

НОБЕЛЕВСКИЕ ЛЕКЦИИ ПО ФИЗИКЕ — 2005

Определение и измерение оптических частот: перспективы оптических часов — и не только

Дж.Л. Холл

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

Четыре давно разрабатываемые направления лазерной технологии встретились и слились в 1999–2000 гг. Два из них — это, с одной стороны, реализация повторяющихся последовательностей все более коротких импульсов, а с другой стороны, поиск путей генерации как можно более стабильных во времени неизменных частот. Устроить брак между сверхбыстрыми и сверхстабильными лазерами пытались в основном две международные группы. Эта работа стала особенно захватывающей, когда обнаружилось, что оптические волокна со специально созданной микроструктурой настолько нелинейны, что могут преобразовывать фемтосекундные лазерные импульсы в белый свет, охватывающий целую оптическую октаву. При этом впервые оказалось возможным генерировать частотную гребенку, заполняющую интервал частот, равный низшей частоте гребенки, и выразить этот интервал как целое кратное от частоты повторения импульсов фемтосекундного лазера. Эта "коробка передач" — связь между стандартом частоты радиодиапазона и любым/всеми оптическими стандартами частоты создавалась вместе со становлением методов повышения чувствительности. Объединение этих четырех направлений привело к взрывному росту точности измерений частоты в области стандартов и открыло путь к более совершенной проверке заботливо хранимых физических принципов, таких как стабильность во времени фундаментальных физических констант (например, постоянной тонкой структуры, скорости света, отношений некоторых атомных масс и т.д.) и эквивалентность хода часов, работающих на разных физических принципах. Технология стабильных лазеров позволяет также настолько точно синхронизовать два независимых фемтосекундных лазера, что их излучение воспринимается как излучение одного лазера. При совершенствовании экспериментов по накачке/зондированию важным применением станет и детальное, селективное по связям исследование пространственной структуры биологических объектов. Следующее десятилетие в оптике будет бурным!

PACS numbers: 01.30.Bb, 06.20.-f, 42.50.-p

Содержание

1. Итоги и беглый обзор (1353).
 2. Метрологические стандарты и наука (1354).
 - 2.1. Тесная двусторонняя связь.
 - 2.2. Стандарт длины и его связь с частотой/временем.
 - 2.3. Фундаментальные физические проблемы и новое определение длины.
 3. Часы и время (1355).
 - 3.1. Шкала достижимой точности при измерении времени.
 - 3.2. Как устроены часы?
 - 3.3. Электронные часы, основанные на квантовых переходах.
 4. Рождение мечты об оптических часах (1358).
 - 4.1. Появление лазеров.
 - 4.2. Связь с глауберовскими когерентными состояниями света.
 - 4.3. Когерентность лазерного поля делает доступной диагностику частоты.
 - 4.4. Когерентность лазерных биений позволяет управлять лазером с помощью частотных измерений.
 - 4.5. Сравнительно высокая мощность лазеров сделала возможными нелинейную спектроскопию и узкие резонансы.
 - 4.6. На свободно летящие молекулы действует лазерный импульс — два взгляда на соотношение неопределенности.
 - 4.7. Перенос импульса от света молекулам — расщепление из-за эффекта отдачи.
 - 4.8. Другие опорные оптические частоты, основанные на нелинейной спектроскопии.
 5. Измерение частоты с помощью оптической гребенки (1362).
 6. Взаимодополняемость, кооперация и конкуренция (1363).
 - 6.1. Основы.
 - 6.2. Краткая история оптического чуда 1999–2000 гг.
 - 6.3. Гонка началась.
 - 6.4. Некоторые результаты измерений частоты.
 - 6.5. Оптический стандарт частоты на молекулах йода.
 7. Что же будет дальше? (1365).
 8. Приложение. Полная история гребенки в простом изложении (1365).
- Список литературы (1366).

1. Итоги и беглый обзор

Если оглянуться назад, то путь к важным свершениям часто кажется определенным и неизбежным, хотя в те времена он вовсе не представлялся очевидным. Одна из современных тенденций в науке состоит в направлении усилий на определенный исследовательский проект, настолько простой и

Дж.Л. Холл (J.L. Hall). JILA, NIST, and University of Colorado, Boulder, CO 80309-0440, USA

ясный, что руководитель может надеяться на успех в решении выбранной задачи. Однако такой проект, скорее всего, будет иметь скромные результаты, поскольку наверняка они были ясны с самого начала. Возможность нашей оптической частотной гребенки, напротив, стала совершенно непредвиденным результатом синтеза независимых современных направлений в четырех различных областях: сверхстабильных лазеров, лазеров ультракоротких импульсов, материалов с гигантской нелинейностью и эффективностью и сверхчувствительных методов лазерной спектроскопии. Схожесть этих различных направлений заключается в общем, хотя и независимом, стремлении к развитию простых и эффективных технологий для использования электромагнитных сигналов для своих собственных спектроскопических и других оптических интересов в области видимого диапазона. После *великого синтеза лазерных технологий 1999–2000 гг.*, ставшего знаменитым под кратким названием оптическая частотная гребенка, возможности оптических методов резко возросли. В знак уважения к нашему покровителю, д-ру Нобелю, можно высказаться определенное и ярче и *уподобить произошедший расцвет оптики взрыву*.

В результате возникли новые невероятные возможности и средства, которые в свою очередь поддерживают прогресс в областях, их породивших. Например, после лихорадочных измерений частоты с помощью частотной гребенки первого поколения возможные применения гребенки второго поколения включают малошумящую синхронизацию лазерных генераторов ультракоротких импульсов; когерентное сшивание спектров независимых фемтосекундных лазеров для расширения спектра и уменьшения длительности составного импульса; синтез сигналов определенной формы для экспериментов по когерентному контролю; прецизионное измерение оптических нелинейностей с использованием фазовой чувствительности радиочастотных методов; когерентное накопление нескольких сотен последовательных импульсов с последующим извлечением их полной энергии в серии более мощных импульсов с меньшей частотой повторения и т.д. Захватывающие темы третьего поколения приложений оптических гребенок включают прецизионную дистанционную синхронизацию полей в резонаторах ускорителей, стабильные опорные генераторы для больших решеточных телескопов радиочастотного диапазона, потенциальное уменьшение относительного фазового шума опорных генераторов телескопов, зондирующих глубокий космос (NASA, VLBI и т.д.). И это только часть планов на первые пять лет.

Что же все-таки изменилось теперь в прецизионной метрологии? Подобно тому, как целых полстолетия мы пользовались мощными спектроскопическими методами с использованием радиочастотных сигналов (одно из достойных применений — ядерная магнитная томография!), теперь мы можем применять методы управления частотой в оптическом диапазоне. При этом есть действительно важное отличие: в оптическом диапазоне число колебаний в секунду приблизительно в 10 миллионов раз больше, чем в радиодиапазоне, хотя и на радиочастотах процессы происходят в несколько миллионов раз быстрее тех, которые успевает воспринять человек. По существу, эти большие числа характеризуют соответствующее увеличение разрешения и наших измерительных возможностей (более подробное обсуждение будет приведено ниже). В нашем восприятии мы способны различать половины, четверти, десятые доли и, возможно, даже чуть точнее. Произведение двух упомянутых больших чисел характеризует усиление наших возможностей и переносит нас в метрологический рай, где относительная погрешность измерений составляет порядка 10^{-11} . При усреднении независимых измерений можно достичь и большего.

2. Метрологические стандарты и наука

2.1. Тесная двусторонняя связь

Постепенное накопление успешных шагов в научном исследовании приводит иногда к выдающимся изменениям в осознании нашего опыта: возникает новое понимание или систематика. Но такому открытию предшествует обычно кропотливая работа, количественное представление результатов эксперимента, которое, как правило, выражается в абсолютных единицах. Иногда эксперимент сам обеспечивает себе внутреннюю калибровку, но чаще мы нуждаемся в удобных эталонах, с которыми можно соотнести результаты измерений. Конечно, прежде чем научный результат может быть воспроизведен в различных научных лабораториях, сами эти эталоны должны быть reproducedированы и распределены между ними. В лучшем случае требуемый эталон должен быть основан на каком-нибудь физическом явлении, в идеале — квантовом, чтобы его можно было независимо воспроизвести с одинаковой точностью в разных лабораториях. Этот процесс создания эталонов сам по себе революционен [1]!

2.2. Стандарт длины и его связь с частотой/временем

Обсудим сначала метрологические стандарты, среди которых семь основных мы принимаем за основные величины *Международной системы единиц* (Système International d'Unités), сокращенно СИ или "метрическая система" [2]. Из этих семи основных единиц выводится около тридцати употребительных производных единиц. Ясно, что для достижения самой предельной точности измерений больше всего подходит *время* и *длина*. С незапамятных времен сутки служили естественной единицей Времени, тогда как стандарты длины были искусственными и произвольными. Впервые метрическая система обсуждалась в 1791 г., но из-за отсутствия серьезного метрологического опыта члены Французской академии наук эпохи Просвещения решили, что метром должна служить некая малая часть ($1/4 \times 10^{-7}$) длины окружности большого земного круга, проходящего через полюсы и Францию. Конечно, для практической работы в лаборатории не совсем удобно иметь единицу длины, основанную на геодезии, но, по крайней мере, она была, наконец, определена и соответствовала некоторой вполне определенной длине. Это было долгожданное событие, поскольку, как можно увидеть в музеях в Брауншвайге в Германии и на острове Санторин в Греции, стандарт длины мог прихотливо меняться в соответствии с длиной руки очередного приходившего к власти герцога. Однако после Договора Метрической комиссии 1875 г. стали склоняться к идее стабильного металлического стержня. Он не вполне удовлетворял требованиям универсальности и возможности независимой реализации. Однако завод мог изготовить много таких прототипов Метра и подтвердить их эквивалентность. В 1889 г. сообщество Метрических стран приняло улучшенные стержни с поперечным X-образным сечением в качестве эталона длины известного как "международный прототип метра". В конструкции использовались деления (штрихи), нанесенные на платино-иридевый стержень, при этом метр определялся как расстояние между двумя штрихами при температуре 0 °C и атмосферном давлении, измеренное с помощью специально установленного устройства. С использованием техники оптического компаратора было прокалибровано 30 новых стержней и по паре образцов распределено между странами.

В 1890 г. А.А. Майкельсон установил исключительно высокую когерентность красной линии кадмия, а в 1892 г., используя ее в своем новом интерферометре, определил длину международного прототипа метра. Его измерения показали, что при атмосферном давлении 760 мм и температуре 15 °C метр содержит 1 553 164,13 длин волн красной линии кадмия. В 1907 г. за этот вклад и другие достижения Майкельсон был удостоен Нобелевской премии. Естественно, что оставалась проблема с тепловым расширением, так что, когда был

изобретен сплав стали с малым коэффициентом теплового расширения, автору (и директору Международной палаты мер и весов Г.Ш. Гильому) была присуждена Нобелевская премия (1920 г.). Тем не менее определение метра в СИ оставалось неизменным в течение 85 лет, и металлические метры служили исправно, а компараторы обрели неутомимые фотоэлектронные глаза.

Спектроскопические эксперименты при поддержке квантовой механики улучшили понимание и качество световых источников. Метрологические нужды мировых войн изменили научный климат, а перебои в транспорте подчеркнули преимущество стандартов, основанных на квантовой физике и допускающих независимое воспроизведение. Наконец, в 1960 г. Одиннадцатая генеральная конференция по мерам и весам смогла определить Международный Эталон Длины как 1 650 76,73 длины волн оранжевой спектральной линии в вакууме, излучаемой при переходах между определенными энергетическими уровнями атома 86-го изотопа криптона. Исходя из нового определения метра, можно утверждать, что длина волны этой линии Kr составляет $\lambda = 1 \text{ м} / 1\,650\,763\,73 = 0,605\,780\,211 \text{ мкм}$. В принятом определении имеются в виду невозмущенные атомы, однако фактически в свете лампы, использовавшейся для практической реализации этого метра, было обнаружено несколько сдвигов. Для стабилизации столкновительных сдвигов и режима разряда лампа работала при определенных фиксированных значениях тока и температуры разряда и давления в нем (с использованием тройной точки жидкого азота). Газовый поток Kr⁺ в электрическом поле приводил к различию длин волн, излучаемых из разных концов ячейки. При сравнении этого стандарта с лазером обнаружилась еще одна проблема, связанная с радиально зависящими диплеровскими сдвигами излучения.

В 1960-е и 1970-е гг. появился и совершенствовался ряд различных стабилизованных лазерных систем, происходило измерение и сравнение длин волн лазеров из разных национальных лабораторий. По существу все эти лазерные системы боролись за право стать следующим международным эталоном длины. В то время в Метрической конвенции участвовало 48 стран и, дипломатически выражаясь, выбор одного из множества предлагаемых лазеров был бы трудным. Кроме того, по характеристикам, стоимости и сложности ни одна из этих систем не имела подавляющего превосходства. К тому же с научной точки зрения заманчиво было определить стандарт длины на основе скорости света, введенной как точно определенная величина. На основе многочисленных измерений, проведенных с помощью лазерной техники, скорость света была принята равной точно 299 792 458 м с⁻¹. Это округленное значение измерений, проведенных в нескольких лабораториях стандартов. Новое определение 1983 года гласило:

"Метр — это длина пути, проходимого светом в вакууме за интервал времени равный 1/299 792 458 секунды. Скорость света равна $c = 299\,792\,458 \text{ м с}^{-1}$ (точно).

Секунда определяется цезиевыми часами с погрешностью $U = 1 \text{ на } 10^{14}$.

Генеральная конференция также рекомендовала некоторые линии излучения для реализации метра, например:

"Длина волны гелий-неонового лазера, стабилизированного по йоду, равна

$$\lambda_{\text{He-Ne}} = 632,99139822 \text{ нм},$$

с относительной погрешностью (U) равной $\pm 2,5 \times 10^{-11}$.

Цель всех этих изменений в определении состояла не только в увеличении его точности, но и в том, чтобы внесенное изменение было минимальным [3]. После определения скорости света оптическая частота (связанная со временем) может служить и для определения единицы длины.

2.3. Фундаментальные физические проблемы

и новое определение длины

Во времена этих переопределений была некоторая озабоченность: не меняем ли мы основание физики ради определения

метра? Если, например, мы в будущем обнаружим, что некоторые "физические константы" на самом деле медленно меняются, не может ли новое определение повлиять на процесс познания или даже ограничить его? Во всяком случае, мы будем в неведении относительно таких глобальных изменений, которые сохранят неизменными открытые нами физические взаимосвязи. Возможно ли, что некий разностный эффект будет доступен наблюдению? До 1960 г. расстояние между некоторыми плоскостями решетки Pt–Ir-сплава эталона метра принималось за основу для измерения длины. Ясно, что эту длину должны были задавать фундаментальные законы квантовой механики, электричества и магнетизма. Рассматривая колебания молекул в нескольких ангармоничных межатомных потенциалах, можно предположить, что массы ядер и, тем самым, сильные взаимодействия также играют роль в определении длины через тепловое расширение. Не создали ли мы в 1960 г. предпосылки для путаницы, использовав длину волны излучения атома криптона для определения метра? И сейчас фундаментальные законы квантовой механики, электричества и магнетизма по-прежнему влияют на определение длины, но теперь масса атома учитывается только через поправки к приведенной массе, а не через тепловой эффект. Конечно, новая "константа", скорость света, используется линейно как размерная постоянная шкалы. С первого взгляда переопределение 1983 г. выглядит отличным от определения через криptonовый эталон 1960 г., однако в действительности оно воспроизводит идею использования разности энергий уровней (только теперь вместо оптической энергии криптона используется энергетический интервал атома цезия, определяющий секунду) с последующим размерным преобразованием. Кто знает, не скрыта ли здесь какая-нибудь усмешка природы?

В результате мы пришли к тому, что система СИ теперь работает с шестью, а не с семью основными единицами. Метр понижен в должности до производной единицы, а значение времени и частоты возросло еще больше. Здесь начинается длинная история, в которой основным единицам системы СИ был брошен вызов "со дна сосуда Дьюра" [4]. Там были достигнуты замечательные успехи, давшие эталон Вольта, основанный на эффекте Джозефсона (Нобелевская премия 1973 г.) и квантовый эталон сопротивления, использующий эффект Фон Клитцинга (Нобелевская премия 1985 г.). Соотношение V^2/R , очевидно, дает электрическое определение единице ватт, тогда как ватт в системе СИ, определяемый, как джоуль в секунду, дается выражением $1/2 \text{ кг} (\text{м} \cdot \text{с}^{-2}) \text{ с}^{-1}$. Соотношение между этими единицами было установлено в эксперименте "сопоставление ватт" [5]. Недавно использование одноэлектронного транзистора открыло возможность цифрового счета заряда, протекающего в секунду, а это ведет к определению ампера, единицы тока в системе СИ. Такое взаимопроникновение квантовой физики и метрологии стало горячей темой последнего времени. Замечательные успехи метрологии вместе с достижениями космологии и астрономии поддерживают и мотивируют наше стремление разобраться, точны ли и неизменны во времени те величины, которыми мы пользуемся для описания физического мира.

3. Часы и время

Время представляет собой величину, которую мы можем измерить с наибольшей точностью, поэтому оно всегда привлекало определенный класс посвященных исследователей. Однако теперь различные датчики и управляющие микропроцессоры переводят регистрацию многих физических параметров в измерения частоты, что добавляет огромное число ученых из других областей, желающих добраться в своих измерениях до мельчайших деталей. (Тем не менее некоторые важнейшие области исследований не развиты еще в той мере, чтобы использовать частотные методики: например, некоторые решения мирового значения о том, что нам делать с

загрязнением воздуха, принимаются, несмотря на то, что мы едва ли уверены в *значе* ряда эффектов.)

Однако для технологов повышение точности измерений времени повсеместно вызывает большой интерес и приводит к конкуренции в этой области. В немалой степени это происходит благодаря достижениям, которые в этом году отмечены Нобелевской премией — скачок точности измерений на несколько порядков необычен для любой области, не говоря уже о той из них, в которой точность уже и так была на высшем уровне и была доведена почти до своего фундаментального предела.

Конечно, интерес ко времени присутствовал в истории человечества с самого начала, однако только в последние несколько столетий, благодаря некоторым удачливым группам людей, которые жили, не замечая смены времен года и имели достаточно свободного времени, чтобы размышлять о Природе, время начало становиться объектом эксперимента. Сегодня на вопрос, в чем причина интереса ко времени, можно взглянуть с научной и экспериментальной точек зрения. Для тех, кому дорога точность, причина ясна: *время является наиболее продуктивной метрологической переменной*.

3.1. Шкала достижимой точности при измерении времени

Точность измерения времени может увеличиваться практически без ограничений при увеличении продолжительности измерений просто из-за увеличения числа периодов некоторых равнотостоящих событий. Однако еще большая скорость роста информации со временем возможна, если у нас есть источник, сохраняющий когерентность от начала до конца измерений. Для наших целей под "когерентностью" мы можем понимать то, что если мы знаем фазу колебаний в начале измерений, то такой источник настолько устойчив, что мы можем предсказать фазу и позже, почти в конце измерений с точностью в 1 радиан. В таком случае точность измерений будет расти с интервалом измерения τ как $\tau^{3/2}$. Для простого доказательства этого утверждения разделим продолжительность измерения на три равные части, оставив в каждой по $N/3$ измерений. На начальном этапе мы сравниваем по фазе опорные часы с неизвестными с относительной погрешностью пропорциональной $(N/3)^{1/2}$. Затем на втором этапе мы просто считаем число событий, равное $N/3$. На последнем этапе мы снова оцениваем относительную погрешность аналогового соотношения фаз, которая опять пропорциональна $(N/3)^{1/2}$. Вычитание двух аналоговых фаз увеличивает погрешность одного измерения в $2^{1/2}$, так что в итоге относительная погрешность увеличивается в $(1/2^{1/2})(N/3)^{3/2}$. Если измерение происходит в области радиочастот с несущей частотой, равной 10^{10} Гц, выигрыш составляет 10^5 . Коммерческие частотометры способны уже считать двенадцатизначные числа в секунду, так что при правильном измерении частоты когерентного источника увеличение точности измерений получится огромным. Неудивительно, что мы пришли к ситуации, когда ученые-метрологи, а также философы, моряки и фермеры интересуются часами, временем и временами года [7]. И действительно, самая убедительная проверка существования гравитационного излучения, которое было предсказано Эйнштейном, пришла из наблюдений за уменьшением года в бинарном пульсаре Халса–Тейлора и сравнения физики орбитальных часов с физикой земных квантовых стандартов частоты. Эта замечательная работа была отмечена Нобелевской премией 1993 г.

3.2. Как устроены часы?

Основными элементами часов являются: источник регулярных событий, счетчик/интегратор, суммирующий события, и подходящий считающий механизм, передающий текущий результат заинтересованному человеку или механизму. Во многих отношениях источник колебаний — самая интересная часть, поскольку он по своей сути является аналоговой

системой, при конструировании которой основная цель состоит в том, чтобы процесс считывания информации как можно меньше нарушал стабильность физических колебаний. В этом деле очень важны нюансы и детали. Обычно качество часов, основанных на каком-нибудь хорошо известном генераторе регулярных "щелчков", в течение многих лет улучшается на несколько порядков трудами многих людей. Однако неотвратимо наступает момент, когда эти часы вдруг устаревают из-за появления лучшего стабильного осциллятора. Новая идея должна быть серьезным достижением, поскольку уже в начале своего существования она должна выдерживать конкуренцию с предыдущей многократно улучшившейся технологией. И все же некоторые технологии живут удивительно долго, например, и сейчас еще можно купить хорошие наручные часы, основанные на крутильном маятнике, хотя концепция балансира была использована Х. Гюйгенсом еще в 1675 г.

Серьезный интерес к наблюдению за временем возник, когда человек занялся сельским хозяйством, однако наибольшей остроты он достиг с расширением прибыльной международной торговли — лучшее знание положения на море (в основном, долготы) позволило бы уменьшить число "неизбежных" кораблекрушений. Парламентская премия по долготе, обещанная в 1714 г. (более 10 миллионов долларов в нынешнем исчислении) привлекла внимание Джона Харрисона, что заняло у него почти сорок лет изобретательного труда. В 1761 г. его часы H4 даже на море продемонстрировали точность хода в $1/5$ секунды за день, что соответствует погрешности $\delta v/v \sim 2.5 \times 10^{-6}$. Это было в несколько раз лучше, чем требовалось, тем не менее, ему сначала выплатили только половину премии — частично проблема была связана с интеллектуальной собственностью! Второй проблемой был конфликт интересов в самой комиссии, присуждавшей премию (эта история хорошо описана в работе [7]). Нынешние потребители точного времени — это ТВ сети (для синхронизации), компании мобильной связи, пользователи сигналов глобального позиционирования, которым требуются предельные характеристики, радиоастрономы, системы сопровождения в глубоком космосе (NASA) и многие другие области науки, в которых физические переменные определяются частотными методами.

3.2.1. Эволюция осцилляторов. Различие между воспроизведимостью и точностью. Основная частота механических часов или электронного генератора, основанного на колебательных модах кварцевого генератора, определяется механическими размерами. Такой осциллятор может быть очень стабильным и иметь хорошую воспроизводимость в том смысле, что его частота может быть определена числом со многими значащими цифрами, однако она не может претендовать на какое-либо определенное или естественное значение. Однако стабильность некоторых кварцевых генераторов может быть замечательной: относительный дрейф частоты, превышавший 10^{-6} за сутки, постепенно снизился до современных значений, составляющих $\leq 1 \times 10^{-10}$ за сутки, а сдвиг частоты из-за ускорения равен 10^{-9} на g . Высокая частота электронных генераторов хорошо служила для интерполяции между "щелчками" эталона, которые обеспечивались ежесуточным прохождением Солнцем зенита, как было принято Метрическим соглашением 1875 г. (позднее регулярные данные о вращении Земли были основаны на наблюдениях покрытий Луной определенных звезд и планет, проводившихся с помощью телескопов). К 1950 г. электронные генераторы были настолько усовершенствованы, что удалось обнаружить флуктуации скорости вращения Земли на уровне 10^{-8} . Они были объяснены изменениями момента инерции системы Земля–атмосфера, которые вызываются океанскими приливами север–юг и большими бурями. Научное сообщество хотело избавиться от этой изменчивости и нуждалось при этом в абсолютном и универсальном эталоне (а не в местном артефакте). Новым выбором стал астрономический тропический 1900 г., которому было приписано определенное число

секунд. Возможно, что намерения были хорошими, поскольку вращение Земли вокруг Солнца имеет меньший уровень возмущений. Однако не очень просто пользоваться высокой воспроизводимостью осциллятора, который щелкает только раз в год. Метрологи отдают предпочтение эталону с очень высокой частотой осцилляций, такой, что при измерении интересующих явлений результат выражается большим целым числом отсчитанных щелчков, а неизбежный шум и погрешность определения остаточной аналоговой доли периода становятся пренебрежимо малыми.

3.3. Электронные часы, основанные на квантовых переходах

Основываясь на методе атомного пучка, разработанного Отто Штерном (принесшим ему Нобелевскую премию 1943 г.), И.И. Раби разработал резонансный пучковый метод, который позволял с более высокой точностью зондировать внутренние (сверхтонкие) квантовые уровни таких атомов, как цезий. Эта работа была удостоена Нобелевской премии в 1944 г. Такое использование атомов открывало путь к созданию первичного стандарта, удовлетворяющего требованиям независимой реализуемости и универсальности. Вдобавок частоты переходов были близки к высокочастотному пределу освоенного радиодиапазона, так что и метрологические аспекты были оптимизированы. В 1949 г. в Национальном бюро стандартов (НБС) были созданы первые часы на переходе радиочастотного диапазона в пучке молекул аммиака, а в 1955 г. часы на пучке атомов цезия уже работали в Национальной физической лаборатории (НФЛ) и в НБС. В 1955 г. Н.Ф. Рамзей сообщил об изобретенном им эффективном методе разнесенных осциллирующих полей (Нобелевская премия 1989 г.). В этом методе двойного возбуждения атомы после первого возбуждения в определенное состояние совершили свои колебания в отсутствие (в идеале) возмущений до тех пор, пока второй импульс возбуждения не завершал интерферометрическое сравнение скоростей изменения фазы в атомах в поле лабораторного генератора. Стандарт частоты на пучке атомов цезия быстро усовершенствовался во многих лабораториях, и в 1967 г. секунда в системе СИ была определена, как период времени, в течение которого атом цезия совершает 9 192 631 770 колебаний на переходе сверхтонкой структуры в основном атомном состоянии. Соответственно, частота этих осцилляций в атоме цезия в точности равна 9 192 63 770 Гц (циклов в секунду). Специалисты, вовлеченные в новое определение единицы времени и частоты, поступили мудро, не уточняя детали измерительного процесса и оставляя поле для дальнейшего прогресса. Так, например, когда в ранние 1990-е годы стало возможным и модным с помощью лазеров производить оптическую накачку атомов цезия, т.е. их перераспределение по сверхтонким подуровням, сотрудники Национального института стандартов и технологии (НИСТ, США, бывшее НБС) создали новый стандарт на основе пучка атомов цезия, названный НИСТ-7. В нем использовался оптический перенос большей части населения со всех 16 сверхтонких подуровней в одно выделенное нижнее состояние ($|3,0\rangle$), вовлеченное в часовой переход. Кроме этого фактора (~ 16) были улучшены источник атомного пучка, генератор стабилизируемой частоты и детектирующая электроника. Все это вместе с компьютерной обработкой сигнала и активным контролем систематических отклонений частоты позволило уменьшить неточность воспроизведения цезиевой секунды в НИСТ до $\sim 5 \times 10^{-15}$. Но, как это обычно случается с методами прецизионной метрологии, вскоре эта сложнейшая система в одноточье устарела из-за появления качественно лучшей технологии.

Как было показано Казевичем и Чу [8], лазерное охлаждение атомов цезия делает возможным успешное применение идеи "атомного фонтана" для эталона частоты, основанного на цезии. Управляя частотой или мощностью лазеров, можно подбросить медленно движущийся шар атомов вертикально

вверх, после чего он пролетит сквозь возбуждающий радиочастотный резонатор, достигнет апогея почти на метровой высоте над резонатором, затем начнет падать и через несколько сотен миллисекунд опять пролетит через возбуждающий резонатор. Такое большое время когерентного взаимодействия сразу уменьшило ширину линии резонанса до 1 Гц, в то время как ранее, в эпоху тепловых атомных пучков, она составляла ~ 300 Гц. Оптическое зондирование атомов под резонатором (после его прохождения) дает зависимость вероятности перехода от частоты пробного поля, которая позволяет управлять частотой стабилизируемого генератора. Используя подходящие замкнутые оптические переходы для детектирования, от одного атома можно получить много переизлученных фотонов, так что даже с учетом потерь из-за ограничения телесного угла и неэффективности детектирования измерительные шумы будут не на много превышать предельные шумы, обусловленные конечным числом атомов. Первый рабочий стандарт частоты на цезиевом фонтане был получен А. Клероном с сотрудниками [9] в Парижском институте, известном сейчас как LNE-SYRTE [10]. Даже без использования современных методов для преодоления атомного дробового шума фонтанные часы в НИСТ и в SYRTE с учетом всех возмущений и проблем измерений достигли сейчас уровня точности выше, чем 1×10^{-15} [11]. Конечно, с увеличением разрешения можно надеяться на увеличение точности, но уже заранее ясно, что это приведет к расширенному перечню требующих учета малых сдвигов частоты и дополнительным обременительным заботам. В конце концов, даже при увеличенном времени взаимодействия регистрируемая частота составляет 10^{10} колебаний в секунду, а достигнутая погрешность 1×10^{-15} отвечает одной стотысячной доле от ширины резонанса атомного фонтана. Возможности цезиевого фонтана ограничены двумя эффектами: столкновительными сдвигами, обусловленными сильно возросшей концентрацией атомов [12], и сдвигами из-за влияния теплового излучения стенок вакуумной системы. Попытки дальнейшего улучшения привязки к вершине широкой линии всегда приводят к расширяющемуся списку новых малых проблем и создают непреодолимый барьер.

Важным обстоятельством является то, что для многих типов ансамблей атомных поглотителей эффекты уширения линий одинаковы для областей радио- и оптических частот. Например, вместо микроволновых переходов в атомном фонтане можно использовать оптические переходы с тем же самым временем взаимодействия. Очевидно, что высокие оптические частоты предпочтительны, поскольку представляющая интерес резонансная структура будет во столько же раз острее, во сколько раз оптическая частота больше СВЧ. Можно ожидать, что более узкие линии обеспечат более точные измерения, что позволит лучше определить влияние различных экспериментальных параметров. Это приведет к лучшей независимой воспроизводимости, которая при надлежащем вложении усилий и более полном понимании причин отклонений частоты может дать почти такое же увеличение точности измерений. Однако как можно было планировать измерение абсолютной оптической частоты до года Тысячелетия и Оптической Гребенки?

Идея повторяемости выглядит гораздо слабее золотого стандарта *точности*, которая дает нам дополнительную возможность связать результат измерения с основными единицами Международной системы. Сейчас фактически известно несколько типов оптических часов, обеспечивающих погрешность, в 10 раз меньшую, чем цезиевый стандарт. Однако прежде, чем будет принято новое определение единицы времени, необходимо и очень интересно провести их сравнение, поскольку оно открывает путь в наиболее интересную область Науки, старающуюся разгадать, какие из физических законов точны по существу; какие законы игнорируют некоторые детали и не могут быть четко сформулированы; какие законы фактически устанавливают "факты" о Природе, которые в действительности не совсем точны? В качестве примеров

могут назвать небесную механику, законы идеальных газов, пренебрегающие объемом молекул, и сохранение четности в атомной физике.

4. Рождение мечты об оптических часах

4.1. Появление лазеров

Будущее метрологии радикально изменилось 12 декабря 1960 г., когда небольшая группа в Лабораториях Белла под руководством Али Джавана нашла, наконец, необходимые условия, при которых их оптический мазер стал генерировать самоподдерживающиеся оптические колебания. В их тщательно изготовленной газоразрядной трубке возникла неправдоподобная ситуация, при которой соотношение населенностей двух определенных уровней атома неона было обратно обычному, тепловому. Перенос энергии при столкновениях в разряде в газе, содержащем больше гелия, чем неона, создал инверсию населенностей, при которой на более высоком энергетическом уровне оказалось больше атомов. Впечатляет то, что эти условия были найдены в результате тщательных измерений и моделирования условий разряда! Инвертирование населенностей по сравнению с обычным случаем привело к усилению вместо поглощения, которое, согласно нашему опыту, является универсальным свойством (обычной) материи. В соответствии с инвертированной населенностью вместо поглощения группа Джавана получила излучение света. Атомы обеспечивали усиление любого резонансного оптического сигнала, проходящего по разрядной трубке. Обычно коэффициент усиления в несколько процентов не сильно впечатляет, однако использование специально рассчитанных и изготовленных многослойных зеркал, в которых потери при отражении были меньше усиления за проход, создало условия для увеличения мощности при каждом проходе. Так они получили самоподдерживающуюся непрерывную генерацию оптических колебаний и увидели коллимированный пучок света, предвиденный Чарльзом Таунсом и Артуром Шавловым в их классической работе 1958 г. Похожие идеи рассматривались и в бывшем Советском Союзе, что в 1964 г. привело к присуждению Нобелевской премии Н. Басову, А. Прохорову и Таунсу.

4.2. Связь с глауберовскими когерентными состояниями света

Теоретическое исследование оптических полей можно начать с известных результатов для однофотонных полей, потом понемногу добавлять фотоны и смотреть, что получается. Для всех нас, последователей работ Глаубера, было удивительным, как мало надо фотонов, чтобы функция распределения их плотности стала фундаментально отличаться от обычного распределения Пуассона: с увеличением числа фотонов в моде их поля начинают проявлять малые относительные флуктуации, характерные для классических полей. Экспериментально выходная мощность первого лазера Джавана была порядка 1 мВт, что соответствовало излучению примерно $N = 10^{16}$ фотонов в секунду! Можно оценить ожидаемые для этого эксперимента относительные флуктуации как $\sim 1/N^{1/2}$, но ясно, что для такого неправдоподобно большого числа когерентных фотонов в одной моде результат будет нефизичным, слишком малым. Тысячи простых технических эффектов приведут к флуктуациям большим, чем предсказываемый предел $1:10^8$! Другими словами, эти лазеры работали при большой мощности далеко в области классических полей и наблюдать в них квантовые флуктуации было очень трудно. И, действительно, только в конце 1970-х годов люди снова стали размышлять о том, как исследовать квантовые поля с небольшим числом фотонов в них. Далеко не просто наблюдать квантовые корреляции при такой чрезвычайно малой интенсивности, однако они очень интересны, поскольку их относительные проявления могут быть весьма значительны.

Так, например, группа Дж. Кимбла использовала зависящий от фазы сжатый свет и провела спектроскопические измерения с двукратно улучшенным отношением сигнала к шуму по сравнению с наивным ограничением по дробовому шуму [13]. Чем больше поглощение, тем ближе статистика к тепловому пределу, поэтому для наблюдения высокой степени сжатия света необходимо минимизировать оптические потери. К сожалению, технический шум линейно растет с ростом мощности, а преимущество, обусловленное сжатием света, растет медленнее. Похоже, что достичь десятикратного улучшения отношения сигнала к шуму будет невероятно трудно.

4.3. Когерентность лазерного поля

делает доступной диагностику частоты

Успех лазерной конструкции в Лабораториях Белла был основан на полуклассическом представлении о том, как будет работать оптический мазер. Конечно, усиление в нем должно обеспечиваться квантово-механическими атомными системами, а не электронными лампами или кристаллонами, а каждый атом в единичном событии должен привносить в поле всего один фотон. Все же, учитывая насколько велико число фотонов, едва ли дискретность может играть заметную роль. Группа в Лабораториях Белла почти сразу приступила к проверке этих представлений, совместив пучки двух лазеров и направив их на светочувствительную поверхность быстрого фотоприемника. Они уже представляли лазерное излучение как вполне классическое поле, удовлетворяющее граничным условиям при отражении на двух зеркалах. Условие стабильной и самовоспроизводящейся циркуляции поля в резонаторе определяет возможные длины волн генерируемого лазерного излучения. Благодаря удаче и конструкции разряд был на удивление спокойным, так что можно было предположить, что и показатель преломления остается практически постоянным. Таким образом, интерференционные граничные условия жестко задавали частоту генерации и, соответственно, выходного излучения. При облучении поверхности нелинейного приемника двумя полями с хорошо определенными частотами (узкими спектрами) можно было ожидать появления разностной частоты, что и случилось. Я до сих пор помню свист звукового сигнала биений, записанный Джаваном, когда два его лазера были настроены почти на одну частоту. Разность частот двух источников, работавших в области 260 ТГц, составляла всего 1 кГц!

На самом деле удивительно, насколько малой была ширина линии этих биений. Выше мы уже предполагали это, основываясь на больших числах фотонов. Поток, равный 10^{16} фотонов/с, должен иметь флуктуации мощности на уровне 10^{-8} по отношению к полной мощности. Поэтому оптическая фаза может быть очень хорошо определена. Однако оценки, выполненные по формуле Шавлова–Таунса, ширины линии генерации лазера с учетом потерь, которые и ограничивают его когерентность, дают величину порядка нескольких мГц.

Таким образом, мы, в принципе, получили невероятно узкополосный источник и должны были быть готовы к поиску новых интересных эффектов. Но здесь нас ждало разочарование: в действительности эти малые предсказанные флуктуации фазы почти полностью тонули в шумах технического происхождения. Мы уже отмечали, что частота генерации жестко определяется условием интерференционного воспроизведения при циркуляции волн между зеркалами и образовании стоячей волны. Но лаборатория на языке сейсмологов — шумное место. Даже в тихой лаборатории вибрации пола составляют $\sim 3 \times 10^{-9}$ м ($\text{Гц}^{-1/2}$) в полосе частот 1–30 Гц. Длина резонатора лазера составляет заметную долю метра, а всю систему трудно сделать сколь угодно жесткой. В колебаниях длины резонатора и соответствующих флуктуациях частоты генерации может легко проявиться некоторая заметная часть вибраций пола. Предположим, что только 1 % вибраций пола переходит в относительное изменение

длины резонатора. Масштаб проблемы сразу виден: относительные флуктуации частоты априори составят 10^{-10} . Даже изменения температуры приводят к серьезным проблемам, поскольку вариация порядка 10^{-10} для слабо расширяющихся материалов типа плавленого кварца отвечает изменению температуры на несколько мК. Ситуацию можно улучшить, привязывая частоту лазера к частоте стабильного опорного резонатора [14]. Для оптимизации защиты от вибраций используется жесткое крепление зеркал эталонного резонатора и подвес всей сборки, оставляющий свободными горизонтальные степени свободы. Уделив должное внимание защите от вибраций, Бергквист получил рекордно малую ширину линии лазера $\sim 0,16$ Гц! Другой подход заключался в поиске путей минимизации чувствительности резонатора к ускорению. Используя вертикальное симметричное крепление эталонных резонаторов, наша группа недавно опубликовала результаты о достижении ширин линии лазера на уровне единиц Гц [16].

4.4. Когерентность лазерных биений позволяет управлять лазером с помощью частотных измерений

Из-за низких собственных фазовых шумов лазерного источника и сравнительно большой мощности (\sim мВт) гетеродинный сигнал биений двух лазеров дает большое отношение сигнала к шуму. Даже при малых временах усреднения, скажем 1 мкс, отношение сигнала к шуму остается вполне достаточным. К тому же хорошо сконструированный лазер на таких коротких временах слабо откликается на "побочные эффекты" жизни лаборатории (изменения температуры, скачки напряжения в сети, вибрации и т.д.) — за 1 мкс они не успевают сильно изменить систему. Длительность возмущений слишком мала, чтобы нарушить стабильность резонатора, определяющего частоту. Таким образом, мы фактически можем проводить полезные для нас измерения фазы лазера за столь короткие промежутки времени, что проблемы еще не успевают как следует проявиться! Начинает просматриваться такая стратегия: мы быстро выясняем, как, собственно, ведет себя наш лазер по сравнению с тем, как нам бы хотелось, чтобы он себя вел, а затем с помощью подходящего исполнительного элемента используем обратную связь для управления частотой лазера. Если коррекция происходит быстро и достаточно аккуратно, то управляемый лазер будет очень хорошо аппроксимировать необходимый нам идеальный лазер со стабильной частотой.

В реализации предложенной концепции регулируемой обратной связи много тонких деталей, в совершенствование которых автор вложил немногим более 40 лет активной работы. Это привело к созданию многих интересных и полезных электрооптических инструментов и методов.

4.5. Сравнительно высокая мощность лазеров сделала возможными нелинейную спектроскопию и узкие резонансы

Начнем с первых работ по наблюдению узких атомных резонансов с помощью спектроскопии насыщенного поглощения. Впервые эти эффекты исследовались Биллом Беннетом внутри резонатора лазера с использованием дисперсионных эффектов, связанных с неоновым газом в активной среде лазера. Естественная ширина атома неона, равная ~ 10 МГц, скрыта доплеровским уширением, составляющим ~ 1500 МГц. Таким образом, большинство атомов отстроено от резонанса на величину, зависящую от продольной проекции скорости. Только часть атомов имеет такие скорости, что доплеровский сдвиг делает их частоты резонансными для лазерного поля внутри резонатора. Фактически имеются две такие скорости, поскольку лазерные волны распространяются в двух противоположных направлениях, циркулируя между зеркалами. Попавшие в резонанс атомы довольно сильно взаимодействуют с полем, что увеличивает скорость распада

верхнего состояния атомов с выделенными скоростями, поскольку их инверсная населенность преобразуется в фотоны резонатора! Следовательно, в зависимости разности населенностей (населенность верхнего уровня минус населенность нижнего) от скорости должен проявиться локальный и довольно узкий провал в окрестности той скорости, для которой инверсия населенностей трансформируется в световые кванты. В действительности, как было уже отмечено, есть два таких зеркально симметричных провала. Когда лазерная частота смещается к частоте неподвижных атомов, разворачиваются интересные события. При этом скорости атомов, находящихся в резонансе, становятся все меньше, пока, наконец, выделенная скорость не станет равной нулю. В этот момент и происходит кое-что новое: при большой отстройке у нас было две группы активных атомов, передававших свою энергию выходному излучению лазера, а при настройке на центральную частоту обе бегущие волны взаимодействуют с одной группой атомов. Уменьшение числа атомов, дающих вклад в генерацию, заметно уменьшает и мощность генерации, но только при настройке на центральную частоту. Частота лазера может стабилизироваться по этому провалу в зависимости мощности от частоты, который называется "лэмбовским провалом" в честь Уиллиса Лэмба, прояснившего в своей ранней теоретической работе происхождение этого экспериментально наблюдавшегося эффекта. (Ему была присуждена Нобелевская премия 1955 г. за работы по исследованию субсверхтонких структур в спектре водорода.) Как выяснилось, рабочее давление для оптимальной работы лазера довольно велико (~ 3 торр, 400 Па), что приводит к большой вероятности межатомных столкновений даже за короткое (10 нс) оптическое время жизни атома. Из-за этого лэмбовский провал уширяется и становится мельче. При этом он должен быть различим на фоне доплеровской линии, представляющей распределение атомных скоростей. Вдобавок к уменьшению контраста лэмбовского провала возникают и заметные сдвиги частоты [17]. Произвольно уменьшать давление нельзя, поскольку реальный механизм накачки в разряде заселяет метастабильный уровень атома гелия и необходимы столкновения, чтобы передать это возбуждение атомам неона. В результате, хотя измерить длину волны когерентного излучения лазера гораздо легче, чем длину волны криптоновой разрядной лампы (существующего стандарта длины волны), переход к лазерам сдерживался недопустимо большими сдвигами лазерной частоты из-за давления. Дополнительным осложняющим обстоятельством было то, что существовавшая тогда технология разрядных трубок приводила в процессе эксплуатации к изменению давления и состава газовой смеси из-за откачки при распылении электродов.

Вскоре Ли и Школьник предложили безусловно важную идею разделения функций усиливающей и опорной газовых ячеек. Более подробно эти интересные модификации обсуждаются в работах [18, 19], но для наших целей сейчас важно рассмотреть существо дела. Поскольку задача состояла в защите реперных атомов от возмущений, более привлекательнымказалось мыслить в терминах поглощения, а не усиления. Тогда нам не потребуется разряд или оптическая накачка опорных квантовых осцилляторов. Конечно, чтобы было возможно использовать нелинейный лэмбовский резонанс для стабилизации частоты, необходимо, чтобы частота лазера могла настраиваться на резонансную частоту опорной ячейки. Сегодня это не проблема — есть перестраиваемые лазеры. Однако в те времена лучшая идея относительно того, как обеспечить совпадение длин волн, заключалась в том, чтобы в качестве поглотителей использовать молекулы, тогда мы бы получили огромное количество линий поглощения, из которых могли бы выбирать. Современный рекордсмен в этой области — молекула йода с подходящими узкими линиями, занимающими область от ближнего ИК-диапазона до 500 нм. Если для других молекул ограничиться только колебательно-вращательными переходами, то их длины волн лежат в ИК-диапазоне, в интервале ~ 2 – 10 мкм.

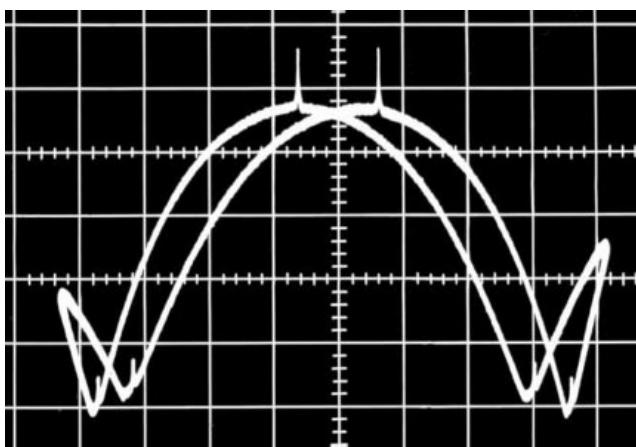


Рис. 1. Пик резонансного поглощения молекул CH_4 . Не-Не-лазер, работающий на длине волны 3,39 мкм, возбуждается радиочастотным разрядом. Ячейка, наполненная метаном под давлением 12 мторр (16 мбар), помещена внутри резонатора. Выходная мощность 300 мкВт, контраст пика $\sim 12\%$. Полуширина пика на полувысоте ~ 270 кГц. При максимальной мощности ($\sim 0,8$ мВт) контраст пика $\sim 15\%$. Межмодовый интервал резонатора — 250 МГц. В двухмодовой области вблизи излома зависимости заметен перекрестный резонанс. Удвоение осциллограммы вызвано гистерезисом сканирования.

Первой из таких систем с оптическим репером (и остающейся до сих пор одной из лучших) была Не-Не-разрядная трубка, обеспечивающая усиление на длине волны 3392 нм [18]. Кроме того, в лазерном резонаторе имелась ячейка с молекулами CH_4 , обычновенными, хорошо известными молекулами метана, обладающими тетраэдральной симметрией и интересными линиями, которые можно было получить с помощью Не-Не-лазера. Короче говоря, необходимое спектральное перекрытие излучателя и поглотителя было достигнуто путем подбора, основанного на большом везении! Использованная ИК-полоса поглощения v_3 является сильной фундаментальной колебательной полосой, обеспечивающей коэффициент поглощения $0,18 \text{ см}^{-1}$ на торр. Конечно, если поглащающая ячейка расположена внутри резонатора, то, для того чтобы она оказывала заметное влияние на динамику лазера, нет необходимости в большом поглощении. Достаточно всего нескольких процентов, поскольку это соответствует примерно половине потерь на выходном зеркале. Столкновительное уширение резонанса метана при давлении 10 мторр составило 160 кГц, что было сравнимо с пролетным уширением в 130 кГц, вызванным свободным пролетом молекул через лазерный пучок с типичным диаметром 0,3 мм. Важно, что столкновительный сдвиг для этих переходов оказался очень малым — всего 1 кГц для приведенных условий.

Итак, мы обсуждаем систему с резонансом в зависимости мощности от частоты с полной шириной на полувысоте $\sim 0,6$ МГц и приблизительно 5%-ным контрастом относительно полной выходной мощности лазера, составлявшей около 200 мкВт. Простой расчет отношения сигнала к дробовому шуму дает величину $\sim 10^{-6}$ при ширине полосы 1 Гц. Мы рассматриваем здесь пик субмегагерцовой ширины, регистрируемый при настройке на центр линии, когда обе бегущие волны в резонаторе просветляют одни и те же молекулы и тем самым уменьшают внутрирезонаторные потери на поглощение. При оптимальном использовании такого отношения сигнала к шуму можно было бы достичь субгерцововых отклонений стабилизированного лазера для времени измерения 1 с. В 1968 г., когда возникла область реперов оптических частот на основе насыщенного поглощения, наши детекторы и предусилители были не слишком высокого качества и мы не стремились достичь дробового предела, при котором неста-

бильность частоты составила бы $\sim 2 \times 10^{-14}$ за 1 с. Перед этим, однако, мы получили результат $\delta v/v \sim 1 \times 10^{-12}$, который вскоре был улучшен до 3×10^{-13} благодаря улучшению приемников и обработки сигнала.

Физика системы легче поддается анализу, когда опорная ячейка размещается вне резонатора лазера, и такая схема использовалась в ранних экспериментах Бордэ и Хэнча, а также группы Чеботаева. Интересные детали описаны в учебниках Летохова и Чеботаева [20], Стенхольма [21], Левенсона и Кано [22]. Обратимся теперь к проблеме пролетной ширины линии.

4.6. На свободно летящие молекулы действует лазерный импульс — два взгляда на соотношение неопределенности

Для рассматриваемых переходов излучательное время жизни (\sim мс) много больше времени пролета свободных молекул через лазерный пучок. При низких давлениях ни доплеровское, ни столкновительное уширение не дают вклада в ширину линии насыщенного поглощения, из чего сразу следует, что резонансная ширина может быть уменьшена при увеличении времени взаимодействия молекулы с полем. Полезны широкие пучки и охлаждение стеклянной ячейки жидким азотом. Так началось серьезное исследование формы линии резонанса в режиме свободного пролета. Чеботаев с сотрудниками развили аналитическую теорию в пределе малых давлений и малых оптических мощностей [23]. Теория, развитая в Объединенном институте экспериментальной астрофизики (JILA), была основана на численном интегрировании матрицы плотности для поглащающих молекул, свободно пролетающих через лазерный пучок, имеющий предположительно гауссов профиль [24]. Для упрощения расчетов использовалось приближение малых интенсивностей и слабого взаимодействия. Скоро выяснилось, что основной вклад в наблюдаемый сигнал дает очень малое число медленных молекул. Теория предсказала логарифмическое заострение точно в центре линии. При больших временах взаимодействия даже "малая" мощность приводит к насыщению и другим эффектам, характерным для сильного поля.

Продольная скорость молекул должна быть малой, чтобы они не пересекали волновые фронты вдоль оси. В связи с этим мы стали анализировать фазовую модуляцию, обусловленную доплеровским эффектом. Молекулы должны лететь перпендикулярно оси и покидать волновой фронт после пролета с геометрическим фазовым сдвигом, не превышающим 1 рад. Поперечные скорости тоже должны быть малыми, поскольку большое время пролета приводит к более узкой линии. Из условия $\delta v \approx 1$ следует $\delta v = \beta v_{th}/w_0$, где δv — полуширина наблюдаемого резонанса на полувысоте, v_{th} — тепловая скорость, w_0 — радиус гауссова пучка, β — измеряемый параметр. Для метана при комнатной температуре эксперимент дал $\beta v_{th} = 88$ кГц мм. Измерения проводились для радиусов мод в пределах от 56 мкм до 9 см, чему соответствовали полуширины от 1,6 МГц до 940 Гц. (Об интересной субструктуре мы поговорим чуть позже.) Полезно рассмотреть пролетное уширение, вызванное угловой расходимостью в фурье-дуальной области. Минимальная угловая расходимость коллимированного лазерного пучка с гауссовым распределением радиуса w_0 составляет $\delta\theta = \lambda/2\pi w_0$. Разброс \mathbf{k} -векторов, в особенности, их неаксиальных компонент, вызывает зависящий от скорости доплеровский сдвиг, причем его знак одинаков для обеих бегущих волн, что проявляется как уширение и сдвиг резонанса. Конечно, для меньшего диаметра моды угловая расходимость увеличивается, спектральная ширина растет.

Хотя в молекулах, как правило, нет "закрытых" оптических переходов, подобных тем, что используются при обычном лазерном охлаждении атомов, полярные молекулы обладают дипольным моментом. Как было показано группой Мейера [25], меняя знак сильного электрического поля, такие моле-

кулы можно замедлять, используя механизм подобный сизифову механизму охлаждения атомов. Позднее группа Йе достигла беспрецедентно высокого разрешения в микроволновой спектроскопии свободных радикалов OH, замедляя их с помощью эффекта Штарка [26]. Это безусловно интересное направление!

К другим важным направлениям можно отнести детектирование с высокой чувствительностью и улучшение точности стабилизации по молекулярным сигналам. Например, в одной из работ, выполненных в JILA (метод помехо-защищенной оптической гетеродинной спектроскопии молекул с применением накопительного интерферометра, NICE-OHMS), показано, как увеличить чувствительность, комбинируя использование накопительного интерферометра и радиочастотный метод боковых полос [27]. Необыкновенно интересна задача поиска частотного сдвига (связанного с четностью) между подходящими энантиомерами [28]. Другие важные применения лазеров описаны в монографии Сванберга [29].

4.7. Перенос импульса от света молекулам — расщепление из-за эффекта отдачи

Общий анализ радиационных взаимодействий наравне с числами фотонов и внутренними состояниями квантовой системы должен включать импульсы полей и молекул. Такой анализ важен для случая взаимодействия света с атомами, имеющими закрытые уровни энергии, обеспечивающие циклическое взаимодействие со светом. В них реализуется глубокое охлаждение, за которое Филипс, Чу и Коэн-Тандужки в 1997 г. получили Нобелевскую премию (премия за охлаждение атомов). Для рассматриваемых здесь молекул разумным является предположение об однократности взаимодействия, поскольку молекулы имеют много каналов распада и велика вероятность того, что до возвращения молекулы в лазерный пучок она столкнется со стенкой. Будучи двухступенчатым процессом, Спектроскопия Насыщенного Поглощения наглядно демонстрирует передачу импульса поля атомной системе. Рассмотрим поглотители, которые вначале имеют практически нулевую скорость вдоль лазерного пучка. Тогда лазерный пучок, распространяющийся налево, можно настроить на частоту

$$v = v_0 \left(1 + \frac{hv}{2Mc^2} \right),$$

при этом, кроме энергии перехода v_0 молекуле требуется дополнительная энергия для получения кинетической энергии, приобретаемой в результате передачи молекуле импульса фотона после перехода. Встречный пучок также опустошает эту группу атомов с изначально нулевой скоростью. В результате возникающее при такой настройке частоты нелинейное уменьшение молекулярного поглощения приведет к пику в спектре пропускания. Частота этого пика немного сдвинута относительно опорной частоты в сторону более высоких частот. Другой интересный случай происходит, когда молекулы имеют скорость $v = h/M\lambda$, т.е. изначально имеется достаточный молекулярный импульс, так что при взаимодействии с молекулой лазерного излучения, слегка отстроенного в область более низких частот, фотонный и молекулярный импульсы взаимно уничтожаются, а исходная кинетическая энергия может восполнить дефицит энергии фотона. В результате возбужденная молекула приобретает нулевую продольную скорость. Теперь встречный лазерный пучок той же частоты усиливается при взаимодействии с этой группой неподвижных возбужденных атомов, что снова приводит к формированию пика в пропускании ячейки. Если молекула изначально обладает кинетической энергией, то для выполнения резонансного условия для верхнего состояния лазер должен быть настроен на частоту

$$v = v_0 \left(1 - \frac{hv}{2Mc^2} \right).$$

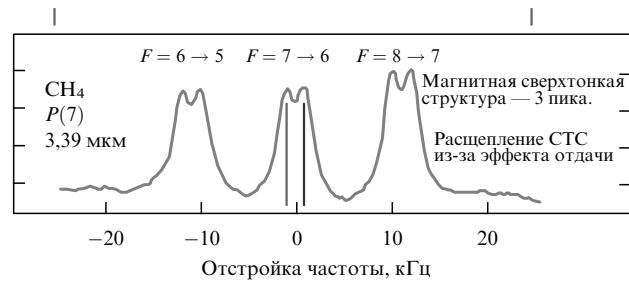


Рис. 2. Расщепление пиков сверхтонкой структуры (СТС) в свободных молекулах метана из-за эффекта отдачи. Вертикальные линии обозначают положение двух компонент, на которые из-за отдачи расщепилась одна из сверхтонких компонент.

Таким образом, при учете отдачи фотона нелинейное взаимодействие связано с тем, что оба встречных лазерных пучка при одной и той же отстройке частоты могут взаимодействовать с населенными либо нижнего, либо возбужденного уровня. При этом молекулы в каком-либо из этих состояний имеют нулевую скорость. Для метана расщепление между этими двумя пиками составляет 2,163 кГц и ясно видно на рис. 2 [30].

Если в JILA и в Университете Северного Парижа для увеличения времени взаимодействия молекул применяли в основном лазерные пучки больших диаметров, то Чеботаев с Багаевым и другими сотрудниками успешно реализовали другую физическую идею, а именно, обеспечили условия, при которых основной вклад в наблюдаемый сигнал давали сверхмаленькие молекулы. Благодаря этому было достигнуто дополнительное двадцатикратное сужение линии до величины < 50 Гц [31]. Важным обстоятельством в этом подходе является то, что для трехмерного движения эффективная температура молекул меньше 0,1 К, что приводит к сильному подавлению доплеровских сдвигов второго порядка, ≈ 1 Гц. Среднюю скорость, которая была в 13 раз меньше тепловой, продемонстрировали Йе с сотрудниками на медленных молекулах C2HD [27]. Это удалось осуществить благодаря очень высокой чувствительности метода NICE-OHMS.

4.8. Другие опорные оптические частоты, основанные на нелинейной спектроскопии

Много исследовательских групп было привлечено к работам по применению стабилизации лазеров в измерительных стандартах, таких, как интерферометрическая калибровка концептуальных мер длины, которые служат для контроля стандартов, используемых в промышленности. Большим достижением в этой области является Не-Не-лазер, работающий на длине волны 633 нм, с внутрирезонаторной йодной ячейкой. Тщательно проработанные системы такого типа доступны даже коммерчески. В начале 1980-х годов именно для такой Не-Не/I₂-системы усилиями НБС была измерена частота с погрешностью 70 кГц. (Поскольку это было первое измерение в видимом диапазоне, наверное, понятно, что вначале многие погрешности были далеки от своих фундаментальных значений.) Этим направлением занялись и другие группы, и в течение десятилетия многие лаборатории приобрели опыт в этой области, а некоторые даже провели измерения, подтвердившие результат НБС, так что появилось желание пересмотреть определение международной единицы длины — метра в системе СИ.

Становится понятным, что спектроскопия открывает перед нами бесконечный мир интереснейших деталей. Возможно, что несохранение четности откроет следующее поколение тонких структур в хиральных молекулах, особенно в связи с развитием методов "холодных" молекул. Однако хватит уже говорить про тиканье часов, пора вернуться к

главной теме — средствам стабилизации частоты и измерения счета циклов — внутренним шестеренкам оптических часов!

5. Измерение частоты с помощью оптической гребенки

Новое определение метра 1983 г. не было подарком для метрологов-практиков, занятых измерением реальных физических объектов, поскольку не были еще сформулированы практические методы применения измерений. Однако оно было благоприятным для ученых, работающих в области метрологии, поскольку их задачей стал поиск хороших стабилизованных лазерных систем, оптимальных для прецизионной метрологии, полевой геодезии, управляющих систем в станках и т.д. Поэтому в течение десятка лет после переопределения был создан по меньшей мере десяток основательно проработанных оптических стандартов частоты, приведенных на рис. 3. Видно, что источники стабильных частот доступны в интервале от 10 мкм (30 ТГц) до ~ 280 нм (~ 1 ПГц), что выходит далеко за рамки видимого диапазона. Удивительным образом частотные интервалы между линиями довольно близки, составляя около 88 ТГц, что приблизительно равно частоте стабилизированного по метану лазера. Это привело к созданию схем, в которых удвоенная частота одного лазера сравнивалась с суммой далеко отстоящих частот двух других лазеров. Остаточный дефицит частоты в несколько ТГц, "сдачу", можно было синтезировать, используя гребенку Коуорги, основанную на использовании радиочастотного модулятора, помещенного внутрь резонатора. Его длина обеспечивала резонансное накопление всех генерируемых боковых полос [32]. Таким методом мы измерили частоту йодного стандарта, равную 532 нм, в единицах разности между удвоенной частотой стандарта системы He—Ne/I₂ (633 нм) и частотой двухфotonного резонанса в Rb (782 нм) [33].

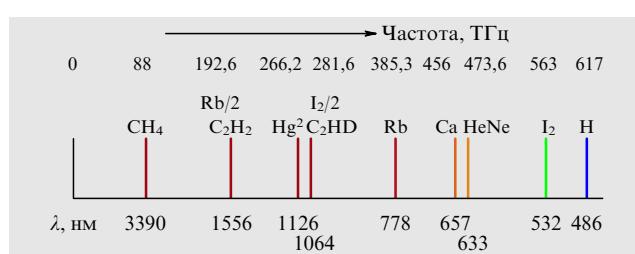


Рис. 3. Лазеры, стабилизированные по нелинейным свободным от доплеровского уширения резонансам в газах.

Таковым было наше первое применение изящного метода оптической гребенки — когерентного ансамбля спектральных линий, чьи частоты точно определяются простой формулой. Наша система по длине волны перекрывала всего несколько нм. Как было бы замечательно перекрыть сразу весь оптический диапазон несколькими миллионами точно известных, опорных частот!

Один из возможных способов уширения спектральной полосы оптической гребенки состоит в использовании внутрирезонаторного усиления для компенсации оптических потерь в модуляторе. Такой способ продемонстрировал Диддамс, поместив внутри резонатора кристалл параметрического генератора света. При частотной модуляции легко наблюдались колебания и генерация сотен боковых полос [34]. При некоторых настройках и фазовых соотношениях для ряда компонент вместо чистого частотно-модулированного сигнала наблюдалась генерация импульсов. Во многих отношениях это был лишь более трудный способ получения режима самоорганизующихся стабильных пугов ультракоротких

импульсов с высокой частотой повторения — режима, из-за которого ученые, занимающиеся лазерами ультракоротких импульсов, особенно ценили лазер на титанате сапфира с самосинхронизацией мод. Техническое богатство этих лазеров и проблем гребенки описано в ряде статей нашей группы [35]. Сделаю здесь лишь одно замечание о взаимосвязи "независимых" направлений в науке — мы переключились на фемтосекундные лазеры на титанате сапфира и больше уже не оглядывались.

В заключительные дни последнего тысячелетия лазерное сообщество случайно получило от лазерной промышленности исключительно важный подарок. Без него частотные гребенки едва ли получили бы широкое распространение. Этим подарком было появление мощных лазеров видимого диапазона, основанных на удвоении частоты твердотельного лазера на ниодиме с диодной накачкой. Их сразу стали использовать вместо довольно шумных и вычурных аргоновых ионных лазеров, которые широко использовались для накачки твердотельных лазеров. Конкуренция вынуждала хорошо конструировать эти новые накачивающие лазеры, так, чтобы за счет стабилизации интенсивности в них получался очень низкий уровень остаточного амплитудного шума. Это свойство является ключевым из-за механизма работы лазеров с самосинхронизацией мод: лазеры на титанате сапфира самосинхронизуются из-за индуцированной собственным излучением оптической линзы, которая уменьшает потери резонатора, когда все лазерные моды синхронизованы и образуют "оптическую пулью" в активной среде [36]. Эта нестационарная линза формируется поперечным градиентом показателя преломления, индуцируется оптической пульей и может существовать только в ее присутствии. Таким образом, резонатор лазера изначально настраивается так, что для образования лазерных мод с низкими потерями требуется дополнительная фокусировка, а после начала работы в импульсном режиме поддерживается стабильная самосинхронизация мод. Пусть длительность импульса составляет всего 10 фс при периоде повторения ~ 10 нс. При идеальной синхронизации отношение пиковой мощности к средней составляет $\sim 10^6$. Типичный лазер излучает $\sim 0,5$ Вт через зеркало с коэффициентом пропускания 5 %. Следовательно, средняя внутренняя мощность равна 10 Вт, а пиковая — 10 МВт, и она фокусируется в пятно радиусом ~ 14 мкм на лазерный кристалл из титаната сапфира. При этом площадь поперечного сечения активной области равна 3×10^{-6} см², так что при пиковой мощности 10 МВт получаем интенсивность 3 ТВт см⁻²! Соответствующее электрическое поле составляет 10 % от межатомного поля в кристалле, так что не удивительно, что при этом оптически индуцируется значительное увеличение показателя преломления (оптический эффект Керра). Понятно теперь, почему столь критичен амплитудный шум лазера: зависимость фазового сдвига в лазерном кристалле от интенсивности приводит к амплитудно-частотному преобразованию и, тем самым, к недопустимому фазовому шуму, если флукутирует накачка. Из-за этого механизма в благоприятном случае ширина линий лазерной гребенки без стабилизации частоты лежит в пределах 3–10 кГц. Подробнее этот эффект исследовался в работе [37].

Таким образом, из лазера выходит пуг импульсов с пиковой мощностью ~ 500 кВт, большая часть которой фокусируется на специальное нелинейное волокно, появившееся в век Оптической Гребенки. Микроструктура волокна такова, что даже при диаметре сердцевины 1,5–2 мкм вся мощность идет по этому волоконному световоду. При этом активная площадь в волокне примерно в 200 раз меньше, чем в лазере, тогда как уровень мощности меньше в ~ 20 раз. Десятикратное увеличение интенсивности дает трехкратный рост поля в кварцевом волокне, доводя его фактически до межатомного, и создает условия для СИЛЬНЫХ нелинейных взаимодействий. Забудьте здесь разложение в ряд мистера Тейлора, здесь царит Нелинейная физика сильных сигналов! Все спектральные компоненты лазера смешиваются друг с другом, радикально уширяя спектр. Структура волокна

такова, что оптические частоты, занимающие широкий диапазон, распространяются по волокну почти с одинаковой скоростью, что сохраняет фазовый синхронизм в данном частотном преобразовании и приводит к накоплению мощности на новых частотах. По существу входной спектр на нескольких сантиметрах длины волокна преобразуется в белый свет и перекрывает октаву (или больше) частот в оптическом диапазоне. На самом деле свет не совсем белый, поскольку в нем еще сохраняется основной пульс исходного лазера, например 100 МГц. Как уже ранее объяснялось, это в действительности генерирует гребенку линий в спектре с шириной компонент, связанной с используемой спектральной разрешающей силой. В конце концов, на уровне ширин порядка 1 кГц или меньше процессы фазовой модуляции, проявляющиеся в широкой полосе во всех лазерах, приводят к уширению линий (если не включена система стабилизации).

6. Взаимодополняемость, кооперация и конкуренция

6.1. Основы

Примечательные по проницательности результаты работы профессора Хэнша в Стэнфорде, опубликованные в 1978 г. [38], уже тогда продемонстрировали возможность использования импульсно-периодического лазера для формирования оптической гребенки, которая может служить оптической линейкой. Однако ширина полосы перекрываемого спектра была слишком мала для многих измерений, всего 1 или 2 ГГц. Предложенный метод не нашел широкого применения, поскольку такие интервалы перекрывались другими способами. В то время по существу не было путей технического усовершенствования. Принцип работал, а приборы нет.

Трудоемкий, прямолинейный, "правительственный" подход к измерению частоты (повторявший пионерскую работу группы частотных измерений Али Джавана, занимавшегося частотными измерениями в МИТ [40]) был продемонстрирован в НБС в 1972 г. [39]. Это была героическая по усилиям работа, но только национальные лаборатории стандартов проявили к ней интерес. Лазер выстраивался за лазером, частота последующего связывалась с удвоенной частотой предыдущего, шаг за шагом формируя измерительную цепь. Эта работа требовала создания схем стабилизации частоты и фазы, использующихся сейчас довольно широко. Мы получили "один типичный" физический результат, измерив совместными и продолжительными усилиями группы НБС единственную лазерную частоту [41]. Но этого оказалось достаточно, чтобы запустить процесс нового определения метра.

6.1.1. Схема "Разделяй и властвуй". В замечательной статье 1990 г. профессор Хэнш с сотрудниками предложили отличный способ упрощения частотных цепей: следовало использовать разность частот двух лазеров в качестве основного строительного элемента каскадной цепи, связывающей далекие участки спектра [42]. В таком подходе все лазеры в ансамбле имеют почти одинаковые длины волн и по существу могут быть сделаны дублированием одного базового диодного лазера. Затем, используя нелинейные кристаллы, быстрые фотоприемники и электронные схемы фазовой привязки, можно связывать между собой частоты, переходя от радиочастотного диапазона к оптическому. Эта система тоже оказалась непростой и довольно трудоемкой, однако в Гархинге она была реализована и дала хорошие результаты. Аналогичная схема, основанная на сравнении разностных частот, была создана в Национальном научно-исследовательском совете (NRC) на базе CO₂-лазеров [43]. Анализ такого рода цепей показывает, что первые 9–10 ступеней из 14 служат только для того, чтобы добраться до низкочастотного края терагерцовой области.

Затем в 1994 г. появился метод Куроги и Оцу, в котором использовалось возбуждение сразу многих мод резонатора и

который позволял одним шагом достичь сразу нескольких ТГц [32]. При продвижении в оптический диапазон в этих системах возникает проблема роста фазового шума, поскольку получаемая оптическая частота является высокой гармоникой исходного радиочастотного сигнала. Но тут появилась фемтосекундная лазерная гребенка, которая открыла более простой и лучший путь (см. ниже).

6.2. Краткая история оптического чуда 1999–2000 гг.

6.2.1. Волокна для уширения спектра. К этому времени наша группа в JILA уже высоко оценила фемтосекундные лазеры, как источники импульсного лазерного света. Наши лазеры имели ширину полосы ~80 нм с центром на 800 нм. Однако оптические стандарты частоты, которые мы хотели связать, лежали на длинах волн 1064 нм (основная частота стабилизированного по йоду неодимового лазера) и 778 нм (диодный лазер, стабилизированный по двухфотонному переходу в рубидии). Было установлено, что в обычном волокне, используемом в линиях связи, доступное уширение спектра едва перекрывает необходимую величину — 104 ТГц. Эта работа была направлена в печать в конце сентября 1999 г. [44].

6.2.2. Микроструктурные волокна с большой нелинейностью. В июне 1999 г. на Конференции по лазерам и электрооптике группа из Лабораторий Белла выступила с впечатляющей презентацией на постдэйлайновской секции [45], во время которой было продемонстрировано, как нормальный импульс фемтосекундного лазера при прохождении нескольких метров специального волокна радикально изменял свой цвет. Это волокно создавало коллимированный белый свет в форме стабильно повторяющихся импульсов, в точности так, как Тед Хэнш постулировал в своем (неопубликованном) проекте по измерению частоты. При использовании такого ранее неизвестного источника излучения все остальное становилось возможным. (Лицезрение этого импульсно-периодического лазерного белого света мгновенно убедило меня, что концепция Теда действительно может быть физически осуществлена! Без такого лазера, основанного на повторяющихся импульсах белого света, у нас не было никаких шансов.) В конечном счете после чудесного появления в лаборатории JILA образца этого волшебного волокна длительные призывы к научному сотрудничеству, обращенные к производителям волокна, стали ненужными. Концепция запрещенной зоны или фотонных кристаллов в применении к оптическим волокнам была введена Найтом с сотрудниками, указавшими на возможность управления пространственными модами и эффективной дисперсией групповой скорости с помощью определенной конфигурации механических отверстий [46]. Наши первые эксперименты в JILA были выполнены с использованием волокна, вытянутого из заготовки, сделанной сотрудником Лабораторий Белла Робертом С. Виндлером 10 сентября 1997 г. на установке собственной разработки. Большой набор структур волокон был исследован П. Расселом с сотрудниками в Бате, Великобритания.

6.3. Гонка началась

Конечно, в JILA мы не знали, что группа в Гархинге уже перешла от планов к первой демонстрации фазового когерентного перехода между излучением радиочастотного и видимого диапазонов и в ноябре 1999 г. направила свою статью в редакцию журнала *Phys. Rev. Letters*. Это произошло даже раньше, чем мы получили волшебное волокно! Они использовали гребенку с довольно ограниченной шириной полосы, 44 ТГц, но их делительные каскады могли связать оптическую частоту с 28-й гармоникой разности крайних частот гребенки. Этот прекрасный результат был наконец опубликован 10 апреля 2000 г. Тем временем группа в JILA упорно работала с белым светом, генерируемым волшебным волокном, пытаясь осуществить и продемонстрировать нашу систему фазово-когерентной стабилизации частоты расположенной между несущей и огибающей в терминах частоты

повторения лазерных импульсов. В описании изобретения мы назвали ее "схемой с самопривязкой". Созданная нами электронная система управления имела цифровой ступенчатый переключатель, позволявший установить любое целое кратное от фазового набега, отвечавшего 1/16 периода следования импульсов. Экспериментальная демонстрация в JILA была основана на интерферометрическом измерении разности фаз между несущей и частотойгибающей между двумя импульсами, разделенными одним промежуточным импульсом. В конце концов, новая электроника заработала, эксперимент дал четкие результаты, и наше сообщение было опубликовано 28 апреля 2000 г. в *Science* [49]. Успех был торжественно отмечен совместной статьей групп из Гархинга, Лабораторий Белла и JILA, опубликованной в *Phys. Rev. Letters* 29 мая 2000 г. [50]. В следующем году появилась лавина работ по абсолютным измерениям оптических частот, выполненным в лабораториях по всему миру. Эта славная страница истории оптики в значительной степени является следствием глубокого взаимного уважения научных групп, полной открытости, поощрявшейся частым обменом между двумя отчаянно конкурировавшими группами постдоками Скоттом Диддамсом и Томасом Удемом.

6.4. Некоторые результаты измерений частоты

По всему миру активно исследовалось много лазерных стандартов частоты, так что, когда произошел прорыв с Гребенкой, нашлось много объектов для измерений. Как правило, они проводились впервые. Некоторые из этих результатов приведены в таблице.

В 2000 г. началось стремительное распространение техники, основанной на применении оптической гребенки, принося с собой существенное упрощение измерений оптической частоты и неуклонный рост точности. Очень скоро после первых измерений стали возникать ситуации, когда точность измерений, обеспечиваемая гребенкой, стала превосходить точность измеряемого стандарта. Испытания, проведенные недавно в NIST, BIPM и ECNU [51], подтвердили результаты выполненных ранее в MPQ экспериментов [52], в которых было показано, что метод гребенки надежно работает для измерений с точностью более 18 знаков.

6.5. Оптический стандарт частоты на молекулах йода

Благодаря отличным характеристикам и сравнительной простоте, лазер на Nd:YAG, стабилизированный по йоду, является ярким примером стабилизованных лазеров. Один из таких созданных в Японии лазеров работает в условиях багажного отделения самолета, демонстрируя при этом пре-

Таблица. Измеренные оптические частоты. Приведены: опорные атомы/молекулы, длины волн их переходов, первый автор, институт, название журнала и дата. Первое измерение с помощью фемтосекундной гребенки было сделано Райхертом и др. для водорода. Первое прямое оптическое фемтосекундное измерение было проведено группой из JILA (Джонс). Несколько малы сроки между публикациями!

Ca	657 нм	Schnatz	PTB	PRL	1 янв. 1996
Rb	780 нм	Ye	JILA	Opt. Lett.	авг. 1996
C ₂ H ₂	1500 нм	Nakagawa	NRLM	JOSA-B	дек. 1996
I ₂	532 нм	Hall	JILA	IEEE Instr. Meas.	апр. 1999
Sr ⁺	674 нм	Bernard	NRC	PRL	19 апр. 1999
In ⁺	236 нм	v. Zanthier	MPQ	Opt. Comm.	авг. 1999
H	243 нм	Reichert	MPQ	PRL	10 апр. 2000
Rb	778 нм	D. Jones	JILA	Science	28 апр. 2000
I ₂	532 нм	Diddams	JILA	PRL	29 мая 2000
H	243 нм	Niering	MPQ	PRL	12 июня 2000
Yb ⁺	467 нм	Roberts	NPL	PRA	7 июля 2000
In ⁺	236 нм	v. Zanthier	MPQ	Opt. Lett.	1 дек. 2000
Ca	657 нм	Stenger	PTB	PRA	17 янв. 2001
Hg ⁺	282 нм	Udem	NIST	PRL	28 мая 2001
Ca	657 нм	Udem	NIST	PRL	28 мая 2001
Yb ⁺	435 нм	Stenger	PTB	Opt. Lett.	5 окт. 2001

красные характеристики [53]. Из-за большой массы молекулы йода доплеровская поправка второго порядка для этой системы составляет всего 5×10^{-13} , и вполне возможно, что при улучшенной технической реализации независимая воспроизведимость может достигнуть величины в пять раз меньшие приведенной. В частности, проблемой по-прежнему остается использование метода модуляции без смещения. Преимуществами данной системы являются компактность и потенциально разумная цена. Добавляя оптическую гребенку, мы получаем оптические часы [54], которые могут пользоваться спросом (рис. 4). Относительная нестабильность частоты каждой из 1 миллиона линий гребенки равна $\sim 4 \times 10^{-14}/\tau^{1/2}$.

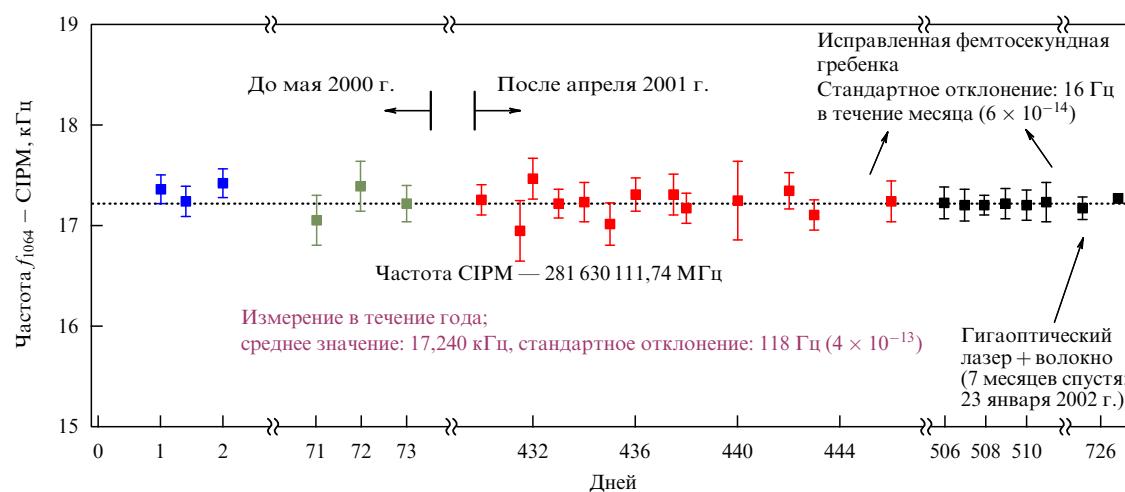


Рис. 4. Долговременная стабильность частоты оптических часов на основе йода. Рисунок показывает улучшение и малый частотный сдвиг частоты оптических часов по сравнению с предыдущими измерениями, проведенными со значительно меньшей точностью. С улучшением технологий 2002 г. погрешность была еще уменьшена до $\sim 6 \times 10^{-14}$.

Недавно стали доступны стабильные одночастотные лазеры на Yb:YAG, которые могут работать на длине волны 1029 нм. Частота излучения этих лазеров может стабилизироваться по линии йода с длиной волны 514,5 нм. Ширина этой линии в пять раз меньше, чем у линии на 532 нм, так что может быть получена еще более высокая стабильность [55]. Этую же длину волны генерируют и волоконные системы.

7. Что же будет дальше?

В результате, кроме упрощения измерения оптических частот, возникли новые невероятно богатые возможности и средства, которые, в свою очередь, поддерживают прогресс в областях, их породивших. В этой статье я не могу даже пытаться описать огромное число тонких физических эффектов, которые обычно относят к разным областям, но которые теперь, оказавшись взаимосвязанными, могут привести к замечательным и многообещающим успехам в исследовательских методах оптики. Все же я приведу несколько примеров.

После лихорадки, сопровождавшей измерения частоты с помощью оптических гребенок первого поколения, приведенные в таблице, группа Йе начала работу над применениеми гребенок второго поколения, которые включали: малошумящую временную синхронизацию (~ 1 фс) лазерных генераторов ультракоротких импульсов [56]; когерентное сшивание спектров независимых фемтосекундных лазеров для расширения спектра и уменьшения длительности составного импульса [57]; прецизионное измерение оптических нелинейностей с использованием фазовой чувствительности радиочастотных методов [58]; когерентное накопление нескольких сотен последовательных импульсов с последующим извлечением их полной энергии в серии более мощных импульсов с меньшей частотой повторения [59]. Отметим и исследование временной стабильности физических констант, проводимое группой в Гархинге [60]. К захватывающим темам исследований приложений оптических гребенок третьего поколения теперь включают: установление связи с субгерцовой точностью между различными промежуточными стандартами частоты, разнесенными как по спектру, так и в пространстве, обеспечение прецизионной дистанционной синхронизации полей в резонаторах ускорителей, создание стабильных опорных генераторов для больших решеточных телескопов радиочастотного диапазона, потенциальное уменьшение относительного фазового шума опорных генераторов телескопов, зондирующих глубокий космос (NASA, VLBI и т.д.). И это только часть планов на первые пять лет.

А следующие проекты? Не сделать ли такую гребенку, чтобы одна из ее гармоник смогла пронизировать ядерный мёссбауэровский резонанс с энергией 14,4 кэВ в ^{57}Fe ? Другая узкая линия с энергией 6,2 кэВ есть у ^{181}Ta . А как насчет определения биологической активности проверяемого лекарства с помощью метода КАРС с параллельной обработкой и использованием синхронизованных лазерных импульсов, которые будут возбуждать рамановские резонансы определенных лиганд одной молекулы, притянутой и прилипшей к участку поверхности с испытуемой белковой бляшкой?

С более общей точки зрения, мы находимся сейчас почти в уникальной точке развития науки, когда у нас есть поразительная возможность "понять" практически все явления, точно вычислить предсказания теории и включить большое число деталей в наши модели. Вспомним, например систему глобального позиционирования (GPS), в которой такие области, как гравитация и теория относительности успешно слились с нашими изощренными атомными часами, не говоря уже о радиотехнике и компьютерном матобеспечении, так что в итоге мы получили гармоничное и очень полезное для практики средство. Примечательно, что система проста для конечного пользователя. Мы должны рассматривать успех этой системы как одно из самых совершенных технических достижений за всю историю.

Работа, отмеченная в 2005 г. Нобелевской премией, это еще одно впечатляющее, крупное и многообещающее достижение, и мы можем ожидать, что оно проявят свойства того же размаха и характера, что отмечались только что по отношению к GPS. Однако в первые моменты после его рождения наша оптоэлектронная технология еще слишком нова и не может продемонстрировать достаточно впечатляющих успехов, не выходя при этом за рамки первоначальных интересов специалистов, занимающихся стандартами частоты, и метрологов. Мы знаем, что сейчас точность оптических измерений ограничена существующим радиочастотным стандартом на уровне "всего" 15 значащих цифр, в то время, как технология гребенки позволяет на самом деле сличить две оптические частоты с точностью, большей на несколько порядков. Если история физики может служить путеводителем, то мы вполне реалистично можем ожидать приятных сюрпризов по мере того, как новые возможности будут все более распространяться и использоваться в оригинальных фундаментальных измерениях растущим изобретательным сообществом ученых, занимающихся "фундаментальной физикой". Оглядываясь на все развитие Науки, станет ли кто держать пари, что всю русскую матрешку Природы мы уже раскрыли и дошли до самой последней?

Благодарности. Радость общения с замечательными молодыми учеными, несомненно, является одним из сокровищ жизни. Среди многих таких я должен особенно выделить и поблагодарить Джима Бергквиста, Лео Хольберга, Мяо Жу и Джун Йе за их энтузиазм и уникальный вклад в программу работ JILA. Горячая благодарность руководству НИСТ за одобрение и многолетнюю финансовую поддержку серии рискованных проектов в области лазерной спектроскопии. Лео Хольберг, Стив Кандиф и я были особенно рады поддержке проекта синтезатора частоты на основе фемтосекундной гребенки, предложенного в 1999 г. К этим экспериментам были дополнительно привлечены отличные сотрудники — Скотт Диддамс и Дэвид Джонс, а с возвращением Джун Йе в 1999 г. и созданием его собственной группы научный потенциал JILA необыкновенно возрос. Как обычно, когда нас посещал профессор Лонг Шенг Ма из Шанхая, наша работа сильно ускорялась. Такие ученые, как Кристиан Борде, навевшие нас, оставался нашим сотрудником, хотя прошло уже тридцать лет с той поры, когда он работал в JILA. Я с удовольствием выражают признательность фондам NSF, ONR, AFOSR и NASA за частичную поддержку и НИСТ за поддержку в течение более чем сорока лет. Я многое получил от своего руководителя в НБС, Питера Л. Бендера, который щедро делился со мной идеями и возможностями. Но больше всего я признателен терпеливому и проницательному другу всей моей жизни, Линде Холл, за ее понимание, титанические усилия и вклад в эту научную работу и, что еще более важно, за нашу счастливую и веселую совместную жизнь. Было замечательно в течение 45 лет наблюдать развитие экспериментов и череду технических достижений, которые в результате привели к созданию оптической гребенки. Сейчас мы обсуждаем, не пора ли очистить мой кабинет в JILA, уложить вещи в наш новый дом-автоприцеп и отправиться в путь для познания других сфер жизни.

8. Приложение. Полная история гребенки в простом изложении

Я рад, что Вы спросили, как понимать частотные гребенки. Пусть у нас есть синусоидальное напряжение или поле. Тогда зависимость от времени представляет собой гладкие колебания, а в зависимости от частоты есть только одна фурье-компоненты, узкая линия. Добавим теперь в эту волну гармоники. В спектре появятся новые линии в точности на частотах гармоник, а временная зависимость станет довольно сложной. Подбирая фазы этих гармоник, мы можем начать синтезировать некое возмущение во временной зависимости, напоми-

нающее импульс, точнее, серию одинаковых импульсов. Продолжим увеличение числа гармоник. Чем больше мы их добавляем, тем более короткий импульс мы можем синтезировать и, конечно, тем богаче спектр этого сигнала. Продолжая добавлять когерентные гармоники исходной синусоиды, мы получим огромное количество линий в спектре. Если частота исходного источника равна 100 МГц и мы хотим воспроизвести описанный подход и дойти до оптического диапазона, потребуется несколько миллионов гармоник. При правильном подборе фаз длительность импульса может быть в 10^6 раз меньше, чем период исходной синусоиды. Итак, мы действительно можем ожидать очень коротких импульсов и очень широкой спектральной полосы.

Эта ситуация хорошо согласуется с результатом фурье-анализа одиночного импульса. Такой импульс имеет фурье-компоненты на всех частотах с почти постоянными амплитудами, которые постепенно уменьшаются на частотах выше частоты, равной обратной длительности импульса. Если мы хотим проанализировать спектр последовательности повторяющихся импульсов, то нам потребуется спектрометр, полоса пропускания которого уже, чем частота следования импульсов — иначе мы не разрешим структуру гармоник. Однако узкая полоса пропускания соответствует большему времени отклика. Поэтому сигнал на выходе спектрометра, настроенного на определенную длину волны, будет представлять результат когерентного сложения вкладов от многих импульсов. Отдельный импульс имеет широкий и непрерывный спектр, а спектральные амплитуды для многих импульсов интерферируют, что приводит к модуляции спектра. Добавляя со временем большее число импульсов (при более высоком спектральном разрешении), мы получим более глубокую модуляцию. В итоге, мы получим фурье-гармоники в виде очень узких эквидистантных линий. Пока мы не столкнемся с такими техническими проблемами, как фазовый шум в частоте следования, наблюдаемые линии будут тем остree, чем выше будет разрешение при анализе сигнала. Так что спектр действительно напоминает "гребенку". Во всем этом можно спокойно самостоятельно убедиться дома, это проще сделать в области электроники, но оптика и электроника, конечно же, работают одинаково.

На самом деле в отношении фемтосекундных лазеров, используемых при генерации этих импульсов, имеется еще один интересный момент. Лазер может генерировать колебания на многих модах своего резонатора, определяемых условием воспроизведения фазы после полного обхода резонатора. Все вовлеченные моды имеют свое продольное квантовое число, означающее, сколько полных оптических периодов содержится в замкнутой петле. Ясно, что это условие содержит фазовую скорость, которая зависит от длины волны, и предполагает усреднение по многим оптическим элементам, через которые проходит свет. Другое практически важное обстоятельство связано с тем, что лазер работает в самоподдерживающемся режиме повторяющихся импульсов. Фактически это означает, что оптические потери резонатора могут быть сделаны достаточно большими, чтобы подавлять генерацию до тех пор, пока фазы мод резонатора не подберутся таким образом, что сформируется пространственная дельта-функция. Особенно важно, чтобы импульс был коротким при прохождении кристалла титаната сапфира, поскольку короткому импульсу соответствует очень высокая пиковая мощность, которая взаимодействует с материалом лазерного стержня по квадратичному закону (оптический эффект Керра), образуя положительную линзу с максимумом показателя преломления на оси, где интенсивность максимальна. Таким образом, стабильная самоорганизующаяся генерация импульсов происходит в лазере с избыточно большими дифракционными потерями (не хватает положительной оптической силы линзы), но эта ситуация периодически исправляется световой пульс, которая, используя свое воздействие на кристалл, увеличивает показатель преломления и в необходимой мере уменьшает потери.

Огибающая импульса, которая описывает эту световую пулью, является результатом суперпозиции многих лазерных мод, и если временные задержки зависят от длины волны, форма огибающей будет эволюционировать. Мы обсуждаем сейчас понятие групповой скорости, согласно которому форма возмущения не меняется во времени, только если все частоты распространяются с одинаковой скоростью. В любом реальном лазере необходимо использовать некоторые оптические элементы, которые должны компенсировать задержку голубого света относительно красного. Чтобы получить как можно более короткий импульс, необходимо, чтобы времена обхода резонатора были строго одинаковыми, хотя, как нетрудно понять, задача усложняется, если учсть, что лазерный импульс сам влияет на времена задержки. В любом случае свет, излучаемый из выходного зеркала лазера, представляет собой регулярную последовательность коротких импульсов, которые при спектральном анализе имеют структуру гребенки. Однако каждый раз, когда импульс приходит на поверхность зеркала, быстрые оптические колебания световой волны (формирующей этот импульс) имеют, вообще говоря, разные фазы. От импульса к импульсу фаза смещается то вперед, то назад, так что гребенка оптических частот может быть немного смещена относительно идеальных фурье-гармоник, которые мы перед этим рассматривали. В обычном случае имеется постоянный сдвиг фазы в каждом импульсе, при котором сдвиг фазы относительно гармоники на частоте следования импульсов происходит с постоянной скоростью. Мы разработали электронно-оптическую схему, названную схемой "самопривязки", которая позволяет стабилизировать эту добавочную частоту — частоту расстройки между несущей и огибающей — так чтобы ее отношение к частоте следования было равно определенному задаваемому числу. Например, если его выбрать равным нулю, мы получим чисто гармоническую гребенку. Если выбрать это отношение равным $1/2$, сдвиг гребенки будет составлять $1/2$ от базовой частоты повторения, которая сама, конечно, равна промежутку между линиями гребенки.

Перевел с английского В.Л. Величанский
Научная редакция перевода А.М. Семихатова

Список литературы

1. BIPM: Bureau Intern. des Poids et Mesures, http://www.bipm.org/en/si/si_constants.html
2. Это масса, кг; время, с; длина, м; ток, А; температура, К; количество вещества, моль; единица силы света, свеча
3. NIST: National Institute of Standards and Technology, <http://www.nist.gov/div821/museum/timeline.htm>
4. Flowers J L, Petley B W "Progress in our knowledge of the fundamental constants of physics" *Rep. Prog. Phys.* **64** 1191 (2001)
5. Steiner R L, Williams E R, Newell D B, Liu R "Towards an electronic kilogram: an improved measurement of the Planck constant and electron mass" *Metrologia* **42** 431 (2005)
6. Bordé C J "Base units of the SI, fundamental constants and modern quantum physics" *Philos. Trans. R. Soc. London Ser. A: Math. Phys. Eng. Sci.* **363** 2177 (2005)
7. Sobel D *Longitude: the True Story of a Lone Genius Who Solved the Greatest Scientific Problem of His Time* (New York: Penguin Books, 1995)
8. Kasevich M A, Riis E, Chu S, DeVoe R G "rf spectroscopy in an atomic fountain" *Phys. Rev. Lett.* **63** 612 (1989)
9. Clairon A, Laurent P, Santarelli G, Ghezali S, Lea S N, Bahoura M "A cesium fountain frequency standard: preliminary results" *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **44** 128 (1995)
10. Heavner T P, Jefferts S R, Donley E A, Shirley J H, Parker T E "NIST-F1: recent improvements and accuracy evaluations" *Metrologia* **42** 411 (2005)
11. Gibble K, Chu S "Laser-cooled Cs frequency standard and a measurement of the frequency shift due to ultracold collisions" *Phys. Rev. Lett.* **70** 1771 (1993)
12. Polzik E S, Carri J, Kimble H J "Atomic spectroscopy with squeezed light for sensitivity beyond the vacuum-state limit" *Appl. Phys. B* **55** 279 (1992)

13. Drever R W P, Hall J L, Kowalski F V, Hough J, Ford G M, Munley A J, Ward H "Laser phase and frequency stabilization using an optical resonator" *Appl. Phys. B* **31** 97 (1983)
14. Young B C, Cruz F C, Itano W M, Bergquist J C "Visible lasers with subhertz linewidths" *Phys. Rev. Lett.* **82** 3799 (1999)
15. Young B C, Rafac R J, Beall J A, Cruz F C, Itano W M, Wineland D J, Bergquist J C "Hg⁺ optical frequency standard: recent progress", in *Laser Spectroscopy: Proc. of the XVII Intern. Conf., Aviemore, Scotland, UK, 19–24 June 2005* (Ed. E A Hinds) (Hackensack, NJ: World Scientific, 2005) p. 433
16. Notett M, Ma L-S, Ye J, Hall J L "Simple and compact 1-Hz laser system via an improved mounting configuration of a reference cavity" *Opt. Lett.* **30** 1815 (2005)
17. Hall J "The laser absolute wavelength standard problem" *IEEE J. Quantum Electron.* **QE-4** 638 (1968)
18. Barger R L, Hall J L "Pressure shift and broadening of methane line at 3.39 μ studied by laser-saturated molecular absorption" *Phys. Rev. Lett.* **22** 4 (1969)
19. Hall J L "Optical frequency measurement: 40 years of technology revolutions" *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **6** 1136 (2000)
20. Letokhov V S, Chebotayev V P *Nonlinear Laser Spectroscopy* (Berlin: Springer-Verlag, 1977)
21. Stenholm S *Foundations of Laser Spectroscopy* (New York: Wiley, 1984)
22. Levenson M D, Kano S *Introduction to Nonlinear Laser Spectroscopy* (Boston: Academic Press, 1988)
23. Багаев С Н, Василенко Л С, Дмитриев А К, Скворцов М Н, Чеботаев В П "Сужение нелинейных резонансов в газах низкого давления" *Письма в ЖЭТФ* **23** 399 (1976) [Bagayev S N, Vasilenko L S, Dmitriev A K, Skvortsov M N, Chebotayev V P "Narrowing of nonlinear resonances in low-pressure gases" *JETP Lett.* **23** 360 (1976)]
24. Bordé C J, Hall J L, Kunasz C V, Hummer D G "Saturated absorption line shape: Calculation of the transit-time broadening by a perturbation approach" *Phys. Rev. A* **14** 236 (1976)
25. Bethlehem H L, Berden G, Meijer G "Decelerating neutral dipolar molecules" *Phys. Rev. Lett.* **83** 1558 (1999)
26. Hudson E R, Lewandowski H J, Sawyer B C, Ye J "Cold molecule spectroscopy for constraining the evolution of the fine structure constant" *Phys. Rev. Lett.* **96** 143004 (2006)
27. Ma L-S, Ye J, Dubé P, Hall J L "Ultrasensitive frequency-modulation spectroscopy enhanced by a high-finesse optical cavity: theory and application to overtone transitions of C₂H₂ and C₂HD" *J. Opt. Soc. Am. B* **16** 2255 (1999)
28. Ziskind M, Daussy C, Marrel T, Chardonnet Ch "Improved sensitivity in the search for a parity-violating energy difference in the vibrational spectrum of the enantiomers of CHFCIBr" *Eur. Phys. J. D* **20** 219 (2002)
29. Svanberg S *Atomic and Molecular Spectroscopy: Basic Aspects and Practical Applications* 2nd ed. (Berlin: Springer-Verlag, 1992)
30. Hall J L, Bordé C J, Uehara K "Direct optical resolution of recoil effect using saturated absorption spectroscopy" *Phys. Rev. Lett.* **37** 1339 (1976)
31. Bagayev S N, Chebotayev V P, Dmitriev A K, Om A E, Nekrasov Yu V, Skvortsov B N "Second-order Doppler-free spectroscopy" *Appl. Phys. B* **52** 63 (1991)
32. Kourogi M, Enami T, Ohtsu M "A coupled-cavity monolithic optical frequency comb generator" *IEEE Photon. Technol. Lett.* **8** 1698 (1996)
33. Hall J L, Ma L-S, Taubman M, Tiemann B, Hong F-L, Pfister O, Ye J "Stabilization and frequency measurement of the I₂-stabilized Nd:YAG laser" *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **48** 583 (1999)
34. Diddams S A, Ma L-S, Ye J, Hall J L "Broadband optical frequency comb generation with a phase-modulated parametric oscillator" *Opt. Lett.* **24** 1747 (1999)
35. Hall J L, Ye J, Diddams S A, Ma L-S, Cundiff S T, Jones D J "Ultrasensitive spectroscopy, the ultrastable lasers, the ultrafast lasers, and the seriously nonlinear fiber: a new alliance for physics and metrology" *IEEE J. Quantum Electron.* **QE-37** 1482 (2001)
36. Salin F, Squier J, Piche M "Mode locking of Ti:Al₂O₃ lasers and self-focusing: a Gaussian approximation" *Opt. Lett.* **16** 1674 (1991)
37. Holman K W, Jones R J, Marian A, Cundiff S T, Ye J "Detailed studies and control of intensity-related dynamics of femtosecond frequency combs from mode-locked Ti:Sapphire lasers" *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **9** 1018 (2003)
38. Eckstein J N, Ferguson A I, Hänsch T W "High-resolution two-photon spectroscopy with picosecond light pulses" *Phys. Rev. Lett.* **40** 847 (1978)
39. Evenson K M, Wells J S, Petersen F R, Danielson B L, Day G W, Barger R L, Hall J L "Speed of light from direct frequency and wavelength measurements of the methane-stabilized laser" *Phys. Rev. Lett.* **29** 1346 (1972)
40. Sanchez A, Davis C F, Liu K C, Javan A "The MOM tunneling diode: Theoretical estimate of its performance at microwave and infrared frequencies" *J. Appl. Phys.* **49** 5270 (1978)
41. Jennings D A, Pollock C R, Petersen F R, Drullinger R E, Evenson K M, Wells J S, Hall J L, Layer H P "Direct frequency measurement of the I₂-stabilized He-Ne 473-THz (633-nm) laser" *Opt. Lett.* **8** 136 (1983)
42. Telle H R, Meschede D, Hänsch T W "Realization of a new concept for visible frequency division: phase locking of harmonic and sum frequencies" *Opt. Lett.* **15** 532 (1990)
43. Whitford B G "Measurement of the absolute frequencies of CO₂-laser transitions by multiplication of CO₂-laser difference frequencies" *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **29** 168 (1980)
44. Diddams S A, Jones D J, Ma L-S, Cundiff S T, Hall J L "Optical frequency measurement across a 104-THz gap with a femtosecond laser frequency comb" *Opt. Lett.* **25** 186 (2000)
45. Ranka J K, Windeler R S, Stentz A J "Visible continuum generation in air-silica microstructure optical fibers with anomalous dispersion at 800 nm" *Opt. Lett.* **25** 25 (2000)
46. Knight J C, Birks T A, Russell P St J, Atkin D M "All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding" *Opt. Lett.* **21** 1547 (1996)
47. Windeler R S, private communication to J L Hall (May 2006)
48. Reichert J, Niering M, Holzwarth R, Weitz M, Udem Th, Hänsch T W "Phase coherent vacuum-ultraviolet to radio frequency comparison with a mode-locked laser" *Phys. Rev. Lett.* **84** 3232 (2000)
49. Jones D J, Diddams S A, Ranka J K, Stentz A, Windeler R S, Hall J L, Cundiff S T "Carrier-envelope phase control of femtosecond mode-locked lasers and direct optical frequency synthesis" *Science* **288** 635 (2000)
50. 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 "Direct link between microwave and optical frequencies with a 300 THz femtosecond laser comb" *Phys. Rev. Lett.* **84** 5102 (2000)
51. Ma L-S, Bi Z, Bartels A, Robertsson L, Zucco M, Windeler R S, Wilpers G, Oates C, Hollberg L, Diddams S A "Optical frequency synthesis and comparison with uncertainty at the 10⁻¹⁹ level" *Science* **303** 1843 (2004)
52. Udem Th, Holzwarth R, Hänsch T W "Optical frequency metrology" *Nature* **416** 233 (2002)
53. Hong F-L, Ishikawa J, Sugiyama K, Onae A, Matsumoto H, Ye J, Hall J L "Comparison of independent optical frequency measurements using a portable iodine-stabilized Nd:YAG laser" *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **52** 240 (2003)
54. Ye J, Ma L S, Hall J L "Molecular iodine clock" *Phys. Rev. Lett.* **87** 270801 (2001)
55. Cheng W-Y, Chen L S, Yoon T H, Hall J L, Ye J "Sub-Doppler molecular-iodine transitions near the dissociation limit (523–498 nm)" *Opt. Lett.* **27** 571 (2002)
56. Shelton R K, Foreman S M, Ma L-S, Hall J L, Kapteyn H C, Murnane M M, Noteff M, Ye J "Subfemtosecond timing jitter between two independent, actively synchronized, mode-locked lasers" *Opt. Lett.* **27** 312 (2002)
57. Shelton R K, Ma L-S, Kapteyn H C, Murnane M M, Hall J L, Ye J "Phase-coherent optical pulse synthesis from separate femtosecond lasers" *Science* **293** 1286 (2001)
58. Fortier T M, Jones D J, Ye J, Cundiff S T "Highly phase stable mode-locked lasers" *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **9** 1002 (2003)
59. Jones R J, Ye J "High-repetition-rate coherent femtosecond pulse amplification with an external passive optical cavity" *Opt. Lett.* **29** 2812 (2004)
60. Fischer M, Kolachevsky N, Zimmermann M, Holzwarth R, Udem Th, Hänsch T W, Abgrall M, Grünert J, Maksimovic I, Bize S, Marion H, Dos Santos F P, Lemonde P, Santarelli G, Laurent P, Clairon A, Salomon C, Haas M, Jentschura U D, Keitel C H "New limits on the drift of fundamental constants from laboratory measurements" *Phys. Rev. Lett.* **92** 230802 (2004)