

К 100-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ Н.Г. БАСОВА

КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

Наследие Н.Г. Басова: от первых мазеров к оптическим стандартам частоты

А.А. Беляев, В.Г. Воронцов, Н.А. Демидов, К.Ю. Хабарова, Н.Н. Колачевский

Пионерские идеи Н.Г. Басова, чей столетний юбилей торжественно отмечался в 2022 году, заложили фундамент целому ряду современных направлений в области квантовой электроники и лазерной физики — от тонких лазерных экспериментов, нацеленных на проверку основополагающих законов физики, до лазерного поджига термоядерных мишеней, от высокоскоростных линий передачи данных до лазерной сварки и обработки материалов. В обзорной работе, докладывавшейся на посвящённой юбилею Н.Г. Басова научной сессии Отделения физических наук РАН, обсуждается развитие и сегодняшнее состояние "первенца" из этой череды научных побед — водородного лазера (Н-лазера). Н-лазеры постоянно совершенствуются и участвуют в решении широчайшего спектра задач: метрологии времени и частоты, спутниковой навигации и космической радиоастрономии. Россия является признанным мировым лидером в области создания лазерной техники, что служит блестящим примером успешной реализации басовских идей. Естественным развитием направления является создание оптических стандартов частоты, перспективам которых посвящена заключительная часть обзора.

Ключевые слова: стандарт частоты, лазер, Н-лазер, релятивистские тесты, РСДБ, оптические часы

PACS numbers: 06.20. – f, 84.40.lk, 95.55.Sh

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2022.11.039347>

Содержание

1. Введение (1091).
 2. Н-мазеры в лабораториях и космических исследованиях (1093).
2.1. Н-мазеры в государственных службах времени и научных лабораториях. 2.2. Н-мазеры в тестах фундаментальных теорий и космических миссиях. 2.3. Н-мазеры в системах глобальной спутниковой навигации.
 3. Перспективы развития оптических стандартов частоты (1097).
3.1. Переход из микроволнового диапазона в оптический. 3.2. Частотой магнитодипольный переход 1,14 мкм в атомах тулия.
 4. Заключение (1101).
- Список литературы (1102).

1. Введение

Принцип мазерно-лазерной генерации, сформулированный Н.Г. Басовым совместно с А.М. Прохоровым в далёком 1952 г. [1], лёг в основу функционирования

разнообразнейших приборов, которыми мы сегодня повсеместно пользуемся как в быту и промышленности, так и при проведении научных исследований. Будущими Нобелевскими лауреатами было предсказано, что ансамбль идентичных молекулярных систем, в которых реализовано условие инверсии населённости, помещённый внутрь объёмного резонатора, настроенного на частоту перехода, будет излучать узкополосное когерентное излучение, соответствующее частоте перехода. При этом спектральная ширина линии этого излучения должна оказаться намного уже ширины самого перехода по аналогии с резонансным автогенератором [2]. Эта идея легла в основу докторской диссертации Н.Г. Басова "Молекулярный генератор", которую он защитил в свои 35 лет. Интересно отметить, что вопрос об ожидаемой ширине линии такого излучения вызвал много споров в научном окружении Басова: сложно было поверить, что генератор должен был излучать фактически неограниченно узкую спектральную линию, а не линию, соответствующую спектральной ширине перехода. Это явилось одной из причин, по которой, помимо бывшего научного руководителя (А.М. Прохорова), на работу дали отзывы такие корифеи науки, как В.Л. Гинзбург, Е.К. Завойский, В.В. Мигулин, Л.А. Арцимович и И.М. Франк, а А.Н. Ораевский охарактеризовал защиту диссертации как "драматичную".

К 1954 г. Н.Г. Басовым была осуществлена и практическая реализация его идеи — в СССР был создан экспериментальный макет молекулярного генератора на мо-

А.А. Беляев⁽¹⁾, В.Г. Воронцов⁽¹⁾, Н.А. Демидов⁽¹⁾,
К.Ю. Хабарова⁽²⁾, Н.Н. Колачевский^(2,*)

⁽¹⁾ АО "ВРЕМЯ-Ч", ул. Ошарская 67, 603105 Нижний Новгород,
Российская Федерация

⁽²⁾ Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,
Ленинский просп. 53, 119991 Москва, Российская Федерация
E-mail: ^(*) kolachevsky@lebedev.ru

Статья поступила 6 апреля 2023 г.

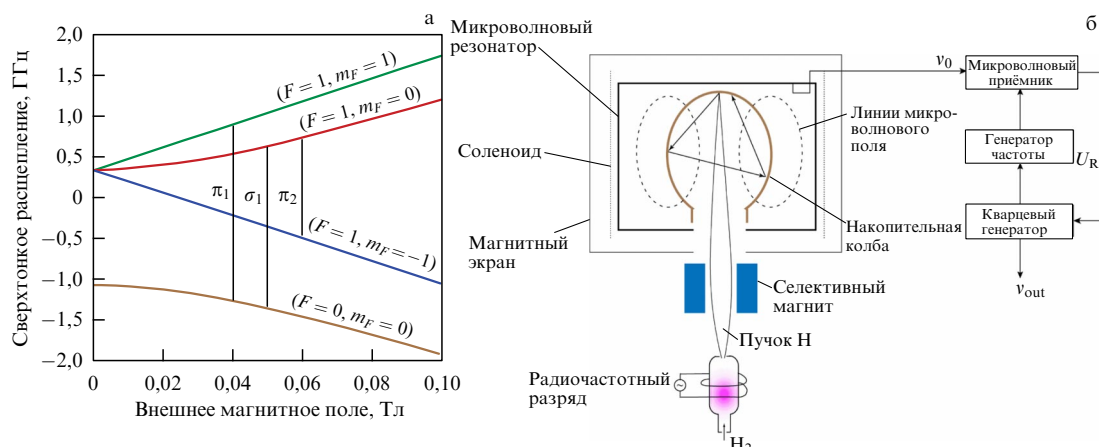


Рис. 1. (а) Схема уровней основного состояния атома водорода в магнитном поле. (б) Схема водородного мазера.

лекулах аммиака. Схожие исследования шли и в США: Ч. Таунс, Дж. Гордон и Х. Цайгер создали аммиачный генератор в Колумбийском университете в 1953 г. Отсюда и пошло устоявшееся сегодня название этого прибора — мазер (от акронима maser — microwave amplification by stimulated emission of radiation). Как мы знаем, за фундаментальный вклад в развитие квантовой электроники, приведший к созданию генераторов и усилителей на лазерно-лазерном принципе, Н.Г. Басов, А.М. Прохоров и Ч. Таунс были удостоены Нобелевской премии в 1964 г.

Как и все гениальные изобретения, устройство первого аммиачного мазера, работающего на частоте 24 ГГц, оказалось достаточно простым. Пучок газообразного аммиака проходил через селектор состояний, обеспечивающий условие инверсной населённости, и поступал в резонатор, формирующий условие для вынужденного излучения. Однако в силу целого ряда причин аммиачный мазер не нашёл широкого применения в исследованиях и был замещён своим "старшим братом" — водородным мазером (Н-мазером). Водородный мазер, работающий на сверхтонком переходе основного состояния атома водорода (рис. 1) на частоте 1,42 ГГц, был впервые предложен Норманом Рэмси в 1960 г. [3]. Выяснилось, что среди приборов подобного типа именно водородный мазер наилучшим образом подходит для создания стандартов частоты, в том числе за счёт беспрецедентной стабильности частоты выходящего сигнала. За свои разработки в области прецизионной спектроскопии и создание водородного мазера [4] Н. Рэмси был удостоен Нобелевской премии в 1989 г.

В СССР разработки Н-мазера начались в 1961 г. под руководством Н.Г. Басова, который сразу понял широкие возможности его практического использования. Было ясно, что для достижения высоких метрологических характеристик требовалось решить массу научных, технических и технологических задач: обеспечить качественную селекцию состояний, снизить потери, подобрать материал покрытия колбы, подавить флуктуации магнитного поля, дрейфы резонатора, создать качественную электронику и многое другое. В.М. Татаренков, ученик и коллега Н.Г. Басова, возглавил это направление и перешёл в 1966 г. из ФИАНа во ВНИИФТРИ (Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений), где была создана группа по разработке новых по тем вре-

менам стандартов частоты. Позже технологии создания Н-мазеров были перенесены на производство в Н. Новгород (ННИПИ (Нижегородский научно-исследовательский приборостроительный институт "Кварц" им. А.П. Горшкова)). Сегодня лучшие в мире водородные мазеры разрабатываются и производятся российской компанией АО "Время-Ч" (Н. Новгород), которая реализовала по всему миру несколько сотен экземпляров этих сложных приборов, — примерно половину того, что было создано в мире за последние десятилетия. Это является одним из удачных и, к сожалению, нечастых примеров, когда научное лидерство, заложенное советскими учёными, не только успешно реализовалось в технологии, но и продемонстрировало значительные успехи на мировом рынке.

Существует ряд модификаций Н-мазеров: активные, пассивные, с сапфировыми резонаторами; идёт непрерывная научно-техническая работа по совершенствованию их характеристик, уменьшению габаритов и повышению надёжности. Относительная нестабильность частоты Н-мазеров достигла сегодня 1×10^{-16} , что фактически совпадает с нестабильностью лучших первичных Cs-стандартов фонтанного типа. Можно задаться вопросом — почему же мазеры не используются в качестве первичного стандарта, ведь тогда можно было бы "убить двух зайцев", упростив конструкцию первичного стандарта и перейдя к заветной мечте всех физиков-метрологов — выразить секунду СИ через фундаментальные константы. Для этого можно использовать выражение для энергии сверхтонкого расщепления состояния $1S$ в атоме водорода

$$\Delta E_{\text{HFS}} = \frac{8}{3} \text{Ry} \alpha^2 \frac{m_e}{m_p} g_p$$

с необходимыми поправками (релятивистскими, квантовоэлектродинамическими и пр.). Здесь Ry — ридберговская энергия, α — постоянная тонкой структуры, m_e/m_p — отношение массы электрона к массе протона, а g_p — g -фактор протона. При таком подходе секунда была бы непосредственно привязана к атомным единицам энергии. Однако такой подход упирается в две проблемы. С одной стороны, частота излучения мазера, несмотря на высокую стабильность, обладает плохой воспроизводимостью. Из-за специфики взаимодействия атомов водорода с материалом внутренней поверхности колбы-накопителя (обычно тефлон), частота генерации

Таблица

Параметр Наименование	Оптические стандарты частоты	Первичный стандарт частоты	Коммерческие часы на атомном пучке	Компактные атомные часы	Миниатюрные атомные часы	Прецизионные кварцевые часы	Наручные кварцевые часы
Погрешность	10^{-18}	10^{-16}	10^{-13}	10^{-11}	10^{-10}	10^{-7}	10^{-5}
Нестабильность	$0,1 \text{ нс год}^{-1}$	10 нс год^{-1}	10 мкс год^{-1}	$0,1 \text{ мкс сут}^{-1}$	1 мкс сут^{-1}	100 мкс сут^{-1}	1 с сут^{-1}
Габариты	10^7 см^3	10^7 см^3	10^4 см^3	100 см^3	10 см^3	$1 - 10 \text{ см}^3$	10 мм^3
Мощность	1 кВт	1 кВт	0,1 – 0,5 кВт	1 Вт	120 мВт	100 мВт	10 мкВт
Стоимость	> \$5 млн	> \$1 млн	\$50 тыс.	\$2 тыс.	\$300	\$100	\$1

различных Н-мазеров может значительно отличаться (вплоть до 10^{-12}), к тому же частота мазера подвержена медленному дрейфу. Напомним, что экспериментальная точность определения частоты сверхтонкого перехода в атоме водорода составляет $1420,405751767(1)$ МГц (относительная точность 7×10^{-13}) [5]. При этом воспроизводимость частоты современных первичных цезиевых стандартов фонтанного типа составляет около единицы 16 знака [6]. Другим ограничением является теоретическая точность расчёта $\Delta E_{\text{HFS}}^{(\text{theor})}$, находящаяся на уровне 10^{-8} [7]. Погрешность связана в первую очередь с неточностью определения зарядового и магнитного радиусов протона. Таким образом, Н-мазеры, несмотря на кажущуюся привлекательность, не могут использоваться в качестве высокоточных стандартов частоты с хорошей воспроизводимостью. При этом за счёт чрезвычайно высокой стабильности частоты выходного сигнала они нашли широчайшее применение в метрологических лабораториях, играя роль хранителя частоты и времени (своеобразного маховика-интегратора). Н-мазеры находят также широкое применение в задачах наземной и космической навигации, радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой (РСДБ) и решении фундаментальных задач.

Помимо рукотворных мазеров существуют и природные космические объекты, испускающие мазерное излучение. Так, первый космический мазер на молекуле ОН (длина волны генерации 18 см) был обнаружен в 1965 г. [8]. Один из первых обзоров по космическим мазерам представлен в журнале *УФН* в 1975 г. [9]. Наиболее распространёнными космическими мазерными источниками являются скопления молекул гидроксила (ОН), воды (H_2O), метанола (CH_3OH) и монооксида кремния (SiO), при этом накачка происходит за счёт внешнего космического излучения.

Помимо Н-мазеров за последние десятилетия создано множество разнообразных стандартов частоты, некоторые из которых перечислены в таблице. Стандарты обладают существенно отличающимися характеристиками (точностью и стабильностью воспроизводимой частоты, габаритами, потребляемой мощностью, стоимостью) и находят применение в различных областях науки и техники, где требуются соответствующие характеристики.

Ещё в далёком 1968 г. Н.Г. Басов совместно с В.С. Летоховым [10] указали на перспективность оптических стандартов частоты. Огромный путь, пройденный научным сообществом за прошедшие годы, вывел оптические стандарты частоты на уровень относительной погрешности 10^{-19} [11], что подтвердило самые смелые ожидания Н.Г. Басова. Широкая практическая востре-

бованность столь точных стандартов сегодня пока не очевидна, при этом они успешно используются в разнообразных фундаментальных тестах [12]. Наиболее просматриваемой на сегодня областью применения оптических часов с относительной погрешностью ниже 10^{-17} является гравиметрия, поскольку они оказываются достаточно чувствительными для измерения разности гравитационных потенциалов вблизи поверхности земли (относительный сдвиг частоты составляет около 10^{-16} м^{-1}). В заключении обзора обсуждаются перспективные направления развития оптических часов для повышения их точности и надёжности функционирования.

2. Н-мазеры в лабораториях и космических исследованиях

2.1. Н-мазеры в государственных службах времени и научных лабораториях

Чрезвычайно высокая стабильность частоты Н-мазера и долговечность функционирования делают его незаменимым инструментом в национальных службах времени. Если первичные стандарты частоты (цезиевые пучковые стандарты и атомные фонтаны) обеспечивают воспроизведение секунды СИ, то мазеры, в свою очередь, исполняют функцию хранителя времени, интегрируя сигнал на интервалах от секунд до десятков суток и более. Характерный вид аллановской девиации одного из лучших изготавливаемых в России активных Н-мазеров (Ч1-1035, АО "Время-Ч") представлен на рис. 2. Видно, что нестабильность частоты Н-мазера снижается на интервалах времени измерения более 10^3 с составляет менее 1×10^{-15} , достигая $(2-3) \times 10^{-16}$ на интервалах времени измерения 10^5 с. Столь впечатляющего результата удалось добиться за счёт значительного усовершенствования системы: дополнительной стабилизации резонатора, перемешивания $m_F = -1$ и $m_F = +1$ магнитных подуровней после магнита-селектора и прецизионной системы автоматической настройки резонатора [13].

Для формирования надёжной шкалы времени крупные национальные метрологические лаборатории создают комплекс из нескольких Н-мазеров, первичных стандартов и систем взаимного сличения и сличения с сигналами глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Несколько Н-мазеров, работающих одновременно (обычно блоками по четыре), требуется для повышения надёжности системы. Сличение частот в непрерывном режиме происходит с использованием прецизионных компараторов и счётчиков интервалов времени, например Ч7-315.

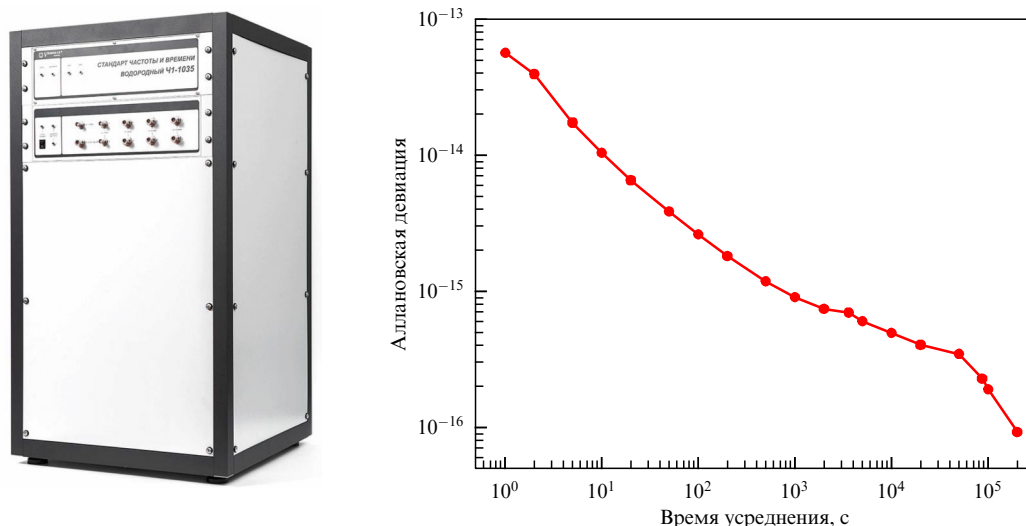


Рис. 2. Аллановская девиация активного Н-мазера Ч1-1035, производитель АО "Время-Ч".

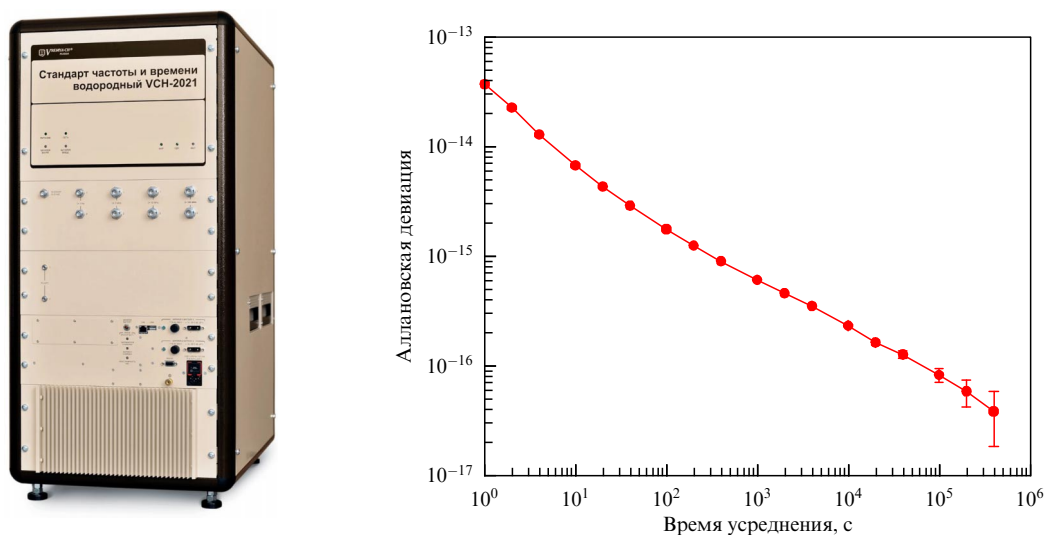


Рис. 3. Аллановская девиация активного Н-мазера VCH-2021, производитель АО "Время-Ч".

Сегодня в национальном метрологическом институте России ВНИИФТРИ функционирует эталон времени ГЭТ1, в который включены первичный цезиевый стандарт частоты фонтанного типа, два рубидиевых стандарта фонтанного типа, 16 Н-мазеров [14] и оптический стандарт частоты на атомах стронция [15]. За счёт совершенствования эталонной базы, в том числе значительного улучшения характеристик Н-мазеров, вклад России в формирование мировой шкалы времени UTC, формируемой службой ВРМ на основе статистически взвешенных вкладов мировых стандартов частоты, значительно вырос. На сегодня вклад российской национальной шкалы UTC(SU) в мировое время UTC достигает 17 %. В свою очередь, вклад водородных мазеров в формирование мировой шкалы времени составляет более 90 %.

Активные и пассивные Н-мазеры широко применяются и в научных лабораториях, где требуется создать локальную "институтскую" шкалу частоты и времени. Калибровка частоты активного Н-мазера по сигналам ГНСС позволяет после длительного усреднения (около

10 сут) сформировать сигнал опорной частоты с относительной точностью воспроизведения на уровне 10^{-15} , что ограничивается возможностями канала сличения со спутниковым сигналом. Такая локальная шкала востребована как для точных радиочастотных измерений и калибровок, так и для задач прецизионной спектроскопии в оптическом диапазоне [16].

Дальнейшее совершенствование Н-мазеров связано с применением технологии получения пучка атомов водорода в одном квантовом состоянии (атомы в состоянии с $F=1$, $m_F=-1$ исключаются из пучка), которая позволяет уменьшить вклад тепловых шумов резонатора в нестабильность частоты приблизительно в 1,5 раза. Эта технология внедрена в перспективный стандарт частоты и времени водородный VCH-2021 (рис. 3), что позволило достичь нестабильности частоты менее 1×10^{-16} на интервале времени измерения 1 сут. В данный момент идёт подготовка к серийному производству VCH-2021 [17].

Пассивные водородные стандарты частоты имеют значительно меньшие размеры, массу и цену. По устойчивости и прочности к внешним воздействиям пассивный

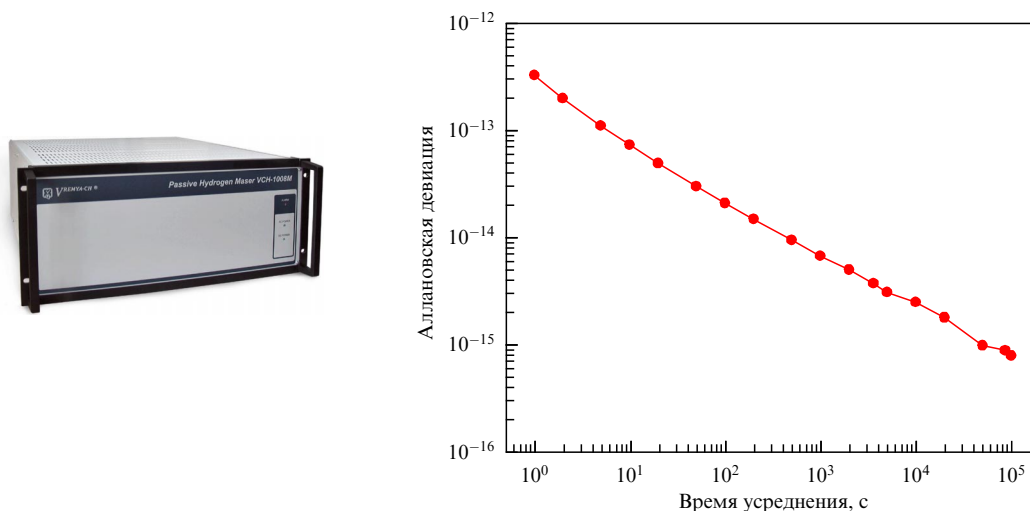


Рис. 4. Аллановская deviation пассивного Н-мазера VCH-1008M, производитель АО "Время-Ч".

водородный стандарт частоты значительно превосходит активные водородные стандарты и имеет на порядок более высокие характеристики по сравнению с рубидиевыми и цезиевыми стандартами частоты. Внешний вид и deviation Аллана промышленно выпускаемого пассивного водородного стандарта частоты VCH-1008M представлены на рис. 4.

При внедрении технологии двойной сортировки атомов в пассивные стандарты частоты возможно уменьшение нестабильности частоты на интервале времени измерения 1 сут вплоть до 5×10^{-16} , при этом увеличение длины физической части прибора (водородного дискриминатора) составит около 60 мм.

2.2. Н-мазеры в тестах фундаментальных теорий и космических миссиях

В своей пионерской работе 1961 г. "О возможности исследования релятивистских эффектов с помощью молекулярных и атомных стандартов частоты" [18] Н.Г. Басов предложил использовать уникальные свойства мазерного излучения в тестах Общей и Специальной теории относительности (ОТО, СТО), а также для исследования космологических эффектов. Кажется удивительным, что всего полвека назад каноническая поправка старшего порядка ОТО, отвечающая за сдвиг частоты в гравитационном поле $\Delta f/f = \Delta U/c^2$, продолжала вызывать споры и дискуссии (ΔU — разность гравитационных потенциалов в точках наблюдения). Поправка носит название гравитационного "красного" смещения, поскольку частота излучения уменьшается при уменьшении гравитационного потенциала (удалении от массивного объекта).

В качестве примера можно привести запуски первых спутников американской системы GPS в 1977 г. ОТО предсказывает, что ход часов на орбите должен отличаться от их хода на Земле за счёт двух эффектов: гравитационного смещения и дилатации времени. Для орбиты спутников GPS (20000 км) относительная поправка при приходе сигнала на поверхность Земли составляет около $+5 \times 10^{-10}$ и её учёт является абсолютно критическим для обеспечения точности навигации [19, 20]. Однако конструкторы спутников не были уверены не только в величине этой поправки, но даже в её знаке, поэтому

была заложена возможность подстройки частоты передаваемого сигнала. После трёх недель сличения с наземными станциями поправка была вычислена экспериментально ($4,425 \times 10^{-10}$), что с точностью 1 % совпало с теоретическим предсказанием [19].

Для детального исследования вклада эффектов ОТО американскими учёными примерно в то же время (1976 г.) была осуществлена миссия "Gravity probe A" (GPA). На ракету, запущенную в суборбитальный полёт на высоту 10000 км, был установлен активный Н-мазер, частота которого в течение всего полёта сличалась с наземным стандартом. В результате эксперимента было установлено, что возможное отклонение от предсказания теории $\Delta f/f = (1 + \alpha)\Delta U/c^2$ (здесь α — мера отклонения) не превышает $|\alpha| < 7 \times 10^{-5}$ [21]. Этот результат оставался рекордным по чувствительности вплоть до последнего времени (2018 г.), когда ограничение было усилено в пять раз по анализу сигналов спутников GALILEO, находящихся на слегка эксцентрической орбите [22].

Следующий после GPA запуск активного Н-мазера в космос состоялся в 2011 г. в рамках российской космической миссии "Спектр-Р" ("Радиоастрон", ФИАН). Миссия "Радиоастрон", создателем которой являлся академик Н.С. Кардашёв, представляет собой радиоинтерферометр со сверхдлинной базой (РСДБ), одно из плеч которого вынесено на космический аппарат, обращающийся вокруг Земли по эллиптической орбите [23]. При этом удалось существенно увеличить базу интерферометра вплоть до 300000 км, что сделало прибор наиболее зорким из существующих РСДБ-телескопов. При наблюдении мазерных космических источников было достигнуто угловое разрешение в 8 мкс дуги, что сегодня является мировым рекордом.

Для того чтобы обеспечить запись сигнала космической антенной для последующей обработки на корреляторе (рис. 5), на борту аппарата должен стоять стандарт частоты, обеспечивающий точные метки времени. Н.С. Кардашёв принял решение установить на борт космического аппарата два активных Н-мазера производства компании АО "Время-Ч" (VCH-1010 № 004-07 и № 005-07), которые обладали достаточными характеристиками для обеспечения миссии. Это был существенный риск, поскольку надёжность функционирования

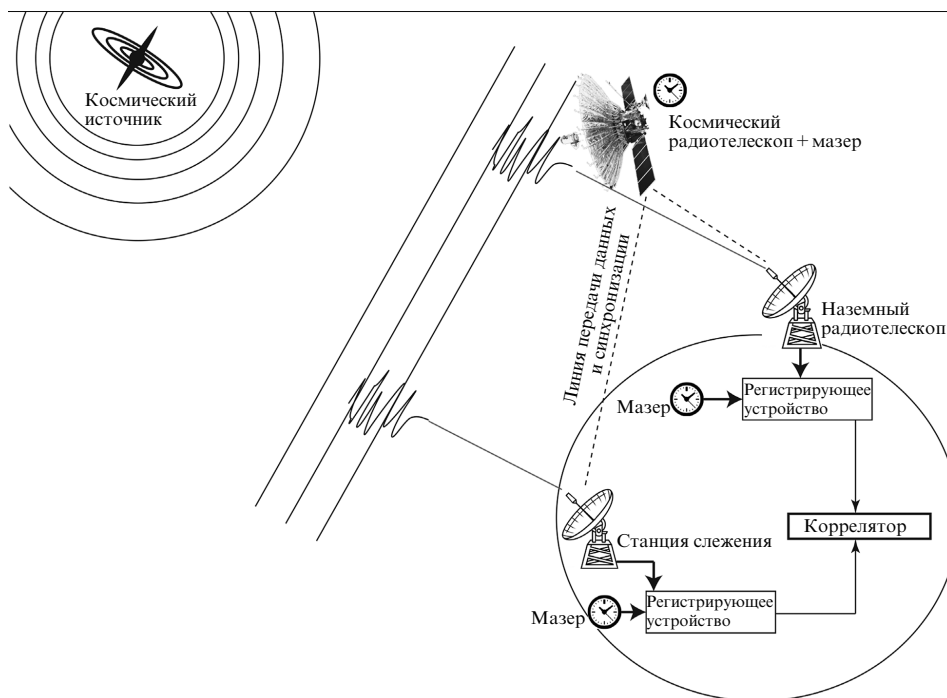


Рис. 5. Схема РСДБ. Сигнал, получаемый антенной, усиливается, оцифровывается и записывается синхронно вместе с метками времени, которые обеспечиваются стандартом частоты. После этого сигналы от двух (или более) антенн поступают на коррелятор, на котором производится обработка сигнала.

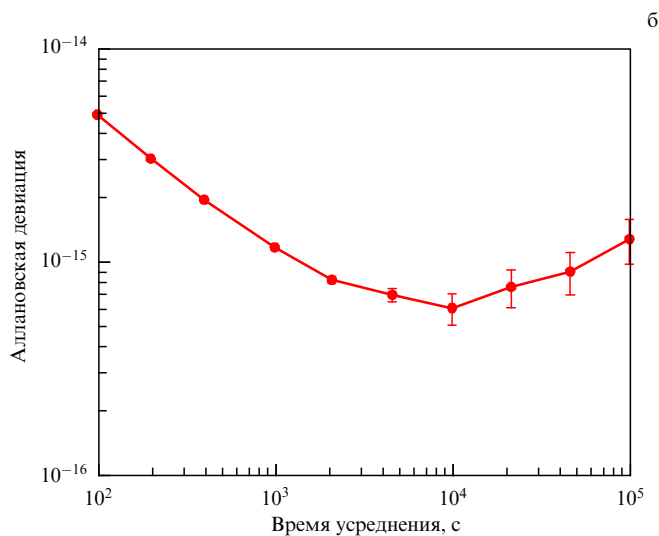


Рис. 6. (а) Водородный мазер, установленный на борту космического телескопа "Радиоастрон". (б) Аллановская девиация частоты мазера за вычетом линейного дрейфа. Для записи данных на борту использовались интервалы около 1000 с, что соответствует относительной погрешности частоты 10^{-15} .

Н-мазеров в длительных космических миссиях не была изучена.

После запуска и вывода радиотелескопа на орбиту один из бортовых Н-мазеров оказался неисправным, но при этом второй был успешно запущен и проработал на орбите около шести лет (вся миссия длилась с 2011 г. по 2018 г.). Характеристики Н-мазера, использовавшегося на борту "Радиоастрона", и измеренные перед запуском, представлены на рис. 6.

Российский проект XXI в. "Радиоастрон" позволил получить уникальные данные о квазарах и активных

ядрах галактик, пульсарах, галактических и внегалактических источниках мазерного излучения. Обработка данных продолжается, учёные анализируют результаты, накопленные в период работы "Радиоастрона".

Следующим проектом ФИАН является миссия "Спектр-М" или "Миллиметрон" [24]. Это тоже РСДБ-телескоп, который будет функционировать в миллиметровом диапазоне длин волн (от 80 мкм до 3 мм), что позволит выполнить передовые исследования физики сверхмассивных чёрных дыр, раскрыть детали происхождения Вселенной и эпохи реионизации, вы-

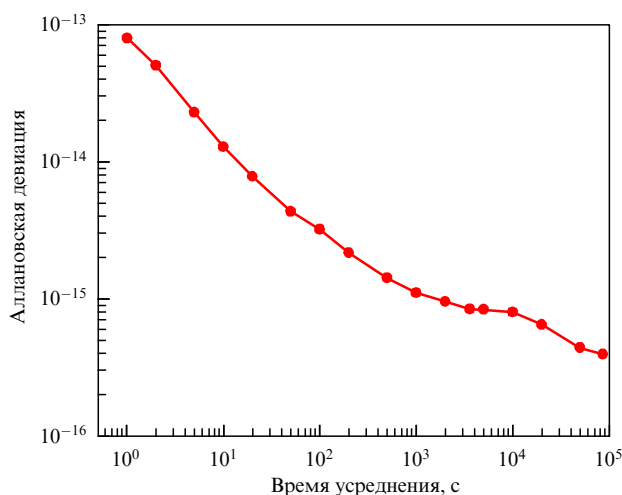


Рис. 7. Н-мазер компании АО "Время-Ч" бортового исполнения для миссии "Миллиметр" (ФИАН).

полнить исследование образования звёзд и планет, провести поиск следов воды. Для обеспечения режима РСДБ, как и в случае "Радиоастрона", требуется бортовой стандарт частоты, в качестве которого запланирован Н-мазер с улучшенными характеристиками (рис. 7). При этом время жизни приборов составляет больше 10 лет, масса не более 56 кг, габаритные размеры $\varnothing 460 \times 671$ мм.

Таким образом, Россия не только впервые в мире осуществила запуск активного Н-мазера в длительный орбитальный полёт, но существенно улучшила характеристики таких бортовых систем, что выводит нас в абсолютные мировые лидеры. Необходимо, чтобы этот опыт и наработки продолжали развиваться, учитывая амбициозные планы коллективов из Европы [25], США и Китая, активно работающих в этом направлении.

2.3. Н-мазеры в системах глобальной спутниковой навигации

Повышение стабильности частоты бортового синхронизирующего устройства в системах ГНСС остаётся важной задачей и сохраняет свою актуальность, несмотря на значительный прогресс последних десятилетий. Так, суточная нестабильность сигнала спутников "Глонасс-М" и "Глонасс-К" составляет 1×10^{-13} , а "Глонасс-К2" — 5×10^{-14} [26]. Учитывая, что относительная погрешность бортовых часов на уровне 1×10^{-14} или 1 нс сут⁻¹ соответствует ошибке в определении псевдодалности 30 см, можно сделать вывод, что вклад погрешности существующих бортовых систем остаётся существенным в общем бюджете погрешности определения координат. В существующих аппаратах ГЛОНАСС бортовое синхронизирующее устройство включает в себя комплекс из пучковых цезиевых часов и часов на рубидиевой ячейке. Принято решение о необходимости снижения погрешности в следующих поколениях аппаратов ГЛОНАСС до уровня 5×10^{-15} (1 сут) и далее до 2×10^{-15} (1 сут) в перспективных системах. При этом потенциал рубидиевых и цезиевых стандартов на сегодняшний день фактически исчерпан.

В 2016 г. Европейский союз начал заполнение собственной орбитальной группировки ГНСС – GALILEO.

Принцип работы GALILEO не отличается от существовавших до него GPS и ГЛОНАСС, однако европейцами было принято решение устанавливать в качестве бортового стандарта пассивный Н-мазер (вместо часов на цезиевом пучке). При разработке конструкции этого мазера [27] были использованы результаты, полученные учёными из Н. Новгорода. Несмотря на возникший в начале проекта скепсис по отношению к надёжности функционирования Н-мазеров на борту, измеренные характеристики однозначно указывали на то, что нестабильность частоты пассивных Н-мазеров во много раз меньше нестабильности бортовых рубидиевых стандартов [28]. Так, нестабильность частоты достигает 7×10^{-15} при дрейфе всего $1,9 \times 10^{-14}$ сут⁻¹. Установка столь качественного бортового стандарта частоты явилась одной из ключевых причин, по которой точность определения координат с использованием сигналов GALILEO — менее 1 м в обычном режиме — в несколько раз превосходит точность, обеспечиваемую системами GPS и GLONASS.

Как упоминалось, конструкция пассивного Н-мазера для космического использования была изначально разработана в России, примерно одновременно с европейцами были созданы и первые работающие образцы (рис. 8). При этом характеристики последних образцов пассивных Н-мазеров во многом превосходят зарубежные, в том числе установленные в системе GALILEO. Так, нестабильность частоты достигает $1,5 \times 10^{-15}$ на интервале времени измерения 1 сут при массе прибора 12,5 кг и габаритных размерах $470 \times 170 \times 200$ мм.

Таким образом, учитывая характеристики выходного сигнала, габариты и надёжность, пассивный Н-мазер на сегодняшний день представляется наилучшей возможностью для модернизации бортового синхронизирующего устройства на спутниках ГЛОНАСС. Лётные испытания пассивного Н-мазера намечены на 2023 г., и мы надеемся, что он продемонстрирует требуемые характеристики при работе с комплексом бортовой аппаратуры. В развитие перспективных бортовых систем также планируется использовать оптические стандарты частоты [29, 30], которые сегодня разрабатываются кооперацией российских организаций (АО "РКС", ФИАН, Сколтех).

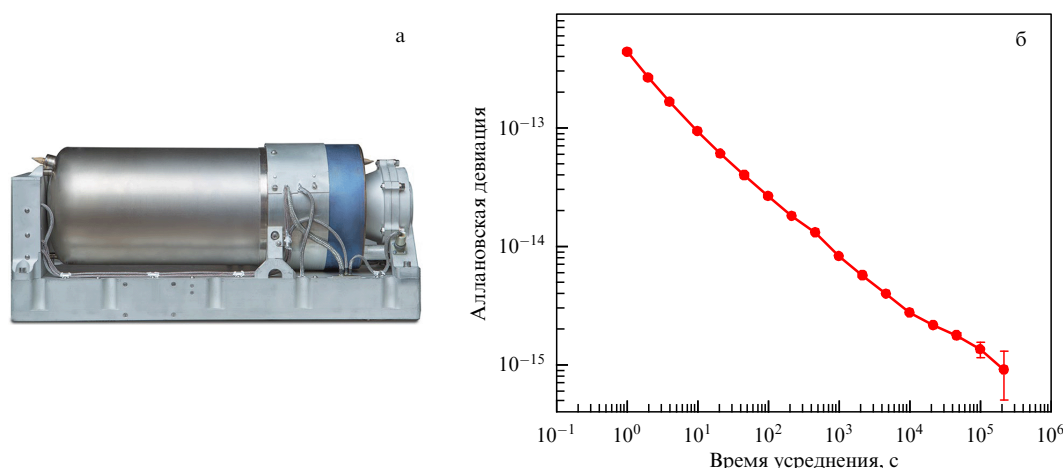


Рис. 8. (а) Пассивный Н-мазер, созданный компанией АО "Время-Ч". (б) Характеристики выходного сигнала Н-мазера российской разработки.

3. Перспективы развития оптических стандартов частоты

3.1. Переход из микроволнового диапазона в оптический

В основополагающей работе Н.Г. Басова в соавторстве с его учеником и коллегой В.С. Летоховым "Оптические стандарты частоты" [10] был обозначен путь развития направления на десятилетия вперед. Повышение несущей частоты из диапазона 10^{10} Гц (микроволновый диапазон) в область $10^{14}–10^{15}$ Гц (оптический диапазон) обеспечивает соответствующий рост добротности атомных резонансов Q . Как следствие, повышается точность и стабильность стандартов частоты в соответствии с выражением

$$\sigma_y(\tau) = \frac{1}{K} \frac{1}{Q} \frac{1}{S/N} \frac{1}{\sqrt{\tau/c}}.$$

Здесь K — коэффициент порядка единицы, а S/N — отношение сигнал/шум. Кроме того, существенным преимуществом оптических стандартов является значительное, на несколько порядков, снижение времени усреднения для выхода на заданный уровень нестабильности. Если для микроволновых стандартов время выхода на уровень 10^{-16} занимает около 10 сут, то для оптических систем для этого может потребоваться от 1 до 100 с (в зависимости от характеристик опрашивающего лазера). Это свойство открывает возможности оперативного анализа систематических эффектов, присутствующих в системе и ограничивающих точность.

Эпоха оптических стандартов частоты, открытая в СССР Н.Г. Басовым и подхваченная В.С. Летоховым (который в 1970 г. перешёл из ФИАНа в ИСАН (Институт спектроскопии РАН)) и В.П. Чеботаевым (Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова (ИФП) СО РАН, с 1991 г. Институт лазерной физики (ИЛФ) СО РАН) и многими другими выдающимися учёными того времени, пришла сегодня к расцвету этого направления. Эксперименты, выполняющиеся с использованием оптических часов, позволяют реализовать наиболее чувствительные тесты фундаментальных физических теорий (поиск дрейфа постоянной тонкой структуры, поиск тем-

ной материи, чувствительные тесты эффектов СТО и ОТО, проверки принципа эквивалентности), что отражено в ряде обзоров [12, 31]. На сегодня существует целый ряд оптических стандартов частоты, работающих как на нейтральных атомах [32, 33], так и ионах [34, 35], для которых относительная воспроизводимость частоты перешла рубеж 18-го знака после запятой, что подтверждает самые смелые ожидания Н.Г. Басова и его коллег.

Частичный обзор работ по часам на одиночных ионах и перспективам развития представлен в работе [36]. Здесь мы кратко подытожим прогресс в области разработки оптических часов на ультрахолодных лантаноидах в ФИАНе, достигнутый с 2016 г., когда использование тулия в качестве стандарта частоты было обосновано в [37]. Поскольку метрологический ("часовой") переход в атоме тулия не изучался другими группами, в дальнейшей части обзора мы представим результаты типичного цикла исследований, сопровождающего разработку и характеризацию любого оптического стандарта на нейтральных атомах.

3.2. Часовой магнитодипольный переход 1,14 мкм в атомах тулия

Прежде всего для реализации оптических часов на нейтральных атомах необходимо охладить атомный ансамбль до температуры 1–10 мК, что обеспечит возможность перезагрузки в оптическую решётку, сформированную стоячей световой волной (рис. 9).

Двухступенчатое охлаждение атомов Tm было впервые реализовано в ФИАНе, что позволяет охладить облако, состоящее из 10^6 атомов, до температуры менее 25 мК [38]. Оптическая решётка выполняет две функции: 1) удержание атомов для повышения времени взаимодействия с опрашивающим лазерным излучением (вплоть до нескольких секунд) и 2) обеспечение режима Лэмба–Дике, при котором атом оказывается локализован в области пространства много меньше длины волны возбуждающего света [39]. При выполнении условия Лэмба–Дике эффект Доплера первого порядка не оказывает влияния на несущую частоту, соответствующий сдвиг частоты обнуляется.

Однако поляризация атомов, обеспечивающая их удержание в решётке, одновременно приводит и к световому сдвигу частоты (динамический эффект Штарка).

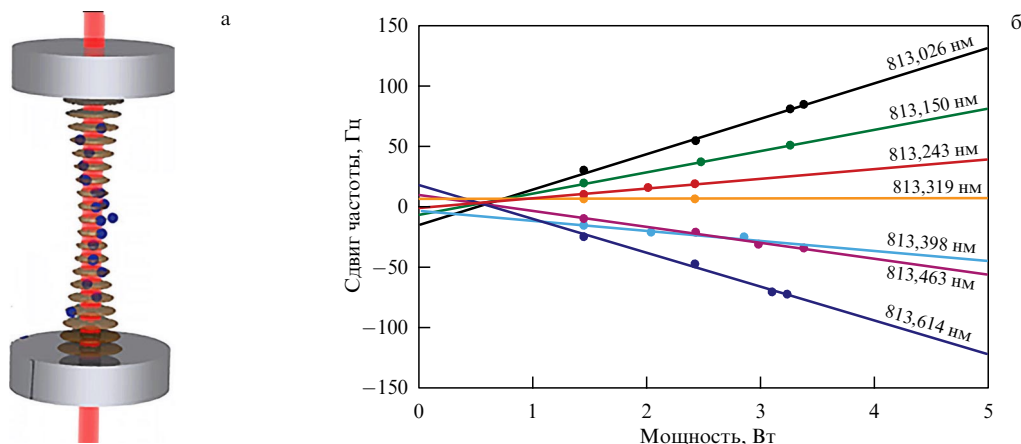


Рис. 9. (а) Атомы в вертикальной оптической решётке, сформированной стоячей волной в резонаторе Фабри – Перо. (б) Экспериментальное определение магической длины волны. Выполняются измерения сдвига центра линии в зависимости от мощности оптической решётки и её длины волны.

Прорывным предложением, которое сейчас нашло применение во всех часах на нейтральных атомах, было использование так называемой "магической" длины волны, при которой разностная поляризуемость верхнего и нижнего часовых уровней обнуляется в первом порядке (линейное приближение) [39]. Обычно положение магической длины волны сначала оценивается из расчётов, а потом уточняется в эксперименте. Поиск и анализ магической длины волны является самостоятельной исследовательской задачей.

Для часового магнитодипольного перехода в атомах тулия нами был выполнен расчёт разностных поляризуемостей часовых уровней и выделены кандидаты для магической длины волны в области 808, 813 и 1063 нм [40]. Точные измерения для диапазона 813 нм показали, что поляризуемости верхнего и нижнего уровней сравниваются при $\lambda_{m1} = 813,320$ нм (рис. 9б).

Эта длина волны может быть обеспечена излучением лазера на Ti:Sa или полупроводникового лазера. Отметим, что качество сигнала, считываемого с часового перехода атомов в оптической решётке, существенно зависит от спектральных свойств излучения решётки — уровня фазовых и амплитудных шумов. При настройке на магическую длину волны спектр часового перехода сужается (исчезает уширение мощностью). В наших экспериментах с атомами тулия обычно использовались линии со спектральной шириной около 10 Гц, что ограничено длительностью импульса возбуждающего поля (80 мс). Дальнейшее сужение линии при работе в режиме оптических часов обычно не целесообразно, поскольку существенно удлиняет цикл эксперимента и не приводит к снижению σ_y .

В последующих экспериментах мы планируем использовать другую магическую длину волны, $\lambda_{m2} = 1063$ нм, что обусловлено рядом преимуществ: доступностью более мощных и стабильных лазерных источников, большой отстройкой от ближайших резонансов и соответствующим снижением рассеяния. Таким образом, с точки зрения спектральной ширины резонанса, количества атомов и характеристик оптической решётки, оптические часы на тулии находятся в одном ряду с другими распространёнными системами на стронции [32] и иттербии [41]. Отметим, что оптические часы на ней-

тральном Sr рассматриваются метрологическим сообществом в качестве основного кандидата для переопределения секунды СИ ввиду их широкой распространённости в мире и успешно подтверждённых сличений. К определённым недостаткам тулиевых часов можно отнести более низкую частоту резонанса (в 1,6 раза ниже, чем в стронции) и большой зеемановский сдвиг.

Чрезвычайно важной характеристикой любых оптических часов является вклад систематических эффектов, которые необходимо контролировать с высокой точностью. Существенный вклад в бюджет погрешностей оптических часов на нейтральных атомах обычно вносят: 1) сдвиг излучением чёрного тела, 2) зеемановский сдвиг, 3) сдвиги старших порядков от оптической решётки, столкновения и пр. [42]. Так, в стронциевых часах относительный сдвиг часового перехода (698 нм) излучением чёрного тела составляет -5500×10^{-18} (при комнатной температуре 300 К). Таким образом, для достижения уровня 18-го знака необходимо контролировать вклад этого эффекта с чрезвычайно высокой точностью или охлаждать установку до криогенных температур [33].

Нами было экспериментально показано, что за счёт уникальной структуры уровней в тулии и специфики магнитодипольного перехода 1,14 мкм сдвиг частоты излучением чёрного тела, описываемый выражением

$$\Delta\nu_{\text{BBR}} = -\Delta\alpha_0^S \frac{\pi^2 a_0^3 k_B^4}{15c^3 \hbar^4} T^4,$$

оказывается чрезвычайно низким. Здесь $\Delta\alpha_0^S$ — разностная скалярная поляризуемость (статическая) верхнего и нижнего часовых уровней, a_0 — боровский радиус, k_B — постоянная Больцмана, T — температура окружения. В работе [43] нами была экспериментально определена разностная динамическая скалярная и тензорная поляризуемость в широком спектральном диапазоне для перехода 1,14 мкм, что позволило установить, что при комнатной температуре сдвиг излучением чёрного тела в тулии составляет всего $2,3 \times 10^{-18}$, в 2000 раз ниже, чем в оптических часах на атомах стронция. Этот результат существенно снижает требования к контролю температуры, позволяя создавать компактные транспортируемые системы [44].

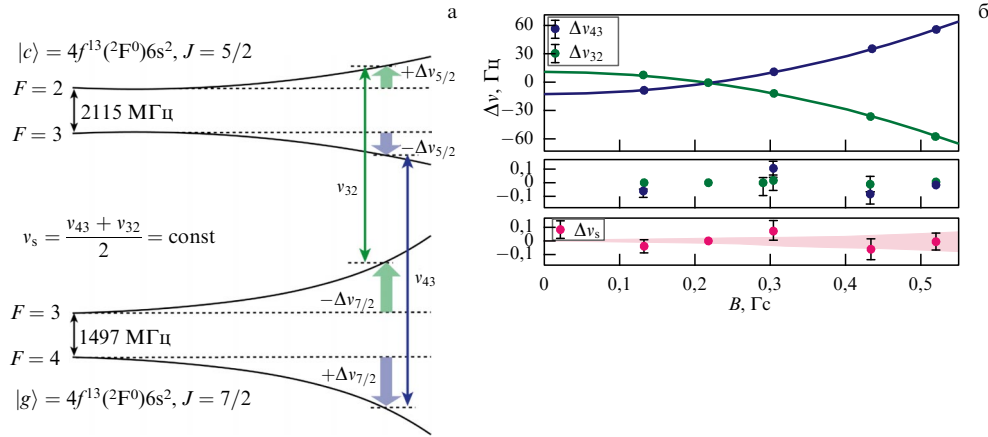


Рис. 10. (а) Уровни часового перехода в атомах тулия-169 с учётом сверхтонкой структуры. Бихроматическим лазерным полем одновременно опрашиваются два часовых перехода v_{43} ($F = 4 \rightarrow F = 3$) и v_{32} ($F = 3 \rightarrow F = 2$), в обоих случаях зеемановские компоненты с нулевой проекцией спина ($0-0$ переходы). Синтетическая частота $v_s = (v_{43} + v_{32})/2$ нечувствительна к магнитному полю. (б) Измерение зеемановского сдвига во внешнем магнитном поле B Δv_{43} и Δv_{32} для двух часовых переходов v_{43} и v_{32} соответственно. На нижнем графике показано поведение синтетической частоты v_s .

Подробное исследование другого доминирующего систематического эффекта — зеемановского сдвига — показало, что он может быть полностью исключён в атоме тулия за счёт измерения так называемой "синтетической" частоты, являющейся комбинацией частот двух переходов. Сама по себе идея синтетической частоты не является новой [45], однако в ФИАНе удалось впервые реализовать одновременное (а не последовательное) возбуждение двух часовых переходов, что позволяет полностью исключить влияние магнитного поля [46]. На рисунке 10 представлена система уровней часового перехода 1,14 мкм в атоме тулия-169 с учётом сверхтонкой структуры нижнего и верхнего уровней.

Поскольку спин ядра атома тулия равен $I = 1/2$, справедлива формула Брейта–Раби для расщепления уровней в магнитном поле, которая имеет вид

$$E_{F=J\pm 1/2}(m_F, B) = E_F^0 + g_J \mu_B B m_F \pm \frac{(g_J - g_I)^2 \mu_B^2 B^2}{4 E_{\text{HFS}}} \left(1 - \frac{m_F^2}{(2J+1)^2} \right),$$

где B — напряжённость магнитного поля, m_F — магнитное квантовое число, J — квантовое число полного момента электронной оболочки атома. Из формулы видно, что верхний ($F = J + 1/2$) и нижний ($F = J - 1/2$) компоненты сверхтонкой структуры для каждого из электронных уровней сдвигаются в магнитном поле абсолютно симметрично, что обеспечивает полную независимость синтетической частоты $v_s = (v_{43} + v_{32})/2$, являющейся полусуммой двух частот, от магнитного поля B . Компенсация зеемановского сдвига была исследована экспериментально (рис 10б), что подтверждает как минимум 1000-кратную компенсацию зеемановского сдвига.

Важной особенностью выполненных исследований являлся одновременный опрос двух сверхтонких компонент часовых переходов, что технически относительно легко реализуется с помощью акусто-оптических модуляторов. Именно за счёт одновременного опроса полностью компенсируется вклад флуктуаций магнитного поля, который неизбежен при последовательной схеме.

Экспериментальная демонстрация и верификация такой схемы открывают новые возможности в области создания оптических часов с минимальным вкладом систематических эффектов. Сложной частью этой задачи был контроль за переносом населённости между четырьмя часовыми уровнями, который происходит в процессе спонтанного распада верхних уровней. В атоме тулия время опроса перехода (несколько десятков мс) сопоставимо с временем жизни верхнего уровня (130 мс), что потенциально может привести к искажению спектров и сдвигам частоты. Тщательный анализ процессов переноса населённости, выполненный в работе [46], показал, что эти сдвиги не превышают 2×10^{-18} .

Измерения продемонстрировали, что относительная нестабильность синтетической частоты не превышает 10^{-16} при времени усреднения 1000 с, что ограничивается в настоящее время шумами лазерной системы и возможностями метода измерения. Оценки относительной нестабильности, выполненные по сравнению различных подгрупп экспериментальных данных и частичной компенсацией шумов лазера (сличение двух часовых переходов), показывают, что дисперсия частоты часового перехода достигает 20 мГц (7×10^{-17} в относительных единицах) [46]. По статистическим характеристикам часы на тулии пока в несколько раз уступают своим основным конкурентам — стронциевым и иттербиевым часам на оптических решётках. Улучшение может быть достигнуто за счёт использования опрашивающего лазера следующего поколения, например, со стабилизацией по криогенному кремниевому резонатору [47].

Как отмечалось выше, ключевой характеристикой оптических часов является величина систематических сдвигов. Тулиевые часы являются одним из рекордсменов среди оптических часов на нейтральных атомах, сочетая чрезвычайно низкий вклад сдвига излучением чёрного тела и полную компенсацию зеемановского сдвига. Анализ всех других известных сдвигов, выполненных в работе [43], показал, что их суммарный вклад не превышает $1,7 \times 10^{-17}$ (без компенсации, при комнатной температуре), причём основной вклад вносит поле удерживающей оптической решётки. Это открывает уверенные возможности для создания транспортируемых систем,

обеспечивающих погрешность и воспроизводимость частоты на уровне единицы 17-го знака, что широко требуется в задачах метрологического обеспечения, навигации и гравиметрии [48].

Нашей группой сделаны первые шаги по созданию транспортируемых тулиевых часов: создана и охарактеризована компактная магнитооптическая ловушка без зеемановского замедлителя [44], по характеристикам не уступающая предыдущему поколению. С использованием новой установки выполнены первые эксперименты по глубокому охлаждению атомов тулия и захвату в оптическую решётку. В настоящее время выполняются исследования по более глубокому охлаждению атомов (третья стадия охлаждения на узком переходе 506 нм) для снижения вклада сдвигов оптической решётки, ведутся работы по уточнению магической длины волны в области 1063 нм. Целью ближайших экспериментов является сравнение двух систем, демонстрация относительной нестабильности на уровне 10^{-17} и проведение исследований по влиянию гравитационного потенциала на тулиевые часы, что будет осуществляться с помощью поднятия одной из систем на несколько десятков сантиметров относительно другой (аналогично работам [49, 50]).

Ещё одной важной задачей, которую требуется решить при создании следующих поколений оптических часов, является устранение вклада эффекта Дика [51]. Эффект Дика возникает в системах с периодическим считыванием сигнала, в результате чего часть высокочастотных шумов опрашивающего лазера переносится в низкочастотный диапазон и ухудшает статистические характеристики оптических часов. Вклад эффекта Дика в нестабильность описывается выражением

$$\sigma_{\text{Dick}}^2(\tau) = \frac{1}{\tau} \sum_{n=1}^{\infty} \left| \frac{G_n}{G_0} \right|^2 S_y \left(\frac{n}{T_c} \right),$$

где T_c — полный период опроса атома, $S_y(f)$ — спектральная плотность шумов опрашивающего лазера на частоте f , а $G(t)$ — функция, описывающая отклик атомной системы на малое отклонение фазы опрашивающего лазера. Видно, что вклад σ_{Dick} спадает по закону $1/\sqrt{\tau}$ (достаточно медленно) и существенно ухудшает характеристики часов на всех временах усреднения. Эффект Дика фактически является проявлением муара, который, например, наблюдается в цифровых осциллограммах (со строго периодической оцифровкой входного сигнала) при регистрации высокочастотных сигналов на медленных временах развёртки.

Эффект Дика может быть снижен при использовании сверхмалощумящих опрашивающих лазеров (например, на основе криогенных резонаторов) [52] или при использовании двух независимых опрашиваемых систем. Так, в экспериментах с двумя стронциевыми часами [53] было показано, что синхронный опрос позволяет снизить относительную нестабильность систем примерно на порядок (с 10^{-15} на 100 с до 10^{-16} на 100 с) за счёт устранения эффекта Дика. Однако такой метод является очень трудоёмким и затратным. Снижение собственных шумов опрашивающего лазера является отдельной трудоёмкой задачей, на сегодняшний день кремниевые криогенные резонаторы с нестабильностью ниже 10^{-16} (1 с) успешно функционируют только в США и Германии.

Одной из возможностей устранения эффекта Дика являются непрерывно работающие оптические часы.

Такие системы могут либо использовать атомные пучки [54], либо работать в лазерном или сверхизлучательном режиме на узком метрологическом переходе [55]. Наша группа также рассмотрела возможность создания тулиевых оптических часов непрерывного типа с использованием преимущества полной компенсации зеемановского сдвига на синтетической частоте [56]. К сожалению, пока полноценно функционирующие часы непрерывного типа не реализованы как по причине значительных технических трудностей, так и за счёт увеличения вклада ряда некоторых систематических эффектов по сравнению с "классическими" оптическими часами с периодическим опросом. Прослеживается некоторая аналогия с попытками создания цезиевых атомных фонтанов непрерывного типа для метрологического обеспечения национальных лабораторий, что пока не реализовано [57].

Таким образом, на примере создания оптических часов на атомах тулия в ФИАНе мы показали путь развития аналогичных систем на других нейтральных атомах и обозначили определённые научные и технические вызовы в развитии этого направления.

4. Заключение

Развитие стандартов частоты продолжает идти по двум направлениям: для решения прикладных задач и для фундаментальных исследований. Как кажется на сегодняшний день, стандарты частоты, обеспечивающие относительную нестабильность и воспроизводимость на уровне 10^{-16} , "закрывают" основные потребности общества в таких массовых направлениях, как навигация и телекоммуникации. В таком массовом сегменте работают водородные мазеры различного типа, атомные фонтаны, часы на пучках и атомных ячейках, кварцевые осцилляторы. Продолжается борьба за повышение надёжности, компактности и снижение энергопотребления, а также выход в космический сегмент. Использование более точных систем пока находит наиболее широкое применение в фундаментальных исследованиях, а наиболее просматриваемым практико-ориентированным направлением является релятивистская геодезия.

При этом прогресс в оптических стандартах частоты не останавливается — в измерениях гравитационного смещения в миллиметровом облаке холодных атомов, выполненных группой исследователей из США в 2022 г., достигнута относительная погрешность $7,6 \times 10^{-21}$ [58]. И этот результат перешагнул тот предел ($10^{-15} - 10^{-20}$), который Николай Геннадиевич Басов обозначил смелой рукой мелом на доске около 60 лет назад, что запечатлено на одной из исторических фотографий, опубликованных в честь 100-летия со дня его рождения [59]. Идёт поиск новых переходов, наименее чувствительных к внешним воздействиям (многозарядные ионы [60], ядерные стандарты [61, 62]), улучшаются лазерные системы, разрабатываются компактные фемтосекундные гребёнки оптических частот для перехода из оптического диапазона в радиочастотный [63], создаются всё более компактные и надёжные системы. Пройдут годы, и новые, более точные, стандарты частоты будут находить всё более широкое применение в различных областях нашей жизни (может быть и тех, о которых мы сегодня не догадываемся), а характеристики передовых разработок

будут улучшаться и открывать новые возможности для познания мира.

Список литературы

- Басов Н Г, Прохоров А М, в сб. *Всесоюз. конф. по радиоспектроскопии, май 1952 г., АН СССР*
- Басов Н Г, Прохоров А М *УФН* **57** 485 (1955)
- Kleppner D, Goldenberg H M, Ramsey N F *Phys. Rev.* **126** 603 (1962)
- Ramsey N F *Angew. Chem. Int. Engl. Ed.* **29** 725 (1990)
- Hellwig H et al. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **19** 200 (1970)
- Weyers S et al. *Metrologia* **55** 789 (2018)
- Mohr P J, Taylor B N *Rev. Mod. Phys.* **77** 1 (2005)
- Weaver H et al. *Nature* **208** 29 (1965)
- Стрельницкий В С *УФН* **113** 463 (1974); Strel'nitskii V S *Sov. Phys. Usp.* **17** 507 (1975)
- Басов Н Г, Летохов В С *УФН* **96** 585 (1968); Basov N G, Letokhov V S *Sov. Phys. Usp.* **11** 855 (1969)
- Brewer S M et al. *Phys. Rev. Lett.* **123** 033201 (2019)
- Safronova M S et al. *Rev. Mod. Phys.* **90** 025008 (2018)
- Воронцов В Г и др., в сб. *Метрология времени и пространства. Международный симпозиум, Менделеево, Московская область, Россия, 12–14 сентября 2018* (Отв. ред. Л А Токина) (Менделеево: ВНИИФТРИ, 2018)
- Table 4. Equipment and source of UTC(k) of the laboratories contributing to TAI in 2020, https://www.bipm.org/documents/20126/59466374/10_Table4_TAR20.pdf/0ae3ed2f-f998-9398-fc96-6d12f406f8f6
- Слюсарев С Н и др., в сб. *Метрология времени и пространства. Международный симпозиум, Менделеево, Московская область, Россия, 12–14 сентября 2018* (Отв. ред. Л А Токина) (Менделеево: ВНИИФТРИ, 2018)
- Haroche S et al., in *Laser Spectroscopy IV, Proc. of the Fourth Intern. Conf. on Laser Spectroscopy, June 11–15, 1979, Rottach-Egern, Federal Republic of Germany* (Springer Series in Optical Sciences, Vol. 21, Ed. A L Schawlow) (Berlin: Springer-Verlag, 1979) p. 244
- Polyakov V, Timofeev Y, Demidov N, in *2021 Joint Conf. of the European Frequency and Time Forum and IEEE Intern. Frequency Control Symp., EFTF/IFCS, Gainesville, FL, USA, 2021* (Piscataway, NJ: IEEE, 2021) p. 1, <https://doi.org/10.1109/EFTF/IFCS52194.2021.9604270>
- Басов Н Г и др. *УФН* **75** 3 (1961); Basov N G et al. *Sov. Phys. Usp.* **4** 641 (1962)
- Ashby N *Living Rev. Relativ.* **6** (1) 1 (2003)
- Khabarova K *Nature* **602** 391 (2022)
- Vessot R F C *Phys. Rev. Lett.* **45** 2081 (1980)
- Delva P et al. *Phys. Rev. Lett.* **121** 231101 (2018)
- Kovalev Y Y et al., in *2014 XXXIth URSI General Assembly and Scientific Symp., 16–23 August 2014, Beijing, China*
- Smirnov A V et al. *Proc. SPIE* **8442** 1456 (2012)
- Schiller S et al., arXiv:1206.3765
- Бакитко Р В и др. *ГЛОНАСС. Модернизация и перспективы развития* (М.: Радиотехника, 2020)
- Mattioni L et al., in *Proc. of the 34th Annual Precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting, December 3–5, 2002, Reston, Virginia*
- Rochat P et al., in *Proc. of the 2005 IEEE Intern. Frequency Control Symposium and Exposition 26, Vancouver, 2005*
- Khabarova K et al. *Symmetry* **14** 2213 (2022)
- Kolachevsky N N et al. *Space* **5** (1) 12 (2018)
- Fischer M et al. *Phys. Rev. Lett.* **92** 230802 (2004)
- Bloom B J et al. *Nature* **506** 71 (2014)
- Ushijima I et al. *Nat. Photon.* **9** 185 (2015)
- Huang Y et al. *Phys. Rev. Appl.* **17** 034041 (2022)
- Huntermann N et al. *Phys. Rev. Lett.* **116** 063001 (2016)
- Хабарова К Ю, Заливако И В, Колачевский Н Н *УФН* **192** 1305 (2022); Khabarova K Yu, Zalivako I V, Kolachevsky N N *Phys. Usp.* **65** 1217 (2022)
- Вишнякова Г А и др. *УФН* **186** 176 (2016); Vishnyakova G A et al. *Phys. Usp.* **59** 168 (2016)
- Kalganova E et al. *Phys. Rev. A* **96** 033418 (2017)
- Takamoto M et al. *Nature* **435** 321 (2005)
- Tregubov D O et al. *Quantum Electron.* **49** 1028 (2019)
- Zhang A et al. *Metrologia* **59** 065009 (2022)
- Ludlow A D et al. *Rev. Mod. Phys.* **87** 637 (2015)
- Golovizin A *Nat. Commun.* **10** 1724 (2019)
- Golovizin A et al. *Opt. Express* **29** 36734 (2021)
- Yudin V I et al. *Phys. Rev. Lett.* **107** 030801 (2011)
- Golovizin A et al. *Nat. Commun.* **12** 5171 (2021)
- Kessler T et al. *Nat. Photon.* **6** 687 (2012)
- Mehlstaebler T E et al. *Rep. Prog. Phys.* **81** 064401 (2018)
- Takamoto M et al. *Nat. Photon.* **14** 411 (2020)
- Huang Y et al. *Phys. Rev. A* **102** 050802 (2020)
- Dick G J et al., in *Proc. of the 22nd Annual Precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting, December 4–6, 1990, Vienna, Virginia*, p. 487
- Oelker E et al. *Nat. Photon.* **13** 714 (2019)
- Takamoto M et al. *C.R. Phys.* **16** 489 (2015)
- Katori H *Appl. Phys. Express* **14** 072006 (2021)
- Norcia M A, Thompson J K *Phys. Rev. X* **6** 011025 (2016)
- Mishin D et al. *Appl. Phys. Express* **14** 112006 (2021)
- Jallageas A et al. *J. Phys. Conf. Ser.* **723** 012010 (2016)
- Bothwell T et al. *Nature* **602** 420 (2022)
- Николай Геннадиевич Басов, 100 лет со дня рождения (М.: Изд-во РМПИ, 2022)
- King S A et al. *Nature* **611** 43 (2022)
- Kazakov G A et al. *New J. Phys.* **14** 083019 (2012)
- Campbell C J et al. *Phys. Rev. Lett.* **108** 120802 (2012)
- Brasch V et al. *Science* **351** 357 (2016)

N.G. Basov's legacy: from the first masers to optical frequency standards

A.A. Belyaev⁽¹⁾, V.G. Voronov⁽¹⁾, N.A. Demidov⁽¹⁾, K.Yu. Khabarova⁽²⁾, N.N. Kolachevsky^(2,*)

⁽¹⁾ JSC VREMYA-CH, ul. Osharskaya 67, 603105 Nizhny Novgorod, Russian Federation

⁽²⁾ Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Leninskii prosp. 53, 119991 Moscow, Russian Federation

E-mail: ^(*) kolachevsky@lebedev.ru

The pioneering ideas of N.G. Basov, the centennial of whose birth was solemnly celebrated in 2022, laid the foundation for a number of modern research and technology areas in the field of quantum electronics and laser physics: from precision laser experiments aimed at testing the fundamental laws of physics to laser ignition of thermonuclear targets, from high-speed data transmission lines to laser welding and material processing. In this review paper, which was presented at the Basov centennial Scientific Session of the Physical Division of the Russian Academy of Sciences, we discuss the development and current state of the 'firstborn' of a series of scientific victories — the hydrogen maser (H-maser). The performance of H-masers is continuously being improved, and they are involved in solving a wide range of problems: time and frequency metrology, satellite navigation, and space radio astronomy. Russia is the recognized world leader in the development of maser technology, which is a brilliant example of the successful implementation of Basov's ideas. The natural development of this field is the advent of optical frequency standards, whose development prospects are discussed in the final part of the review.

Keywords: frequency standard, maser, H-maser, relativistic tests, VLBI, optical clocks

PACS numbers: **06.20.** – f, 84.40.lk, 95.55.Sh

Bibliography — 63 references

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **193** (10) 1091–1102 (2023)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2022.11.039347>

Received 6 April 2023

Physics – Uspekhi **66** (10) (2023)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2022.11.039347>