

Страсть к точности

Т.В. Хэнш

(Нобелевская лекция. Стокгольм, 8 декабря 2005 г.)

Оптические частотные гребенки, формируемые фемтосекундными лазерами с синхронизованными модами, привели к революции в искусстве измерения частоты света. Они позволяют установить прямую связь между оптическими и радиочастотами и создать часовой механизм оптических атомных часов, который так долго искали и не находили ученые. Расширяя возможности временной и частотной метрологии, оптические частотные гребенки позволяют выполнить новые проверки основных физических законов. Точное сравнение частот оптических резонансов атома водорода и других атомов с радиочастотой цезиевых атомных часов устанавливает пределы возможных медленных изменений фундаментальных физических постоянных. Генерация оптических гармоник высокого порядка расширяет область применения высокоточной лазерной спектроскопии. Техника частотных гребенок дает также ключ к развитию физики аттосекундных импульсов, позволяя управлять электрическим полем сверхкоротких лазерных импульсов. Развитие новых приборов и методов высокоточной лазерной спектроскопии в наших лабораториях в Стэнфорде и Гархинге было направлено на постоянное увеличение разрешения и точности в оптической спектроскопии обычного атома водорода, открывающее уникальные возможности для экспериментальной проверки фундаментальных физических теорий. В настоящей лекции предлагается личный взгляд автора на увлекательную историю развития техники лазерных частотных гребенок.

PACS numbers: 01.30.Bb, 06.20.-f, 06.30.Ft

Содержание

1. Введение (1368).
2. На заре лазерной спектроскопии, свободной от доплеровского уширения (1369).
3. Лазерная спектроскопия атомарного водорода (1369).
4. Измерение оптических частот (1370).
5. Оптические частотные гребенки, формируемые фемтосекундными лазерами (1372).
6. Такая простая идея! Почему на нее ушло так много времени? (1373).
7. Новые измерения частоты перехода 1S–2S атома водорода в 2003 г.: постоянны ли фундаментальные постоянные? (1377).
8. Оптические атомные часы (1378).
9. Перспективы создания частотных гребенок в далеком ультрафиолетовом диапазоне (1378).
10. Выводы (1379).

Список литературы (1379).

1. Введение

В нашем очень сложном и постоянно меняющемся мире важно быть уверенным в том, что ряд физических величин можно

измерить и предсказать с высокой точностью. Высокоточные измерения всегда привлекали меня как одна из самых красивых сторон физики. Появление все более совершенных инструментов для измерений позволяет заглянуть в неизведанные области. Не раз бывало так, что казавшиеся незначительными расхождения между результатами измерений и теоретическими предсказаниями приводили к крупным открытиям в фундаментальной науке. Само рождение современной науки тесно связано с искусством точных измерений.

С момента изобретения Галилео Галилеем и Христианом Гюйгенсом маятниковых часов время и частота являются величинами, которые мы можем измерять с наиболее высокой точностью. В наши дни хороший способ произвести точное измерение физической величины, такой как, например, длина или электрическое напряжение, часто заключается в преобразовании этой величины в частоту. Именно это и имел в виду мой друг и наставник в Стэнфордском университете Артур Шавлов, давая такой совет своим студентам: "Никогда не измеряйте ничего, кроме частоты!" Измерение частоты, т.е. подсчет числа циклов за данный интервал времени, по своей сути представляет процедуру работы с числами, устойчивую ко многим видам шумов. Давно известны электронные измерители частоты, работающие в спектральной области вплоть до диапазона радиоволн. В 1967 г. конференция Генеральной ассамблеи мер и весов определила секунду — нашу единицу измерения времени — как период времени, в течение которого атом цезия-133 совершает 9192631770 колебаний на переходе сверхтонкой структуры в основном атомном состоянии. Сегодня, по прошествии 50 лет работ по повышению точности физических измерений, радиочастот-

Т.В. Хэнш (T.W. Hänsch). Max-Planck-Institut für Quantenoptik, Garching, and Department of Physics, Ludwig-Maximilians-Universität München, Germany

ные цезиевые атомные часы достигают точности до 15-го знака [1].

Ожидается, что еще более высокие точности измерений могут быть достигнуты в будущем с помощью оптических атомных часов с "маятником," представляющим собой атомы и ионы, колеблющиеся на световой частоте. Разбивая время на сотни тысяч коротких интервалов, такие часы существенно расширяют границы временной и частотной метрологии. Часовой механизм, который так долго искали ученые, теперь может быть реализован на основе частотных гребенок, формируемых фемтосекундными лазерами — сверхточного измерительного прибора, способного напрямую связывать и сравнивать оптические частоты с частотами радиоволнового диапазона без потери когерентности фаз. Лазерные частотные гребенки представляют собой мощный инструмент для новых проверок фундаментальных физических законов. Точное сравнение оптических резонансных частот атомарного водорода и других атомов с частотой радиоволн цезиевых атомных часов уже позволило установить пределы предполагаемых медленных изменений фундаментальных физических постоянных. Генерация оптических гармоник высокого порядка позволяет расширять область применения частотных гребенок до далекого ультрафиолетового диапазона, открывая новые области приложений для высокоточной лазерной спектроскопии. Техника частотных гребенок дает ключ к развитию оптики аттосекундных импульсов, позволяя управлять электрическим полем сверхкоротких лазерных импульсов.

Частотные гребенки, формируемые фемтосекундными лазерами, были выделены в списке нобелевских премий по физике за 2005 г. Хотя эта техника достигла совершенства лишь около семи лет назад, фемтосекундные частотные гребенки уже успели стать стандартным инструментом высокоточной спектроскопии и оптической частотной метрологии во многих лабораториях мира. Приборы, выпущенные в коммерческих целях, быстро появились на рынке; методам измерений, основанным на использовании частотных гребенок, посвящены подробные обзоры и монографии [2–4]. В данной лекции я постараюсь изложить мой личный взгляд на развитие этого интересного метода измерения времени и частоты. Я далек от мысли дать здесь всесторонний обзор проблемы, а приводимые ниже примеры выбраны так, чтобы помочь проследить извилистый путь развития моего личного видения проблемы.

2. На заре лазерной спектроскопии, свободной от доплеровского уширения

Лазерная спектроскопия высокого разрешения и высокоточные спектроскопические измерения привлекали меня, когда я был еще аспирантом в Гайдельбергском университете. Работая над дипломом и диссертацией в группе Петера Тошека в Институте прикладной физики, возглавляемом Кристофом Шмельцером, я использовал гелий-неоновые лазеры. Меня заинтересовал центральный узкий лэмбовский провал, который Эбрахам Соке и Али Джаван впервые обнаружили при сканировании частоты одномодового газового лазера через доплеровски уширенный профиль полосы усиления [5]. Такой провал был предсказан Уиллисом Лэмбом в его полуклассической теории лазеров [6]. Билл Беннетт был первым, кто дал простое объяснение этого явления на основе насыщения и выжигания спектрального провала в поле двух встречных волн в лазерном резонаторе стоячей волны [7]. Другие исследователи, такие, как Джон Холл, Вениамин Чеботаев и Кристиан Борде вскоре обнаружили "инвертированные лэмбовские провалы", которые наблюдаются при внесении поглощающего молекулярного газа в лазерный резонатор [8]. Имея в своем распоряжении резонансы беспрецедентно высокого спектрального разрешения, мы буквально вдыхали воздух революции в лазерной спектроскопии, которая развернулась

в последующие несколько лет. Однако в то время спектроскопия, свободная от доплеровского уширения, ограничивалась исследованием лазерных переходов в газовых лазерах и несколькими молекулярными линиями поглощения, обеспечивавшими удачную комбинацию параметров. Работая с Петером Тошеком, я исследовал эффекты квантовой интерференции в связанных трехуровневых атомных системах [9, 10], демонстрирующих явления, вся значимость которых стала понятной лишь недавно, такие как лазерная генерация в системах без инверсии населенностей и электромагнитно индуцируемая прозрачность. Эти эффекты также важны для понимания физической сути медленного света.

В 1970 г. я занял позицию научного сотрудника (постдока) в группе Артура Л. Шавлова в Стэнфордском университете. В ходе проведения различных экспериментов в это время мне довелось сотрудничать с Питером Смитом, работавшим тогда в Беркли [11], и с Марком Левенсоном из Стэнфорда [12]. В процессе этой деятельности я разработал новый метод спектроскопии насыщения, свободной от доплеровского уширения, который не требовал помещения образца в лазерный резонатор. Вскоре после этого мне удалось создать специальный перестраиваемый импульсный лазер на красителе, накачиваемый азотным лазером со столь высокой степенью монохроматичности, что мы смогли применить спектроскопию насыщения, свободную от доплеровского уширения, к произвольным атомным резонансным линиям [13, 14]. Перестраиваемая в широком спектральном диапазоне лазерная генерация в жидких растворах органических красителей была независимо открыта Фрицем Шефером [15] и Питером Сорокиным [16] в 1966 г.

3. Лазерная спектроскопия атомарного водорода

Предложение использовать наши методы для исследования низкочастотной бальмеровской α -линии атома водорода исходило от Артура Шавлова. В 1930-х годах эта линия была объектом пристального внимания ученых, работавших в области атомной спектроскопии, поскольку имелись основания предполагать, что наблюдаемый спектральный профиль этой линии не согласуется с предсказаниями релятивистской квантовой теории Дирака [17]. Однако в связи с тем, что доплеровское уширение оказывается особенно значительным для легких атомов водорода, в те годы спектроскописты могли наблюдать лишь набор неразрешаемых компонент тонкой структуры. Спектроскопия простого атома водорода в течение длительного времени играла ключевую роль в истории атомной физики. Видимый бальмеровский спектр атома водорода оказался тем Розеттским камнем, который позволил расшифровать законы квантовой физики. Он вдохновил основополагающие открытия Нильса Бора, Арнольда Зоммерфельда, Луи де Бройля, Эрвина Шрёдингера, Поля Дирака и даже Уиллиса Лэмба на заре эпохи современной электродинамики.

В 1972 г. вместе с аспирантом Иссой Шахином мы с гордостью представили Артуру Шавлову свободный от доплеровского уширения спектр низкочастотной бальмеровской α -линии водорода, записанный с помощью нашего импульсного перестраиваемого лазера на красителе [18]. В полученном оптическом спектре ясно наблюдался лэмбовский 2S-сдвиг, т.е. расщепление 2S- и 2P-состояний, которые в теории Дирака должны быть вырожденными. Так было положено начало долгой истории высокоточной спектроскопии простого атома водорода, позволившей выполнить уникальное сопоставление экспериментальных данных и теоретических предсказаний. Поиск не прекращается и сегодня. Благодаря ему был достигнут значительный прогресс в развитии спектроскопических методов, включая первые предположения о возможности лазерного охлаждения атомных газов [19], а также последние

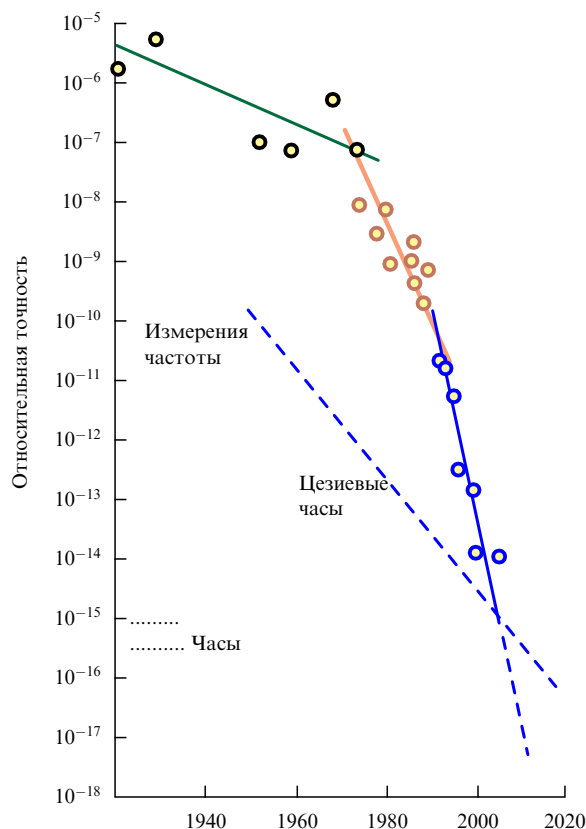


Рис. 1. Повышение относительной точности оптической спектроскопии атома водорода на протяжении восьми десятилетий. Серьезные трудности были преодолены благодаря появлению свободной от доплеровского уширения лазерной спектроскопии в начале 1970-х годов и распространению оптических измерений частоты в начале 1990-х годов. Точность таких измерений в ближайшем будущем достигнет предела точности цезиевых атомных часов. Ожидается, что в будущем впечатляющий успех высокоточной спектроскопии будет связан с разработкой оптических атомных часов.

разработки в области частотных гребенок, формируемых фемтосекундными лазерами.

На рисунке 1 показано, как улучшалась со временем точность оптической спектроскопии атома водорода [20]. Из-за сильного доплеровского уширения спектральных линий атома водорода классическая спектроскопия не позволяет проводить измерения с точностью более шести или семи значащих цифр. В 1971 г. нашей группе в Стэнфорде удалось преодолеть этот барьер с помощью нелинейной спектроскопии, реализованной на основе перестраиваемого лазера на красителе. Наши усилия быстро поддержали другие исследовательские группы, среди которых следует выделить лабораторию в Нью-Хейвене, Оксфорде и Париже, которым в течение последующих двух десятилетий удалось повысить точность спектроскопических измерений на три порядка. На рубеже 1990 г. обнаружилась новая трудность — ограничения метрологии, основанной на измерении оптических длин волн, связанные с неизбежно возникающими геометрическими искажениями волнового фронта. Точности более высокого порядка, чем 10^{-10} , нам удалось достичь лишь потому, что мы лучше понимали, как измерить частоту, а не длину волны света. В 2003 г. точность спектроскопических измерений достигла $1,4 \times 10^{-14}$ [21]. Дальнейшее увеличение точности осложнилось, поскольку мы вновь столкнулись с фундаментальным ограничением, связанным с границами нашего знания о единице времени — секунде. На протяжении последних 50 лет, как показано штриховой линией на рис. 1, часы на

основе атома цезия непрерывно совершенствовались [1], но, по-видимому, возможности дальнейшего совершенствования практически исчерпаны. Однако наши методы, основанные на подсчете оптической частоты, открывают возможность создания оптических атомных часов, использующих узкие оптические резонансы охлажденных лазером ионов, нейтральных атомов или молекул в ловушках. С помощью таких часов спектроскопические измерения в будущем могут достичь точности до 10^{-18} и выше.

В случае атомарного водорода самое высокое разрешение может быть достигнуто на двухфотонном резонансе $1S-2S$, лежащем в ультрафиолетовой области спектра и имеющем естественную ширину линии всего 1 Гц. От доплеровских сдвигов первого порядка можно избавиться, если возбуждать этот переход двумя встречными лазерными волнами, как было впервые указано Вениамином Чеботаевым [22]. Первые свободные от доплеровского уширения спектры были получены в 1975 г. в нашей лаборатории в Стэнфорде [23]. В Гархинге для наблюдения этого резонанса мы использовали коллинеарное возбуждение пучка охлажденных атомов водорода [21]. Начиная с 1986 г., многие поколения аспирантов и постдоков внесли огромный вклад в совершенствование этого мастерства.

В наши дни атомы водорода получают путем диссоциации молекул в радиочастотном поле и охлаждаются до температуры около 6 К путем столкновений со стенками сопла, соединенного с гелиевым криостатом. Свободное от доплеровского уширения двухфотонное возбуждение атомов осуществляется в коллинеарной геометрии в поле стоячей волны с длиной волны 243 нм, получаемой в результате возбуждения резонатора внутри вакуумной камеры излучением второй гармоники лазера на красителе. Атомы, возбужденные до метастабильного состояния $2S$, проходят путь около 10 см и регистрируются путем приложения замедляющего электрического поля методом счета фотонов, излучаемых в лаймановской α -линии в вакуумной ультрафиолетовой части спектра. Лазерное излучение периодически перекрывается с помощью прерывателя, и отсчеты фотонов распределяются в группы в соответствии с различным временем задержки. Для медленных атомов, выделяемых при времени задержки, равном 1,3 мс, ширина линии на длине волны 243 нм теперь уменьшается примерно до 530 Гц, что соответствует разрешению $4,3 \times 10^{-13}$. Для измерения положения линии с точностью 1 % от ее ширины потребуется достичь точности измерений 5×10^{-15} .

4. Измерение оптических частот

Для наблюдения узких оптических резонансов методами нелинейной лазерной спектроскопии с разрешением, превышающим предельную разрешающую способность интерферометрии, основанной на измерении длины волны, требуется перейти от измерения длины волны излучения к измерению его частоты. Работы над созданием оптического частотомера начались практически сразу после создания лазера. Али Джаван, один из изобретателей гелий-неонового лазера, был первым, кто наблюдал на фотодетекторе биения двух лазерных пучков, совмещаемых в пространстве при помощи светоделительной пластины, аналогичные интерференции звуковых волн от двух камертонов [24]. Это был замечательный результат, потому что он доказал, что лазерное излучение может вести себя так же, как классическая радиоволна. Когерентное лазерное излучение может иметь вполне определенную фазу и амплитуду, так что можно пересчитать горбы такой световой волны. Однако для частот, соответствующих примерно 500000 миллиардов колебаний в секунду, не существует достаточно быстрых электронных приемников и передающих цепочек, которые бы можно было использовать для создания оптического частотомера.

В начале 1960-х в Массачусетском технологическом институте Али Джаван начал исследовательский проект, направленный на распространение радиотехнических методов измерения частоты на оптический спектральный диапазон. Он экспериментировал с тонкими усиками точечных контактов металл–диэлектрик–металл, используемыми в качестве антенн, приемников и смесителей инфракрасного лазерного излучения. Позже подобные элементы были использованы Джоном Холлом и Кеном Эвенсоном из Национального бюро стандартов (НБС, в настоящее время — Национальный институт стандартов) в Боулдере для создания первой частотной цепочки на основе генерации гармоник, использовавшейся для определения скорости света путем измерения длины волны и частоты излучения стабилизированных по метану гелий-неоновых газовых лазеров на длине волны 3,39 мкм [25]. Лазерные частотные цепочки, основанные на генерации гармоник, представляли собой сложные системы для измерения единственной оптической частоты, поэтому совсем немного таких частотных цепочек было создано в нескольких хорошо оборудованных национальных метрологических лабораториях. В начале 1980-х годов частотная цепочка, разработанная в НБС в Боулдере, была настолько усовершенствована, что позволила измерить частоты некоторых стабилизированных по иоду гелий-неоновых лазеров видимого диапазона с точностью до 10 десятичных знаков. Этот результат позволил в 1983 г. Генеральной ассамблее мер и весов уточнить определение метра, определив скорость света в вакууме c как 299792458 метров в секунду. Один метр, таким образом, определяется как расстояние, проходимое светом за время, равное $1/299792458$ секунды. С этого момента длина волны лазерного излучения в вакууме λ могла быть точно определена простым измерением частоты f , поскольку имеет место соотношение $f\lambda = c$.

К сожалению, НБС пришлось отказаться от использования сложной частотной цепочки вскоре после занесения нового определения метра в справочники, и в течение следующего десятилетия в США не было ни одной лаборатории, которая могла бы выполнить данные предписания. Лучше обстояли дела в ряде европейских лабораторий, особенно в Парижской обсерватории (в настоящее время — BNM — SYRTE) и Физико-техническом институте в Брауншвейге (Physikalisch-Technische Bundesanstalt, PTB). В работе, опубликованной в начале 1996 г. [26], группа из PTB сообщала о первом фазово-когерентном измерении частоты излучения в видимом диапазоне. Для выполнения этого измерения использовалась сложная частотная цепочка, занимавшая три большие лаборатории, расположенные в двух различных зданиях, с помощью которой проводилось сравнение частоты низкочастотной интеркомбинированной линии атома кальция и радиочастоты цезиевых атомных часов. Для достижения достаточной фазовой стабильности частота часов сначала понижалась до 100 МГц — частоты стабильного кварцевого генератора. Далее частотная цепочка дискретными шагами пересекала весь электромагнитный спектр, генерируя при этом некоторую гармоническую частоту в подходящем нелинейном преобразователе и обеспечивая достаточную мощность для последующих этапов преобразования частоты на основе использования синхронизованного по фазе генератора. Требуемая конечная частота получалась в результате сложной процедуры с использованием нескольких вспомогательных генераторов.

Было очевидно, что мы не могли позволить себе создание подобной лазерной частотной цепочки на основе генерации гармоник для проведения экспериментов с атомом водорода в Гархинге. В качестве более простого решения мною в 1988 г. была предложена цепочка, основанная на делении частоты, которая давала возможность оперировать с разностью частот, а не с самими частотами, что позволяло работать в удобном спектральном диапазоне, например, в ближней инфракрасной области спектра, где можно использовать

компактные диодные лазеры [27]. Ключевым элементом созданного нами устройства являлся делитель частотных интервалов с автоматическим контролем лазера, позволяющим реализовать лазерную генерацию на частоте, лежащей точно в центре интервала между двумя начальными частотами. Для этой цели проводилось сравнение частоты второй гармоники основного лазера с суммой начальных частот, получаемой с помощью нелинейного оптического кристалла. Каскадная цепочка из n таких делителей позволяет разделить начальный частотный интервал на $2n$ интервалов. Для измерения абсолютной частоты лазера f можно было начать с интервала между f и частотой второй гармоники $2f$, протяженность которого равна как раз частоте f . Путем многократного деления этого интервала пополам примерно через 15 шагов удается получить достаточно малый частотный интервал, который можно наблюдать в виде сигнала биений на быстродействующем фотодетекторе и можно измерить с помощью радиочастотомера. В 1990 г. вместе с Харальдом Телле, перешедшим к нам из РТВ, и Дитером Мешедом мы продемонстрировали первый работающий делитель интервалов [28].

Мы так и не собрали полную схему оптического частотомера, но создали цепь, состоящую из четырех делителей интервалов для измерения частотного интервала, равного 1 ТГц, возникающего при сравнении частоты перехода $1S-2S$ в атоме водорода с инфракрасной частотой стабилизированного по метану гелий-неонового лазера, работающего на длине волны 3,39 мкм. Это было отправной точкой в создании нашей собственной короткой лазерной частотной цепочки на основе генерации гармоник [29]. Нам приходилось многократно отправлять этот промежуточный стандарт частоты в Брауншвейг для синхронизации с цезиевыми часами с помощью имевшейся в РТВ частотной цепочки. В 1997 г., измерив частоту ультрафиолетового перехода $1S-2S$ с точностью $3,7 \times 10^{-13}$, мы установили новый рекорд оптической частотной метрологии [29]. С помощью этих и других спектроскопических измерений, выполненных для атома водорода, нам удалось получить новое значение постоянной Ридберга, играющей роль масштабного множителя для любого спектроскопического перехода и известной с наибольшей точностью среди всех фундаментальных постоянных. Нам также удалось определить лэмбовский сдвиг основного состояния $1S$ с точностью, достаточной для проверки квантовой электродинамики связанного состояния. Более того, в предположении правильности положений квантовой электродинамики, мы также смогли определить новые среднеквадратичные значения зарядового радиуса протона и структурного радиуса дейтрона [29, 30]. Мы были особенно горды тем, что достигнутая в наших настольных экспериментах точность на порядок превышала точность экспериментов по рассеянию электронов, выполняемых на больших ускорителях.

Вскоре ряд метрологических лабораторий начали строительство оптических частотомеров, основанных на оптическом делении оптических частотных интервалов. В Гархинге мы тем временем также экспериментировали с любезно предоставленными нам Мотонобу Коуроги электрооптическими генераторами частотных гребенок, с помощью которых можно получать эквидистантные гребенки модуляционных частотных компонент, простирающиеся в спектральном интервале в несколько терагерц [31]. Используя электрооптический генератор частотных гребенок для заполнения частотного интервала, получающегося на конечной стадии деления, мы получали возможность создать частотомер всего за шесть или семь шагов деления частотных интервалов. Во время своего пребывания в Гархинге Мотонобу Коуроги показал нам, как наблюдать даже очень слабые компоненты частотных гребенок методом гетеродинного детектирования, а также как улучшать отношение сигнала к шуму с помощью сбалансированных оптических приемников и сменных светоделителей.

Вскоре нам удалось выполнить прямое сравнение точности его генератора частотных гребенок и нашего делителя частотных интервалов [32].

В процессе длительного поиска высокоточных оптических измерительных инструментов исследовались также многие другие возможности, например, такие, как интерферометрия с использованием модулированных лазерных волн [33, 34] и деление частоты с помощью синхронизованных по фазе оптических параметрических генераторов [35]. Дэвид Уайнлэнд предложил синхронизовать циклотронное движение одиночного электрона с лазерной волной [36]. Тем временем, однако, такие усложнения стали излишними. Появление в 1998 г. фемтосекундных лазерных синтезаторов оптических частотных гребенок привело к существенному упрощению оптических измерений в частотном представлении [2, 3].

5. Оптические частотные гребенки, формируемые фемтосекундными лазерами

Схема синтезатора частотных гребенок, показанная на рис. 2, достаточно проста. Ключевым элементом этого устройства является фемтосекундный лазер, работающий в режиме синхронизации мод и поддерживающий короткий световой импульс в форме солитона, который циркулирует внутри лазерного резонатора. Такой лазер можно сравнить со световыми часами — устройством, известным по мысленному эксперименту Эйнштейна. Пусть после каждого прохода по резонатору ослабленная копия светового импульса выходит из системы, так что лазер излучает регулярную последовательность сверхкоротких импульсов. Для измерения неизвестной частоты лазерной волны пучок и последовательность импульсов совмещаются с помощью светоделителя, а результирующий интерференционный сигнал регистрируется фотодетектором. В идеализированном случае точно периодической последовательности импульсов можно ожидать возникновения низкочастотного сигнала биений всякий раз, когда лазерная частота приближается к значению, при котором целое число осцилляций поля соответствует временному интервалу между двумя импульсами. Например, если мы знаем, что лазер излучает точно один миллиард импульсов в секунду, и можем быть уверены, что лазерная волна совершает точно 500000 колебаний в течение периода повторения импульсов, то мы знаем, что оптическая частота должна составлять 500000 миллиардов циклов в секунду.

В частотном представлении мы можем утверждать, что связанные продольные моды импульсного лазера формируют эквидистантную гребенку спектральных компонент. Низко-

частотный сигнал биений ожидается всякий раз, когда неизвестная лазерная частота приближается к одной из спектральных компонент гребенки. Происхождение спектра излучения в виде гребенки частотных компонент хорошо объясняется в классическом учебнике Энтони И. Сигмана [37]. Рассмотрим оптический импульс произвольной формы, циркулирующий внутри оптического резонатора. Во время каждого прохода ослабленная копия импульса выходит через полупрозрачное зеркало. Одна копия импульса имеет широкий и достаточно сложный спектр. Однако две идентичные копии импульса, идущие друг за другом, будут давать интерференционную картину, напоминающую ту, что наблюдалась в эксперименте Юнга с двумя щелями. Спектр трех копий похож на интерференционную картину от трех щелей, а бесконечная последовательность копий дает набор узких линий, которые можно идентифицировать как моды резонатора. С математической точки зрения идеальная периодическая последовательность импульсов может быть описана с помощью ряда Фурье, а спектральные компоненты гребенки соответствуют элементам этого ряда.

Интервал между двумя соседними модами или спектральными компонентами гребенки точно равен частоте повторения f_r . Это соотношение остается в силе, даже если импульсы пуга не являются идентичными копиями, но при этом имеется (воспроизводимый) сдвиг фазы "несущей" волны электромагнитного поля относительно его огибающей от импульса к импульсу [2, 3, 38]. Подобные сдвиги фазы неизбежно возникают в реальном лазере из-за дисперсии резонатора. Вследствие этого вся гребенка сдвигается относительно спектра целых гармоник частоты повторения f_r на частоту расстройки между несущей и огибающей f_{CE} по модулю 2π равной полному сдвигу фазы за интервал между импульсами. Частота спектральной компоненты гребенки, соответствующей моде с номером m , при этом определяется выражением

$$f_m = mf_r + f_{CE}.$$

Подобная частотная гребенка действует как линейка в пространстве частот, которую можно использовать для измерения больших интервалов между двумя различными оптическими частотами f_r в терминах скорости повторения импульсов. В случае, когда эти две частоты представляют собой известные кратные или дробные части одной и той же лазерной частоты f , такое измерение позволяет определить саму частоту f . При известной частоте повторения f_r сигнал биений, формируемый полем известной оптической частоты f и ближайшей спектральной компонентой частотной гребенки, позволяет определить ранее неизвестную частоту расстройки f_{CE} . Зная две радиочастоты f_r и f_{CE} и целое число, соответствующее номеру моды, мы можем рассчитать частоту любой спектральной компоненты гребенки.

Даже для большинства специалистов оказались удивительными обширные возможности техники, основанной на использовании частотных гребенок. Частотный спектр фемтосекундного лазерного осциллятора в нелинейно-оптической среде можно уширить, и это уширение может превышать оптическую октаву без нарушения целостности частотной гребенки. В ставшей ныне обычной экспериментальной реализации этой техники последовательность импульсов, формируемая титан-сапфировым лазером, синхронизация мод в котором достигается за счет наведения керровской линзы, пропускается через микроструктурированное кварцевое волокно с малой твердотельной сердцевиной, окруженной заполненными воздухом отверстиями [39, 40]. Большая разность показателей преломления на границе воздух-кварц обеспечивает волноводное распространение за счет явления полного внутреннего отражения даже для жестко сфокусированных падающих пучков высокой интенсивности. Так как часть излучения распространяется в виде эванесцентной волны в воздухе, в таком волокне имеется дополнительный техниче-

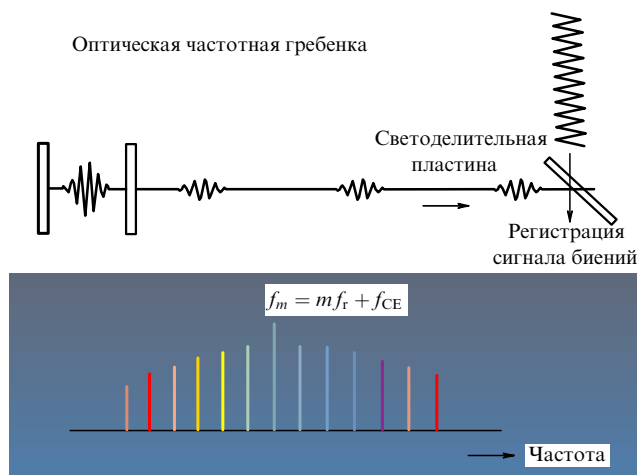


Рис. 2. Схема синтезатора фемтосекундной лазерной частотной гребенки.

ский параметр для уменьшения распыливания инжектируемого лазерного импульса за счет дисперсии групповой скорости. Внутри волокна спектр импульса уширяется за счет фазовой самомодуляции, связанной с зависящей от интенсивности добавкой к показателю преломления, солитонного расщепления импульса, формирования ударных волн и других нелинейно-оптических процессов. Возникающий в результате этих процессов белый свет можно разложить на спектральные составляющие с помощью дифракционной решетки, позволяющей наблюдать всю радуу цветов. Это излучение, однако, отличается от обыкновенного белого света. Замечательным является то, что процесс, приводящий к генерации белого света, настолько хорошо воспроизводим, что последующие импульсы сохраняют корреляцию фазы и могут спектрально интерферировать, в результате чего образуется частотная гребенка, состоящая из нескольких сотен тысяч узких спектральных компонент.

Многие эксперименты, выполненные к настоящему времени, подтвердили, что частотный интервал между спектральными компонентами гребенки с высокой точностью равен частоте повторения f_r . В условиях, когда спектральная протяженность частотной гребенки превышает октаву, измерение частотной расстройки несущей и огибающей f_{CE} оказывается особенно простым. При этом из низкочастотной части спектра можно просто выделить несколько тысяч спектральных компонент частотной гребенки и пропустить лазерное излучение через удваивающий частоту кристалл, так что новые частотные компоненты гребенки оказываются смещенными на удвоенную частоту расстройки f_{CE} . Сигнал коллективных биений с соответствующими исходными спектральными компонентами, лежащими в высокочастотной части спектра, позволяет выполнить прямое измерение сдвига f_{CE} . Коль скоро эту частоту можно измерить, появляется возможность управлять ее значением, например, путем подстройки дисперсии лазерного резонатора или просто изменением мощности накачки. Можно даже сделать f_{CE} равной нулю, так что частоты спектральных компонент гребенки окажутся точно равными целым кратным лазерной частоты повторения f_r .

До сих пор мы рассматривали все световые волны как классические электромагнитные волны. Нами пока не исследовались квантово-оптические аспекты техники частотных гребенок, т.е. ожидаемые корреляции шума, обусловленные свойствами фотонов и их запутанностью. Такие исследования могут открыть новое богатое поле научной деятельности.

Лазерные частотные гребенки устанавливают прямую связь между оптическими и радиочастотами. Эту связь можно использовать в любом из двух направлений. Мы можем измерять частоту повторения f_r или управлять этой частотой с помощью цезиевых атомных часов с целью синтеза нескольких сотен тысяч узких опорных спектральных оптических линий, характеристики которых известны с высокой точностью, так как они исходно привязаны к стандарту времени. После этого можно определить любую неизвестную частоту путем измерения длины волны с помощью обыкновенного спектрального измерительного прибора, обеспечивающего достаточную точность для определения целого числа m , соответствующего порядку ближайшей спектральной компоненты частотной гребенки. Точное расстояние от этой опорной линии затем измеряется путем подачи сигнала биений на радиочастотный измеритель. Измерения могут выполняться также и в обратном направлении. При этом отправной точкой служат узкие оптические опорные линии какого-либо холодного иона в ловушке, холодных атомов или медленных молекул, которые используются в качестве оптического стандарта частоты для привязки близлежащей спектральной компоненты частотной гребенки. Все остальные спектральные компоненты частотной гребенки при этом оказываются целыми кратными оптической опорной

частоты, а частота повторения становится точно известным дробным числом.

Синтезаторы частотных гребенок действуют так, как если бы у нас имелось несколько сотен тысяч сверхстабильных, точно настроенных и одновременно работающих лазеров. Путем нелинейной генерации суммарной и разностной частоты такие системы позволяют выполнить высокоточное измерение любой частоты от радио- до ближнего ультрафиолетового диапазона. Они служат тем часовым механизмом оптических атомных часов, который так долго искали ученые. Они способны даже генерировать радиоволны с предельной фазовой стабильностью [41]. Являясь источниками стабилизированных по фазе фемтосекундных импульсов, синтезаторы частотных гребенок также дают нам ключ к решению увлекательных проблем из области аттосекундной оптики [42]. Благодаря возможности электронного автоматического контроля такие устройства могут быть относительно простыми, надежными и все более удобными в использовании.

6. Такая простая идея!

Почему на нее ушло так много времени?

При взгляде назад идеи, лежащие в основе техники измерений с использованием частотных гребенок, выглядят довольно простыми и почти очевидными. Почему же все специалисты, включая тех, кто работал в нашей лаборатории, так долго бились над гораздо более громоздкой методикой, связанной с использованием лазерных частотных цепочек, основанных на генерации гармоник?

По-видимому, основная причина заключается в том, что никто всерьез не верил, что частотные гребенки могут на самом деле работать. Имелись веские причины полагать, что спектральный интервал между радио- и оптическими частотами невозможно заполнить за один шаг. Фазовые шумы даже самых лучших кварцевых генераторов настолько велики, что должны были бы полностью размыть любую структуру гребенки, если бы удалось каким-то образом умножить ее частоту до видимого диапазона спектра. В частотных цепочках, основанных на генерации гармоник, промежуточные передаточные генераторы выполняют функцию фильтров фазового шума, работают как электромагнитные "маховики", предотвращающие "коллапс когерентности" [43].

Еще одна причина может заключаться в том, что с самого раннего периода развития лазерной физики по отдельности развивались два научных сообщества. Ученые, занимавшиеся спектроскопией высокого разрешения, направляли всю свою изобретательность на повышение частотной стабильности непрерывных лазеров. С другой стороны, были ученые, которые изобретали тонкие методы получения все более коротких импульсов с использованием лазеров с синхронизацией мод. Короткие вспышки света с широким спектром использовались для исследования сверхбыстрых явлений в полупроводниках и жидкостях, а также динамики химических реакций и для получения высоких пиковых интенсивностей в экспериментах по физике плазмы. Эти два научных сообщества проводили отдельные друг от друга конференции и не чувствовали сильной потребности следить за достижениями друг друга.

Что касается моей собственной работы, то я не могу прибегнуть к изложенному выше оправданию. Со времени ранних экспериментов, выполненных с использованием многомодовых гелий-неоновых лазеров [44], мне было известно, что продольные моды лазера представляют собой хорошо разрешаемую структуру, а их фазы могут быть связаны таким образом, что результатом сложения таких мод является короткий световой импульс, циркулирующий внутри лазерного резонатора [45, 46]. Несколько лет спустя с помощью широкополосных лазеров на красителе были получены еще более короткие импульсы путем синхронизации их

аксиальных мод с помощью насыщающегося поглотителя или посредством синхронной накачки модулированным аргонным лазером [47]. В середине семидесятых годов в Стэнфорде я увлекся идеей спектроскопии высокого разрешения атомных резонансных линий, основанной на рамсеевском возбуждении с помощью когерентной последовательности, состоящей из многих световых импульсов [48]. Резонансное возбуждение, осуществляемое разнесенными во времени световыми импульсами, также исследовалось в то время Майклом Сейлором в Массачусетском технологическом институте [49] и Вениамином Чеботаевым в Новосибирске [50]. После первых обнадеживающих экспериментов, выполненных с помощью импульсов лазера на красителе, инжектируемых в пассивный резонатор [48], наша группа в Стэнфорде при участии аспиранта Джима Экстайна и Аллистера Фергюсона, работавшего в нашем университете при поддержке фонда Линдемманна, показала, что синхронно накачиваемый пикосекундный лазер на красителе, работающий в режиме синхронизации мод, может генерировать стабильную фазово-когерентную последовательность импульсов, которую мы использовали для свободного от доплеровского уширения двухфотонного возбуждения атома натрия [51]. Спектральные компоненты частотной гребенки служили в качестве частотной линейки для измерения интервалов тонкой структуры атома. Для повышения точности мы заменили изначально использовавшийся радиочастотный генератор модулятором нашего аргонного лазера накачки, имевшего высокочастотный синтезатор частоты. К нашему удивлению, работа лазера на красителе улучшилась настолько, что мы первыми получили субпикосекундные импульсы прямо на выходе лазера на красителе с синхронной накачкой [52]. В тот момент нам следовало усвоить важный урок: все, что хорошо для стабильности частоты, также хорошо для генерации сверхкоротких световых импульсов! Позже мы использовали нашу частотную гребенку для свободной от доплеровского уширения поляризационной спектроскопии [53], а также выполнили эксперименты по двухфотонной спектроскопии с использованием частотной гребенки, формируемой лазером с синхронизованными модами, в котором фазы мод подобраны таким образом, что интенсивность излучения остается постоянной, а частота периодически изменяется [54].

По ходу наших экспериментов в Стэнфорде мы с огорчением осознали, что мы не можем определить абсолютные положения спектральных линий нашей частотной гребенки, поскольку дисперсия внутри лазерного резонатора приводит к относительно неизвестному сдвигу фазы несущей волны относительно огибающей импульса. Как подробно показано в кандидатской диссертации Джима Экстайна [38], написанной им в Стэнфорде в 1978 г., такие сдвиги фазы приводят к смещению всего спектра гребенки на неизвестную величину f_{CE} . Учитывая то, что протяженность спектра нашей гребенки составляла всего 800 ГГц, мы не имели возможности наблюдать и измерять частоту расстройки f_{CE} . Поэтому в конце семидесятых годов мы не знали как измерять абсолютные оптически частоты с помощью лазерных частотных гребенок.

Идея каким-то образом генерировать гораздо более широкие частотные гребенки вновь возникла у меня после моего возвращения в Германию в 1986 г. В 1990 г. я опубликовал работу, в которой предлагался синтезатор субфемтосекундных импульсов, основанный на наложении частот различных синхронизованных по фазе непрерывных лазерных генераторов, приводящем к генерации очень широкой частотной гребенки [55]. В начале 1990-х годов открытие Уилсоном Сиббетгом из Университета Ст.-Эндрюса явления синхронизации мод за счет керровской линзы [56] привело к впечатляющему прорыву в области технологий получения сверхкоротких импульсов. Вскоре после этого стали доступными коммерческие фемтосекундные лазеры на основе титаната сапфира, существенно облегчавшие генерацию сверхкоротких импуль-

сов. Заинтересовавшись этими новыми источниками излучения, я обсудил с Питером Ламброполусом из Гархинга возможность найти какой-нибудь нелинейный эффект, такой, например, как надпороговая ионизация (НПИ), который был бы чувствителен к фазе электрического поля, определенной относительно огибающей импульса, и мог бы позволить измерить частоту расстройки f_{CE} спектральных компонент в частотной гребенке. Выполненные расчеты вскоре показали, что такие эффекты могли бы наблюдаться только для импульсов с длительностью, не превышающей нескольких оптических циклов [57]. В наши дни источники таких импульсов стали доступны, и фазовая зависимость процесса НПИ была продемонстрирована Герхардом Паулусом и Хербертом Вальтером [58]. В 1994 г. я также обсуждал проблему фазового сдвига между несущей и огибающей с Ференцем Краусом из Технического университета Вены. В 1996 г. его группа впервые наблюдала подобные сдвиги фазы от импульса к импульсу в интерференционных корреляционных экспериментах [59].

Я вспоминаю, как в 1994 г. на торговой выставке мое внимание привлек фемтосекундный титан-сапфировый лазер с синхронизацией мод и регенеративным усилителем (Coherent Mira). Лазерный пучок, сфокусированный в стеклянную пластинку, вызывал генерацию белого света — континуума, который с помощью призмы раскладывался на все цвета радуги. Подобные импульсы белого света получают в результате совместного действия самофокусировки, фазовой самомодуляции и других нелинейно-оптических процессов. Уже в течение долгого времени такие импульсы использовались для исследования быстропротекающих процессов по схеме возбуждение — зондирование [60]. Поразительную картину представляла собой почти лазерная спекл-структура радуги цветов, свидетельствующая о высокой степени пространственной когерентности излучения. Тогда мне пришлось в голову, что при условии достаточно высокой степени корреляции между соседними импульсами подобная система могла бы быть использована для получения частотной гребенки протяженностью в октаву. Частотную гребенку такой ширины можно было бы использовать в качестве линейки для измерения большого интервала между лазерной частотой и ее второй гармоникой, равного самой лазерной частоте. Даже несмотря на то, что частота повторения импульсов, составлявшая несколько сотен килогерц, была слишком мала, что представляло собой неудобство для экспериментов с частотными гребенками, я был настолько заинтересован, что приобрел в 1994 г. такую систему для нашей лаборатории частотной метрологии в Гархинге. В глубине души я надеялся, что нам, может быть, как-нибудь удастся получить белый свет с помощью импульсов из лазерного генератора без использования регенеративного усилителя, использование которого значительно снижает частоту повторения импульсов. Я полагал, что этого можно достичь с помощью маленького волновода, изготовленного из материала с высокой оптической нелинейностью, который позволил бы получать белый свет ниже пороговой мощности самофокусировки.

Мы не приступили немедленно к осуществлению подхода, основанного на использовании фемтосекундных импульсов, потому что мы уже достаточно далеко продвинулись в совершенствовании альтернативной схемы оптического деления частотных интервалов. Точное измерение частоты перепада $1S-2S$ уже казалось почти осуществимым. Мы также понимали, что нам потребуется независимый инструмент для проверки измерений, выполняемых с помощью фемтосекундных лазерных частотных гребенок, так как иначе сообщество специалистов, работающих в области частотной метрологии, не восприняло бы наши результаты как достоверные. Измерения с водородом были наконец закончены в 1997 г. [29, 30].

В феврале 1997 г. я посетил Европейскую лабораторию нелинейной спектроскопии (LENS) во Флоренции, Италия. В этом институте Марко Беллини использовал в своей работе

фемтосекундный лазер на титанате сапфира с усилителем, который позволял получать импульсы с энергией 1 мДж с частотой повторения 1 кГц. Как и во многих других лазерных лабораториях, занимающихся исследованием сверхбыстрых процессов, он получал белый свет (излучение континуума) для проведения измерений методом возбуждение–зондирование путем фокусировки части лазерного пучка на тонкую пластину CaF_2 . Я спросил его, что случится, если расщепить лазерный пучок на две части и сфокусировать эти новые пучки в два пространственно разнесенных пятна. Будут ли интерферировать эти два импульса белого света?

В выполненном ранее совместном эксперименте в Лазерном центре Лунда мы исследовали этот вопрос для случая генерации гармоник высокого порядка в газовой струе [61]. Со времен того эксперимента в Лунде у Марко Беллини на полке сохранился интерферометр Майкельсона, который мы смогли быстро поместить в лазерный луч и слегка разъюстировали, так, чтобы два луча выходили из интерферометра в двух немного различных направлениях. Регулируя длину одного плеча интерферометра, мы добивались, чтобы два сфокусированных импульса попадали на пластину CaF_2 строго одновременно. Меня как будто ударило током, когда мы увидели стабильные высококонтрастные интерференционные полосы для всех цветов, и я смог сфотографировать их камерой моего компьютера (рис. 3) [62]. Импульсы белого света оказались синхронизованы по фазе с лазерным полем накачки! Каким бы сложным ни был процесс генерации белого света, он был воспроизводим. Если бы такие импульсы были разделены во времени, а не в пространстве, они бы интерферировали в спектральном представлении, приводя к возникновению очень широкой частотной гребенки.

К 30 марта 1997 г. я написал конфиденциальный проект на шести страницах, предлагавший разработку универсального оптического синтезатора частотной гребенки "*...для генерации широкой гребенки эквидистантных частотных маркеров с известными абсолютными частотами, охватывающей инфракрасный, видимый и ультрафиолетовый спектральные диапазоны. Для достижения этой цели выходное излучение фемтосекундного лазера, работающего в режиме синхронизации мод, фокусируется в оптическое волокно или объемный образец с нелинейностью третьего порядка с получением излучения белого света с частотой повторения импульсов f_r . Скорость сдвига фазы несущей волны лазерного излучения относительно огибающей импульса f_{CE} определяется путем регистрации сигнала биений между излучением белого света и второй гармоникой излучения лазера*". Предполагалось, что разрабатываемая схема самопривязки позволит определить частоту расстройки между несущей и огибающей f_{CE} без вспомогательного лазера. 4 апреля 1997 г. я попросил Томаса Удема и Мартина Вайца из нашей лаборатории засвидетельствовать и

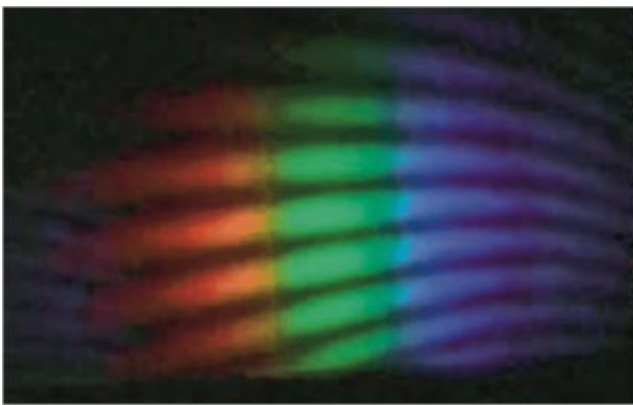


Рис. 3. Интерференционные полосы, образованные двумя импульсами излучения белого света [62].

подписать каждую страницу проекта, так как это могло оказаться важным для последующего патентования.

Вскоре в нашей лаборатории в Гархинге развернулась серьезная экспериментальная деятельность с целью проведения оптических частотных измерений с помощью фемтосекундных лазерных частотных гребенок. Хотя мы еще не знали, как уширить спектр нашего лазерного генератора Miga до спектральной ширины, превышающей оптическую октаву, мы могли воспользоваться предложенным в 1988 г. методом [27] и измерять частоту лазера на красителе в нашем водородном спектрометре с помощью короткой цепочки из двух или трех ступеней деления интервала, используя компактные полупроводниковые лазеры для сокращения частотного зазора до интервала, меньшего ширины нашей лазерной гребенки. Окрыленные такими перспективами, Томас Удем и Йорг Райхерт исследовали спектр частотной гребенки, получаемой с помощью фемтосекундного лазера Miga. К этой работе позже присоединился Рональд Хольцварт. К этому времени сотни подобных лазеров работали в лабораториях всего мира, но использовались они в основном для исследования сверхбыстрых явлений. Насколько нам было известно, никто никогда не изучал спектральные компоненты частотных гребенок, формируемых такими лазерами. При частоте повторения импульсов 76,5 МГц спектр гребенки нашего фемтосекундного лазера оказался таким плотным, что ни один из имевшихся в нашей лаборатории спектрометров не позволял нам разрешить спектральные линии гребенки. Тогда мы прибегли к методу гетеродинного детектирования, используя непрерывный диодный лазер в качестве локального генератора. Излучение диодного лазера совмещалось с последовательностью импульсов с помощью светоделительной пластины, а сигнал биений проходил через спектральный фильтр и регистрировался с помощью лавинного фотодиода. После решения проблем, связанных с механической стабильностью фемтосекундного лазера, нам удалось наблюдать устойчивые спектральные линии частотной гребенки. Вслед за этим мы приступили к исследованию интервала между этими линиями. Мы синхронизовали по фазе два диодных лазера и две произвольным образом выбранные спектральные линии гребенки и воспользовались оптическим делителем частотного интервала для получения новой частотной компоненты, лежащей точно посередине полученного частотного интервала. К нашему удивлению, сигнал биений с ближайшей линией частотной гребенки подтвердил, что спектральные линии частотной гребенки вплоть до далеких крыльев спектра излучения разделены интервалами, равными друг другу с точностью до 10^{-17} [63].

Теперь появилась уверенность в том, что частотная гребенка, формируемая фемтосекундным лазером с синхронизованными модами, не подвержена "коллапсу когерентности" и может служить линейкой в пространстве частот для измерения больших оптических частотных интервалов. Во время первой демонстрации измерения оптических частот с помощью фемтосекундной лазерной гребенки мы определили частотный интервал между резонансной линией D1 цезия и четвертой гармоникой передвижной лазерной установки на основе стабилизированного по метану гелий-неонового лазера с длиной волны 3,39 мкм, калибровка которого проводилась с помощью лазерной частотной цепочки, основанной на генерации гармоник и работающей в институте РТВ в Брауншвейге [64]. Оптическая цезиевая частота была необходима для определения постоянной тонкой структуры α по энергии отдачи атома, измеренной методом атомной интерферометрии группой Стива Чу в Стэнфорде. Эти эксперименты довольно скоро вызвали резонанс в газетах и журналах. Они продемонстрировали сообществу специалистов, работающих в области оптической частотной метрологии, что фемтосекундные лазерные частотные гребенки являются мощным инструментом для измерения частоты света.

Вслед за этим мы обратились к более амбициозной задаче измерения абсолютной оптической частоты нашего лазера на красителе, излучающего на частоте 486 нм, с помощью спектрометра, работающего на переходе $1S-2S$ атома водорода. К этому времени мы сумели уширить частотную гребенку, формируемую нашим лазерным генератором с синхронизованными модами в небольшом сегменте обычного оптического волокна, так что ее спектральная протяженность составила 60–70 ТГц. Вместо того, чтобы создавать несколько новых ступеней деления частотных интервалов, мы нашли более эффективный способ решения задачи нашего первого демонстрационного эксперимента. Нам потребовалась лишь незначительная модификация нашего водородного спектрометра [29] для получения двух дробных субгармоник ($4/7$ и $1/2$) частоты излучения лазера на красителе, интервал между которыми мог быть заполнен нашей фемтосекундной лазерной гребенкой [65, 66]. Стабилизированный по метану гелий-неоновый лазер теперь не использовался в качестве промежуточного стандарта частоты, а служил для деления частотного интервала. В качестве первичного стандарта для наших первых абсолютных измерений частоты служили часы, созданные на основе коммерческого НР источника цезиевого атомного пучка, использовавшиеся нами для определения частоты повторения импульсов f_r и частоты расстройки между несущей и огибающей f_{CE} [65]. Измерение оптического частотного зазора позволяло нам установить абсолютную частоту лазера на красителе, а также абсолютные частоты всех спектральных компонент частотной гребенки. Для управления положением спектральных линий гребенки мы научились изменять частоту f_{CE} нашего лазера MiGa на титанате сапфира путем варьирования наклона глухого зеркала лазерного резонатора. Пара призм, установленная в этой части резонатора, разлагает излучение в спектр. Таким образом, нам впервые удалось получить фемтосекундные лазерные импульсы с управляемым сдвигом фазы между несущей и огибающей.

В октябре 1998 г. мы с гордостью показали наш эксперимент Норману Рамси, приехавшему в Институт Макса Планка в качестве члена Научного консультативного комитета. Нам впервые удалось выполнить прямое сравнение частоты перехода $1S-2S$ атома водорода с частотой цезиевых атомных часов, работающих в нашей лаборатории, без использования громоздких частотных цепочек, основанных на генерации гармоник. Позднее, в том же году, мы продемонстрировали наш эксперимент Джону Холлу, приехавшему в Мюнхен, чтобы принять участие в семинаре, посвященном памяти нашего общего друга Вениамина Чеботаева. Джон очень быстро превратился в убежденного сторонника "этого сумасшедшего метода, делающего ненужным все то, над чем мы так долго работали". Он занялся формированием мощной команды профессионалов в Боулдере, перед которой ставилась задача развития методов измерений, основанных на использовании фемтосекундных лазерных частотных гребенок. Он убедил своего коллегу Стива Кандиффа из лаборатории JILA, одного из ведущих экспертов Лабораторий Белла по фемтосекундным лазерам, посетить нашу лабораторию весной 1999 г. Возросшая конкуренция между лабораториями стимулировала быстрое развитие новой техники измерений в наступившие за тем месяцами и зажгла фейерверк новых прорывов этой методики в последующие годы [3].

До лета 1999 г. у нас сохранялось чувство, что мы единственные игроки на поле фемтосекундных частотных гребенок. Томас Удем сделал доклад о наших экспериментах на конференции в Перте, Австралия, в конце 1998 г. [43]. Мы, однако, задержали наши публикации, включая первое сообщение об "измерении частоты света с помощью лазеров с синхронизованными модами" [67], чтобы эти сообщения появились после регистрации наших первых патентных заявок в марте 1999 г., потому что согласно немецким законам

изобретение не может быть запатентовано, если оно уже опубликовано.

В июне 1999 года мы смогли выполнить прямое сравнение водородной частоты с высокоточными передвижными часами на основе цезиевого фонтана (PHARAO), созданных в лаборатории LPTF (ныне BNM-SYRTE) в Париже [66]. Этот эксперимент позволил определить новое значение частоты перехода $1S-2S$ в атоме водорода с точностью до $1,8 \times 10^{-14}$, что более чем на порядок превосходило все ранее выполненные оптические частотные измерения. Таким образом, к этому времени были в полной мере продемонстрированы все наиболее замечательные преимущества методики, основанной на использовании лазерных частотных гребенок. Вскоре был также предложен ряд методов, позволивших осуществить управление расстройкой фазы между несущей и огибающей [68].

В качестве следующего шага мы планировали существенное упрощение нашей экспериментальной установки. К этому времени появились сообщения о новом оптическом инструменте, который мог позволить нам отказаться от использования оптических делителей частотных интервалов. На конференции по лазерам и электрооптике (CLEO) в Балтиморе, Мэриленд, проходившей в мае 1999 г., исследователи из Лабораторий Белла сообщили о новом микроструктурированном волокне — источнике радуги, которое могло давать уширение спектра импульсов фемтосекундных лазеров на титанате сапфира без всякого усиления, преобразуя лазерное излучение в цветную радугу [40]. После экспериментов по интерференции белого света во Флоренции [62] я был уверен, что это волшебное волокно способно сохранять фазовую когерентность соседних импульсов и формировать спектральные компоненты частотных гребенок с требуемым частотным интервалом.

В июне 1999 г. Джон Холл приехал в Германию, чтобы принять участие в ежегодном семинаре нашей исследовательской группы в замке Рингберг около озера Тегернзее к югу от Мюнхена. Вместе с Джоном мы звонили многим из наших старых друзей в Лабораториях Белла, чтобы попытаться получить образец этого волшебного волокна. Мы надеялись продемонстрировать генерацию частотной гребенки шириной в октаву, пока Джон Холл еще находился в Германии. К сожалению, этому плану не суждено было осуществиться из-за юристов компании Lucent Technologies, которые запретили, чтобы это волокно покидало Лаборатории Белла. Во время своих летних каникул 1999 г. Рональд Хольцварт посетил Лаборатории Белла в Холмделе, Нью-Джерси, но также вынужден был уехать, не получив ни кусочка волокна. Группа Джона Холла в Боулдере вначале столкнулась с аналогичными трудностями, однако в октябре 1999 г. им удалось наконец получить немного дырчатого волокна и продемонстрировать генерацию первых, не требующих внешней синхронизации, лазерных частотных гребенок шириной в оптическую октаву [69, 70]. Нашей группе в Гархинге удалось реализовать аналогичную систему для генерации частотной гребенки несколькими неделями позже [71], после того как мы получили так называемое "фотонно-кристаллическое волокно" от группы Филипа Расселла из Университета Бата в Великобритании. Мы слишком поздно обнаружили, что на самом деле именно этим британским исследователям принадлежит приоритет в изготовлении микроструктурированных кварцевых волокон [39]. В один и тот же день (12 ноября 1999 г.) обе лаборатории отправили первые краткие сообщения о частотных гребенках шириной в октаву на конференцию CLEO/QELS-2000 в Сан-Франциско.

Аналогично экспериментам в Боулдере в наших первых экспериментах по генерации частотных гребенок протяженностью в октаву использовался коммерческий компактный кольцевой лазер на титанате сапфира, формировавший импульсы длительностью около 25 фс с частотой повторения

625 МГц. Пропуская импульсы с мощностью 170 мВт через фотонно-кристаллическое волокно длиной 30 см, мы немедленно получили генерацию частотной гребенки с шириной спектра, превышающей октаву. Спектр выходного излучения имел довольно сложную структуру с провалами и пиками, однако пригодные для измерений спектральные компоненты гребенки имелись во всем спектральном диапазоне. Вся оптическая система, включая нелинейный интерферометр для управления частотой расстройки f_{CE} , легко помещалась на одной оптической платформе. В то время как традиционные частотные цепочки, основанные на генерации гармоник, включают в себя целые залы лазеров и рассчитаны на измерение одной-единственной оптической частоты, наша новая система позволяла измерять любую частоту в видимой и ближней инфракрасной областях спектра.

Со времени описанных экспериментов был достигнут существенный прогресс в развитии фемтосекундных лазеров на основе титаната сапфира. В настоящее время такие системы позволяют генерировать излучение с шириной спектра, превышающей октаву, непосредственно на выходе задающего генератора без необходимости внешнего спектрального уширения [72]. Частотные гребенки с шириной спектра около октавы также могут быть сформированы с помощью эрбиевых волоконных лазеров [73], накачиваемых высоконадежными и стабильными лазерными диодами, разработанными для телекоммуникационных приложений. Подобные волоконные генераторы частотных гребенок включаются одним поворотом ключа и могут работать в течение нескольких месяцев без участия людей.

В качестве первой серьезной проверки созданной системы Рональд Хольцварт произвел сравнение синтезатора частотной гребенки с шириной спектра порядка октавы с более сложным синтезатором частоты, использовавшимся в наших экспериментах 1999 г. по измерению частоты перехода в атоме водорода [71]. На основе использования общего радиочастотного опорного источника, работающего на частоте 10 МГц, ему удалось выполнить сравнение спектральных компонент гребенок около частоты 350 ТГц, что позволило убедиться в совпадении результатов измерений с точностью порядка 10^{-16} . Точность этой проверки ограничивалась доплеровскими сдвигами, вызванными изменениями давления воздуха и тепловыми изменениями размеров оптических столов. В 2002 г. группа из института РТВ в Брауншвейге показала, как можно использовать фемтосекундный лазерный генератор частотной гребенки в качестве передающего генератора для высокоточного измерения отношений оптических частот [74]. В качестве проверки своего подхода они измерили отношение частот второй гармоники и основного излучения Nd:YAG-лазера. Ожидаемое значение, равное двум, было получено с точностью 7×10^{-19} . В более поздних экспериментах Маркус Циммерманн из нашей лаборатории довел точность подобных измерений до 6×10^{-21} [75]. В 2004 г. исследователи из Боулдера произвели сравнение четырех различных источников частотных гребенок, созданных в разных лабораториях, обнаружив совпадение ближайших спектральных компонент гребенок с точностью около 10^{-19} [76]. К настоящему времени не было обнаружено никаких систематических ошибок, которые бы ограничивали принципиально достижимую точность высокоточных спектроскопических экспериментов или оптических атомных часов в будущем.

7. Новые измерения частоты перехода 1S–2S атома водорода в 2003 г.: постоянны ли фундаментальные постоянные?

В феврале 2003 г. мы использовали синтезатор частотных гребенок со спектральной шириной порядка октавы для новых измерений частоты перехода 1S–2S атома водорода

[21]. Марк Фишер и Николай Колачевский во многом усовершенствовали водородный спектрометр. Излучение лазера на красителе пропусклось через оптическое волокно и направлялось в лабораторию частотной метрологии, где с помощью синтезатора частотной гребенки шириной в октаву, основанного на фемтосекундном лазере на титанате сапфира, проводилось сравнение оптической частоты с частотой радиосигнала, вырабатываемого часами на основе атомного фонтана, разработанными в Париже в PHARAO, которые были вновь доставлены в Гархинг для проведения совместных работ.

Благодаря такой мгновенной абсолютной частотной калибровке, спектроскопия водорода имеет исключительно высокий уровень достоверности. Статистическая ошибка результатов измерений, выполненных за один день, оказалась существенно ниже аналогичного показателя в экспериментах 1999 г. Тем не менее флуктуации результатов измерений, фиксируемых день за днем, оставались на том же уровне, что и ранее. Это обстоятельство указывало на наличие неконтролируемых систематических погрешностей. После тщательных экспериментальных исследований, имевших своей целью установление возможных причин систематических сдвигов линий, и детального статистического анализа всей совокупности накопленных данных мы пришли к заключению, что флуктуации связаны с некоторыми остаточными малыми доплеровскими сдвигами первого порядка. Проявления таких сдвигов можно ожидать в случае неточного согласования двух встречных волновых фронтов возбуждающего излучения с длиной волны 243 нм. Рассогласование волновых фронтов может быть вызвано неполным согласованием мод при введении излучения второй гармоники лазера на красителе в резонатор, находящийся внутри системы управления атомным пучком, через входное зеркало с коэффициентом отражения, равным 2%. Другая причина может быть связана с накоплением замороженного молекулярного водорода на стенках холодного медного сопла, служащего для доставки водородного атомного пучка, что может приводить к искажению оптических волновых фронтов в результате экранировки и дифракции. Еще одной причиной систематических сдвигов линии в двухфотонной спектроскопии при использовании удвоенной частоты лазерного излучения могут быть нежелательные корреляции между амплитудным и фазовым шумами, вызываемые неточной автоматической синхронизацией усилительных резонаторов. Для будущих экспериментов мы готовим высокодобротный внешний резонатор для ультрафиолетового излучения и разрабатываем полностью твердотельный лазерный источник с шириной линии, равной нескольким герцам.

Эксперименты 2003 г. позволили нам определить частоту перехода между компонентами сверхтонкой структуры с квантовыми числами $F = 1$ и $F' = 1$ перехода 1S–2S атома водорода, которая оказалась равной 2466061102474851 ± 34 Гц с относительной погрешностью $1,4 \times 10^{-14}$. Результаты этих новых измерений согласуются в пределах погрешности эксперимента с результатами экспериментов 1999 г., согласно которым частота того же перехода была определена как 2466061102474880 ± 46 Гц. Различие между результатами измерений составляет 29 ± 57 Гц за 44 месяца и соответствует относительному дрейфу частоты перехода 1S–2S атома водорода, равному $(3,2 \pm 6,3) \times 10^{-15}$ в год, т.е. величина частотного дрейфа сопоставима с дрейфом нуля.

Описанный выше эксперимент вызвал интерес в связи с возможностью проверки гипотезы о медленном изменении электромагнитной постоянной тонкой структуры α . Во время эксперимента 2003 г. нам неоднократно звонил теоретик Харальд Фришц, которого интересовали предварительные результаты наших измерений в связи с предсказанным им наблюдаемым дрейфом радиочастоты цезиевых часов относительно частоты перехода атома водорода [77]. Отправной

точкой его доводов служат результаты астрономических наблюдений спектральных линий, видимых в излучении далеких квазаров, выполненные в обсерватории Кека [78]. Дифференциальные низкочастотные сдвиги, по-видимому, могут свидетельствовать о том, что на раннем этапе существования Вселенной электромагнитная постоянная тонкой структуры α могла быть несколько меньше своего современного значения. При простейшем предположении о линейном сдвиге измерения должны фиксировать сдвиг, равный $(6,4 \pm 1,35) \times 10^{-16}$ в год, который слишком мал, чтобы его можно было наблюдать в наших лабораторных экспериментах. Основываясь на идеях теории Великого объединения и квантовой хромодинамики, Фришш, однако, утверждал, что постоянная α не может изменяться отдельно от других постоянных. Если при высоких значениях энергии все известные нам силы должны быть объединены, то и другие константы взаимодействия также должны изменяться. Как следствие, массы и магнитные моменты адронов (измеряемые в единицах магнетона Бора) должны изменяться относительно массы и магнитного момента электрона. Фришш указал на возможный эффект, который может в 20 раз ускорить изменение частоты перехода между состояниями сверхтонкой структуры цезиевых атомных часов по сравнению с оптической частотой атома водорода. К настоящему времени мы не нашли никаких доказательств такого дрейфа. Имеются также другие, более поздние измерения спектров квазаров, которые не подтверждают гипотезу об изменении постоянной тонкой структуры [79].

Независимо от приведенных выше рассуждений необходимо признать, что эксперименты по спектроскопии водорода, выполненные в 1999 и 2003 годах, не могут полностью исключить изменения постоянной тонкой структуры α . Можно полагать, что магнитный момент ядра цезия изменяется с точно такой скоростью, чтобы привести к нулевому результату в наших экспериментах. По счастью, измерения необязательно проводить с водородом. Можно измерить частоты переходов в более тяжелых атомах, в которых релятивистские эффекты более ярко выражены и которые характеризуются различным откликом на изменения постоянной α . Одним из возможных кандидатов является рассматриваемый в контексте атомных часов переход в одиночных холодных ионах Hg^+ . В 2000 и 2002 годах Джим Бергквист и его группа в Боулдере выполнили сравнение этого перехода с цезиевыми атомными часами, также используя в своих экспериментах лазерные частотные гребенки [80]. Экхард Пайк и его группа в институте РТВ выполнили два независимых измерения на переходе одиночного иона Yb^+ [81]. Взятые вместе, эти два лабораторных эксперимента дают некоторую информацию о порядке величины верхних пределов скоростей возможного изменения постоянной тонкой структуры α и ядерного магнитного момента цезия μ_{Cs} : соответственно $(-0,3 \pm 2,0) \times 10^{-15}$ и $(2,4 \pm 6,8) \times 10^{-15}$ в год.

В ближайшие несколько лет следует ожидать выполнения гораздо более строгих лабораторных экспериментов, которые позволят более точно определить пределы возможных изменений физических постоянных. Если бы такие изменения удалось обнаружить, то это открытие не имело бы никаких последствий для нашей повседневной жизни, однако дало бы основания для интересных заключений относительно природы нашей Вселенной.

8. Оптические атомные часы

Определение точных пределов изменений фундаментальных постоянных будет основано на сравнении различных типов оптических атомных часов, которые в настоящее время создаются высокопрофессиональными группами во многих индустриально развитых странах. Совершенствование оптических стандартов частоты в последние годы происходило гораздо более высокими темпами, чем совершенствование

радиочастотных цезиевых часов [82]. С появлением фемтосекундных лазерных гребенок, доступных сейчас в качестве совершенного часового механизма, следует сосредоточить усилия на более точной, чем когда бы то ни было стабилизации частоты, а также на решении проблем высокоточной спектроскопии узких оптических резонансов, связанных с систематическими сдвигами линий, служащих в качестве "маятника" оптических часов. Уже достигнут значительный прогресс в экспериментах с холодными ионами в ловушках, включая такие системы как Hg^+ , Yb^+ , In^+ , Sr^+ . Холодные нейтральные атомы, такие как H , Ca или Sr также являются привлекательными кандидатами благодаря возможности одновременного наблюдения за многими атомами без возмущения, вносимого кулоновским отталкиванием. При этом имеется возможность улучшения отношения сигнала к шуму и скорости установления резонансной частоты. Особенно перспективный подход предложен Хидетоши Катори [83]. Он использовал часы на основе нейтральных атомов, в которых большое количество холодных нейтральных атомов Sr из-за дипольных сил захвачено в потенциальных ямах оптической решетки. Световые сдвиги сведены к минимуму выбором "магической" длины волны поля решетки. В 2005 г. точность лучших оптических стандартов частоты достигла уровня точности лучших часов на основе цезиевого фонтана. Но даже если оптические стандарты частоты и не являются самыми точными, они уже имеют одно важное преимущество. Для того чтобы выполнить сравнение двух цезиевых часов с точностью на уровне 10^{-15} , требуется несколько часов или дней. Сравнение двух оптических частот с таким же уровнем точности занимает всего несколько секунд.

Интересно взглянуть на историческую эволюцию точности часов. Часы на средневековых церквях ходили с точностью примерно до 20 мин в день. В XVIII веке навигационные часы Н4, сделанные легендарным часовым мастером Джоном Харрисоном, достигали точности около 100 мс в день. В наши дни лучшие часы на основе цезиевого фонтана имеют точность около 100 пс в день. Некоторые ученые надеются, что уже в следующем десятилетии оптические атомные часы будут в сотни или даже тысячи раз более точными.

Более точные атомные часы будут востребованы для множества научных и технических приложений, так что усилия в этом направлении не пропадут даром, даже если не будет обнаружено никаких изменений фундаментальных постоянных. Измерительные приборы на основе таких часов позволят расширить рубежи высокоточной спектроскопии, а также временной и частотной метрологии. Такие приборы позволят с высокой точностью синхронизовать часы, находящиеся на большом расстоянии друг от друга. В астрономических исследованиях синхронизованные подобным образом часы помогут расширить границы применимости интерферометров с большой базой, позволив использовать такие интерферометры в инфракрасном и видимом спектральных диапазонах. Более точные часы улучшат работу спутниковых навигационных систем и систем слежения за далекими космическими объектами. Высокоточные часы необходимы для синхронизации оптических телекоммуникационных сетей. В области фундаментальной физики высокоточные часы позволят выполнить более точные проверки законов специальной и общей теории относительности, а также других фундаментальных законов.

9. Перспективы создания частотных гребенок в далеком ультрафиолетовом диапазоне

До сих пор мы не обнаружили каких-либо фундаментальных ограничений на потенциально достижимую точность часов будущего. Представляется также возможным расширить пределы применимости методов, основанных на использовании частотных гребенок, в область далекого ультрафиоле-

тового и мягкого рентгеновского спектральных диапазонов, что позволит делить время на еще более мелкие интервалы. Получение когерентных последовательностей импульсов в этих областях может быть основано на явлении генерации оптических гармоник высокого порядка в поле интенсивных фемтосекундных импульсов, фокусируемых в газовую струю.

Со времени пионерских экспериментов Чарли Родса [84] и Анн Л'Ульье [85] в конце 1980-х годов явление генерации гармоник высокого порядка исследовалось во многих лабораториях. Согласно простой модели, впервые предложенной Полом Коркумом [86], в процессе ионизации атомов газа лазерным излучением электроны ускоряются сильным лазерным полем до тех пор, пока поле не изменяет свое направление. В зависимости от времени вылета из атома, такие электроны могут возвратиться к ионному остову со значительным запасом кинетической энергии, которая может излучаться в виде фотонов высоких энергий, при этом за каждые полцикла лазерного поля накачки возникает одна вспышка такого излучения.

Я много размышлял о взаимной фазовой когерентности коротких импульсов во время своего знакомства с экспериментами по генерации гармоник высокого порядка, проводимыми Анн Л'Ульье и Класом Йораном Вальстремом в Лазерном центре Лунда в 1995 г. Я задавался вопросом: сохраняют ли два последовательных импульса гармоник взаимную фазовую когерентность? Для ответа на этот вопрос я предложил разбить лазерный пучок на две части, сфокусировать эти два пучка в различные области газовой струи и посмотреть, возникнут ли интерференционные полосы излучения высоких гармоник аналогично тому, как это имело место в экспериментах с белым светом во Флоренции [62]. Поначалу казалось, все говорит о том, что такая интерференция не должна наблюдаться, поскольку фаза излучения высоких гармоник должна сильно зависеть от изменяющейся интенсивности лазерного импульса накачки. Однако после того, как я уехал из Лунда, аспирант Рауль Церн предпринял попытку такого эксперимента и обнаружил быстро исчезающие интерференционные полосы. Возвзонованные этим открытием, мы запланировали серьезные совместные эксперименты в Лунде. Марко Беллини из лабораторий LENS согласился участвовать в этой работе и создать стабильный интерферометр Майкельсона, который позволял бы осуществлять точную регулировку временной задержки между двумя лазерными импульсами. Вскоре мы наблюдали хорошо разрешаемые высококонтрастные интерференционные полосы для гармоник вплоть до 15-го порядка и выше [61]. В последующих экспериментах мы даже обнаружили режим, в котором излучение гармоник было окружено расходящимся ореолом с очень малой длиной когерентности. Такое поведение можно объяснить проявлением двух различных типов электронных траекторий, дающих вклад в излучение гармоники с данной энергией фотона [87].

Результаты описанных выше экспериментов показывают, что импульсы излучения гармоник высокого порядка могут иметь взаимную фазовую когерентность, так что периодическая последовательность таких импульсов может привести к формированию частотной гребенки в далеком ультрафиолетовом диапазоне. Однако необходимые для этого пиковые интенсивности порядка 10^{14} Вт см⁻² могут быть достигнуты только с помощью лазерных систем с усилением, работающих на низких частотах повторения. Только в самое последнее время Кристоф Голе и Томас Удем смогли выполнить эксперименты в нашей лаборатории в Гархинге, в которых импульсы излучения гармоник высокого порядка с длиной волны вплоть до 60 нм получались на частоте повторения, равной 112 МГц [88]. Для этой цели ими был создан внешний резонатор с компенсацией дисперсии для импульсов, генерируемых титан-сапфировым лазером в режиме синхронизации мод, и поместили ксенонную газовую струю в фокус этого резонатора. Излучение гармоник высокого порядка выво-

дится из резонатора посредством внешнего отражения от тонкой сапфировой пластины, установленной под углом Брюстера и имеющей показатель преломления в области далекого ультрафиолетового диапазона меньше единицы. Аналогичные эксперименты были выполнены группой Джуна Йи из Боулдера [89].

В будущем в наши планы входит выполнение новых амбициозных исследований, в которых частотные гребенки, получаемые в рентгеновском и ультрафиолетовом диапазонах, будут непосредственно использоваться для высокоточной спектроскопии узких резонансов лазерно-охлажденных ионов в ловушках. Одним из особенно интересных объектов такого исследования представляется водородоподобный ион гелия, имеющий 1S–2S переход в районе длины волны 60 нм. Согласно одному из рассматриваемых нами сценариев, ионы гелия должны претерпевать охлаждение в результате взаимодействия с лазерно-охлажденными ионами магния, находящимися в той же ловушке, при этом сигнал можно будет зарегистрировать посредством наработки двукратно заряженных ионов гелия вследствие фотоионизации.

10. Выводы

Спектроскопия простого атома водорода зажгла искру взаимного оплодотворения двух казалось бы несвязанных областей науки, таких, как высокоточная оптическая спектроскопия и изучение быстропотекающих процессов. Фемтосекундные частотные гребенки приводят к революционным изменениям в области высокоточных измерений времени и частоты. Оптические атомные часы будущего найдут важные приложения во многих областях науки и технологий. Сверхточная оптическая спектроскопия может быть использована для новых проверок фундаментальных физических законов. Однако можно представить себе и много других спектроскопических приложений лазерных частотных гребенок, таких, как, например, мультиплексно-параллельная сверхчувствительная спектроскопия внутррезонаторного поглощения [90] или широкополосная спектральная интерферометрия. В то же время методы, основанные на использовании частотных гребенок, представляются мощным средством для исследования быстропотекающих процессов в физике. Благодаря управлению фазой электрического поля интенсивных световых импульсов длительностью лишь несколько периодов поля частотные гребенки позволяют исследовать сверхбыстрые электронные процессы взаимодействия излучения с веществом, включая генерацию одиночных субфемтосекундных импульсов мягкого рентгеновского излучения в процессе генерации гармоник высокого порядка [42]. Какие новые открытия готовит нам эта тонкая новая техника, покажет только будущее.

Благодарности. Более 90 студентов, научных сотрудников, стажеров, а также моих старших коллег внесли весомый вклад в продолжающуюся более четырех десятилетий работу по высокоточной лазерной спектроскопии. Я особенно признателен Томасу Удему и Рональду Хольцварту, сыгравшим ключевую роль в воплощении в реальность идеи синтезатора частотных гребенок. Я также благодарен Джону Л. Холлу, который в течение длительного времени делился со мной своими бесценными соображениями относительно того, как сделать лазеры невероятно стабильными.

Перевел с английского *А.М. Желтиков*

Список литературы

1. Audoin C, Guinot B *The Measurement of Time: Time, Frequency, and the Atomic Clock* (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2001)
2. Udem Th, Holzwarth R, Hänsch T W *Nature* **416** 233 (2002)

3. Ye J, Cundiff S T (Eds) *Femtosecond Optical Frequency Comb: Principle, Operation and Application* (New York: Springer, 2005)
4. Hannaford P (Ed.) *Femtosecond Laser Spectroscopy* (New York: Springer, 2005)
5. Szöke A, Javan A *Phys. Rev. Lett.* **10** 521 (1963)
6. Lamb W E (Jr.) *Phys. Rev.* **134** A1429 (1964)
7. Bennett W R (Jr.) *Phys. Rev.* **126** 580 (1962)
8. Letokhov V S, Chebotayev V P *Nonlinear Laser Spectroscopy* (Springer Series in Optical Sciences, Vol. 4) (New York: Springer-Verlag, 1977)
9. Hänsch T, Keil R, Schabert A, Schmelzer Ch, Toschek P Z. *Phys.* **226** 293 (1969)
10. Hänsch Th, Toschek P Z. *Phys.* **236** 213 (1970)
11. Smith P W, Hänsch T W *Phys. Rev. Lett.* **26** 740 (1971)
12. Hänsch T W, Levenson M D, Schawlow A L *Phys. Rev. Lett.* **26** 946 (1971)
13. Hänsch T W *Appl. Opt.* **11** 895 (1972)
14. Hänsch T W, Shahin I S, Schawlow A L *Phys. Rev. Lett.* **27** 707 (1971)
15. Sorokin P P, Lankard J R *IBM J. Res. Dev.* **10** 162 (1966)
16. Schäfer F P, Schmidt W, Volze J *Appl. Phys. Lett.* **9** 306 (1966)
17. Series G W *The Spectrum of Atomic Hydrogen* (London: Oxford Univ. Press, 1957)
18. Hänsch T W, Shahin I S, Schawlow A L *Nature* **235** 63 (1972)
19. Hänsch T W, Schawlow A L *Opt. Commun.* **13** 68 (1975)
20. Karshenboim S G, Pavone F S, Bassani G F, Inguscio M, Hänsch T W (Eds) *The Hydrogen Atom: Precision Physics of Simple Atomic Systems* (Lecture Notes in Physics, Vol. 570) (New York: Springer, 2001)
21. Fischer M, Kolachevsky N, Zimmermann M, Holzwarth R, Udem Th, Hänsch T W, Abgrall M, Grünert J, Maksimovic I, Bize S, Marion H, Pereira Dos Santos F, Lemonde P, Santarelli G, Laurent P, Clairon A, Salomon C, Haas M, Jentschura U D, Keitel C H *Phys. Rev. Lett.* **92** 230802 (2004)
22. Baklanov E V, Chebotayev V P *Opt. Commun.* **12** 312 (1974)
23. Hänsch T W, Lee S A, Wallenstein R, Wieman C *Phys. Rev. Lett.* **34** 307 (1975)
24. Javan A, Ballik E A, Bond W L *J. Opt. Soc. Am.* **52** 96 (1962)
25. Evenson K M, Wells J S, Petersen F R, Danielson B L, Day G W, Barger R L, Hall J L *Phys. Rev. Lett.* **29** 1346 (1972)
26. Schnatz H, Lipphardt B, Helmcke J, Riehle F, Zinner G *Phys. Rev. Lett.* **76** 18 (1996)
27. Hänsch T W, in *The Hydrogen Atom: Proc. of the Symp., held in Pisa, Italy, June 30 – July 2, 1988* (Eds G F Bassani, M Inguscio, T W Hänsch) (New York: Springer-Verlag, 1989) p. 93
28. Telle H R, Meschede D, Hänsch T W *Opt. Lett.* **15** 532 (1990)
29. Udem Th, Huber A, Gross B, Reichert J, Prevedelli M, Weitz M, Hänsch T W *Phys. Rev. Lett.* **79** 2646 (1997)
30. Huber A, Udem Th, Gross B, Reichert J, Kourogi M, Pachucki K, Weitz M, Hänsch T W *Phys. Rev. Lett.* **80** 468 (1998)
31. Kourogi M, Nakagawa K, Ohtsu M *IEEE J. Quantum Electron.* **QE-29** 2693 (1993)
32. Udem Th, Reichert J, Hänsch T W, Kourogi M *Opt. Lett.* **23** 1387 (1998)
33. Bay Z, Luther G G, White J A *Phys. Rev. Lett.* **29** 189 (1972)
34. DeVoe R G, Fabre C, Jungmann K, Hoffnagle J, Brewer R G *Phys. Rev. A* **37** 1802 (1988)
35. Lee D, Wong N C *Opt. Lett.* **17** 13 (1992)
36. Wineland D J *J. Appl. Phys.* **50** 2528 (1979)
37. Siegmann A E *Lasers* (Mill Valley, Calif.: Univ. Sci. Books, 1986)
38. Eckstein J N, Ph.D. Thesis (Stanford, Calif.: Stanford Univ., 1978)
39. Birks T A, Roberts P J, Russell P St J, Atkin D M, Shepherd T J *Electron. Lett.* **31** 1941 (1995)
40. Ranka J K, Windeler R S, Stentz A J *Opt. Lett.* **25** 25 (2000)
41. McFerran J J, Ivanov E N, Bartels A, Wilpers G, Oates C W, Diddams S A, Hollberg L *Electron. Lett.* **41** 650 (2005)
42. Baltuška A, Udem Th, Uiberacker M, Hentschel M, Goulielmakis E, Gohle Ch, Holzwarth R, Yakovlev V S, Scrinzi A, Hänsch T W, Krausz F *Nature* **421** 611 (2003)
43. Luiten A N (Ed.) *Frequency Measurement and Control: Advanced Techniques and Future Trends* (Topics in Applied Physics, Vol. 79) (New York: Springer, 2001)
44. Hargrove L E, Fork R L, Pollack M A *Appl. Phys. Lett.* **5** 4 (1964)
45. Yariv A *J. Appl. Phys.* **36** 388 (1965)
46. McDuff O, Harris S *IEEE J. Quantum Electron.* **QE-3** 101 (1967)
47. Shank C V, Ippen E P, in *Dye Lasers* 3rd ed. (Topics in Applied Physics, Vol. 1, Ed. F P Schäfer) (New York: Springer-Verlag, 1990) p. 139
48. Teets R, Eckstein J, Hänsch T W *Phys. Rev. Lett.* **38** 760 (1977)
49. Salour M M, Cohen-Tannoudji C *Phys. Rev. Lett.* **38** 757 (1977)
50. Бакланов Е В, Чеботаев В П *Квантовая электроника*. **4** 2189 (1977) [Baklanov E V, Chebotayev V P *Sov. J. Quantum Electron.* **7** 1252 (1977)]
51. Eckstein J N, Ferguson A I, Hänsch T W *Phys. Rev. Lett.* **40** 847 (1978)
52. Ferguson A I, Eckstein J N, Hänsch T W *J. Appl. Phys.* **49** 5389 (1978)
53. Ferguson A I, Eckstein J N, Hänsch T W *Appl. Phys.* **18** 257 (1979)
54. Hänsch T W, Wong N C *Metrologia* **16** 101 (1980)
55. Hänsch T W *Opt. Commun.* **80** 71 (1990)
56. Spence D E, Kean P N, Sibbett W *Opt. Lett.* **16** 42 (1991)
57. Nakajima T, Lambropoulos P *Phys. Rev. A* **50** 595 (1994)
58. Paulus G G, Lindner F, Walther H, Baltuška A, Goulielmakis E, Lezius M, Krausz F *Phys. Rev. Lett.* **91** 253004 (2003)
59. Xu L, Spielmann C, Poppe A, Brabec T, Krausz F, Hänsch T W *Opt. Lett.* **21** 2008 (1996)
60. Fork R L, Shank C V, Hirlimann C, Yen R, Tomlinson W J *Opt. Lett.* **8** 1 (1983)
61. Zerne R, Altucci C, Bellini M, Gaarde M B, Hänsch T W, L'Huillier A, Lynga C, Wahlström C-G, *Phys. Rev. Lett.* **79** 1006 (1997)
62. Bellini M, Hänsch T W *Opt. Lett.* **25** 1049 (2000)
63. Udem Th, Reichert J, Holzwarth R, Hänsch T W *Opt. Lett.* **24** 881 (1999)
64. Udem Th, Reichert J, Holzwarth R, Hänsch T W *Phys. Rev. Lett.* **82** 3568 (1999)
65. Reichert J, Niering M, Holzwarth R, Weitz M, Udem Th, Hänsch T W *Phys. Rev. Lett.* **84** 2322 (2000)
66. Niering M, Holzwarth R, Reichert J, Pokasov P, Udem Th, Weitz M, Hänsch T W, Lemonde P, Santarelli G, Abgrall M, Laurent P, Salomon C, Clairon A *Phys. Rev. Lett.* **84** 5496 (2000)
67. Reichert J, Holzwarth R, Udem Th, Hänsch T W *Opt. Commun.* **172** 59 (1999)
68. Telle H R, Steinmeyer G, Dunlop A E, Stenger J, Sutter D H, Keller U *Appl. Phys. B* **69** 327 (1999)
69. Diddams S A, Jones D J, Ye J, Cundiff S T, Hall J L, Ranka J K, Windeler R S, Holzwarth R, Udem Th, Hänsch T W *Phys. Rev. Lett.* **84** 5102 (2000)
70. Jones D J, Diddams S A, Ranka J K, Stentz A, Windeler R S, Hall J L, Cundiff S T *Science* **288** 635 (2000)
71. Holzwarth R, Udem Th, Hänsch T W, Knight J C, Wadsworth W J, Russell P St J *Phys. Rev. Lett.* **85** 2264 (2000)
72. Matos L, Kleppner D, Kuzucu O, Schibli T R, Kim J, Ippen E P, Kaertner F X *Opt. Lett.* **29** 1683 (2004)
73. Washburn B R, Diddams S A, Newbury N R, Nicholson J W, Yan M F, Jorgensen C G *Opt. Lett.* **29** 250 (2004)
74. Stenger J, Schnatz H, Tamm C, Telle H R *Phys. Rev. Lett.* **88** 073601 (2002)
75. Zimmermann M, Gohle Ch, Holzwarth R, Udem Th, Hänsch T W *Opt. Lett.* **29** 310 (2004)
76. Ma L-S, Bi Z, Bartels A, Robertsson L, Zucco M, Windeler R S, Wilpers G, Oates C, Hollberg L, Diddams S A *Science* **303** 1843 (2004)
77. Calmet X, Fritzsche H *Phys. Lett. B* **540** 173 (2002)
78. Murphy M T, Webb J K, Flambaum V V *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **345** 609 (2003)
79. Sriand S R, Chand H, Petitjean P, Aracil B *Phys. Rev. Lett.* **92** 121302 (2004)
80. Bize S, Diddams S A, Tanaka U, Tanner C E, Oskay W H, Drullinger R E, Parker T E, Heavner T P, Jefferts S R, Hollberg L, Itano W M, Bergquist J C *Phys. Rev. Lett.* **90** 150802 (2003)
81. Peik E, Lipphardt B, Schnatz H, Schneider T, Tamm C, Karshenboim S G *Phys. Rev. Lett.* **93** 170801 (2004)
82. Hollberg L, Oates C W, Wilpers G, Hoyt C W, Barber Z W, Diddams S A, Oskay W H, Bergquist J C *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **38** S469 (2005)
83. Takamoto M, Hong F-L, Higashi R, Katori H *Nature* **435** 321 (2005)
84. McPherson A, Gibson G, Jara H, Johann U, Luk T S, McIntyre I A, Boyer K, Rhodes C K *J. Opt. Soc. Am. B* **4** 595 (1987)
85. Ferray M, L'Huillier A, Li X F, Lompre L A, Mainfray G, Manus C *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **21** L31 (1988)
86. Corkum P B *Phys. Rev. Lett.* **71** 1994 (1993)
87. Bellini M, Lynga C, Tozzi A, Gaarde M B, Hänsch T W, L'Huillier A, Wahlström C-G *Phys. Rev. Lett.* **81** 297 (1998)
88. Gohle Ch, Udem Th, Herrmann M, Rauschenberger J, Holzwarth R, Schüssler H A, Krausz F, Hänsch T W *Nature* **436** 234 (2005)
89. Jones R J, Moll K D, Thorpe M J, Ye J *Phys. Rev. Lett.* **94** 193201 (2005)
90. Ye J, private communication