
ПРИГЛАШЕННАЯ СТАТЬЯ

Памяти дорогого Евгения Михайловича Дианова

Лазерные гребенки оптических частот и их применения в системах волоконно-оптической связи и в астрофизике

П.Г.Крюков

Рассмотрены методы генерации и применения лазерных гребенок оптических частот (ЛГОЧ). Уникальные свойства ЛГОЧ широко используются в спектроскопии и метрологии, в частности для создания сверхточных оптических часов. С применением ЛГОЧ успешно развиваются исследования в области волоконно-оптических систем связи и фундаментальных проблем астрофизики, таких как поиск и исследование экзопланет, проверка возможного изменения физических констант во времени и т. п.

Ключевые слова: гребенка оптических частот, мультиплексирование, доплеровская спектроскопия, калибровка астрономических спектрографов, экзопланеты.

1. Введение

С момента создания лазеров их исследование и развитие проходило в двух магистральных направлениях, определяемых разными режимами лазерной генерации. Для импульсных лазеров главной целью было и остается получение высокой пиковой мощности и интенсивности излучения за счет сокращения длительности импульса, для непрерывных лазеров – получение узкой линии спектра излучения. Оба направления развивались совершенно независимо с использованием разных подходов и технических решений, и это привело к важным результатам.

Так, стремление получить короткий импульс лазерного излучения с высокой мощностью обусловило создание лазеров, работающих в режиме модуляции добротности резонатора, в результате которого излучение получалось в виде мощных импульсов наносекундной длительности. Дальнейшее сокращение длительности импульсов до пикосекундного диапазона было получено в режиме синхронизации мод. В дальнейшем удалось создать лазеры, генерирующие импульсы фемтосекундной длительности с огромными пиковыми мощностями.

С другой стороны, стремление получить минимальную ширину спектра излучения привело к созданию лазеров непрерывного действия с высокой стабильностью спектра излучения в виде предельно узких спектральных линий. В значительной мере это достигалось путем преодоления эффектов уширения спектральных линий (доплеровского, ударного и пр.). При этом важнейшей задачей было измерение частоты лазерного излучения, для чего требовалось сопоставить частоту спектральной линии излучения лазера оптического диапазона с частотой цезиевого эталона частоты и времени радиочастотного диапазона. С этой целью использовалась сложная цепочка

квантовых генераторов, охватывающих область частот от частоты исследуемого лазера до частоты цезиевого стандарта. Методами нелинейной оптики излучение одного генератора преобразовывалось в гармоники, частоты которых сопоставлялись с частотами гармоник другого генератора. Из-за наличия пределов эффективности нелинейных преобразований требовалось использовать около десяти таких генераторов. В результате получалась исключительно сложная уникальная система, которая была создана всего лишь в нескольких ведущих лабораториях высочайшего научного уровня. Исследования проводились с целью достижений в области прецизионной метрологии, в частности, для создания сверхточных оптических часов. В настоящее время исследования в этой области с применением достижений в волоконной оптике, лазерной физике и нелинейной оптике обусловили создание измерительных систем, точность которых достигает 18-го знака [1, 2].

Развитие лазерной физики привело к слиянию различных направлений исследований. Совершенствование лазеров с пассивной синхронизацией мод позволило создать непрерывно работающие лазеры этого типа. Они испускают непрерывную, строго периодическую последовательность совершенно одинаковых импульсов фемтосекундной длительности, причем излучение в импульсах когерентно связано. Это обстоятельство имеет исключительную важность для экспериментального изучения импульсов фемтосекундной длительности. Сокращение длительности импульса требовало повышения временного разрешения регистрирующей аппаратуры. Разрабатывались уникальные системы на основе электронно-оптических преобразователей. С большим трудом было достигнуто разрешение на уровне сотен фемтосекунд. Однако в случае строго периодической последовательности импульсов нет необходимости исследовать одиночный импульс. Исследование импульсов в непрерывной последовательности позволяет с большим успехом использовать методы, основанные на измерениях корреляционных функций интенсивности излучения. В результате получились достаточно простые и доступные устройства, позволяющие не только измерять длительность фемтосекундного импульса (даже аттосекундного), но и его форму.

П.Г.Крюков. Научный центр волоконной оптики РАН, Россия, 119333 Москва, ул. Вавилова, 38; Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; e-mail: kryukov@fo.gpi.ru

Поступила в редакцию 18 марта 2019 г.

Другая исключительно важная особенность заключается в спектре излучения. В результате когерентной связи излучения во всех импульсах непрерывной последовательности спектр, полная ширина которого соответствует длительности импульса, состоит из набора (гребенки) чрезвычайно узких спектральных линий, а интервал между линиями определяется периодом следования импульсов в последовательности. Замечательным фактом стала возможность управлять положением этих линий путем плавной регулировки параметров лазера. Таким образом, непрерывный фемтосекундный лазер является не только источником интенсивных импульсов, но и источником чрезвычайно узких спектральных линий лазерной гребенки оптических частот (ЛГОЧ). Тот факт, что ЛГОЧ можно получать с помощью лазеров фемтосекундных импульсов и с высокой точностью регулировать оптические частоты спектральных линий, привел к важнейшему слиянию этих двух направлений исследований. Это революционное достижение было отмечено присуждением в 2005 г. Нобелевской премии Теодору Хэншу и Джону Холлу.

Исследования позволили установить, что, наряду с использованием непрерывных фемтосекундных лазеров, ЛГОЧ удается получать с помощью нелинейных оптических преобразований непрерывного лазерного излучения с узкой спектральной линией. Таким образом, появились различные методы генерации ЛГОЧ со своими достоинствами и недостатками, что очень важно для разных применений. В настоящей работе рассматриваются применения ЛГОЧ в области волоконно-оптических линий связи (ВОЛС), а также в области астрофизики, основанные на различных методах генерации ЛГОЧ.

2. Лазерная гребенка оптических частот

2.1. ЛГОЧ на основе фемтосекундного лазера

Основной частью лазера является резонатор. Его оптическая длина определяет частоты мод, а в случае непрерывного фемтосекундного лазера и частоту следования импульсов $f_{\text{греб}}$. Как было указано, частота $f_{\text{греб}}$ равна интервалу между линиями спектра, причем весь спектр эквидистантно расположенных линий f_n гребенки сдвинут по частоте на определенную величину f_0 (рис. 1). Величина этого сдвига определяется дисперсией групповых скоростей вещества внутри резонатора. Таким образом, частоту каждой n -й линии спектра можно записать как $f_n = n f_{\text{греб}} + f_0$, причем обе частоты лежат в радиочастотном диапазоне. Замечательно, что эти частоты можно плавно регулировать и измерять путем сопоставления с микроволновым стандартом частоты (Cs, Rb). Существенным моментом является методика контроля и измерения f_0 .

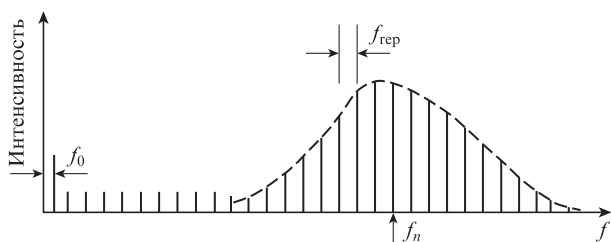


Рис.1. Спектр излучения непрерывного фемтосекундного лазера (для наглядности показано малое число линий, в действительности их число может достигать ~ 1 млн).

Она основана на измерении в микроволновой области разности между частотой из синего края спектра ЛГОЧ и удвоенной частотой из красного края спектра. Полная ширина спектра ЛГОЧ определяется шириной линии усиления активной среды.

Поскольку лазерное излучение состоит из импульсов фемтосекундной длительности, их пиковая мощность и интенсивность излучения высоки. Было показано, что при распространении такого излучения в оптических одномодовых волокнах особой микроструктуры (типа фотонных кристаллов) происходит гигантское расширение спектра за счет нелинейного оптического эффекта – генерации суперконтинуума, причем линейчатая структура спектра сохраняется. Таким образом, на основе фемтосекундных лазеров можно получать ЛГОЧ с шириной спектра, перекрывающего значительную часть оптического диапазона. Это означает принципиальную возможность иметь чрезвычайно узкую линию лазерного излучения с прецизионно измеренной частотой, что и определило важнейшие применения ЛГОЧ в прецизионной спектроскопии и метрологии [3–7].

Принципиальной особенностью и недостатком этого метода генерации ЛГОЧ является способ регулировки интервала между линиями гребенки, которая осуществляется изменением оптической длины резонатора. С этой целью используется прецизионное перемещение одного из зеркал лазера с помощью пьезоэлектрического устройства. Для работы в оптическом диапазоне нужно, чтобы интервал между линиями ЛГОЧ превышал интервал разрешения оптических спектрометров, который обычно составляет более 10–15 ГГц. Однако это требует сокращения оптической длины резонатора до нескольких сантиметров, что чрезвычайно трудно сделать. Этот недостаток преодолевается путем фильтрации спектра ЛГОЧ с помощью эталонов Фабри–Перо (ФП) [6, 7]. Эталон ФП имеет узкие спектральные линии, характеризуется высоким пропусканием на резонансных частотах (длинах волн), значения которых определяются оптической толщиной эталона. Если эта толщина меньше оптической длины резонатора фемтосекундного лазера в кратное число (m) раз, то через него будут проходить частоты ЛГОЧ с разрежением в m раз. Толщину эталона ФП, так же как и длину резонатора, можно регулировать с помощью пьезоэлектрической техники. Эта механическая система весьма сложна и трудна в эксплуатации, тем не менее с помощью такой методики удастся получать ЛГОЧ с интервалами между линиями 15–20 ГГц, что фактически является пределом для фемтосекундной системы генерации ЛГОЧ этого типа.

2.2. ЛГОЧ на основе нелинейно-оптических эффектов в оптических волокнах

Наряду с использованием фемтосекундного лазера, продемонстрирована возможность получения ЛГОЧ путем нелинейно-оптического преобразования в оптических волокнах излучения одного или двух лазеров непрерывного действия с узкими линиями излучения. Этот способ генерации ЛГОЧ основан на нелинейном оптическом эффекте каскадного четырехволнового параметрического преобразования, которое осуществляется при распространении интенсивного излучения в оптическом одномодовом волокне, обладающем керровской нелинейностью и аномальной дисперсией групповых скоростей. При этом для

получения ЛГОЧ входное излучение должно быть модулировано на частоте интервала ЛГОЧ. При распространении такого излучения высокой интенсивности в нелинейной среде с нужной дисперсией периодические изменения интенсивности во времени постепенно превращаются в последовательность импульсов в виде солитонов ультракороткой длительности с соответствующим спектром ЛГОЧ. Принципиальная схема представлена на рис.2.

Модуляцию входного излучения с частотой интервала ЛГОЧ можно реализовать двумя способами: с помощью электрооптического модулятора, причем для обеспечения точного интервала ЛГОЧ частота модулятора должна быть согласована со стандартом частоты, либо путем использования двух лазеров, имеющих равные интенсивности, но частоты которых различаются на определенную величину интервала ЛГОЧ. Суммарное излучение этих лазеров приводит к биениям с частотой, определяемой разностью частот лазеров, которую можно регулировать для получения нужной частоты интервала ЛГОЧ. Конкретно используются два одномодовых непрерывных лазера с узкими линиями излучения. Один из них работает на строго фиксированной частоте, которая должна быть точно синхронизована с оптическим стандартом частоты, а второй – лазер с регулируемой частотой, разность которой с частотой первого лазера определяет интервал между линиями ЛГОЧ и должна быть установлена по стандарту частоты. В результате получается излучение с частотой биений, которую можно регулировать, чтобы установить ее точное значение (удается достигать частоты порядка сотен ГГц).

Далее промодулированное излучение проходит секцию одномодового волокна с аномальной дисперсией, в которой происходит предварительное формирование гребенки. При работе на длине волны ~ 1.5 мкм используется стандартное телекоммуникационное волокно типа SFM-28 длиной в сотни метров. Поскольку генерация гребенки получается за счет нелинейно-оптического эффекта, излучение должно обладать необходимой интенсивностью. В связи с этим излучение следует усилить, причем усиление должно быть тем выше, чем больше интервал ЛГОЧ, поскольку этот интервал равен частоте следования импульсов. Необходимое усиление достигается с помощью усилительного волокна. В случае $\lambda = 1.5$ мкм применяется эрбиевое волокно, а в случае $\lambda \approx 1.1$ мкм – иттербиевое волокно. Для накачки усилительных волокон используются диодные лазеры. Такая схема успешно реализована в работах [8–10]. Следует отметить, что первоначально эта схема исследовалась с целью получения регулярной последовательности ультракоротких импульсов лазерного излучения с высокой частотой следования,

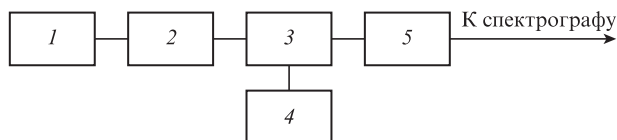


Рис.2. Принципиальная схема генерации ЛГОЧ за счет четырехволнового параметрического преобразования:

1 – источник излучения (два непрерывных одночастотных лазера или один одночастотный лазер с электрооптическим модулятором); 2 – секция одномодового оптического волокна с аномальной дисперсией; 3 – секция оптического волокна с усилением; 4 – диодный лазер накачки; 5 – секция оптического нелинейного волокна типа фотонного кристалла.

но, разумеется, при этом демонстрировалась и возможность генерации ЛГОЧ.

Хотя регулировкой разности частот непрерывных лазеров можно получать очень высокие частоты интервала ЛГОЧ (вплоть до сотен ГГц), имеется определенная трудность. Высокая частота интервала ЛГОЧ означает высокую частоту следования ультракоротких импульсов соответствующей последовательности, и при определенной средней мощности лазерного излучения пиковая мощность в импульсе будет тем меньше, чем выше частота следования в последовательности. Однако для получения нелинейного эффекта нужна высокая пиковая мощность, поэтому очень важной частью лазерной системы является усилительная секция, обеспечивающая получение достаточно высокой средней мощности. Достижение необходимой средней мощности в усилительной секции является определенной сложностью данного метода.

Преимущество этого метода генерации ЛГОЧ по сравнению с другими – полностью волоконно-оптическая конструкция с использованием хорошо апробированных и доступных устройств волоконной оптики. Существенным достоинством является также возможность получения ЛГОЧ с интервалами до сотен ГГц. Для контроля и регулировки интервала ЛГОЧ требуется контроль и регулировка частот излучений двух непрерывных лазеров. Использование электрооптического модулятора позволяет иметь лишь один задающий лазер с прецизионной регулировкой частоты излучения, но, разумеется, при такой же регулировке модулятора. В этом случае максимальный интервал ЛГОЧ ограничивается характеристиками электрооптического модулятора. В настоящее время схеме с электрооптической модуляцией отдается предпочтение.

2.3. ЛГОЧ на основе микрорезонатора

Еще одним перспективным методом генерации ЛГОЧ является использование монолитного микрорезонатора [11–14]. Это тор или кольцо миллиметрового размера из прозрачного материала с исключительно малым коэффициентом поглощения для распространяющегося в нем лазерного излучения (рис.3). При этом излучение испытывает полное внутреннее отражение на стенке. Получаем многократное распространение излучения внутри микрорезонатора, которое по аналогии с явлением в архитектурной акустике называется эффектом «шепчущей галереи». Интерференция волн при многократных обходах означает формирование мод с частотами, определяемыми временем обхода кольца, для которых достигается ультравысокая добротность ($Q \sim 10^8$). Для ввода излучения непрерывного лазера с узкой линией и требуемой интенсивностью используется оптическое волокно (рис.4).

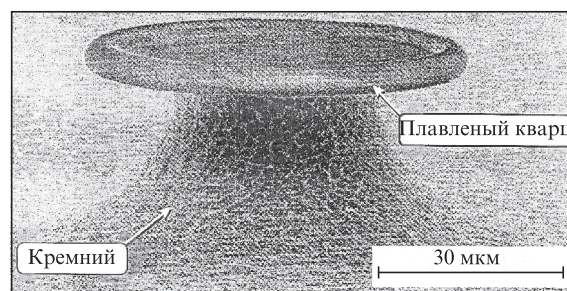


Рис.3. Микрорезонатор, изготовленный из кремния и плавяного кварца.



Рис.4. Ввод одноимодового излучения в микрорезонатор и вывод излучения ЛГОЧ из него.

Выходной конец этого волокна помещается на таком расстоянии от поверхности микрорезонатора, при котором некоторая часть излучения попадает внутрь за счет нарушения полного внутреннего отражения. Точно так же из микрорезонатора излучение выводится в виде ЛГОЧ.

Если материал микрорезонатора обладает нужной керровской нелинейностью (керровский микрорезонатор), то при определенной интенсивности излучения возникает нелинейное параметрическое взаимодействие между излучением лазера накачки и модами микрорезонатора. В результате получается излучение в виде ЛГОЧ, которое также выводится в оптическое волокно из-за нарушенного полного внутреннего отражения на границе поверхность – конец волокна. Размеры микрорезонатора порядка нескольких миллиметров означают высокую (до сотен ГГц) межмодовую частоту, которая, в свою очередь, определяет интервал частот ЛГОЧ. В качестве материала микрорезонатора используют стекло, плавный кварц, флюорит (CaF_2), нитрид кремния. Накачкой может служить излучение одночастотного волоконного лазера с длиной волны около 1.5 мкм. Достоинство этого метода – миниатюрность устройства, что отвечает современным тенденциям микроэлектроники, а также возможность получать интервалы ЛГОЧ вплоть до сотен ГГц. Однако для изготовления керровских микрорезонаторов требуется специальная эпитаксиальная технология, а поскольку интервал ЛГОЧ определяется размерами микрорезонатора, то крайне сложна точная регулировка этого интервала. Это – принципиальный недостаток.

3. Применения ЛГОЧ

Исключительно важными и актуальными применениями ЛГОЧ являются системы мультиплексирования ВОЛС, а также применения в астрофизике, связанные с прецизионными измерениями в астрономической спектроскопии.

3.1. Применения в системе ВОЛС

Развитие системы ВОЛС связано со стремлением увеличить объем и скорость передачи информации. Для передачи информации с помощью современной электроники канал должен обладать полосой пропускания на уровне нескольких гигагерц. В ВОЛС используется оптическое излучение с длиной волны ~ 1.5 мкм, причем ширина полосы усиления усилителей на основе оптических волокон составляет ~ 50 нм, т.е. $\sim 5 \times 10^{12}$ Гц. Таким образом, по одноимодовому волокну ВОЛС, в принципе, можно одновременно пропускать информацию по сотням каналов с шириной полосы (стандарт – 50 ГГц), требуемой для быстрой связи. Поскольку в каждом канале используется отдельный лазер-передатчик, то потребуются множество таких лазеров, каждый из которых работает на определенной частоте канала. Привлекательной идеей представляется замена их системой на основе одного лазера,

генерирующего множество частот со спектральным уплотнением (мультиплексированием) каналов связи с использованием ЛГОЧ [15]. В принципе, прецизионная точность линий гребенки не требуется. Достаточно, чтобы они попадали в нужные каналы, поэтому наиболее подходящей представляется система на основе микрорезонатора. Важной особенностью является принципиальная возможность интеграции в систему микросхем с реализацией современных принципов фотоники. Основной проблемой является схема ввода многих пучков в сердцевину одноимодового волокна, а после прохождения ими ВОЛС разделение выходного излучения по отдельным каналам. Для решения этой проблемы предлагается использовать волоконные брэгговские решетки и волоконные схемы интерферометров Маха–Цендера.

В работе [16] сообщается о создании и исследованиях системы мультиплексирования с использованием ЛГОЧ. Использовался микрорезонатор, изготовленный из SiN. Продемонстрирована передача информации со скоростью 1.44 Тбит/с на расстояние 300 км в 20 каналах. Детальное описание систем мультиплексирования и демуплексирования содержится в работе [17]. Важной особенностью является миниатюрность генератора ЛГОЧ. Результаты аналогичных исследований приведены также в работе [18]. Важно отметить, что мощность лазера накачки на $\lambda = 1.5$ мкм не превышала 400 мВт. Сообщается о возможности передачи информации со скоростью 4.4 Тбит/с на расстояние до 80 км.

3.2. Применения в астрофизике

Эффективным методом астрофизических исследований является спектроскопия оптического диапазона. Свет удаленных космических объектов собирается телескопом и анализируется астрономическим спектрографом. Собранный в фокусе свет должен иметь интенсивность, превышающую чувствительность спектрографа. Поэтому необходимо увеличивать площадь зеркала телескопа, а это приводит к созданию гигантских телескопических систем с точнейшим слежением за положением изучаемого объекта, что требует механического перемещения системы с высокой точностью. С другой стороны, стремление иметь высокие разрешение и чувствительность спектрографа приводит к необходимости создавать сложные спектроскопические системы, использующие дифракционные решетки типа эшелле с размерами в десятки сантиметров, с высокой температурной и механической стабильностью. Поскольку это громоздкие стационарные устройства, то, естественно, возникает необходимость передачи света исключительно малой интенсивности, собираемого в фокусе телескопа, на вход стационарного спектрографа. С этой целью используются специально разработанные многомодовые оптические волокна с диаметром сердцевины до сотен мкм, обладающие минимально возможными потерями и полностью исключающие искажения спектра, которые могут возникать при изгибе волокна. Поскольку изображения в фокусе телескопа имеют микронные размеры, необходимы согласования с входом в волокно и с выходом волокна на вход спектрографа с помощью микролинз. Специальные исследования показали, что требуется определенная микроструктура сечения волокна. В результате получается современная схема астрономического спектрографа с волоконно-оптическим входом (fiber-fed spectrograph) [19].

Одной из важнейших задач астрономической спектроскопии является точное измерение смещений спектров, обусловленных эффектом Доплера, что позволяет определить величину лучевой скорости (ЛС) объекта. Это – доплеровская астрономическая спектроскопия. Выдающимся ее достижением стало открытие красного смещения спектров далеких галактик, пропорционального расстоянию до них (закон Хаббла). Доплеровские смещения в этом случае огромны и значения ЛС достигают долей скорости света. Однако и малые доплеровские смещения позволяют получить весьма важные результаты. Было обнаружено, что ЛС некоторых звезд испытывают во времени малые, но строго периодические изменения [20]. Это интерпретировалось как влияние на движение звезды планеты, обращающейся вокруг нее. Так впервые косвенным, но не вызывающим сомнения способом было открыто существование планет у звезд за пределами Солнечной системы (экзопланет).

Величина доплеровского смещения спектра и соответствующего изменения ЛС зависит от соотношения масс звезды и планеты. Так, вращение Земли вокруг Солнца вызывает максимальное изменение ЛС в 9 см/с с периодом 1 год. Это показывает, что для обнаружения с помощью доплеровской спектроскопии экзопланет, подобных Земле и вращающихся вокруг звезд, подобных Солнцу, требуются продолжительные спектральные измерения с точностью на уровне 10-го знака. Таким образом, возникает необходимость прецизионной калибровки спектрографа. Традиционные методы калибровки с использованием спектральных ламп и йодных ячеек не позволяют добиться точности измерений лучше 7-го знака. Появление же ЛГОЧ сразу вызвало стремление использовать ее уникальные возможности. Однако для практического использования такого калибратора нужно, чтобы интервал частот гребенки превышал интервал разрешения астрономического спектрографа. Это означает, что интервал ЛГОЧ должен быть не менее 10 ГГц.

Для разработки прецизионного калибратора астрономических спектрографов специалистами Института квантовой оптики (ФРГ) и фирмы Menlo Systems (ФРГ) была выбрана классическая схема ЛГОЧ на основе непрерывного фемтосекундного лазера с последующей фильтрацией излучения эталонами Фабри–Перо [21]. В качестве задающего лазера использовался фемтосекундный волоконный Yb-лазер (длина волны ~ 1 мкм, период следования импульсов 250 МГц) с последующей фильтрацией излучения до 18 ГГц. Путем генерации гармоник и суперконтинуума получался спектр ЛГОЧ, охватывающий весь видимый диапазон. Созданный прибор FC1000-250 (Menlo Systems) был успешно испытан в обсерватории La Silla (Чили) в составе системы, содержащей трехметровый телескоп и уникальный спектрограф HARPS (High Accuracy Radial Velocity Planet Searcher).

Однако этот прибор весьма сложен в эксплуатации, имеет огромную стоимость и пригоден лишь для калибровки астрономических спектрографов с разрешением не менее десятков тысяч. Поэтому возникла потребность использовать другие подходы. Специалисты Института астрофизики им. Лейбница (Потсдам, ФРГ) предложили и реализовали волоконно-оптический вариант ЛГОЧ [22, 23]. Были использованы коммерчески доступные элементы волоконной оптики. Важной особенностью этого калибратора, помимо снижения стоимости и сложности, является то, что стало возможным получать ЛГОЧ с ин-

тервалами до сотен гигагерц. Для иллюстрации на рис.5 показан участок спектра калибратора и (для сравнения) спектр излучения спектральной лампы. Значительные интервалы ЛГОЧ означают, что такой прибор может использоваться для калибровки не только уникальных спектрографов, но и спектрографов среднего и даже сравнительно малого разрешения. Это очень важно, поскольку существенно расширяется фронт поисков экзопланет земного типа. Новейший вариант астрономического калибратора данного типа использовался с 3.5-метровым телескопом (Calar Alto Telescope), причем работоспособность системы проверялась регистрацией звезд HD3765, HD219538 [24]. В этом варианте генерации ЛГОЧ задающим генератором служат два непрерывных лазера с равными интенсивностями излучений и с определенной разностью частот. Однако, как было показано выше, можно использовать и один непрерывный лазер в сочетании с электрооптическим модулятором, что существенно упрощает конструкцию. Разумеется, в этом случае требуется высокая точность частоты модулятора. Такой вариант калибратора астрономического спектрографа успешно исследован в работе [25]. Работа аналогичной системы была продемонстрирована в обсерватории при измерении ЛС стандартной звезды HD221354 [26]. Важной особенностью явилась компактность системы. Все устройство размещалось в трех коробках размером 45×45 см. Это имеет большое значение для практического использования астрономического калибратора в обсерваториях.

Следует сказать, что открытия и исследования экзопланет мотивируются принципиально научными, сакраментальными вопросами об уникальности нашей Земли и нашей Солнечной системы. Существование огромного множества звезд естественно вызывает желание выяснить, возможна ли жизнь на экзопланетах. Принципиальным условием жизни является наличие воды в жидкой фазе. Это означает, что среди множества экзопланет нужно искать такие, температура поверхности которых лежит в определенных пределах (так называемая жизненная зона). Естественно, это зависит от температуры звезды. Поэтому предпочтительными объектами являются звезды типа М (красные карлики). Как было указано, доплеровское смещение зависит от массы звезды. Преимущество красных карликов состоит также в том, что их экзопланеты в жизненной зоне вызывают большие доплеровские смещения (типичные значения порядка м/с, по сравнению с см/с для Земли). Периоды обращения экзопланет не превышают года. Из-за пониженной температуры звезд типа красных карликов их спектр сдвинут в красную область, и соответствующая спектральная аппаратура должна работать в красном и ближнем ИК диапазонах. Наконец, следует иметь в виду, что звезды этого типа составляют подавляющее большинство.

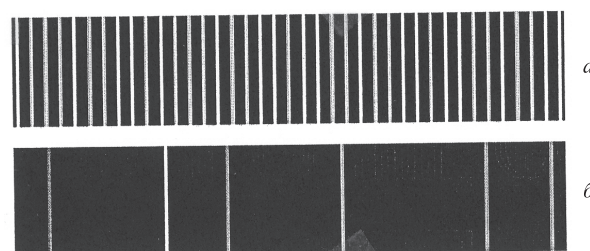


Рис.5. Линейчатые спектры волоконно-оптического калибратора (а) и (для сравнения) спектральной лампы (б).

Исходя из этих соображений, для обнаружения планет, подобных Земле, обращающихся в жизненной зоне, важно развивать методы доплеровской астрономической спектроскопии. С этой целью проводятся исследования и уже получены новейшие результаты [27, 28]. Для калибровки спектрографа разработана электрооптическая система ЛГОЧ на основе достижений волоконной оптики. Излучение непрерывного лазера с длиной волны 1064 нм модулируется частотным и фазовым модулятором на частоте 30 ГГц. В волоконно-оптической системе с использованием оптических волокон разных типов генерируется ЛГОЧ протяженностью ~ 300 ТГц (800–1350 нм). Вся конструкция имеет размеры 60×152 см, что допускает транспортировку. Собственно спектрограф типа HPF (Habitable Zone Planet Finder) имеет высокую механическую и термическую стабильность и работает при криогенных температурах в вакууме. Конкретные астрономические измерения проводились на десятиметровом телескопе (Hobby-Eberly Telescope). Продемонстрирована возможность определения ЛС на уровне 1 м/с с точностью измерения ЛС лучше 10 см/с для звезды типа М с экзопланетой в жизненной зоне.

Помимо поиска и изучения экзопланет, прецизионные спектральные измерения позволяют проводить исследования и других важных проблем астрофизики. Имеется в виду возможность прямого измерения расширения Вселенной. Для этого следует провести точные измерения красного смещения в течение значительного интервала времени. Такая идея была предложена еще в 1962 г. [29], но оценки показали, что при имевшейся на то время точности спектральных измерений потребовались бы измерения на протяжении многих сотен лет. Открытие ЛГОЧ коренным образом меняет ситуацию. Предполагаются измерения ЛС от квазаров с использованием новейших достижений прецизионной спектроскопии. С этой целью разрабатывается международный проект CODEX (COsmic Dynamics EXperiment) [30, 31]. Предполагается использование гигантских телескопов с совершенными спектрографами, снабженными калибраторами на основе ЛГОЧ.

Еще одно важное применение ЛГОЧ в прецизионной спектроскопии связано с абсолютными измерениями спектра водорода, определением константы Ридберга и постоянной тонкой структуры α . В частности, рассматриваются возможности экспериментальной проверки гипотезы Дирака о предполагаемом изменении фундаментальных физических констант во времени. Обзор исследований в этой области, включая астрономические, проведен в работе [32].

4. Заключение

Среди многих применений ЛГОЧ важное значение имеет их использование для мультиплексирования в сис-

темах ВОЛС. Это связано со стремлением увеличения скорости передачи информации вплоть до нескольких петабит в секунду. Исследования в этой области относятся к новому научному направлению – фотонике.

Другое важнейшее применение ЛГОЧ относится к области фундаментальных исследований, а именно к астрофизике. Не будет преувеличением утверждать, что одним из главных достижений астрофизических исследований последних 25 лет является открытие существования планет за пределами нашей Солнечной системы (экзопланет). Новейшим методом обнаружения и исследования экзопланет является доплеровский метод измерения малых вариаций ЛС. Убедительно показано, что современные требования к калибровке астрономических спектрографов успешно выполняются с помощью методик генерации ЛГОЧ.

Рассмотрение и анализ работ по этой тематике показывает, что большое значение имеет междисциплинарное взаимодействие физиков, инженеров и астрономов. Необходимо тесная взаимозаинтересованная кооперация специалистов в области лазерной физики, нелинейной и волоконной оптики, специалистов по точной астрономической технике и астрономов, проводящих непосредственные исследования в обсерваториях.

1. Holly L. et al. *Optica*, **4**, 979 (2017).
2. Rolland A. et al. *Optica*, **4**, 1070 (2017).
3. Jones D.J. et al. *Science*, **288**, 635 (2000).
4. Udem T. et al. *Nature*, **416**, 233 (2002).
5. Cundiff S.T. et al. *Rev. Mod. Phys.*, **75**, 325 (2003).
6. Steinmetz T. et al. *Science*, **321**, 1335 (2008).
7. Li C-H. et al. *Nature*, **452**, 610 (2008).
8. Dianov E.M. et al. *Opt. Lett.*, **14**, 1008, (1989).
9. Mamyshev P.M. et al. *IEEE J. Quantum Electron.*, **27**, 2347 (1991).
10. Chernikov C.V. et al. *Electron. Lett.*, **28**, 931 (1992).
11. Armani D.K. et al. *Nature*, **421**, 925 (2003).
12. Kippenberg T.J. et al. *Phys. Rev. Lett.*, **93**, 083904 (2004).
13. Savchenkov A.A. et al. *Phys. Rev. Lett.*, **93**, 243905 (2004).
14. Del'Haye P. et al. *Phys. Rev. Lett.*, **107**, 063901 (2011).
15. Takara H. et al. *Electron. Lett.*, **36**, 2089 (2000).
16. Pfeifle J. et al. *Nature Photon.*, **8**, 375 (2014).
17. Liu A. et al. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **16**, 23 (2010).
18. Fulöp A. et al. *Nat. Commun.*, **9**, 1598 (2018).
19. Панчук В.Е. и др. *Астрофиз. бюллетень*, **66**, 382 (2011).
20. Mayor M., Queloz D. *Nature*, **378**, 355 (1995).
21. Wilken T. et al. *Nature*, **485**, 611 (2012).
22. Boggio J.M.C. et al. *Proc. SPIE*, **8434**, 84340Y (2012).
23. Zajnulina M. et al. *Appl. Phys. B*, **121**, 171 (2015).
24. Boggio J.M. et al. *Opt. Commun.*, **415**, 186 (2018).
25. Yi X. et al. *Nat. Commun.*, **7**, 10436 (2016).
26. Obrzud E. et al. *Opt. Exp.*, **26**, 34830 (2018).
27. Metcalf A.J. et al. *Optica*, **6**, 233 (2019).
28. Metcalf A.J. et al. *Opt. Lett.*, **44**, 2673 (2019).
29. Santage A. *Astron. J.*, **136**, 319 (1962).
30. Liske J. et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, **386**, 1192 (2008).
31. Pasquini L. et al. *Proc. SPIE*, **7735**, 77352F (2010).
32. Колачевский Н.Н. *УФН*, **178**, 1225 (2008).