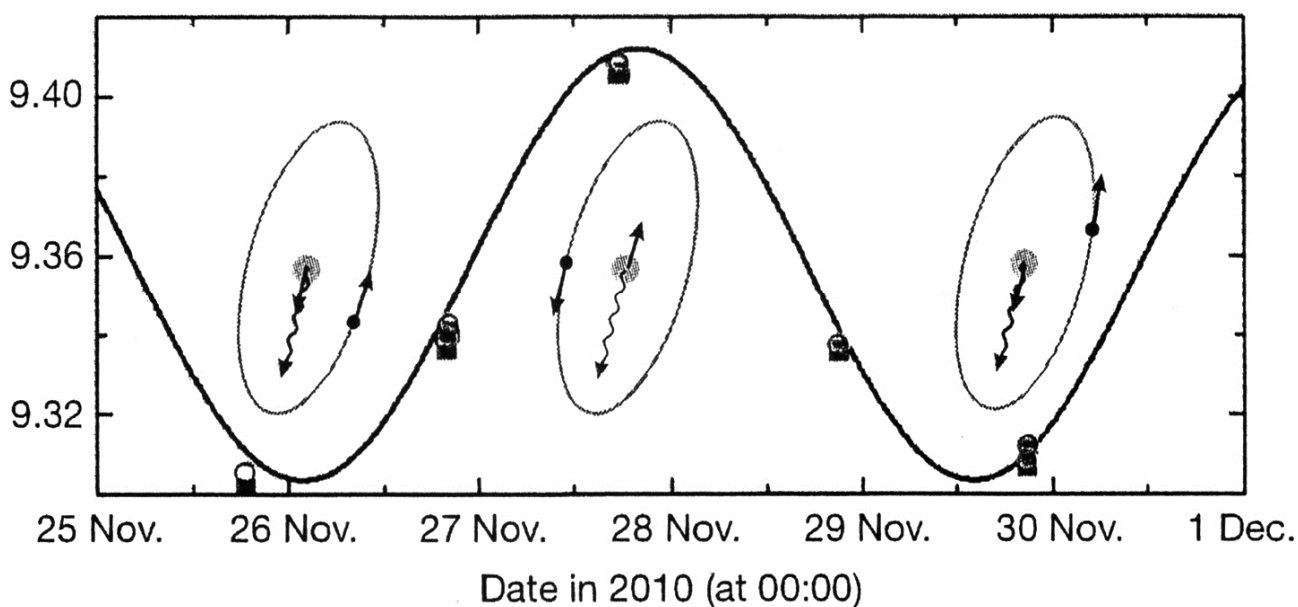


Рис. 14. Результат измерений РС по доплеровским сдвигам спектра звезды с экзопланетой.

Отметим, что работы в области разработки лазерных систем для калибровки астрономических спектрометров не требует создания больших установок и привлечения больших коллективов исследователей. Эти лазерные системы достаточно компактны. На рис. 15 двое молодых сотрудников Т.Хэнша показаны вместе с установкой астрономической ГОЧ. На рис. 16 представлен внешний вид установки и аппаратуры американской группы.

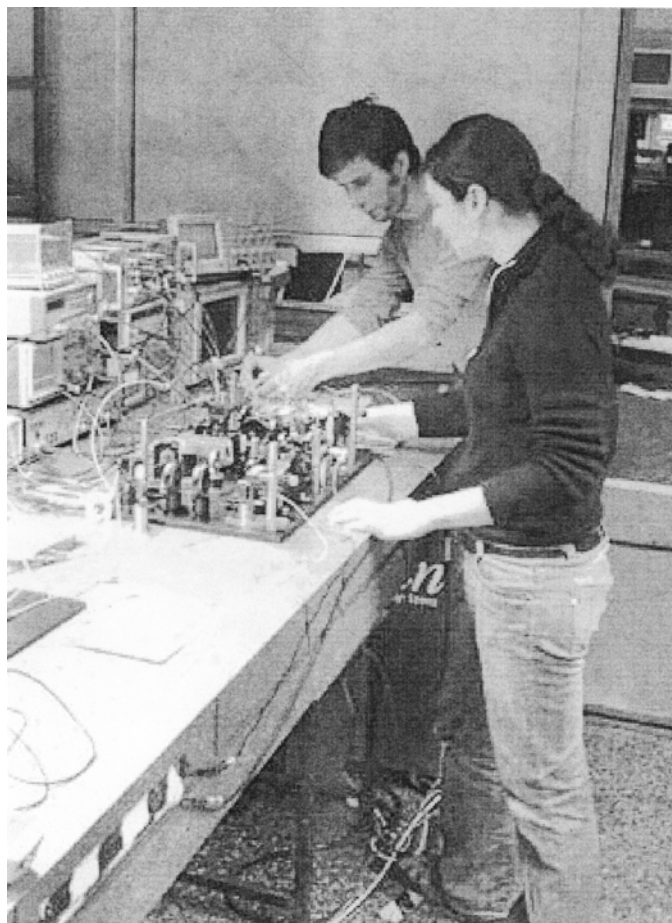


Рис. 15. Внешний вид установки лазерного калибратора с сотрудниками проф. Т. Хэниша.

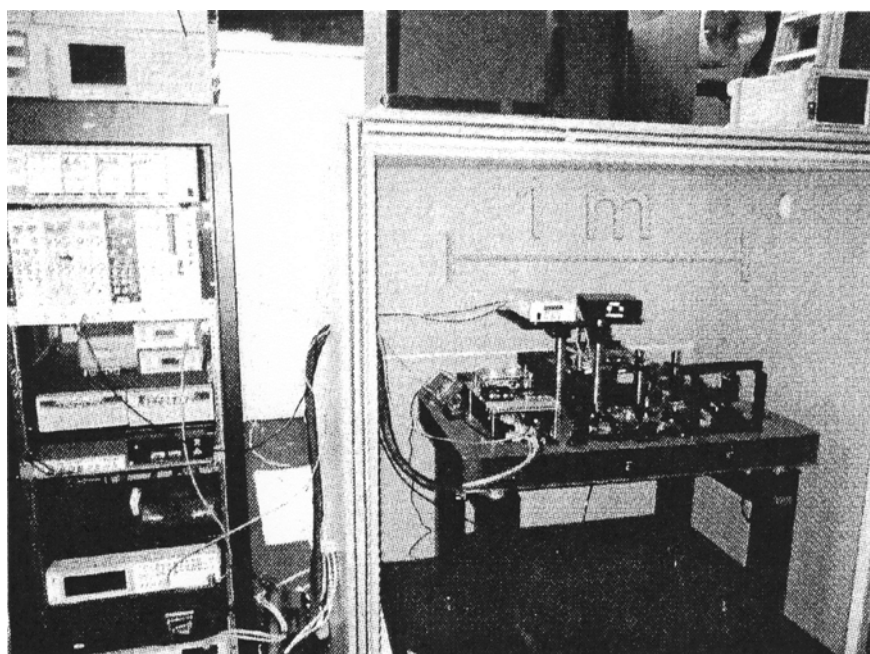


Рис. 16. Внешний вид установки американских исследователей (Opt. Expr. 20, 6640 (2012)).

Наряду с работами по исследованию волоконных фемтосекундных лазеров активно продолжают работы с другими типами лазеров. В том числе продолжают исследования, направленные на улучшения характеристик твердотельных лазеров. Так японские исследователи сообщили об успешном создании миниатюрного твердотельного лазера с керровской линзой, генерирующие фемтосекундные импульсы с частотой повторением 15 ГГц /33 /. Схема лазера показана на рис. 17. Он является аналогом лазера, показанного на рис. 5. Принципиальное отличие состоит в использовании вместо кристалла сапфира лазерной керамики с ионами иттербия. Это даёт весьма существенные преимущества. Вместо сложной и дорогостоящей системы накачки с мощностью 10 Вт используется лазерный диод с мощностью 1,1 Вт. Соотношение длин волн накачки и генерации даёт меньший переход в тепло, чем в случае сапфира. 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 работы отмечают, что, в принципе конструкция позволяет ещё уменьшить размеры и увеличить частоту повторения до 30 ГГц. Главная трудность заключается в изготовлении сферических зеркал с радиусами кривизны меньшими 5 мм с высокими коэффициентами отражения.

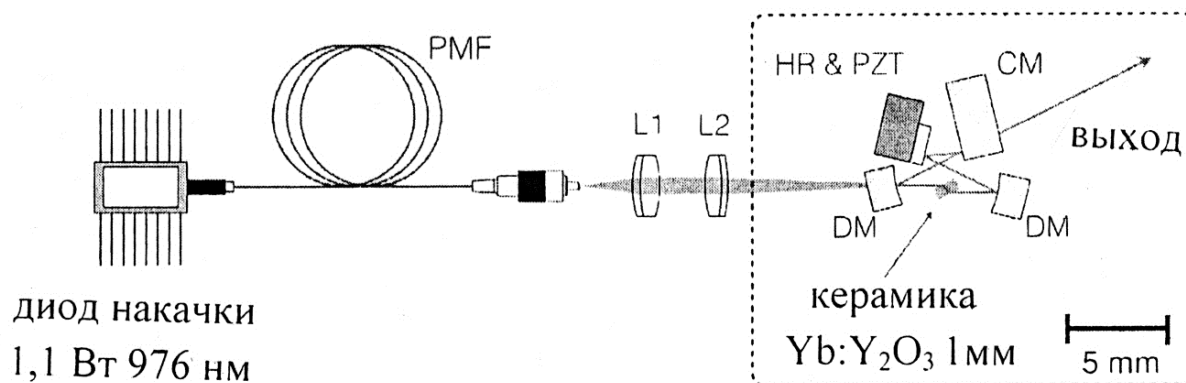


Рис. 17. Твердотельный фемтосекундный лазер с частотой 15 ГГц, PMF – волокно с сохранением поляризации, L₁, L₂ – ахроматические линзы, HR&PZT – зеркало с высоким отражением на пьезотолкателе, CM – выходное зеркало, DM – дихроическое зеркало.

5. Возможность других астрофизических исследований

Помимо поиска и исследования экзопланет прецизионные спектральные измерения позволяют проводить исследования и других весьма важных проблем астрофизики. Так путём прецизионных измерений красных сдвигов удалённых космических объектов можно, в принципе, детально исследовать один из важнейших вопросов современной науки – эволюция Вселенной.

Конкретно, имеется в виду прямое измерение величины ускорения расширения Вселенной. Для этого следует произвести в течение определённого интервала времени точные измерения скорости разлёта удалённых космических объектов по красному сдвигу спектральных линий и определить изменение скорости (ускорения) за этот промежуток времени. Такая идея была предложена в 1962 г. /34/. 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, потребовался бы интервал наблюдений в сотни лет. В 2011 г. Нобелевская премия была присуждена С. Перлмуттеру /35/, Б.П. Щмидту /36/ и А.Дж. Риссу /37/ за открытие ускоренного расширения Вселенной по наблюдению далёких сверхновых звёзд. Согласно их исследованиям величина этого ускорения составляет сантиметры в секунду за несколько лет.

Точности астрономических спектральных измерений РС по доплеровским сдвигам, достигаемые с помощью описанных лазерных методик калибровки спектрометров, позволяют, в принципе, прямое измерение величины ускорения разлёта Вселенной. Предполагается измерение РС от излучения квазаров с большим красным сдвигом в линиях поглощения межгалактических облаков. Для достижения этой цели разрабатывается международный проект CODEX (COsmic Dynamics Experiment) /38, 39/. Предполагается использование следующего поколения гигантских телескопов с усовершенствованными спектрометрами, использующими прецизионную абсолютную калибровку на основе совершенных лазерных систем.

Астрофизические исследования проводятся в Европейской Южной Обсерватории в Чили. Новейший телескоп VLT (Very Large Telescope) представляет комплекс из 4х отдельных 8,2-метровых оптических телескопов и эквивалентен телескопу с 16-метровым зеркалом. Утверждён проект

сооружения ещё большего телескопа E-ELT (European Extremely Large Telescope), который будет иметь зеркало диаметром 39 м, состоящим из множества шестиугольных сегментов, позволяющих осуществить адаптивную оптическую систему. Спектрометры с $R \approx 150\,000$ в диапазоне 350-720 нм, с калибровкой на основе лазерной ГОЧ позволят измерять РС с точностью 1-2 см/с на протяжении десятков лет.

Главной целью проекта CODEX является проведение впервые прямого измерения космической динамики с беспрецедентной точностью. Это будет сделано путём наблюдения многих линий квазаров с Z от $\sim 1,5$ до ~ 4 . Это включает линии $\text{Ly}\alpha$, сдвинутых в видимый диапазон за счёт красного смещения. Предполагается получить ответы на ряд и других весьма важных научных вопросов:

- 1) измерение изменения скорости расширения Вселенной;
- 2) обнаружение двойников Земли в «жизненной зоне» звёзд, подобных Солнцу;
- 3) изучение истории образования Млечного Пути (наша Галактика);
- 4) изучение взаимодействия галактик и межгалактической среды, из которой они образовались;
- 5) улучшенные проверки стабильности фундаментальных физических констант.

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

Заключение

Знаменитый специалист в области лазеров Артур Шавлов говорил: «если вы хотите измерить какую-либо физическую величину с высокой точностью, постарайтесь сделать так, чтобы её измерение сводилось к измерению частоты». Астрономические измерения РС являются прекрасной иллюстрацией этой мысли. Точные измерения движения звёзд сводятся к измерениям частот доплеровских смещений, причём прецизионная точность

измерений обеспечивается новейшими достижениями лазерной физики. Разумеется, имеется существенная специфика. Долговременные измерения требуют высоких эксплуатационных характеристик. Не удивительно использование в современных лазерных системах новейших достижений волоконной оптики, поскольку именно волоконные лазерные системы отличаются высоким эксплуатационным качеством. Калибратор спектрометра на основе фемтосекундного лазера довольно сложное устройство. Поэтому разработчики его должны сами принимать участие в продолжительных сеансах измерений в астрономических обсерваториях. Зато это даёт возможность непосредственно участвовать в исследованиях, результаты которых представляют исключительное значение для фундаментальной науки. Есть все основания полагать, что работа в этой области является привлекательной для молодых исследователей.

Выражаю глубокую благодарность П.Д Березину и И.А. Хлебниковой за оформление работы.

Список литературы

1. S.A. Diddams *et al.*, *Opt. Lett.* **25**, 186 (2000).
2. S.A. Diddams *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **84**, 5102 (2000).
3. R. Holzwarth *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **85**, 2264 (2000).
4. J.L. Hall *et al.*, *IEEE J. Quantum Electron.* **QE-37**, 1482 (2001).
5. Th. Udem, R. Holzwarth, T.W. Hänsch *Nature* **416**, 2331 (2002).
6. M. E. Ferman, A. Galvanauskas, G. Sucha (Eds) *Ultrafast Lasers: Technology and Applications* (New York: Marcel Dekker, 2003).
7. П.Г. Крюков *Лазеры ультракоротких импульсов и их применения* (Долгопрудный: Интеллект, 2012).
8. П.Г. Крюков *УФН* **183**, 897 (2013).
9. С.Н. Багаев, В.П. Чеботаев *УФН* **148**, 143 (1986).
10. С.Н. Багаев и др. *Квантовая электроника* **34**, 1096 (2004).
11. D.J. Jones *et al.*, *Science* **288**, 635 (2000).
12. R.R. Alfano, S.L. Shapiro *Phys. Rev. Lett.* **24**, 84 (1970).
13. J.C. Knight *et al.*, *Opt. Lett.*, **21**, 1547 (1996).
14. J.K. Ranka *et al.*, *Opt. Lett.* **25**, 25 (2000).
15. Е.В. Бакланов, В.П. Чеботаев *Квантовая электроника* **4**, 1252 (1977).
16. Дж.Л. Холл *УФН* **176**, 1353 (2006).
17. Т.В. Хэнш *УФН* **176**, 1368 (2006).
18. M.T. Murphy *et al.*, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **380**, 839 (2007).
19. M. Mayor *et al.*, *The Messenger* **114**, 20 (2003).
20. I.R. Parry, *New Astronomy Reviews* **50**, 301 (2006).
21. S.N. Ostermann *et al.*, *Proc. SPIE*, **9147**, 91475C-1 (2014).

22. D.E. Spence *et al.*, *Opt. Lett.* **16**, 42 (1991).
23. A. Bartels *et al.*, *Science* **326**, 681 (2009).
24. U. Keller *et al.*, *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.* **2**, 435 (1996).
25. M. Hoffmann *et al.*, *Opt. Exp.* **19**, 8108 (2011).
26. H.A. Haus *et al.*, *IEEE J. Quantum Electron.* **31**, 591 (1995).
27. М.А. Губин и др., *Квантовая электроника* **38**, 613 (2008).
28. M.A. Gubin *et al.*, *Appl. Phys.* **B95**, 661 (2009).
29. T. Steinmetz *et al.*, *Appl. Phys.* **B96**, 251 (2009).
30. T. Wilken *et al.*, *Mon. Not. R. Soc.* **405**, L16 (2010).
31. T. Wilken *et al.*, *Nature* **485**, 611 (2012).
32. G.G. Yeas *et al.*, *Opt. Exp.* **20**, 6631 (2012).
33. M. Endo *et al.*, *Opt. Exp.* **23**, 1276 (2015).
34. A. Santage, *Astronomical Journal* **136**, 319 (1962).
35. С Перлмуттер *УФН* **183**, 1060 (2013).
36. Б.П. Шмидт *УФН* **183**, 1078 (2013).
37. А.Дж. Рисс *УФН* **183**, 1090 (2013).
38. J. Liske *et al.*, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **386**, 1192 (2008).
39. L. Pasquini *et al.*, *Proc. SPIE* **7735**, 77352F (2010).

Петр Георгиевич КРЮКОВ
Фемтосекундные лазеры для астрофизики

Подписано в печать 01.04.2015 г. Формат 60х84/16. П.л. 2
Бумага офсетная. Печать офсетная. Тираж 150 экз. Заказ № 13
Отпечатано с оригинал-макета заказчика в типографии РИИС ФИАН
119991 Москва, Ленинский проспект 53