

75 ЛЕТ ФИЗИЧЕСКОМУ ИНСТИТУТУ ИМ. П.Н. ЛЕБЕДЕВА РАН

## Лазерные стандарты частоты в ФИАНе

В.Л. Величанский, М.А. Губин

*Дан краткий обзор работ лаборатории стандартов частоты Отделения квантовой радиофизики ФИАН по одному из важных направлений развития квантовых стандартов частоты — созданию сверхминиатюрных часов на основе эффекта когерентного пленения населённости в атомах щелочных металлов с накачкой полупроводниковыми лазерами (стабильность частоты  $10^{-11}$ – $10^{-12}$ , при времени усреднения  $\sim 10^4$  с) и компактных задающих генераторов/оптических часов со стабильностью частоты  $10^{-14}$ – $10^{-15}$  (при времени усреднения 1 с) на основе He–Ne/CH<sub>4</sub>- и волоконного фемтосекундного лазеров.*

PACS numbers: 01.30.Bb, 06.30.Ft, 42.55.Px, 42.62.Eh

DOI: 10.3367/UFNr.0179.200911h.1219

## Содержание

1. Введение (1219).
  2. Основные направления деятельности лаборатории (1220).
    - 2.1. Высококогерентные полупроводниковые лазеры.
    - 2.2. Сверхминиатюрные атомные часы.
    - 2.3. He–Ne/CH<sub>4</sub>-оптический стандарт частоты.
    - 2.4. Компактные фемтосекундные метановые оптические часы.
  3. Заключение (1223).
- Список литературы (1223).

## 1. Введение

На порядок каждые 10 лет — таков средний темп повышения стабильности и точности квантовых стандартов частоты (КСЧ), начиная с 50-х годов XX века. Эти цифры отражают внутренний потенциал квантовой радиофизики и демонстрируют один из её важнейших вкладов в цивилизацию.

История КСЧ в ФИАНе началась с задачи сужения линии излучения генераторов для радиоспектроскопии. Как только Н.Г. Басов и А.М. Прохоров тысячекратно сузили линию излучения, создав мазер на молекуле аммиака [1, 2], стало ясно, что его можно превратить в источник высокостабильных колебаний, т.е. в стандарт частоты и постоянно работающие часы с исключительно равномерным ходом. Разработки ФИАНа конца 1950-х — начала 1960-х годов (А.Н. Ораевский, Г.М. Страховский, В.С. Зуев, В.В. Никитин, Е.П. Маркин и др.) послужили основой создания в СССР водородных мазеров (частота

излучения 1,4 ГГц) отраслевыми институтами и промышленными предприятиями. Вплоть до настоящего времени водородные мазеры являются наряду с цезиевыми атомно-лучевыми стандартами, основой Государственной службы времени и частоты, обеспечивая навигационную безопасность страны.

С созданием лазеров стало реальным повышение на 4–5 порядков стабильности частоты и точности воспроизведения значения частоты квантового перехода, выбранного как эталонный, поскольку оптические стандарты частоты (ОСЧ) основаны на переходах с более высокой несущей частотой. Перспективы оптических стандартов частоты были обоснованы уже в первом обзоре Н.Г. Басова и В.С. Летохова, посвящённом этой тематике [3]. Появились возможности использования нескольких десятков новых долгоживущих "часовых" квантовых переходов и новых, оптических, методов высокочувствительной регистрации сверхузких спектральных линий на этих переходах. Тематика ОСЧ с тех пор служит "мотором" и для самой квантовой радиофизики и целого ряда областей физики. Некоторые примеры — создание перестраиваемых лазеров с узким (килогерцевым) и сверхузким (субгерцевым) спектром излучения, разработка методов прецизионной (по разрешению и чувствительности) лазерной спектроскопии; сверхглубокое (до температуры  $10^{-9}$  К) охлаждение и удержание атомов и ионов; объединение сверхбыстрых (длительностью несколько фемтосекунд) процессов со сверхстабильными непрерывными режимами генерации [4].

Последнее достижение физики сверхбыстрых процессов в лазерных генераторах, решило одну из задач ОСЧ и создало эффективный способ измерения оптических частот, позволяющий использовать точностной потенциал оптических переходов, объединять различные лазерные и сверхвысокочастотные (СВЧ) стандарты, отстоящие друг от друга по частоте на несколько десятков и сотен терагерц, в единую систему с помощью компактных лазерных устройств [5–8].

Одно из преимуществ такого объединения — передача выходных параметров от одного устройства дру-

В.Л. Величанский, М.А. Губин. Отделение квантовой радиофизики, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Ленинский просп. 53, 119991 Москва, Российская Федерация  
Тел. (496) 751-07-90; (496) 751-06-10; (496) 751-02-49  
Факс (495) 938-22-51  
E-mail: vlvlab@okb.lpi.troitsk.ru; gubin@sci.lebedev.ru

Статья поступила 26 октября 2009 г.,  
после доработки 28 октября 2009 г.

тому, что позволяет потребителю приблизиться к "идеальному" стандарту, выбирая нужное сочетание свойств (относительная стабильность частоты, ширина спектра, повторяемость, воспроизводимость, точность).

Помимо исключительной важности повышения стабильности и точности для фундаментальной науки (прецизионная спектроскопия, фундаментальные физические эксперименты, радиоастрономия, основанная на радиоинтерферометрах со сверхдлинной базой, геофизика), существенно расширилась практическая сфера применений таких исследований. Известные системы спутниковой навигации ГЛОНАСС/GPS (Глобальная навигационная спутниковая система/Global positioning System) имеют своей целью создание глобального координатно-временного поля, доступного в любой точке Земли и в космосе для высокоточного измерения координат, навигации, управления, синхронизации приёмопередачи информации между удалёнными объектами и др. Ключевыми элементами, определяющими точность синхронизации всех бортовых и наземных элементов этих систем, являются КСЧ.

Разнообразие часовых оптических переходов, методов выделения реперных линий, требований на размеры и другие параметры стабильных генераторов и часов объективно создаёт основу для широкой кооперации исследователей. В статье кратко представлена часть работ лаборатории стандартов частоты (ЛСЧ) Отделения квантовой радиофизики (ОКР) ФИАН по одному из перспективных направлений квантовых стандартов частоты: созданию компактных и миниатюрных оптических и микроволновых стандартов частоты. Подробный обзор состояния работ по данной тематике в ФИАНе планируется в отдельной публикации.

## 2. Основные направления деятельности лаборатории

### 2.1. Высококогерентные полупроводниковые лазеры

Полупроводниковые лазеры с обычными резонаторами (без внешней обратной связи) отличаются высоким уровнем фазовых шумов, обусловленных спонтанным излучением. Вследствие этого при сравнительно мягких требованиях к стабильности уровня накачки основной вклад в ширину линии генерации дают не технические, а квантовые шумы. В большинстве других типов лазеров ситуация противоположна: чтобы добраться до квантового шума надо прилагать очень серьёзные усилия. Приступая к работе по созданию перестраиваемых диодных лазеров (ДЛ) с внешним резонатором, сотрудники лаборатории понимали, что внешняя обратная связь должна сильно подавить фазовые шумы и перевести ДЛ в обычный класс лазеров. Это нашло подтверждение в работах [9–11]. Решив принципиальный вопрос об отсутствии фундаментальных ограничений на ширину линии генерации ДЛ с внешним резонатором, лаборатория далее сосредоточилась на улучшении технических характеристик перестраиваемых лазеров, таких как область перестройки частоты, стабильность режима и частоты генерации, мощность генерации [12, 13]. Особо следует отметить цикл работ по использованию высокодобротных мод шепчущей галереи в кварцевых субмиллиметровых шариках для захвата и сужения линии генерации ДЛ [14, 15]. В перспективе это открывает

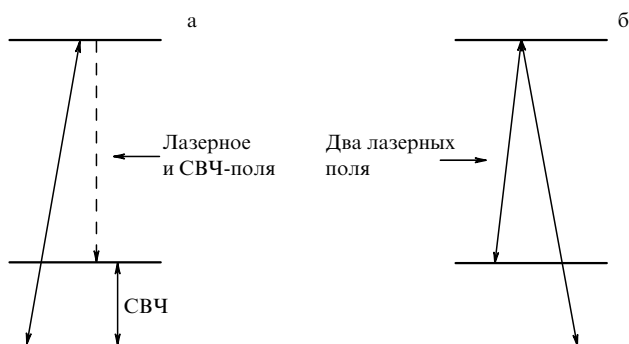
возможность создания сверхминиатюрных лазеров с очень высокой монохроматичностью излучения. Используя весь накопленный опыт, лаборатория разработала компактный и надёжный вариант ДЛ с внешним резонатором [16], который широко используется во многих лабораториях нашей страны и за рубежом.

Параллельно велась работа по использованию создаваемых ДЛ в атомной спектроскопии высокого разрешения. В исследовании внутридоплеровских спектров щелочных металлов при низких давлениях основное внимание уделялось влиянию различных селективных по скоростям атомов механизмов насыщения поглощения (накачка на возбуждённый уровень, перекачка атомов на другой сверхтонкий подуровень поляризация и выстраивание на магнитных подуровнях) [17, 18]. В работах по внутридоплеровским спектрам атомов щелочноземельных металлов (Ba, Sr, Ca) интерес представляли метрологические характеристики резонансов [19, 20]. Был развит новый метод внутридоплеровской спектроскопии — селективное зеркальное отражение, которое позволяет определять сечение столкновительного уширения при высокой концентрации атомов [21]. Дальнейшее развитие этого метода в Университете Париж 13 позволило исследовать ван-дер-ваальсово взаимодействие атомов со стенкой. Отметим также, что в ЛСЧ была запущена первая в России атомная ловушка [22]. Среди многочисленных работ, выполненных с применением полупроводниковых лазеров с внешним резонатором совместно с зарубежными университетами и Национальным институтом стандартов и технологии США, упомянем работу по "лазеру без инверсии" [23], которая Американским физическим обществом была включена в число пяти лучших работ по физике 1995 г.

### 2.2. Сверхминиатюрные атомные часы

Высокотехнологичные полупроводниковые лазеры ближнего инфракрасного (ИК) диапазона позволяют осуществлять оптическую накачку атомов Cs, Rb и K, т.е. создавать неравновесное распределение населённости сверхтонких или магнитных подуровней основного состояния. В равновесных условиях эти подуровни заселены одинаково, поскольку их расщепление много меньше  $k_B T$ , и они практически не поглощают резонансное СВЧ- или радиочастотное (РЧ) поля. Оптическая накачка позволяет наблюдать двойной радиооптический резонанс (ДРОР), который используется и в СВЧ-стандартах и в магнитометрах. Лаборатория стандартов частоты проводила совместные исследования по ДРОР в ячейке с атомами  $^{87}\text{Rb}$  (Горьковский (ныне — Нижегородский) научно-исследовательский приборостроительный институт) [24] и в рубидиевом атомном пучке (Российский институт радионавигации и времени) [25], направленные на создание СВЧ-стандарта, а также в ячейках с  $^{39}\text{K}$  (Государственный оптический институт) [26] для применения в магнитометрии.

Стандарты частоты и часы на атомах  $^{87}\text{Rb}$  с накачкой резонансной рубидиевой лампой и изотопической фильтрацией получили широкое распространение. В традиционных стандартах частоты используется двойной радиооптический резонанс. Резонансное излучение лампы перекачивает атомы с одного сверхтонкого уровня на другой (рис. 1а). В результате поглощение света уменьшается. Микроволновое поле, синтезируемое от кварцевого генератора, возбуждает СВЧ-резона-



**Рис. 1.** Традиционная (а) и новая схема СВЧ стандарта, использующая КПН резонанс (б). В случае (а) на атомы воздействует СВЧ-поле и одно оптическое поле. Штриховой линией показан спонтанный переход. В случае (б) атомы облучаются двумя лазерными полями с разностью частот, определяемой СВЧ-полем.

тор, содержащий ячейку с атомами, и возвращает часть атомов в поглощающее свет состояние. Зависимость поглощения резонансного света в ячейке от частоты СВЧ-поля формирует опорный резонанс, используемый для стабилизации частоты СВЧ-генератора. Для эффективного воздействия СВЧ-полем на атомы ячейку надо помещать в СВЧ-резонатор. Его габариты определяются длиной волны СВЧ-поля и ограничивают возможность миниатюризации прибора. Длина волны для метрологического СВЧ-перехода для Cs составляет примерно 3,26 см, а для  $^{87}\text{Rb}$  — 4,4 см.

Сравнительно недавно стал активно разрабатываться альтернативный способ зондирования СВЧ-перехода в основном состоянии атомов. Он основан на эффекте когерентного пленения населённости (КПН) (рис. 1б), который позволяет на один-два порядка уменьшить объём и энергопотребление. Эффект КПН [26] обусловлен формированием когерентной непоглощающей суперпозиции двух состояний атома под действием бихроматического излучения, каждая из компонент которого настроена в резонанс с одним из оптических переходов, и разность их частот равна расщеплению двух вовлечённых уровней. В традиционной схеме стабилизируется частота СВЧ-поля, непосредственно взаимодействующего с атомным ансамблем, находящимся в СВЧ-резонаторе. В новой схеме [28] стабилизируемое СВЧ-поле прямо не воздействует на атомы, а определяет разность частот двух оптических полей, зондирующих атомы. Именно использование резонанса КПН для создания стандартов частоты даёт возможность радикального уменьшения габаритов стандарта, поскольку отпадает необходимость в СВЧ-резонаторе. Кроме того, важно, что существует возможность использовать компактные полупроводниковые лазеры как источники излучения. Микроволновое поле модулирует ток ДЛ и создаёт требуемый бихроматический спектр.

Такие разработки ведутся во многих странах (Япония, Франция, Китай, Россия и др.) и особенно активно — в США: в Национальном институте стандартов и технологии и в фирмах "Agilent", "Kernco", "Symmetricom", "Teledyne". В США по заказу Агентства передовых оборонных исследований (DARPA) и при его финансовой поддержке разрабатывается новое поколение атомных часов с уникальным набором характеристик: объём порядка  $1\text{ см}^3$ , энергопотребление менее 30 мВт, ста-

бильность за час  $10^{-11}$ . В июне 2007 г. компания "Honeywell" сообщила о создании готового к производству макета атомных часов с параметрами: объём  $1,7\text{ см}^3$ , энергопотребление 57 мВт, стабильность  $5 \times 10^{-12}$  за час. И по объёму, и по потреблению энергии это, по крайней мере, на порядок меньше, чем у самых прецизионных кварцевых генераторов при более высокой стабильности.

Лаборатория стандартов частоты совместно с Институтом лазерной физики СО РАН ведёт активную работу по созданию малогабаритных атомных часов: ещё в 1991 г. было проведено первое исследование КПН-эффекта с помощью двух ДЛ с внешним резонатором [29]; недавно предложены две новые схемы формирования высококонтрастных КПН резонансов для атомных часов [30, 31], продемонстрирована возможность создания чистых суперпозиционных состояний атомов с помощью эллиптически поляризованного бихроматического излучения [32], созданы лазеры с укороченным резонатором, допускающие СВЧ-модуляцию в режиме генерации на одной продольной моде [33]. Лаборатория стандартов частоты в кооперации со многими институтами продолжает разработку таких сверхминиатюрных атомных часов, поскольку многие из применений, несомненно, будут играть важную роль в развитии научного приборостроения и техники. Перечислим некоторые из них: помехоустойчивые быстрые приёмники сигналов GPS и ГЛОНАСС с быстрым стартом и высокой точностью навигации; массовые применения в системах мобильной связи, включая широкополосную связь со сверхбыстрым переключением несущей частоты; синхронизация сетевого компьютерного оборудования и передачи данных в сетях со многими пользователями; наведение, распознавание, слежение; локация; повышение помехозащищённости аппаратуры и создание в полевых условиях более устойчивых беспроводных сетей передачи данных; использование автономных эталонов времени там, где нет возможности принимать спутниковые сигналы, например под водой.

### 2.3. He–Ne/CH<sub>4</sub>-оптический стандарт частоты

В 1968–1969 гг. Дж. Холл (J. Hall, Нобелевский лауреат 2005 года), исследуя взаимодействие излучения одночастотного He–Ne-лазера с молекулами метана, продемонстрировал исключительно высокое разрешение нелинейной внутридоплеровской спектроскопии и возможности её применения в метрологии времени и частоты [34]. Это направление стало стремительно развиваться во многих странах. В СССР работы по данной тематике развернулись в Институте физики полупроводников СО АН, ФИАНе и Всесоюзном научно-исследовательском институте физико-технических и радиотехнических измерений [35–37]. Использовались схемы выделения узкой спектральной линии метана, основанные на лазерах с одночастотным излучением. В ФИАНе совместно с Московским инженерно-физическим институтом был разработан иной, "двухмодовый", метод внутридоплеровской спектроскопии, доказавший свою эффективность при создании высокостабильных компактных оптических стандартов частоты с метановой поглощающей ячейкой (He–Ne/CH<sub>4</sub> ОСЧ) [38–40].

Существуют две разновидности двухмодового метода: регистрация резонансов насыщенного поглощения в интенсивностях мод (метод амплитудных резонансов) [41] и насыщенной дисперсии по изменению частоты

межмодовых биений (метод "частотных" резонансов) [42]. В случае амплитудных резонансов выигрыш в отношении сигнал/шум возникает за счёт резонансного перераспределения интенсивностей конкурирующих мод, когда одна из мод испытывает резонансное уменьшение потерь на центре линии метана при насыщении поглощения стоячей лазерной волной.

Регистрация частотных резонансов имеет ряд преимуществ по сравнению с регистрацией амплитудных резонансов в одномодовых и двухмодовых лазерах: чувствительность определяется спонтанными флуктуациями излучения, спектральная плотность которых в He–Ne-лазере составляет  $W_e = 10^{-4} - 10^{-6}$  Гц<sup>2</sup>/Гц, так что возможна регистрация слабых спектральных линий с линейным коэффициентом поглощения  $\leq 10^{-11}$  см<sup>-1</sup> Гц<sup>-1/2</sup>. Для них снижены требования к выходной мощности лазера, а детектирование не требует охлаждаемых фотодетекторов. По чувствительности метод сравним с методом частотно-модуляционной спектроскопии в оптическом резонаторе [43], но значительно проще по реализации.

Оставляя до более полной публикации вопросы долговременной стабильности частоты и воспроизводимости частоты He–Ne/CH<sub>4</sub> ОСЧ, укажем, что в настоящее время задача создания задающего генератора с кратковременной стабильностью частоты  $(\delta\omega/\omega)_{\text{short}} = 1 \times 10^{-14} - 1 \times 10^{-15}$  (при времени усреднения  $\tau = 1$  с) представляет большой интерес с точки зрения применений. Дело в том, что широко используемые водородные мазеры имеют высокую долговременную стабильность  $((\delta\omega/\omega)_{\text{long}} \sim 1 \times 10^{-15}$  за сутки), но по кратковременной стабильности —  $(\delta\omega/\omega)_{\text{short}} \sim 3 \times 10^{-13}$  ( $\tau = 1$  с), они не удовлетворяют современным требованиям.

Новые типы разрабатываемых в зарубежных лабораториях высокостабильных задающих генераторов — это микроволновые генераторы, стабилизированные по сапфировым резонаторам, охлаждённым до криогенных температур [44] и лазеры, стабилизированные по супердобротным оптическим резонаторам [45]. Благодаря исключительной пассивной стабильности резонаторов и стабилизации параметров окружающей среды, эти устройства демонстрируют стабильность  $(\delta\omega/\omega)_{\text{short}} = 1 \times 10^{-15}$  для  $\tau = (0, 1 - 10)$  с. При больших временах усреднения стабильность ухудшается из-за дрейфа длины оптического резонатора (структурные изменения материала резонатора, остаточные флуктуации температуры). Криогенные установки громоздки, дороги в эксплуатации и являются сугубо лабораторными установками.

Кратковременная стабильность компактных He–Ne/CH<sub>4</sub> ОСЧ, разработанных в ФИАНе, в настоящее время составляет  $(\delta\omega/\omega)_{\text{short}} \sim 1 \times 10^{-14}$  ( $\tau = 1$  с), т.е. в 30–100 раз превышает кратковременную стабильность лучших генераторов радиодиапазона, и имеет перспективу дальнейшего улучшения в 3–5 раз за счёт повышения добротности лазерного резонатора.

Генераторы с такими характеристиками необходимы для радиоастрономии (в качестве высокостабильных генераторов-гетеродинов), фундаментальной метрологии (разработка первичных стандартов на холодных атомах "фонтанного" типа и в оптических ловушках), в экспериментах на ускорителях элементарных частиц, для аппаратуры систем наземной и космической навигации, радиолокационных станций [46].

## 2.4. Компактные фемтосекундные метановые оптические часы

Вопрос о переносе высокой кратковременной стабильности He–Ne/CH<sub>4</sub> ОСЧ в радиодиапазон и создании тем самым задающего генератора с низким уровнем фазовых шумов стал реализуем благодаря появлению фемтосекундной технологии деления оптических частот, о которой говорилось во введении.

В 2008 г. в сотрудничестве с Научным центром волоконной оптики РАН и предприятием "Авеста", созданным на базе лаборатории ультракоротких импульсов Отделения квантовой радиофизики, в ФИАНе впервые в мире был реализован компактный высокостабильный задающий генератор — фемтосекундные метановые оптические часы [47].

Схема оптических часов приведена на рис. 2. "Маятником" в созданных часах служит излучение двухмодового He–Ne-лазера, частота которого стабилизируется по колебательно-вращательному переходу метана ( $\lambda = 3,39$  мкм,  $\nu = 88,4$  ТГц), а роль "часового механизма", выполняющего деление оптической частоты в  $10^6$  раз, — компактный фемтосекундный лазер на эрбиевом волокне ( $\lambda = 1,55$  мкм).

Волоконный лазер излучает непрерывную последовательность импульсов с фемтосекундной длительностью ( $\sim 100$  фс) и частотой повторения 62 МГц, определяемой временем обхода светом резонатора лазера. На спектральном языке такое излучение представляет собой суперконтинуум — гребёнку эквидистантно расположенных через 62 МГц компонент, занимающих область 1000–2000 нм.

Задача заключалась в создании спектра суперконтинуума с необходимыми свойствами и переносе стабильности частоты метанового репера на частоту следования фемтосекундных импульсов. Для этого спектр суперконтинуума волоконного лазера был перенесён из 1,5 мкм в трёхмикронную область спектра преобразованием в нелинейном кристалле периодически поляризованного ниобата лития (ППНЛ). Далее, частота одной из компонент преобразованного спектра привязывалась по фазе системой автоподстройки к частоте метанового стандарта. Поскольку сигнал обратной связи подавался на элемент, управляющий длиной резонатора волоконного лазера, то частота следования фемтосекундных импульсов приобрела стабильность оптического репера,

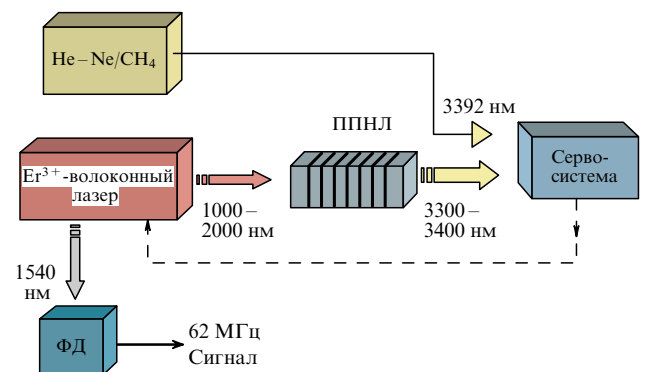


Рис. 2. Схема компактных метановых оптических часов. ППНЛ — кристалл периодически поляризованного ниобата лития, ФД — фотодетектор, регистрирующий импульсы фемтосекундного лазера.

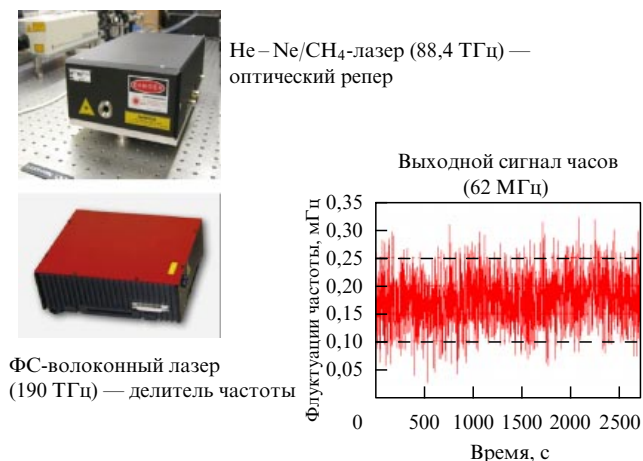


Рис. 3. Основные компоненты созданных компактных оптических часов и запись на частотомере выходного сигнала (время усреднения 1 с). (Частотомер синхронизован по водородному мазеру Ч1-1006.)

т.е. реализовалось "деление" оптической частоты (88 ТГц) в  $1,4 \times 10^6$  раз.

При создании оптических часов были преодолены трудности, связанные с чрезвычайно малым уровнем мощности (несколько пиковатт) компонент фемтосекундной гребёнки, необходимостью создания широкополосных систем управления частотой волоконного лазера и другие. На рисунке 3 показаны основные элементы созданных оптических часов и нестабильность во времени выходного сигнала (время усреднения 1 с). Видно, что флуктуации частоты повторения стабилизированных фемтосекундных импульсов лежат в диапазоне менее 1 МГц.

Сравнение полученного сигнала с сигналом промышленного водородного мазера показало [48], что нестабильность разности их частот составляет  $1 \times 10^{-12}$  при времени усреднения 1 с и ограничивается нестабильностью частоты водородного мазера. Наивысшая достигнутая в эксперименте стабильность частоты сигнала часов составила  $6 \times 10^{-14}$  при времени усреднения 200 с. Таким образом, можно утверждать, что в данном эксперименте с указанной погрешностью синхронизованы оптический и радиодиапазоны спектра.

Для выяснения истинной стабильности сигнала часов на коротких временах необходима вторая система для сравнения.

В 2004 г. в США (г. Боулдер) был выполнен совместный эксперимент ФИАН, JILA (Объединённый институт лабораторной астрофизики Национального института стандартов и технологии США и Колорадского университета) и MIT (Массачусетский технологический институт), в котором впервые были продемонстрированы метановые оптические часы в стационарном варианте [49]. В качестве репера использовался He-Ne/CH<sub>4</sub> ОСЧ ФИАН (стабильность частоты  $\sim 1 \times 10^{-14}$ ,  $\tau = 1$  с), доставленный в JILA (рис. 4). Стабилизировалась частота повторения ( $f_{\text{rep}} = 78$  Гц) фемтосекундных импульсов лазера на кристалле Ti:Sa (спектр суперконтинуума 500–1000 нм), которая далее сравнивалась либо с сигналом водородного мазера, либо с сигналом частоты повторения другого фемтосекундного лазера на кристалле Ti:Sa, но стабилизированного по йодному оптическому стандарту частоты (Nd:YAG/I<sub>2</sub>-лазер)

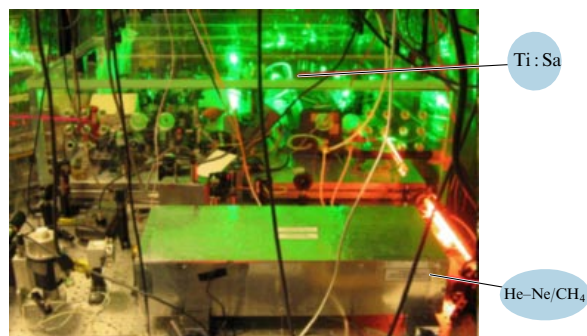


Рис. 4. Установка по реализации стационарных метановых оптических часов в JILA, г. Боулдер, США (2004 г.). На первом плане — He-Ne/CH<sub>4</sub> ОСЧ ФИАН. Ti:Sa — фемтосекундный Ti:Sa-лазер.

[50]). Фактически это были вторые (йодные) оптические часы. Установлено, что стабильность частоты метановых оптических часов ( $f_{\text{rep}}^{\text{CH}_4}$ ) превышает стабильность водородного мазера на временах усреднения  $\tau < 50$  с, а измерение фазовых шумов разности частот двух оптических часов ( $f_{\text{rep}}^{\text{CH}_4}$  и  $f_{\text{rep}}^{\text{I}_2}$ ) показало, что их суммарная спектральная плотность шумов, приведённая к частоте 1 ГГц, в низкочастотной ( $< 1,0$  Гц) области спектра на 30 дБ ниже, чем у лучших кварцевых генераторов.

В эксперименте 2008 г. в ФИАНе осуществлён переход от сугубо стационарной установки к компактному волоконному лазеру и создан новый "интерфейс" для сопряжения спектров фемтосекундного волоконного и He-Ne/CH<sub>4</sub>-лазеров.

Хотя изначально волоконные лазеры имеют более высокий уровень шумов, чем лазеры на кристалле Ti:Sa, но в последнее время доказана возможность получения с их помощью погрешности переноса частоты в радиодиапазон не хуже  $2 \times 10^{-15}$  ( $\tau = 1$  с) [46]. С другой стороны, они обладают такими неоспоримыми преимуществами как компактность, способность работать сутками без вмешательства оператора, относительно невысокая стоимость. Волоконные лазеры органично встраиваются в существующие системы оптических телекоммуникационных сетей, в том числе, начато их использование для передачи сигналов опорных оптических частот и сравнения ОСЧ, расположенных на расстояниях в несколько сотен километров с погрешностью  $1 \times 10^{-19}$  (!) [51].

### 3. Заключение

Получены принципиальные экспериментальные и теоретические результаты, доказывающие возможность создания в ближайшее время в России сверхминиатюрных атомных часов на основе полупроводниковых лазеров (стабильность частоты  $10^{-11} - 10^{-12}$ , при времени усреднения  $\sim 10^4$  с) и компактных задающих генераторов/оптических часов со стабильностью частоты  $10^{-14} - 10^{-15}$  при времени усреднения 1 с на основе He-Ne/CH<sub>4</sub>- и волоконного фемтосекундного лазеров.

### Список литературы

1. Басов Н Г, Прохоров А М *ЖЭТФ* 27 431 (1954)
2. Басов Н Г, Прохоров А М *УФН* 57 485 (1955)
3. Басов Н Г, Летохов В С *УФН* 96 585 (1968) [Basov N G, Letokhov V S *Sov. Phys. Usp.* 11 855 (1969)]

4. Basov N G, Gubin M A *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **6** 857 (2000)
5. Hall J L *Rev. Mod. Phys.* **78** 1279 (2006) [Пер. на русс. яз.: Холл Дж Л *УФН* **176** 1353 (2006)]
6. Hänsch T W *Rev. Mod. Phys.* **78** 1297 (2006) [Пер. на русс. яз.: Хэнш Т В *УФН* **176** 1368 (2006)]
7. Ye J, Schnatz H, Hollberg L W *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **9** 1041 (2003)
8. Ye J, Cundiff S T (Eds) *Femtosecond Optical Frequency Comb Technology: Principle, Operation and Application* (New York: Springer, 2005)
9. Величанский В Л и др. *Письма в ЖЭТФ* **4** 1087 (1978) [Velichanskii V L et al. *Sov. Tech. Phys. Lett.* **4** 438 (1978)]
10. Акульшин А М и др. *Квантовая электроника* **10** 1527 (1983) [Akul'shin A M et al. *Sov. J. Quantum Electron.* **13** 1003 (1983)]
11. Беленов Э М и др. *Квантовая электроника* **10** 1232 (1983) [Belenov E M et al. *Sov. J. Quantum Electron.* **13** 792 (1983)]
12. Акульшин А М и др. *Квантовая электроника* **13** 1391 (1986) [Akul'shin A M et al. *Sov. J. Quantum Electron.* **16** 912 (1986)]
13. Vassiliev V et al. *Opt. Lett.* **23** 1229 (1998)
14. Vassiliev V V et al. *Opt. Commun.* **158** 305 (1998)
15. Ораевский А Н, Яровицкий А В, Величанский В Л *Квантовая электроника* **31** 897 (2001) [Oravsky A N, Yarovitsky A V, Velichansky V L *Quantum Electron.* **31** 897 (2001)]
16. Vassiliev V V, Zibrov S A, Velichansky V L *Rev. Sci. Instrum.* **77** 013102 (2006)
17. Акульшин А М и др. *ЖЭТФ* **96** 107 (1989) [Akul'shin A M et al. *Sov. Phys. JETP* **69** 58 (1989)]
18. Акульшин А М и др. *ЖЭТФ* **99** 378 (1991) [Akul'shin A M et al. *Sov. Phys. JETP* **72** 210 (1991)]
19. Celikov A et al. *Opt. Commun.* **107** 54 (1994)
20. Akulshin A M, Celikov A A, Velichansky V L *Opt. Commun.* **93** 54 (1992)
21. Акульшин А М и др. *Письма в ЖЭТФ* **36** 247 (1982) [Akulshin A M et al. *JETP Lett.* **36** 303 (1982)]; Akulshin A M et al. *Opt. Commun.* **85** 21 (1991)
22. Яровицкий А В и др. *Квантовая электроника* **34** 341 (2004) [Yarovitsky A V et al. *Quantum Electron.* **34** 341 (2004)]
23. Zibrov S A et al. *Phys. Rev. Lett.* **75** 1499 (1995)
24. Будкин Л А и др. *Квантовая электроника* **17** 364 (1990) [Budkin L A et al. *Sov. J. Quantum Electron.* **20** 301 (1990)]
25. Беседина А Н и др. *Квантовая электроника* **18** 367 (1991) [Besedina A N et al. *Sov. J. Quantum Electron.* **21** 334 (1991)]
26. Александров Е Б и др. *Оптика и Спектроск.* **78** 325 (1995) [Aleksandrov E B et al. *Opt. Spectrosc.* **78** 292 (1995)]
27. Arimondo E, in *Progress in Optics* Vol. 35 (Ed. E Wolf) (Amsterdam: Elsevier, 1996) p. 257
28. Knappe S et al. *Appl. Phys. Lett.* **85** 1460 (2004)
29. Akulshin A M, Celikov A A, Velichansky V L *Opt. Commun.* **84** 139 (1991)
30. Taichenachev A V et al. *Письма в ЖЭТФ* **82** 449 (2005) [*JETP Lett.* **82** 398 (2005)]
31. Тайченачев А В и др. *Письма в ЖЭТФ* **80** 265 (2004) [Taichenachev A V et al. *JETP Lett.* **80** 236 (2004)]
32. Zibrov S A et al. *Opt. Lett.* **31** 2060 (2006)
33. Каргапольцев С В и др. *Квантовая электроника* **39** 487 (2009) [Kargapol'tsev S V et al. *Quantum Electron.* **39** 487 (2009)]
34. Barger R L, Hall J L *Phys. Rev. Lett.* **22** 4 (1969)
35. Летохов В С, Чеботаев В П *Письма в ЖЭТФ* **9** 364 (1969) [Letokhov V S, Chebotaev V P *JETP Lett.* **9** 215 (1969)]
36. Багаев С Н, Чеботаев В П *УФН* **148** 143 (1986) [Bagayev S N, Chebotaev V P *Sov. Phys. Usp.* **29** 82 (1986)]
37. Кошеляевский Н Б, Татаренков В М, Титов А Н *Квантовая электроника* **3** 417 (1976) [Koshelyaevskii N B, Tatarenkov V M, Titov A N *Sov. J. Quantum Electron.* **6** 222 (1976)]
38. Басов Н Г, Губин М А, Никитин В В, Проценко Е Д *Квантовая электроника* **11** 1084 (1984) [Basov N G, Gubin M A, Nikitin V V, Protsenko E D *Sov. J. Quantum Electron.* **14** 731 (1984)]
39. Губин М А, Проценко Е Д *Квантовая электроника* **24** 1080 (1997) [Gubin M A, Protsenko E D *Quantum Electron.* **27** 1048 (1997)]
40. Gubin M A et al. *IEEE J. Quantum Electron.* **31** 2177 (1995)
41. Губин М А, Попов А И, Проценко Е Д, в сб. *Квантовая электроника* (Под ред. Н Г Басова) Вып. 3 (М.: Сов. радио, 1971) с. 99 [Gubin M A, Popov A I, Protsenko E D *Sov. J. Quantum Electron.* **1** 280 (1971)]
42. Басов Н Г и др. *Изв. АН СССР, Сер. физ.* **46** 1573 (1982) [Basov N G et al. *Bull. Acad. Sci. USSR Phys. Ser.* **46** (8) 119 (1982)]
43. Ma L-S, Ye J, Dubé P, Hall J J. *Opt. Soc. Am. B* **16** 2255 (1999)
44. Chang S, Mann A G, Luiten A N *Electron. Lett.* **36** 480 (2000)
45. Матвеев А Н и др. *Квантовая электроника* **38** 895 (2008) [Matveev A N et al. *Quantum Electron.* **38** 895 (2008)]
46. Millo J et al. *Appl. Phys. Lett.* **94** 141105 (2009)
47. Губин М А и др. *Квантовая электроника* **38** 613 (2008) [Gubin M A et al. *Quantum Electron.* **38** 613 (2008)]
48. Gubin M A et al. *Appl. Phys. B* **95** 661 (2009)
49. Foreman S M et al. *Opt. Lett.* **30** 570 (2005)
50. Ye J, Ma L S, Hall J L *Phys. Rev. Lett.* **87** 270801 (2001)
51. Terra O et al. *Appl. Phys. B* **97** 541 (2009)

### Laser frequency standards at the P.N. Lebedev Physical Institute

V.L. Velichansky, M.A. Gubin

*P.N. Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences,  
Leninskii prosp. 53, 119991 Moscow, Russian Federation  
Tel. (7-496) 751-0790; (7-496) 751-06 10; (7-496) 751-02 49  
Fax (7-495) 938-22 51  
E-mail: vlvlab@okb.lpi.troitsk.ru; gubin@sci.lebedev.ru*

This paper briefly reviews work done at the Laboratory of Frequency Standards of the Quantum Radiophysics Division, P.N. Lebedev Institute, on two major targets in research on quantum frequency standards: a superminiature clock based on coherent population trapping in alkali atoms using diode laser pumping (a frequency stability of  $10^{-11}$ – $10^{-12}$  for an averaging time of  $\sim 10^4$  s); and a compact reference oscillator (optical clock) (a frequency stability of  $10^{-14}$ – $10^{-15}$  for an averaging time of 1 s) using He–Ne/CH<sub>4</sub> and femtosecond fiber lasers.

PACS numbers: 01.30.Bb, 06.30.Ft, 42.55.Px, 42.62.Eh

DOI: 10.3367/UFNr.0179.200911h.1219

Bibliography — 51 references

Received 26 October 2009, revised 28 October 2009

*Uspekhi Fizicheskikh Nauk* **179** (11) 1219–1224 (2009)

*Physics – Uspekhi* **52** (11) (2009)