УДК 539-194

ИСТОРИЯ АТОМНОГО ВРЕМЕНИ ВО ВНИИФТРИ

Ю.С. Домнин, В.П. Костромин, В.М. Татаренков, Н.Б. Кошеляевский

ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл.
nkoshelyevsky@vniiftri.ru

Статья посвящена истории становления и развития во ВНИИФТРИ атомных стандартов частоты и времени

History of VNIIFTRIS atomic time il the paper the resulte of VNIIFTRI cuvestogation and development of atomic tame and frequency standards are presented

Ключевые слова: атомное время, лазерные стандарты частоты и времени, первичные цезиевые стандарты

Введение

Как и во многих индустриальных странах мира, в нашей стране в послевоенные годы стимулировались исследования и разработки по повышению точности времени и частоты, под эти приоритетные направления создавались новые лаборатории и институты. Связано это с потребностями новых технологий в таких областях, как ракетно-космическая деятельность, авиация, высокоточные системы навигации и управления движением; системы связи и телекоммуникации и ряда других, для которых необходима высокостабильная опорная база точного времени и частоты. Под давлением этих потребностей уже в 1947 г. правительство принимает Постановление об организации единой службы времени страны и о создании научного центра этой службы – Центрального научно-исследовательского бюро (ЦНИБ), на базе которого в 1955 г. был создан ВНИИФТРИ. С тех пор новейшая история отечественной службы и метрологии времени прочно связаны с этим институтом.

К середине 50-х годов возникли научные и технические предпосылки для создания атомных часов и генераторов. Ключевую роль здесь сыграли открытия нобелевских лауреатов И.И. Раби и Н.Г. Рамсея по радиоспектроскопии и Н.Г. Басова, А.М. Прохорова и С.Н. Тоунес по созданию мазеров и их первой реализации на молекулах аммиака.

В 1955 г. в Национальной физической лаборатории Великобритании начали работать первые атомные часы. Начавшийся стремительный прогресс в совершенствовании атомных часов привёл к кардинальным изменениям в метрологии времени. На смену астрономического времени, устанавливаемого из наблюдений за движением небесных тел и по которому жило человечество всю предыдущую историю, пришла эпоха много более точного атомного времени, устанавливаемого с помощью атомных часов в лабораториях.

Статья посвящена истории становления и развития во ВНИИФТРИ атомных стандартов времени и частоты, обеспечивших переход службы времени страны на атомное время и повышение точности измерений в миллионы раз. Успеху работы благоприятствовали установившееся с самого начала тесное сотрудничество с ФИАНом и промышленными институтами ННИПИ «Кварц» и ЛНИРТИ (теперь – РИРВ), а также большое внимание к этому направлению академика Н.Г. Басова.

1. Молекулярные стандарты

Первые молекулярные генераторы на аммиаке $^{14}NH_3$ были разработаны во ВНИИФТРИ в конце 50-х годов (В.Ф. Лубенцов, В.И. Сачков, Г.Г. Рахимов), и в 1959 г. на их основе были изготовлены два атомихрона с фазой автоподстройки кварцевого генератора на 100 кГц (Г.А. Ёлкин, Л.П. Ёлкина, Г.Г. Рахимов). Эти стандарты частоты уверенно работали без заметных сбоев фазы и имели погрешность воспроизведения частоты ~ $1\cdot10^{-9}$, однако их использование в службе времени оказалось практически неперспективным из-за невозможности длительной непрерывной работы. Была сделана переориентация на реперный режим работы, т.е. периодическое измерение частоты кварцевого генератора по частоте молекулярного генератора, резонатор которого при этом настраивался на центр спектральной линии. В 1962 г., благодаря конструктивным усовершенствованиям (Г.Г. Рахимов, Н.Д. Жесткова, Г.А. Ёлкин, Л.П. Ёлкина, А.Ф. Щербинин) (встречные пучки, настройка резонатора путём «магнитной» модуляции добротности спектральной линии) и использованию более «чистой» линии излучения J=3, K=2 была реализована по этой методике погрешность определения частоты кварцевого генератора ~ $5\cdot10^{-11}$. Дальнейшее, значительное снижение погрешности до $1\cdot10^{-11}$ было достигнуто (Г.Г. Рахимов, Н.Д. Жесткова) за счёт использования изотопного аммиака $^{15}NH_3$ с периодической его рекуперацией. С 1963 г. два таких генератора введены в службу времени.

Такому, исключительно быстрому темпу повышения точности ведения шкалы атомного времени во ВНИИФТРИ способствовал значительный успех в разработке и изготовлении кварцевых генераторов на 100 кГц (В.Н. Титов, Н.В. Никитин, А.Н. Смирнов) с уникальными характеристиками: среднесуточным старением и среднесуточной вариацией частоты – $(1\ldots3)\cdot10^{-11}$.

Группа из таких отобранных кварцевых генераторов обеспечивала не только надёжное хранение шкалы атомного времени, но и позволяла производить настройку резонатора молекулярного генератора каждый раз при измерении частоты кварцевого генератора. Разработанная методика настройки позволяла это осуществлять с погрешностью ~ $1\cdot10^{-11}$, несмотря на несоизмеримо большие вариации частоты молекулярного генератора из-

за нестабильности его резонатора и большого коэффициента затягивания.

В результате проведения этих работ основу физического эталона времени и частоты ВНИИФТРИ с 1962 по 1969 гг. составляла группа из трёх-четырёх кварцевых генераторов 100 кГц и двух молекулярных генераторов с системой сличения и настройки, рис. 1.1. По этому же принципу и в таком же примерно составе были укомплектованы вторичные эталоны в Иркутске и на специальном объекте космической связи.

Рис. 1.1. Два молекулярных генератора на изотопном аммиаке $^{15}NH_3$ и система сличения с кварцевыми генераторами 100 кГц

Оценки точностных характеристик молекулярных генераторов показали, что они весьма близки к предельно возможным, и дальнейшее совершенствование их не могло дать заметного повышения точности.

2. Водородные стандарты

В 1960 году Н.Г. Рамсеем был предложен и разработан водородный лазер, который на многие годы становится одним из самых перспективных квантовых приборов времени и частоты.

Первый в нашей стране Н-мазер был создан в ФИАН в 1963 году при участии ВНИИФТРИ, ННИПИ «Кварц» и ЛНИРТИ. Во ВНИИФТРИ водородный мазер был запущен в 1964 г., (Г.А. Ёлкин, Л.П. Ёлкина, А.Ф. Щербинин), исследования которого показали, что настройка его резонатора по амплитуде выходного сигнала позволяет снизить погрешность измерения частоты кварцевых генераторов до ~ $1 \cdot 10^{-12}$, что в десять раз превысило возможности аммиачных генераторов.

Было изготовлено два таких Н-мазера, которые были введены в службу времени. Это были весьма громоздкие конструкции горизонтального расположения с использованием мощных диффузионных и геттерно-ионных насосов, рис. 2.1. Резонатор перестраивался механически путём деформации мембранной крышки, а водород получался путём электролиза воды.

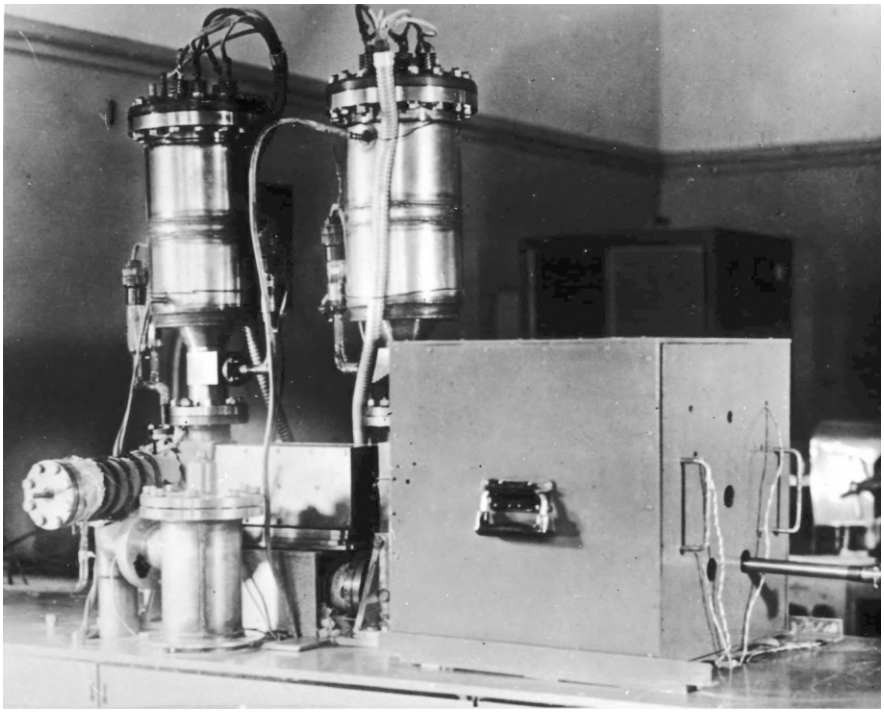

Рис. 2.1. Первый водородный генератор ВНИИФТРИ

В дальнейшем конструкция Н-мазера была существенно усовершенствована, (Г.А. Ёлкин, Б.А. Гайгеров, Н.Д. Жесткова, Г.П. Курников), приняв форму отпаянного прибора за счёт использования геттерного-титанового поглотителя, встроенного сортирующего постоянного магнита, сорбционного хранителя водорода и вертикальной конструкции прибора в целом. Резонаторы водородных мазеров были изготовлены из ситалла с малым коэффициентом линейного расширения, рис. 2.2. Были проведены обширные исследования, направленные на значительное увеличение времени непрерывной работы, повышение кратковременной и долговременной стабильности частоты, а также на снижение погрешности воспроизведения частоты невозмущённого перехода.

Рис. 2.2. Два водородных стандарта частоты

Часть водородных стандартов предназначалась только для работы в реперном режиме и использовалась для ежедневного измерения частоты кварцевых хранителей времени и рубидиевых стандартов частоты. Такие реперы использовались в составе ГЭВЧ и вторичных эталонах Новосибирска, Иркутска, Хабаровска, Киева, Минска, Ленинграда, Николаева. Часть квантовых мер частоты была построена по функциональной схеме, включающей в себя водородный генератор, систему автоматической настройки резонатора по амплитудному критерию и систему формирования выходных частот на основе фазовой автоподстройки кварцевого генератора 5 МГц (Б.А. Гайгеров). Водородным реперам в результате аттестации 1973 года была приписана погрешность воспроизведения частоты $\pm 2 \cdot 10^{-12}$. Водородным хранителям была приписана средняя квадратическая вариация частоты на интервалах времени от 100 с до суток ~ $5 \cdot 10^{-13}$. Водородные хранители с автоматической настройкой резонатора по амплитудному критерию использовались в составе ГЭВЧ до 1976 г. В конце 60-х годов была проведена доработка водородных хранителей частоты с настройкой по амплитудному критерию при использовании «быстрой» модуляции. Средняя квадратическая вариация их частоты составила $1 \cdot 10^{-13}$ при времени измерения от 1000 с до суток. В дальнейшем такая автоподстройка резонатора была усовершенствована и использована в перевозимых квантовых часах.

С начала 80-х годов для Госэталона во ВНИИФТРИ и целого ряда вторичных эталонов России стали поставляться промышленные водородные стандарты разработки ННИПИ «Кварц». Это высокостабильные стандарты частоты с автоматической настройкой резонатора по модуляции ширины линии излучения и работающие в непрерывном режиме. С введением этих стандартов частоты в состав ГЭВЧ отпала необходимость деления водородвных стандартов на реперы и хранители времени. Суточная нестабильность была снижена до значений заметно меньших $1 \cdot 10^{-14}$. В то время это был первый опыт в мире использования ансамбля непрерывно работающих водородных часов для формирования и хранения шкалы времени. В настоящее время в состав ГЭВЧ входят 10 подобных водородных стандартов частоты, рис. 2.3. Суточная нестабильность сформированной на их основе национальной шкалы времени UTC(SU) σ_y(сутки) $\leq 5 \cdot 10^{-15}$, а на интервале времени один год составляет σ_y(месяц) $\leq 3 \cdot 10^{-15}$. Эти результаты были достигнуты благодаря усилиям С.Б. Пушкина, Б.А. Гайгерова, Н.Б. Кошеляевского.

Рис. 2.3. Современный ансамбль водородных хранителей времени и частоты ГЭВЧ

Опыт применения водородных генераторов для формирования шкалы времени представлял всеобщий интерес и в 1991 г. для доступа к шкале времени UTC(SU) Международное Бюро мер и весов сначала представило в аренду, а затем в 2000 г. подарило ВНИИФТРИ времéнной приёмник TTR-6, рис. 2.4. С 1991 г. ансамбль наших непрерывно работающих водородных стандартов, сличаемых с мировым сообществом с помощью дифференциальных приёмов сигналов GPS, даёт вклад в формирование Международной шкалы атомного времени TAI.

Рис. 2.4. Руководитель отделения времени МБМВ Е.Ф. Ариас и Н.Б. Кошеляевский у подаренного времéнного GPS приёмника

Работы по созданию малогаборитного водородного стандарта частоты с использованием полноразмерного объёмного резонатора были начаты в начале 80-х годов. В 1982 году были проведены транспортные испытания малогаборитного водородного стандарта с цилиндрическим резонатором H_{011} из плавленого кварца, рис. 2.5.

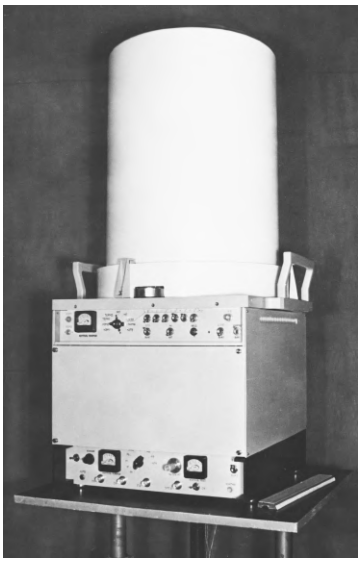

Рис. 2.5. Малогаборитный водородный стандарт частоты с полноразмерным резонатором

Развитие этого направления явилась разработка малогаборитного водородного стандарта времени и частоты «Сфера» (С.Г. Ёлкин, Б.А. Гайгеров, С.Я. Сёмин, Г.П. Курников, В.П. Сысоев, Н.Д. Жесткова).

Особенностью его конструкции является то, что резонатор, соленоид для создания однородного магнитного поля, термостат, магнитные экраны и верхний вакуумный колпак имеют сферическую форму. Полусферы магнит-

ных экранов и вакуумного колпака изготавливались методом холодной штамповки, а кварцевые полусферы резонатора – осаждением кварца из газовой фазы. Сферическая форма этих узлов обеспечивала максимальную жёсткость всей конструкции при минимальном весе. Общая масса стандарта (вместе с аккумуляторной батареей) составляет 60 кг; потребляемая мощность от источника постоянного тока – 35 Вт, рис. 2.6. Среднесуточный ход и случайная вариация за сутки составляла ~ $3 \cdot 10^{-14}$. Стандарты этого типа используются в рабочих эталонах радиоцентра №11 и ТВЦ «Останкино» начиная с 1991 года и по настоящее время (Г.А. Ёлкин, А.И. Бойко, В.П. Сысоев).

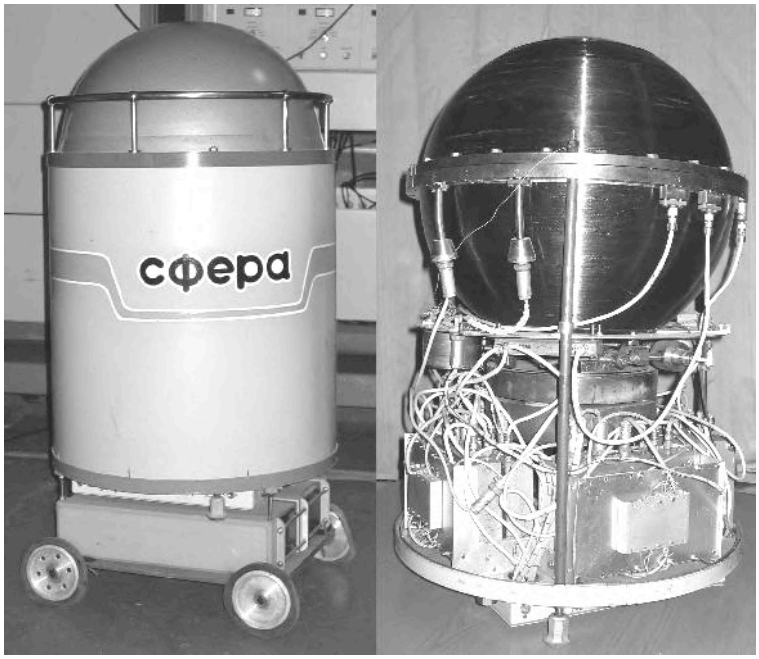

Рис. 2.6. Малогабаритный водородный стандарт «Сфера»

В дальнейшем были проведены усовершенствования водородного мазера этой конструкции, направленные на повышение стабильности выходной частоты и надёжности работы прибора в целом. За счёт применения термокомпенсационных шайб из двуокиси титана температурная зависимость резонатора была снижена до 100…150 Гц/град. Введена двухступенчатая система термостатирования. Добротность линии излучения увеличина до $3 \cdot 10^{-9}$. Нестабильность частоты выходного сигнала модернизированного водородного генератора «Сфера», рис. 2.7., составила $4 \cdot 10^{-14}$ за 10 с, $2 \cdot 10^{-15}$ за 1 час, $3 \cdot 10^{-15}$ за одни сутки. Была изготовлена серия таких генераторов для использования в групповом хранителе частоты и времени.

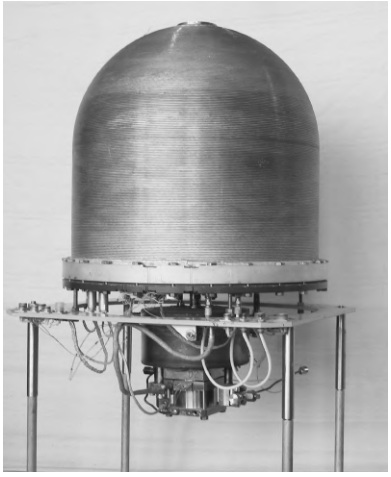

Рис. 2.7. Модернизированный водородный генератор «Сфера»

В последние годы для целей формирования сигнала опроса фонтанного цезиевого стандарта частоты были изготовлены два специальных водородных генератора, рис. 2.8., с повышенной мощностью выходного сигнала (Г.А. Ёлкин, А.И. Бойко). В конструкции используется большая накопительная колба (V~3л), удлинённый объёмный резонатор, двойная селекция атомов и ряд других особенностей, направленных на значительное увеличение выходной мощности при заданной «рабочей» добротности спектральной линии. Отношение мощности шума (в полосе 1 Гц) к мощности выходного сигнала составляет величину $1 \cdot 10^{-9}$, что должно обеспечить погрешность стандарта частоты на фонтане атомов цезия из-за фазовых флюктуаций СВЧ сигнала до $2 \cdot 10^{-13}/\sqrt{\tau}$.

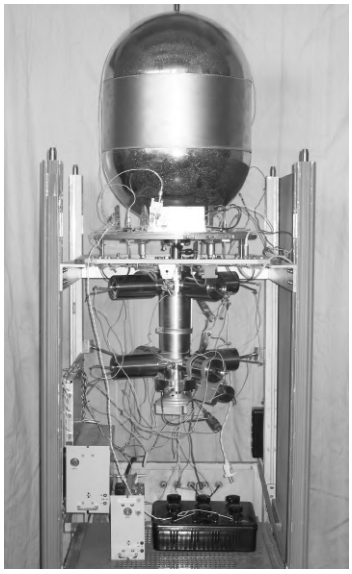

Рис. 2.8. Водородный генератор с повышенной мощностью выходного сигнала

В конце 70-х годов был предложен и реализован активный мазер, размеры резонатора которого были уменьшены за счёт проводящих пластин, размещённых вокруг накопительной колбы параллельно оси резонатора (Ф.С. Русин, Б.А. Гайгеров). При размерах резонатора (D=196 мм, H=210 мм) была получена добротность $27 \cdot 10^{-3}$. Пластины, окружающие колбу, обеспечивали концентрацию поля в области колбы, но и сами вносили дополнительные потери. Работы по созданию перевозимых квантовых часов (ПКЧ) на основе мазера с резонатором такого типа были прекращены в связи с появившейся возможностью изготовления достаточно больших деталей из монокристаллического лейкосапфира с чрезвычайно малыми потерями. Это позволило осуществить аналогичный эффект концентрации высокочастотного поля с помощью полого толстостенного цилиндра из лейкосапфира, окружающего накопительный объём и не примыкающего к боковым стенкам резонатора. В этом случае наряду с уменьшением размеров резонатора снижаются потери за счёт удаления диэлектрика от проводящих стенок резонатора. Конструктивно наиболее простой является аксиально-симметричная конструкция, в которой полый диэлектрический цилиндр, покрытый изнутри фторопластом, выполняет функцию накопительной колбы. Большим достоинством такой конструкции является высокая механическая прочность. Была разработана программа расчёта резонатора цилиндрической аксиально-симметрической конструкции, и был проведён расчёт в широком диапазоне размеров резонатора. В первом образце перевозимых часов (Б.А. Гайгеров, Ф.С. Русин, В.П. Сысоев, Н.И. Польников) был использован резонатор высотой 170 мм, диаметром 168 мм и с накопительной колбой с внутренним диаметром 80 мм, высотой 130 мм, добротность такого резонатора $50 \cdot 10^{-3}$, рис. 2.9.

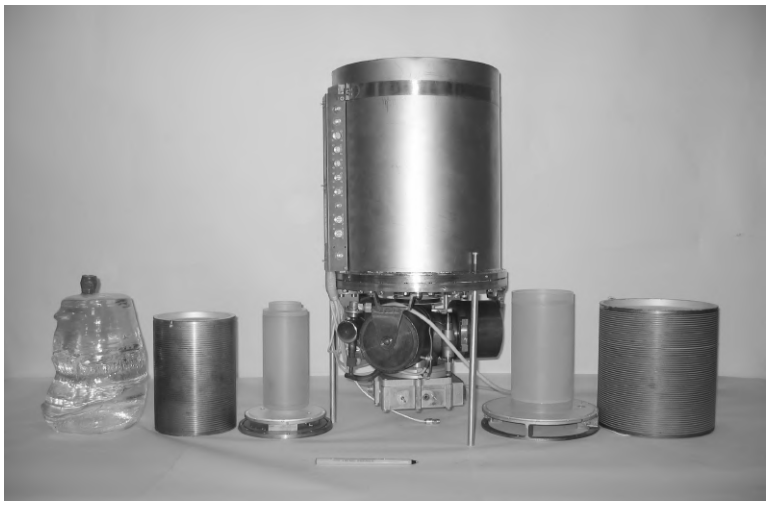

Рис. 2.9. Водородный мазер «Сапфир» без нижнего экрана.
Резонатор Ø 178 мм и накопительная колба. Резонатор Ø 120 мм и накопительная колба для водородного мазера уменьшенных размеров. Образец сапфировой були

На основе такого резонатора были построены часы с общими геометрическими размерами (300x450x550 мм) и массой 63 кг с внутренней батареей аккумуляторов на 5 часов автономной работы. Резонатор термостатирован и окружён четырёхслойным магнитным экраном с коэффициентом экранирования не менее 10^5. В вакуумной системе мазера использован, как и в предыдущих моделях мазеров ВНИИФТРИ, титановый геттер, а также магнито-разрядный насос со скоростью откачки 0,2 л/с. Стабилизация частоты резонатора, кроме термостатирования, обеспечивалась автономной системой автоматической настройки резонатора, использующей амплитудный критерий настройки. У ранних образцов ПКЧ нестабильность частоты выходных сигналов 5 МГц и 100 МГц не превышала $2\cdot10^{-14}$ при времени измерения от 10^3 с до 10^5 с. Первые сличения территориально удалённых эталонов проводились осенью 1987 г. – с эталонами Иркутска и Гаваны, в 1988 г. – сравнение шкал Парижской обсерватории и UTC(SU). В последующие годы подобные сличения продолжались. Погрешность сличения территориально удалённых эталонов, связанная с полётами на самолёте, оценивалась в 10 нс. Сравнение шкал эталонов Московского региона при транспортировании на автомобиле оценивалась в (1 – 2) нс.

Совершенствование конструкции водородного генератора и электронных систем (Б.А. Гайгеров, В.П. Костромин, В.П. Сысоев, М.Ю. Васильев) привело к выпуску в 1994-96 гг. ПКЧ, обеспечивающих погрешность сличений шкал времени территориально разнесённых эталонов не более 2 нс.

Разработка новой цифровой системы АНР, работающей по внешнему частотно-модулированному сигналу (В.П. Сысоев, Ю.С. Самохвалов) дала возможность улучшить метрологические характеристики. ПКЧ с такой системой АНР, рис. 2.10, изготовленные в 2000-2003 гг., имеют следующие характеристики нестабильности частоты $\sigma_y(1\ \text{с}) \le 5\cdot10^{-13}$, $\sigma_y(100\ \text{с}) \le 2\cdot10^{-14}$, $\sigma_y(1\ \text{сутки}) \le 4\cdot10^{-15}$, вариация хода часов при транспортировании в течении 6 часов не превышает 1 нс.

Рис. 2.10. Перевозимые квантовые часы на основе водородного мазера «Сапфир» в микроавтобусе Тойота перед зданием ИМВП.
На переднем плане слева направо В.П. Сысоев и Б.А. Гайгеров.

3. Лазерные стандарты частоты и абсолютные измерения частоты лазеров

Постановка во ВНИИФТРИ работ по созданию и исследованию лазерных стандартов частоты обусловлена появлением новых, перспективных источников когерентного излучения. Первоначально работы были направлены, как и вся деятельность отделения времени и частоты, на создание более стабильных и точных стандартов частоты, которые могли бы составить конкуренцию существующим стандартам частоты в радиодиапазоне.

Работы по оптическим стандартам начались в 1966 г. после перехода из ФИАНа во ВНИИФТРИ группы сотрудников во главе с В.М. Татаренковым. На первом этапе велись исследования и разработки гелий-неонового лазера с внутрирезонаторной поглощающей ячейкой, заполненной чистым изотопом Ne^{20}(He-Ne/Ne^{20}) на длине волны 632,8 нм. В 1967 г. были получены узкие резонансные линии и выполнены исследования по их оптимизации. В 1968 г. было создано два макета оптических стандартов, обеспечивающих воспроизводимость частоты менее $1{\cdot}10^{-9}$ и нестабильность ~ $1{\cdot}10^{-10}$ на интервалах 1 – 100 с (В.М. Татаренков, А.Н. Титов, А.Ф. Мухамедгалиева). Это был хороший уровень для He-Ne/Ne^{20} стандарта. Важным результатом первого периода явилось освоение основных технологических процессов и создание соответствующих установок, необходимых для изготовления собственными силами будущих модификаций лазерных стандартов частоты.

В 1969 г. появилось сообщение будущего Нобелевского лауреата по физике 2005 г. Дж. Холла о возможности использования в качестве

поглощающего перехода линии $F_2^{(2)}$ высокосимметричной молекулы метана CH_4 для He-Ne лазеров, работающих на длине волны λ=3,39 μm. Во ВНИИФТРИ развёрнуты работы в этом направлении. Уже к весне 1970 г. были получены первые пики мощности в выходном излучении лазеров He-N_e/CH_4. Эти работы продолжались почти 10 лет, и было создано несколько поколений стандартов частоты на основе He-Ne/CH_4 лазера.

Исследования велись на двух типах установок: He-Ne/CH_4 лазер, стабилизированный по $F_2^{(2)}$, и E компонентам метана. Несмотря на то, что оба лазера опирались на одни и те же принципы, они имели и много различий.

Несколько серьёзных проблем было решено при создании He-Ne/CH_4 лазера, стабилизированного по $F_2^{(2)}$ компоненте линии метана CH_4.

Была создана малошумящая лазерная усилительная трубка. Поскольку устранение частотного разрыва между линиями усиления неона, Ne, и поглощения метана, CH_4, достигается обычно повышением давления He-Ne смеси в усилительной разрядной трубке лазера до 720±15 Pa, то это, в свою очередь, приводит к резкому росту амплитудных шумов в выходном излучении лазера. Выходные шумы были подавлены более чем в сто раз с использованием разрядной трубки со специальной конструкцией разрядного пространства, которое представляло из себя периодическую последовательность коротких разрядных капилляров, разделённых гораздо более широкими участками.

Поскольку используемая в стандарте $F_2^{(2)}$ компонента линии поглощения метана обладает, при обычных давлениях метана ~ 0,1 Pa в поглощающей ячейке, неразрешённой сверхтонкой структурой, то лазерный стандарт испытывает так называемый «мощностной» сдвиг частоты – его выходная частота зависит от уровня выходной мощности (полная величина сдвига в относительном выражении превосходит $2\cdot10^{-11}$). Впервые выполненные теоретические исследования, в которых учитывалось вырождение уровней сверхтонкой структуры по магнитным квантовым числам, показали, что при малых уровнях мощности сдвиг частоты носит линейный характер, что, в свою очередь, позволило предложить воспроизводимость на стандарте так называемую «предельную» частоту, т.е. частоту, соответствующую нулевой выходной мощности. Был выполнен цикл исследований по зависимости «предельной» частоты от давления метана и других экспериментальных факторов.

Использованный подход позволил создать лазерный стандарт частоты, обладающий воспроизводимостью частоты $\leq 4\cdot10^{-13}$ и относительной нестабильностью $\sigma_y(\tau) \leq 1{,}5\cdot10^{-13}/\tau^{1/2}$ 1 s≤τ≤100 s. «Предельные» частоты двух независимо стабилизированных лазеров совпадали в пределах $\leq 1{,}3\cdot10^{-13}$. Работы в этом направлении велись, в первую очередь с участием А.Н. Титова и Н.Б. Кошеляевского.

Гораздо более многообещающие характеристики воспроизводимости ожидались от He-Ne/CH_4 лазера, стабилизированного по E линии метана, так как эта линия не обладала сверхтонкой структурой. E линия метана отстроена по частоте почти на 3 ГГц вниз по сравнению с $F_2^{(2)}$ линией, поэтому для смещения линии усиления неона было предложено поместить разрядную лазерную трубку в поле постоянного электромагнита. Был использован ранее накопленный при создании He-Ne/CH_4, стабилизированного по $F_2^{(2)}$ линии, опыт. Был выполнен цикл новых исследований по влиянию эффекта газовой линзы в усиливающей и поглощающей среде, кривизны волнового фронта, эффекта бегущей волны на сдвиги частоты. В результате этих исследований на новой экспериментальной установке, рис. 3.1, группе А.Н. Титова, Ю.М. Малышева и Ю.Г. Расторгуева удалось повысить воспроизводимость «предельной» частоты ~ $2\cdot10^{-13}$ при нестабильности $\sigma_y(10\ s)$ ~ $4\cdot10^{-14}$.

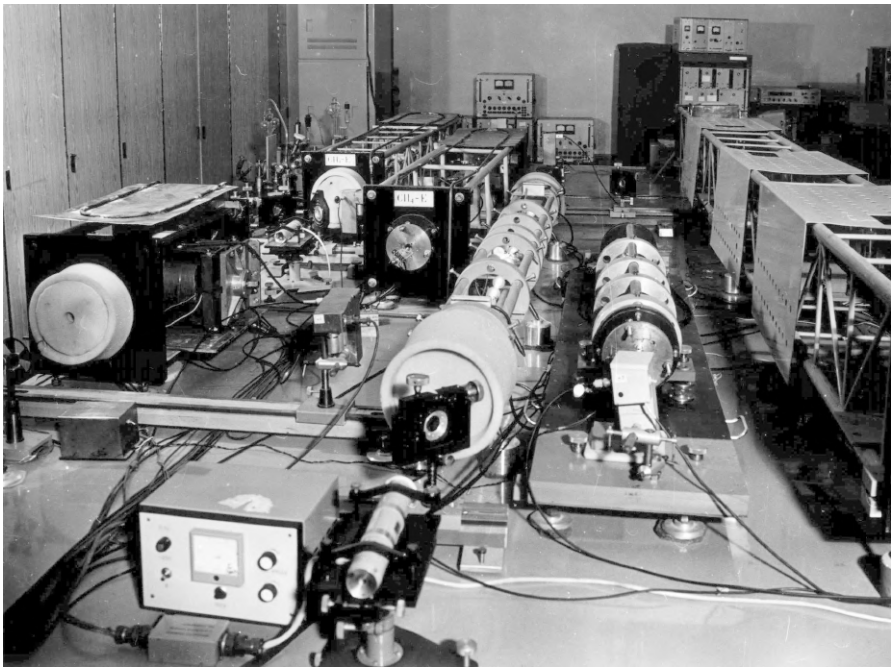

Рис. 3.1. He-Ne/CH_4 лазерные стандарты на $F_2^{(2)}$ и E компоненте метана

Помимо уже упомянутых стандартов на основе He-Ne/CH_4 лазеров был разработан стандарт на $CO_2/^{192}OsO_4$, λ=10,52 μm. В основу часового перехода был положен, как и в лазере He-Ne/CH_4, колебательно-вращательный переход в высокосимметричной молекуле четырёхокиси осмия. В отличие от предыдущих стандартов он использовал внешнюю поглощающую ячейку. С точки зрения воспроизводимости частоты на этот лазер первоначально возлагались довольно большие надежды и ожидалось,

что его воспроизводимость будет даже выше, чем воспроизводимость He-Ne/CH_4-лазера. Дальнейшие исследования показали, что для достижения этих целей необходимо создание оптического спектроскопа с исключительно высококачественной оптикой. Поэтому мы использовали более простое решение, чтобы использовать такой лазер в качестве промежуточного хранителя частоты, что позволило разделить лазерную умножительную цепь на две независимые части. На этом стандарте удалось достичь воспроизводимости частоты ~ $3\cdot10^{-12}$ и нестабильности $\sigma_y(10\ s)$ ~ $3\cdot10^{-13}$. В работах по этому стандарту наиболее активное участие принимали Н.Б. Кошеляевский, С.Н. Овчинников и Л.Н. Копылов.

Для того чтобы перекрыть видимый диапазон, Ю.С. Домниным и Л.Н. Копыловым было создано несколько стандартов частоты на основе He-Ne/I_2 лазера, рис. 3.2. Эти приборы имели традиционную конструкцию на основе линейного резонатора Фабри-Перо, использовали внутреннюю поглощающую ячейку, предоставленную лазерной лабораторией МБМВ, и систему стабилизации частоты по третьей гармонике частоты модуляции. Достигнутый уровень воспроизводимости и временной нестабильности частоты составляли $2\cdot10^{-13}$ и $\sigma_y(10\ s)$ ~ $4\cdot10^{-14}$ соответственно.

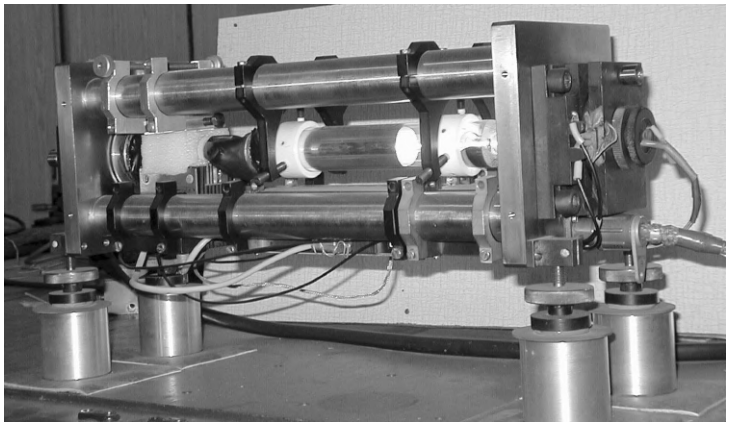

Рис. 3.2. He-Ne/I_2 лазерный стандарт частоты

Частоты излучения созданных лазерных стандартов попадали в инфракрасный и видимый диапазон и не могли быть с необходимой точностью непосредственно сопоставлены с ГЭВЧ, который работал в радиодиапазоне.

Для оценки стабильности и воспроизводимости частоты лазерные стандарты частоты сличались друг с другом. Так как в то время не существовало средств абсолютных измерений частот в оптике, частоты лазеров оценивались на основе измерения их длин волн и затем пересчитывались через скорость света. Разрыв по диапазону от освоенного СВЧ диапазона ~ 100 ГГц (λ = 3 мм) до He-Ne/CH_4, λ = 3,39 μm, (~ 89 ТГц) составлял почти 1000 раз.

Таким образом, параллельно программе по созданию и совершенствованию лазерных стандартов частоты был запущен проект по разработке методов и средств измерения частот в оптике. Ввиду отсутствия на то время каких бы то ни было альтернативных технологий измерения частот был избран сложившийся в радиодиапазоне подход построения цепи промежуточных синхронизированных гетеродинов с небольшими коэффициентами умножения, которые удавалось узнать на каждом этапе этой умножительной цепи на основе одновременно разработанных смесительных элементов.

Исследования по абсолютным измерениям частот лазеров начались во ВНИИФТРИ в конце 50-х П.С. Шумяцким и Ю.С. Домниным в лаборатории В.М. Татаренкова с разработки цепи субмиллиметровых лазеров. Первоначально она состояла из трёх лазеров: HCN – λ = 337 μm, D_2O – λ = 118 μm и H_2O – λ = 28 μm. Затем помимо этих лазеров, в неё были включены два CO_2 лазера, работающих на линиях P(14) – λ = 10,52 μm и K(18) – λ = 10,18 μm, мощный He-Ne лазерный гетеродин на длине волны λ = 3,39 μm, а также набор стабилизированных с помощью систем ФАП СВЧ источников для преобразования разностных частот между гармониками соответствующих лазеров в радиодиапазон. CO_2/P(14) и He-Ne лазер гетеродин были также захвачены системой ФАП по лазерным стандартам частоты, упомянутым в предыдущем изложении. Другой самостоятельной и весьма существенной частью умножительного процесса была разработка быстродействующих и достаточно чувствительных точечных смесительных диодов.

Одна из наиболее сложных проблем: «Как избежать деградации спектра опорного источника в процессе умножения его частоты?» была впервые решена Ю.С. Домниным в 1976 г. и как результат – частота излучения наиболее низкочастотного лазера цепи – HCN была захвачена с помощью петли ФАП по национальному первичному Cs реперу частоты. Этот результат означал, что выходная частота HCN лазера и все её гармоники были однозначно соотнесены с первичным цезиевым репером и могли быть использованы для дальнейших применений. Несколько позднее этот подход был реализован и на D_2O лазере, и таким образом абсолютные лазерные измерения покрыли диапазон до 30 THz.

Наряду с работами по расширению спектральной области абсолютных измерений лазерных частот предпринимались усилия по повышению чистоты спектров лазеров и промежуточных СВЧ источников и повышению точности измерений частот. Для этих целей Ю.С. Домниным, А.Н. Малимоном, С.Н. Слюсаревым и П.С. Шумяцким в умножительную цепь был введён СВЧ источник, стабилизированный по охлаждаемому жидким азотом сапфировому резонатору с использованием типа колебаний «шепчущей галереи», что привело к прямому синтезу в ИК диапазоне опорной эталонной частоты и абсолютному измерению частоты CO_2/OsO_4 стандарта.

В 1979 году впервые лазерная умножительная цепь, рис 3.3, была запущена в полном объёме и были проведены наиболее точные в нашей стране абсолютные измерения частот лазерных стандартов на CO_2/OsO_4 и He-Ne/CH_4. Так, погрешность измерения частоты для He-Ne/CH_4 составляла ± 10 кГц, в относительном выражении $\pm 1 \cdot 10^{-10}$, что более чем на порядок превосходило точность определения частоты на основании интерференционных измерений длины волны излучения лазера. Эта работа Ю.С. Домнина, Н.Б. Кошеляевского, В.М. Татаренкова и П.С. Шумяцкого была направлена на конкурс проводившейся конференции по точным электромагнитным измерениям (CPEM). Первое место на конкурсе получила аналогичная работа группы исследователей из Национальной физической лаборатории, NPL, Великобритании под руководством Др. Найта, в которой была заявлена точность в три раза выше - $\pm 3 \cdot 10^{-11}$. Впоследствии было показано, что приведённое исследователями из NPL значение частоты было ошибочным – более поздние измерения ВНИИФТРИ и других лабораторий подтвердили корректность величины, представленной ВНИИФТРИ.

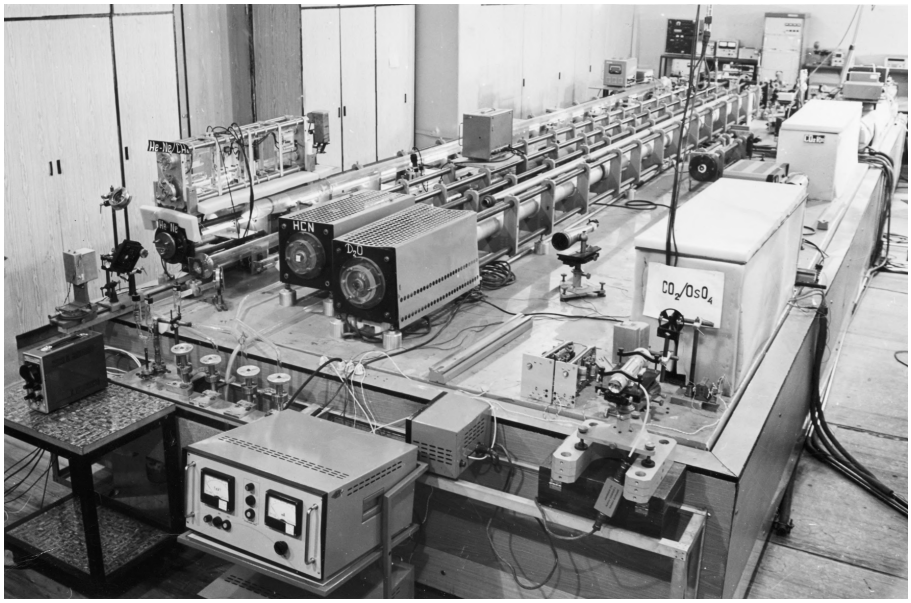

Рис. 3.3. Лазерная умножительная цепь

На протяжении последующего ряда лет лазерная умножительная цепь была оптимизирована, рис. 3.4, и были несколько раз повторены на более высоком уровне эксперименты по измерению абсолютной частоты He-Ne/CH_4 стандарта частоты на линиях $F_2^{(2)}$ и E как путём прямого синтеза, так и с помощью промежуточного стандарта частоты на CO_2/OsO_4. Ввиду большого объёма и разноплановости работы в ней принимали участие практически все сотрудники лаборатории.

Рис. 3.4. Лазерная умножительная цепь. Руководитель лаборатории В.М. Татаренков, третий слева, даёт пояснения комиссии в составе: (слева направо) начальник лаборатории ФИАН – В.В. Никитин, директор ВНИИФТРИ – В.К. Коробов, зам. нач. Управления метрологии Госстандарта СССР – Ю.Н. Иванов, Нобелевский лауреат, дважды Герой социалистического Труда, директор ФИАН – Н.Г. Басов

В начале 1976 г. началась разработка перевозимого стандарта частоты на основе He-Ne/CH_4 лазера. Длина волны этого лазера была измерена на первичном эталоне длины и, таким образом, была определена величина фундаментальной физической константы – скорости света с использованием национальных первичных эталонов времени, частоты и длины. Первый образец перевозимого He-Ne/CH_4 лазера, рис. 3.5, созданный группой А.Н. Титова, Н.Б. Кошеляевского и Ю.Г. Расторгуева, имел воспроизводимость частоты ~ $5 \cdot 10^{-12}$.

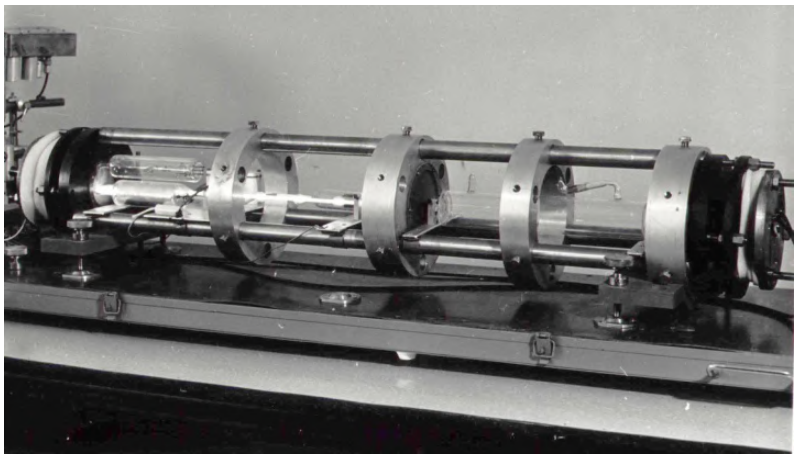

Рис. 3.5. Первичный перевозимый He-Ne/CH_4 лазер

В 1977 г. он был доставлен во ВНИИМ им. Д.И. Менделеева в Санкт-Петербург, и длина его волны была измерена на национальном эталоне длины - $\lambda He\text{-}Ne/CH_4 = 3{,}39223140 \pm 9\cdot10^{-9}$ μm. Измерение значения длины волны и измерение абсолютного значения частоты $He\text{-}Ne/CH_4$ лазерного стандарта приводит к определению значения скорости света с = 299 792 458 ± 3м/с, что уступало по точности измерениям Ивенсона и Холла. Первые международные сличения частот лазерных стандартов во ВНИИФТРИ были выполнены в 1979 г. сотрудниками МБМВ J.-M. Chartier, Р. Фелдер, а также представителями ВНИИФТРИ Н.Б. Кошеляевским, А.С. Обуховым, А.Н. Титовым и В.М. Татаренковым, рис. 3.6. Стационарный $He\text{-}Ne/CH_4$ лазерный стандарт, сличался с портативным стандартом, доставленным из Международного Бюро мер и весов.

Рис. 3.6. Участники первых международных сличений частот лазерных стандартов во ВНИИФТРИ. Слева направо: Н.Б. Кошеляевский, П.С. Шумяцкий, А.Н. Титов, Р. Фелдер, J.-M. Chartier, А.С. Обухов, В.М. Татаренков, Ю.С. Домнин

Результаты абсолютных измерений частоты $He\text{-}Ne/CH_4$ –лазера во ВНИИФТРИ отличались от аналогичных измерений в лабораториях других стран на значительную величину, выходящую за пределы неопределённостей измерения. Для решения вопросов по возникшему разногласию Ю.С. Домниным, Л.Н. Копыловым и Н.Б. Кошеляевским был создан новый специальный перевозимый лазерный стандарт частоты М 101, рис. 3.7, на основе $He\text{-}Ne/CH_4$ лазера. Он имел заметно более высокие характеристики: воспроизводимость частоты $\leq 1\cdot10^{-12}$ и нестабильность $\sigma_y(10\ s) \sim 3\cdot10^{-14}$. На этом лазере был впервые использован индуцированный оптогальванический эффект, впервые исследованный Ю.С. Домниным для регистрации пика поглощения.

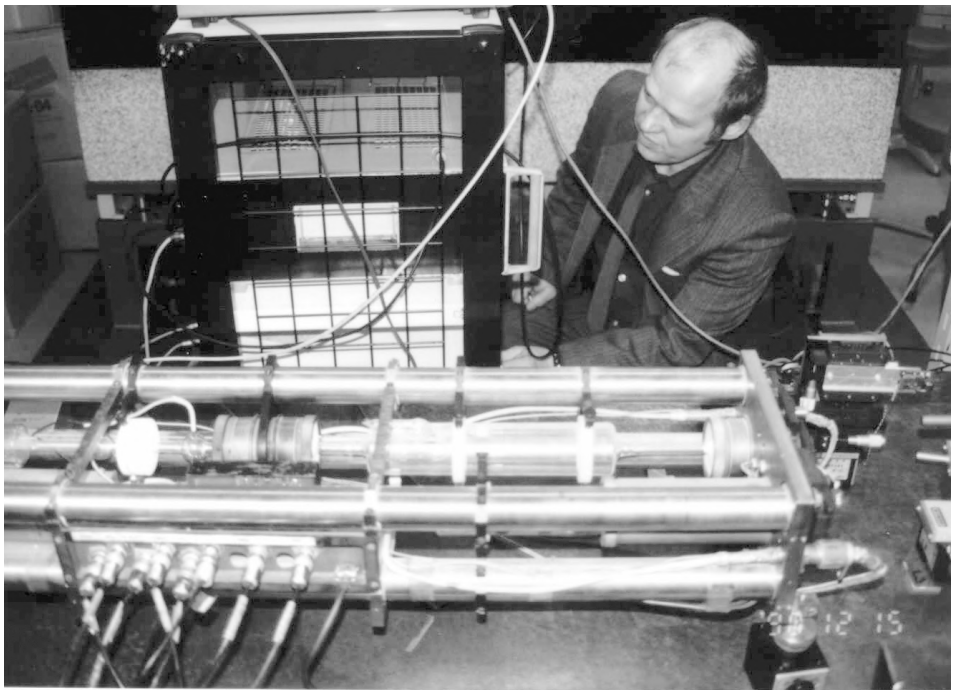

Рис. 3.7. Перевозимый He-Ne/CH_4 лазерный стандарт частоты М 101 в МБМВ, на заднем плане Ю.С. Домнин

Ю.С. Домниным и В.М. Татаренковым было проведено несколько сравнений и кампаний по абсолютным измерениям частот лазеров, в которых лазер М 101 использовался в качестве хранителя частоты.

Рис. 3.8. Участники международных сличений частот лазерных стандартов в МБМВ. Слева направо: В.М. Татаренков, J.-M. Chartier, А.С. Обухов, Ю.С. Домнин

После первых сличений в Международном Бюро мер и весов были проведены абсолютные измерения частоты лазера М 101 в Лаборатории первичного времени и частоты, Франция, при участии сотрудников МБМВ. Во время этих измерений было выявлено, что воспроизводимость лазера М 101 почти в сто раз превосходит воспроизводимость частоты лазеров МБМВ. После этих экспериментов по просьбе администрации МБМВ был изготовлен аналогичный лазер. На деньги от продажи лазера в ИМВП были приобретены два микроавтобуса Тойота, которые с 1991 г. используются при сличениях с помощью перевозимых квантовых часов.

Дальнейшие сличения с помощью лазера М 101 проводились в Физико-техническом институте, ФРГ, Национальном исследовательском совете, Канада, и Национальной исследовательской лаборатории по метрологии, Япония. Результаты сличений и абсолютных измерений частоты лазера подтвердили значение частоты He-Ne/CH_4, полученное во ВНИИФТРИ, но отличались ~ 10 kHz (~ $1 \cdot 10^{-10}$) от величины, принятой Консультативным комитетом по определению метра (ККОМ) в 1983 г. Эти результаты, а также результаты настойчивых исследований в других лабораториях, привели в 1992 г. к новой Рекомендации ККОМ, в которой «решено, что список рекомендованных излучений, данный Международным Комитетом по мерам и весам (МКМВ) в 1983 г. (Рекомендация 1 (С1 – 1983)), должен быть заменён» новым. Несмотря на то, что с той поры прошло много времени, принятое в 1992 г. значение абсолютной частоты He-Ne/CH_4 лазера было подтверждено в 2002 г. без каких бы то ни было изменений в новой Рекомендации МКМВ (CI – 2002).

В завершение этого раздела хотелось бы напомнить, что работы по исследованию и созданию лазерных стандартов частоты, по абсолютному измерению частот в оптике и ИК, а также измерение длины волны лазерных стандартов радикально модифицировали современную метрологию длины. В 1983 г. было принято новое, «пролётное» определение единицы длины метра. Лазерным источникам, рекомендованным для практической реализации метра, были приписаны абсолютные частоты их излучения. Фактически это означало, что размер единицы длины, и соответственно метрика пространства, оказались однозначно определены через размер единицы времени. СССР был первой страной, которая реализовала эту идею практически – в 1986 г. в стране был впервые утверждён единый эталон времени, частоты и длины.

Работы по оптическим стандартам частоты в последнее десятилетие связаны с применением холодных атомов и ионов. Абсолютные измерения частот лазеров радикально изменились. Фемтосекундные лазеры позволяют генерировать сетку оптических частот, занимающую целую октаву. Интервал между соседними частотами составляет ~ 1ГГц, и это даёт возможность сличать практически любой стандарт в диапазоне 0,5 – 1 μm со стандартом частоты СВЧ диапазона. Продемонстрирована возможность

измерения частот в оптике и ИК на основе фемтосекундных технологий с погрешностями менее $1 \cdot 10^{-15}$ и созданы оптические стандарты частоты с ожидаемой потенциальной точностью лучше $1 \cdot 10^{-17}$.

4. Первичные цезиевые стандарты

Первый лабораторный метрологический цезиевый репер частоты МЦР-101, рис. 4.1, был включён в состав Госэталона времени и частоты в 1975 году с погрешностью воспроизведения частоты невозмущённого перехода $5 \cdot 10^{-13}$ (Г.А. Ёлкин, Ю.Г. Абашев, В.И. Пуртов, В.К. Куракин).

Рис. 4.1. Метрологический цезиевый репер частоты МЦР-101

В 1983 году в состав Госэталона был введён второй метрологический цезиевый репер более совершенной конструкции МЦР-102, (Г.А. Ёлкин, Ю.Г. Абашев, В.И. Пуртов, В.Н. Барышев). Основные его конструктивные особенности и режим работы: встречные пути с попеременным включением каждого; ширина спектральной линии 110 Гц при пролётной длине 1 м; шестиполюсные сортирующие магниты. Сигнал «часового» перехода формируется путём умножения выходной частоты водородного хранителя времени 5 МГц до 9180 МГц и добавления частоты синтезатора ~ 12,63177 МГц ± 55 Гц. При настройке измеряется среднее значение частоты синтезатора. В процессе каждого измерения частоты водородного хранителя производится измерение величин магнитного поля путём измерения частоты магнитно-зависимого перехода. По измеренным параметрам спектральной линии Ремси определяется поправка из–за эффекта Доплера 2-го порядка. После каждого четырёхкратного измерения вычисляются сигнал-ошибка, корректирующая частоту синтезатора. Общий цикл измерения с правым и левым пучком проводится примерно неделю.

-

После проведения ряда усовершенствований неисключённая систематическая погрешность МЦР-102 составляет величину $3 \cdot 10^{-14}$.

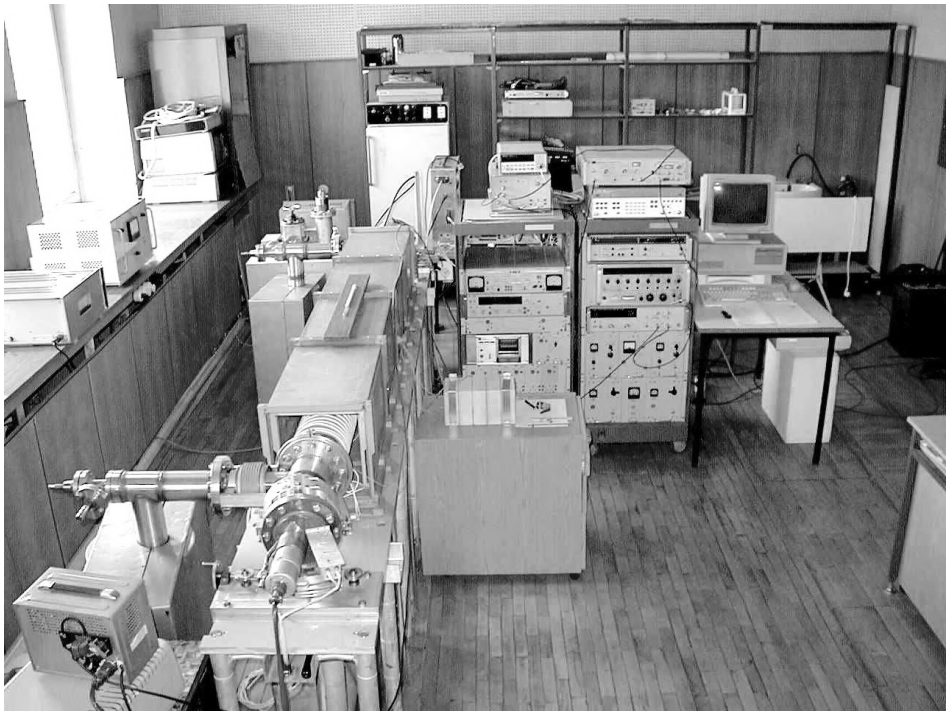

Рис. 4.2. Метрологический цезиевый репер частоты МЦР-102

Проект создания нового первичного цезиевого репера частоты на фоне холодных атомов стартовал во ВНИИФТРИ в начале 1999 года (Ю.С. Домнин, Г.А. Ёлкин, А.В. Новосёлов, В.Н. Барышев, Л.Н. Копылов). Его целью было создание репера нового поколения, имеющего по крайне мере на порядок более высокую точность. В этой установке используется оптическая схема в конфигурации (0,0,0), т.е. используются горизонтальные лучи по осям X и Y, а также вертикальные лучи по оси Z. Подобный подход был использован на первом цезиевом фонтане, разработанном в первичной лаборатории частоты и времени во Франции.

Была разработана и изготовлена вакуумная камера, состоящая из пяти секций, рис. 4.3. Нижняя секция изготовлена на нержавеющей стали и включает в себя два ионных и один абсорбционный насос. В этой секции находится окно для ввода вертикального луча. Следующая секция – секция «оптической трясины» изготовлена, как и все остальные, из титана. Она содержит 4 окна для ввода горизонтальных лучей. Здесь же помещён источник цезия. Далее следует секция детектирования с 4 окнами. Затем следует секция с СВЧ резонатором и пролётная секция с окном для вертикальных лучей.

Рис. 4.3. Спектроскоп на холодных атомах цезия «Фонтан»

По оси вакуумной системы с помощью катушки со специальной намоткой создавалось магнитное С-поле. Затем размещалась обмотка термостата и вся система помещалась в трёхслойный магнитный экран с коэффициентом экранирования порядка 100 000.

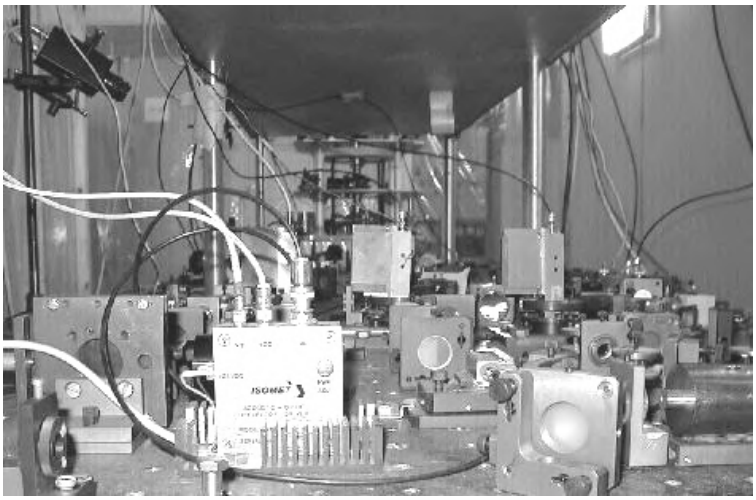

Рис. 4.4. Лазерно-оптическая система «Фонтан»

Экспериментальная установка, рис. 4.4, имеет следующие особенности.

Лазерная система состоит из опорного лазера и лазера перекачки, а также двух инжекционных лазеров. Частота опорного лазера стабилизирована по инвертированному пику в переходе F4 ◄►F'5, а частота лазера перекачки стабилизирована по инвертированному пику F4 ◄► F'5. Использование ин-

вертированных пиков существенно упрощает работу систем стабилизации частоты лазеров и повышает надёжность системы. Для разводки горизонтальных лучей была разработана специальная оптическая система. В этой системе осуществляется независимый баланс встречных горизонтальных лучей и используются возвратные зеркала для повышения оптической мощности.

На установке были получены холодные атомы с температурой около 1 μК. С помощью одного детектора были реализованы резонансы Рэмси шириной 1 Гц. Максимальная высота подброса атомов ограничена размерами физической части и достигает 80 см.

Результаты исследований этой экспериментальной установки были использованы при разработке цезиевых реперов частоты фонтанного типа, использующих лазерное охлаждение атомов. С 2012 года метрологические характеристики ГЭВЧ по неисключённой систематической погрешности ($5{,}0\cdot10^{-16}$) обеспечиваются цезиевыми фонтанами на холодных атомах.

В рамках реализации Федеральной целевой программы «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012 – 2020 годы» проводились работы по созданию новых образцов фонтанных стандартов частоты на атомах рубидия (Rb), оптических стандартов частоты на атомах стронция (Sr), которые рассматриваются в качестве кандидатов на первичную реализацию секунды СИ вместо современных цезиевых (Cs) фонтанов.

Были разработаны:

- образец оптического репера частоты на холодных атомах стронция с погрешностью воспроизведения единицы частоты не более $1\cdot10^{-16}$;

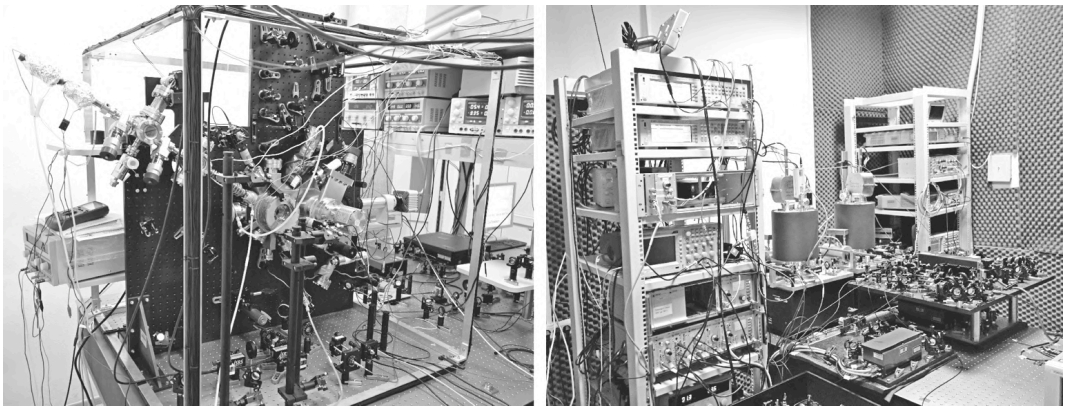

Рис. 4.5. Элементы оптического репера частоты на холодных атомах стронция, размещённого в исследовательских лабораториях Главного метрологического центра времени и частоты во ФГУП «ВНИИФТРИ»

- хранитель единиц времени и частоты на основе «фонтана» атомов рубидия с показателем нестабильности частоты $1^{-2}\cdot10^{-16}$;

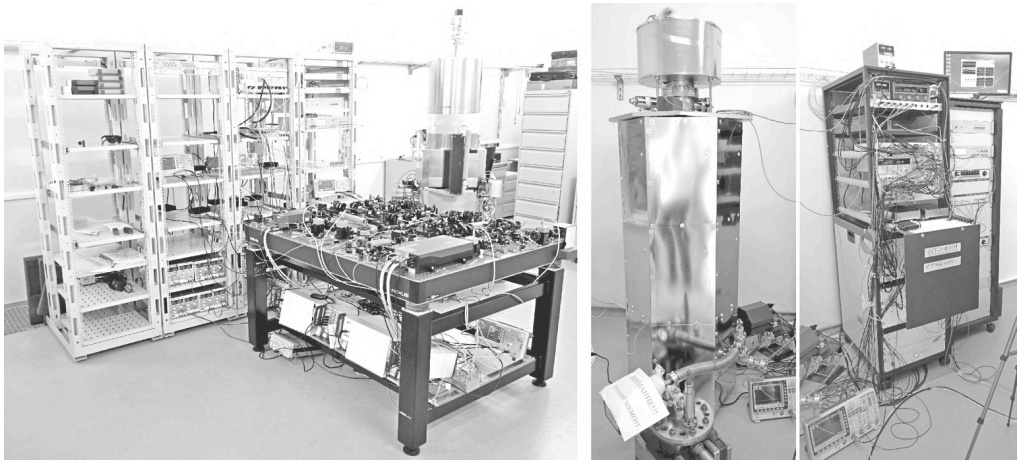

Рис. 4.6. Хранитель единиц времени и частоты на основе «фонтана» атомов рубидия

- новое поколение комплекса хранения национальной шкалы времени на основе ансамбля водородных мазеров с улучшенными характеристиками и соответствующей сличительной аппаратуры (нестабильность частоты стандартов частоты и времени водородных при интервале времени измерения 1 сутки не превышает $3 \cdot 10^{-16}$; относительное среднее измерение частоты ВСЧВ за 1 сут не превышает $\pm 8 \cdot 10^{-17}$).

Настоящее сообщение описывает процесс зарождения и эволюции атомного времени во ВНИИФТРИ. Изоляция страны в течение большого периода времени и ограниченный доступ к зарубежным технологиям оказали заметное влияние на этот путь. Несмотря на это разработки и достижения на каждом этапе были сопоставимы с работами лучших лабораторий мира. Одной из особенностей нашего пути были разработки и широкое использование водородных мазеров для воспроизведения частоты и хранения шкалы времени. Этот опыт оказался пионерским и, возможно, послужил примером зарубежным службам времени.

Сотрудничество ВНИИФТРИ с МБМВ и рядом зарубежных лабораторий оказалось плодотворным, укрепило авторитет института, и его работы получили международное признание. ВНИИФТРИ участвует в формировании шкал времени TAI и UTC, давая вклад своими водородными хранителями времени в МБМВ. Резолюция 1 17-й Генеральной конференции по мерам и весам «Определение метра» основана на результатах абсолютных измерений частот лазерных стандартов, проделанных в 5-6 лабораториях мира, включая ВНИИФТРИ. Результаты широкой международной компании сличений с помощью He-Ne/CH_4 перевозимого лазера ВНИИФТРИ, организованных, как правило, при участии представителей лазерной лаборатории МБМВ, дали значительный вклад в получение более точных значений лазерных частот, которые в 1992 г. были включены в документ по практической реализации нового определения единицы СИ – метра.

В течение всей истории ВНИИФТРИ удалось достичь основной цели – удовлетворять потребности национальной экономики, технологии и науки в точном времени и эталонных частотах. Это способствовало успехам в космической деятельности, разработке ГЛОНАСС, развитию систем телекоммуникаций и многим другим отраслям экономики, науки и технологий.