

ОПРЕДЕЛЕНИЕ И ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ СЕКУНДЫ**Ю.С. Домнин**

ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл.

ydomnin@vniiftri.ru

В работе даётся определение атомной секунды, приводятся сравнительные характеристики различных стандартов частоты, принцип их действия, описывается метрологический цезиевый репер частоты «Фонтан»

The article shows an atomic second definition, comparable characteristics of different, frequency standards and principals of their operation, the description of metrological cesium frequency standard "Fontan".

Ключевые слова: секунда, атомный стандарт частоты, стандарт частоты на холодных атомах

1. Определение и воспроизведение секунды

Термин секунда (времени) произошел примерно 300 лет назад, когда сконструированные астрономами часы могли отсчитывать примерно 1/60 часть минуты.

В 1940-х годах астрономическая секунда определялась как интервал времени, равный 1/86400 длительности средних солнечных суток – секунд среднего солнечного времени.

После 1960 г. - «1/31 556 925,9747 доля тропического года для 0 января 1900 в 12 часов эфемеридного времени» (англ. the fraction 1/31,556,925.9747 of the tropical year for 1900 January 0 at 12 hours ephemeris time) – эфемеридная секунда.

Атомная секунда

Секунда (русское обозначение: с, международное s) — единица измерения времени. Представляет собой интервал времени, равный 9 192 631 770 периодам излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133, находящегося в покое при 0 К. Точный текст действующего определения секунды, утверждённого XIII Генеральной конференцией по мерам и весам (ГКМВ) в 1967 году, таков: «Секунда есть время, равное 9 192 631 770 периодам излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133».

В 1997 году Международный комитет мер и весов (МКМВ) уточнил, что данное определение относится к атому цезия, находящемуся в покое при

температуре 0 К.

До 1967 года единица времени определялась путем астрономических наблюдений. Сначала это была секунда среднего солнечного времени (до 1960 года), потом это была секунда, выведенная из длительности среднего тропического года на 0 января 1900 г. в 12 часов эфемеридного времени.

Определение атомной секунды «Секунда есть промежуток времени, состоящий из 9 192 631 770 периодов излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия 133» было принято на 13-й Генеральной конференции по мерам и весам в 1967 году. Длительность атомной секунды была согласована с наиболее точными определениями эфемеридного времени, проведенными Марковицем в 1958 г. [1] Позднее было добавлено, что переход должен происходить между «невозмущенными» состояниями. Невозмущенные состояния являются физической абстракцией, так как в реальном устройстве всегда на атомы действуют возмущающие факторы. Мы должны либо устранить возмущение, либо учесть степень его влияния. Неисключенная систематическая относительная погрешность воспроизведения частоты является мерой того, с какой точностью можно учесть эти возмущающие факторы.

2. Квантовые стандарты частоты

В основе построения атомных стандартов частоты лежит постулат, заключающийся в том, что атомные свойства являются одними и теми же во все времена и во всех местах, находящихся в непосредственной близости с наблюдателем и движущимися вместе с ним по одной и той же траектории.

2.1. Молекулярные генераторы

Первые молекулярные часы были созданы в США в 1948 г. в Национальном бюро стандартов (НБС), известном в настоящее время как НИСТ (Национальный институт стандартов и технологий [2]. Обзор по созданию и разработке квантовых часов в СССР представлен в работе [3]. В основе работы первых квантовых часов были интенсивные линии поглощения в аммиаке, лежащие в диапазоне 24 ГГц. По этим линиям поглощения стабилизировался кварцевый генератор, который генерировал импульсы времени. Исследования в этом направлении затем были прекращены, так как молекулярный резонанс был уширен столкновениями и доплеровским эффектом настолько, что его долговременная стабильность оказалась не лучше, чем у кварцевых генераторов.

2.2 Квантовые часы на пучках атомов цезия

Первые цезиевые часы были созданы в Национальной физической лаборатории (НФЛ) в Англии в 1955 г. Эссеном и Пэри [4]. Это были первые достаточно надежные квантовые часы, которые регулярно использовались для подстройки кварцевых генераторов.

В настоящее время в классическом цезиевом стандарте используется пучок атомов, который формируется коллиматором, расположенном на выходе цезиевой печи. Скорость атомов в пучке составляет сотни метров в секунду. Пучок атомов пролетает через два плеча СВЧ резонатора. Время пролета атомов через два плеча определяет добротность СВЧ резонатора, и при разумных размерах лабораторной установки ширина полосы пропускания резонатора составляет около 100 Гц, что соответствует добротности $Q \sim 10^8$. Наблюдение резонанса с помощью пучка атомов позволяет исключить доплеровский сдвиг $(\delta\nu/\nu) = (v/c) \sim 10^{-6}$, но остается квадратичный доплеровский сдвиг $(\delta\nu/\nu) \sim (v^2/2c^2) \sim 10^{-12}$. Теоретически этот доплеровский сдвиг с точностью до нескольких процентов можно учесть. Однако более точный учет невозможен из-за невозможности определить распределение по скоростям атомов в пучке. Следовательно, точность пучкового стандарта частоты определяется величиной порядка 10^{-14} .

2.3. Водородные мазеры

Водородные мазеры были созданы в результате экспериментального подтверждения принципа усиления стимулированного излучения. За эти работы Таунсу в США и Басову и Прохорову в СССР была присуждена Нобелевская премия. Первый водородный генератор в СССР был создан в 1963 г. в Физическом институте АН [5]. Для получения стимулированного излучения атомы водорода накапливались в колбе с фторопластовым покрытием. При многократном столкновении со стенками колбы атомы водорода не испытывали значительных возмущений и можно было накопить достаточное число атомов для получения генерации. Хотя водородные мазеры и не проявили достаточной воспроизводимости, они оказались очень высокостабильными как на коротких, так и на длительных интервалах времени. Благодаря этому свойству они с успехом используются для создания хранителей времени и для генерации опорных частот в прецизионных квантовых стандартах частоты. Впервые в качестве хранителей времени стандарты частоты на основе водородных мазеров начали использоваться в СССР.

2.4. Квантовые часы на холодных атомах цезия

Идея создания часов на холодных атомах цезия впервые была высказана Захариасом [6] в 1950 годах. Он построил вертикальный атомный спектро-

скоп высотой в несколько метров. По идее только медленные атомы, имеющие вертикальную скорость, не достигали бы потолка и под действием силы тяжести падали бы вниз. Внизу у источника атомов цезия размещался СВЧ резонатор. Атомы должны были дважды проходить этот резонатор – по пути вверх и по пути вниз. Однако при комнатной температуре число атомов с требуемой скоростью оказалось ничтожно малым, и из-за столкновений с горячими атомами даже имеющиеся атомы отклонялись от вертикального луча. По этой причине идея построения атомного фонтана оказалась несостоятельной.

Возврат к идее построения атомных фонтанов стал возможным в связи с открытием возможности охлаждения атомов путем взаимодействия со световыми фотонами. Применение лазерных технологий позволило охладить атомы до температур в единицы мК, что соответствует скорости атомов в единицы сантиметров в секунду. Холодные атомы дважды пересекают СВЧ резонатор по пути вверх и по пути вниз. Время между двумя прохождениями составляет доли секунды, что позволяет получать атомные резонансы с шириной порядка 1 Гц. Это по крайней мере на два порядка уже, чем ширина атомного резонанса на лабораторных пучковых стандартах. Самое же главное достоинство – практическое отсутствие влияния эффекта Доплера второго порядка, который ограничивает неопределенность частоты воспроизведения величиной $\approx 10^{-14}$. Первый стандарт частоты на фонтане холодных атомов был предложен и создан во Франции А. Клероном [7]. Уже на этом стандарте частоты была достигнута нестабильность частоты $1,5 \cdot 10^{-13} \tau^{-1/2}$, где τ – численное значение времени измерения, выраженное в секундах.

В таблице 1 приведены сравнительные характеристики различных стандартов частоты.

Таблица 1

Тип стандарта	Неисключенная систематическая относительная погрешность воспроизведения частоты перехода
Лабораторный цезиевый стандарт частоты на фонтане холодных атомов	$7 \cdot 10^{-16} - 3 \cdot 10^{-15}$
Лабораторный цезиевый стандарт частоты на непрерывном пучке тепловых атомов	$6 \cdot 10^{-15} - 10^{-13}$
Промышленный цезиевый стандарт частоты	$10^{-12} - 3 \cdot 10^{-11}$
Водородный мазер	$(2-5) \cdot 10^{-12}$

Из таблицы видно, что из практически работоспособных существующих в настоящее время стандартов частоты наивысшей воспроизводимостью частоты обладают стандарты частоты на фонтане холодных атомов.

3. Стандарт частоты на холодных атомах

3.1. Атомный спектроскоп

В основе работы атомного фонтана лежит двукратный пролет атомного облака через СВЧ резонатор атомного спектроскопа при баллистическом полете. Основные стадии работы фонтана показаны на примере работы экспериментальной установки ФГУП «ВНИИФТРИ» [8]. Рассмотрим работу спектроскопа, представленного на рис.3.1.

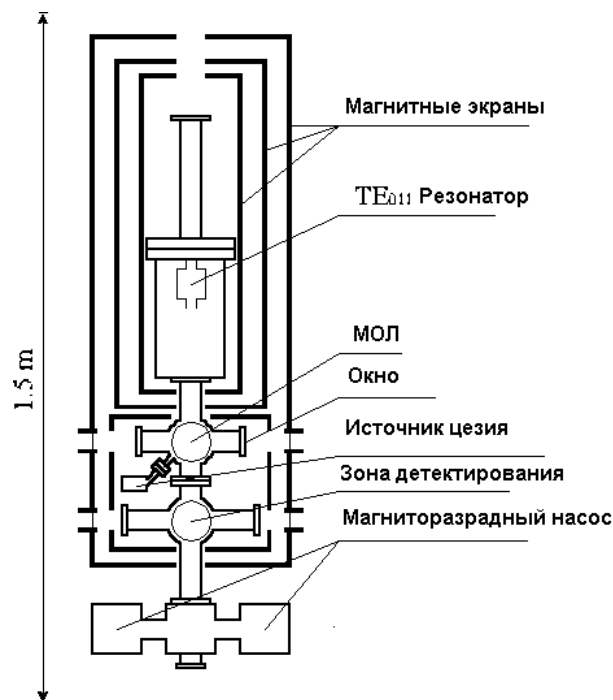


Рис. 1. Схематическое изображение спектроскопа на фонтане холодных атомов

В области магнитно-оптической ловушки (МОЛ) охлаждаются и накапливаются атомы, испускаемые источником цезия. Накопленное атомное облако подбрасывается вертикально вверх и после достижения апогея возвращается вниз по той же самой траектории. Атомное облако дважды пролетает

через СВЧ резонатор - по пути вверх и по пути вниз. Так как используется один и тот же резонатор, то это устраняет проблему разности фаз, свойственную двухплечевому резонатору, используемому в пучковом стандарте частоты. После второго пролета резонатора атомы попадают в зону детектирования, где определяется результат их взаимодействия с СВЧ полем в зависимости от его частоты.

Ультрахолодные атомы практически неподвижны в лабораторной системе координат, что позволяет исключить всевозможные сдвиги частоты, связанные с движением атомов. Атомы пролетают через резонатор со скоростью несколько метров в секунду и, следовательно, квадратичный эффект Доплера составляет величину порядка 10^{-16} . Более того, скорость атомов в облаке составляет сантиметры в секунду, и эффект Доплера второго порядка может быть учтен с точностью до 10^{-20} . Физические поля, действующие на атомы, могут быть либо исключены, либо их влияние может быть учтено с высокой степенью точности. В частности, появляется необходимость учета влияния на сдвиг частоты величины гравитационного потенциала и излучения «черного» тела. В настоящее время точность стандартов частоты на холодных атомах подходит к уровню $\sim 10^{-16}$. Таким образом, основное ограничение пучкового стандарта частоты не является ограничивающим фактором для стандарта частоты фонтанного типа.

3.2. Лазерное охлаждение атомов

Для работы стандарта частоты фонтанного типа необходима технология лазерного охлаждения атомов. Современные технологии лазерного охлаждения и управления движением атомов являются мощным инструментом для разработки и создания нового поколения сверхвысокоточных стандартов времени и частоты. Именно лазерное охлаждение позволяет в максимальной степени реализовать идею воспроизведения частоты «невозмущенного» перехода в стандарте частоты фонтанного типа.

В настоящее время рассматриваются два типа лазерного охлаждения: доплеровское охлаждение и сизифово охлаждение.

3.2. Доплеровское охлаждение

На рис.3.2.2. схематически показано, как работает доплеровское охлаждение в одномерном случае.

Пусть атом движется со скоростью v в поле плоской стоячей волны (одномерный случай). Внизу показана линия поглощения атома с максимумом поглощения на частоте ν_0 . Частота лазера ν_L настроена ниже резонансной частоты ν_0 . Тогда излучение встречной волны действует на атом с частотой $\nu_L(1+v/c)$, а излучение догоняющей волны с частотой $\nu_L(1-v/c)$ соответственно. Из рисунка видно, что взаимодействие со встречной волной гораздо

интенсивнее, чем с догоняющей. При взаимодействии с лазерным излучением атом поглощает фотоны в основном из встречной волны и спонтанно переизлучает их в произвольном направлении.

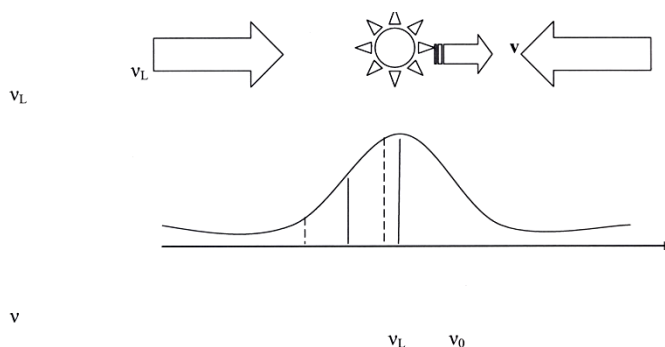


Рис. 2. Принцип доплеровского охлаждения атомов. На движущийся со скоростью v атом действуют две волны лазера с частотой ν_L , которая ниже резонансной частоты поглощения атомов ν_0 . Благодаря эффекту Доплера $\nu_L(1 \pm v/c)$ атом рассеивает больше фотонов из встречной волны и на него действует сила трения, пропорциональная скорости движения. Атом стремится к равновесию в неподвижном состоянии

Сохранение энергии и импульса для атома происходит только в том случае, если атом переизлучает фотон в том же направлении, что и поглощенный фотон. Во всех остальных случаях выполняются законы сохранения энергии и импульса для системы атом-фотон и, в конечном счете, атом теряет свою кинетическую энергию, т.е. тормозится. На атом действует тормозящая сила $\mathbf{F} = -\alpha\mathbf{v}$. Т.е. всякое движение атома в стоячей волне вызывает действие на него тормозящей силы. За один акт переизлучения фотона атом теряет скорость $\Delta v = h/M\lambda$, где M – масса атома, λ – длина волны резонансного излучения, h – постоянная Планка [4.2.3]. Для цезия потеря скорости за один акт поглощение – испускание фотона составляет примерно 3,5 мм/с. Это означает, что атом цезия испытывает торможение порядка 3,5 тысяч g , где g – значение ускорения свободного падения. Из-за остаточного возбуждения, связанного со случайным по природе процессом взаимодействия, доплеровское охлаждение не может охладить атомы ниже доплеровской температуры $kTD = h/2\tau$, где k – константа Больцмана, τ – время жизни атома в возбужденном состоянии. Для атома цезия предельная температура TD составляет 120 мкК. При таких температурах скорость атома цезия составляет десятки см/с и квадратичный эффект Доплера составляет соответственно порядка 10^{-15} . Однако такие скорости еще слишком велики для работы установки в режиме «Фонтана». За времена в доли секунды атомы уходят из области взаимодействия, и для работы фонтана необходимо уменьшение ско-

рости до единиц сантиметров в секунду. Таким образом, несмотря на достаточно низкие температуры атомов, чтобы устранить основное препятствие – эффект Доплера второго порядка, необходимо дальнейшее охлаждение атомов по техническим причинам. А именно: необходимо, чтобы за времена, исчисляющие величиной порядка одной секунды, атомы не пролетели мимо зоны детектирования. По этой причине необходимо использовать другие способы доохлаждения атомов.

3.2.2. Сизифово охлаждение

Принцип сизифова охлаждения можно понять из рис. 3.

Пусть атомы находятся в поле встречных волн с взаимно перпендикулярной поляризацией. Рассмотрим поляризацию суммарной волны в зависимости от положения. Пусть в положении $\lambda/4$ поляризация будет вертикальной, в положении $3\lambda/8$ круговой с правым вращением, в положении $\lambda/2$ – горизонтальной, в положении $5\lambda/8$ круговой с левым вращением, в положении $3\lambda/4$ вертикальной и т.д. В простейшем случае двухуровневой системы атомы будут занимать два энергетических состояния в точках с круговой поляризацией. Момент вращения атома либо совпадает с направлением вращения электрического поля, либо противоположен вращению поля. Пусть атом в состоянии 1 из-за наличия кинетической энергии движется вправо. При движении атом теряет кинетическую энергию и занимает более высокое энергетическое положение, где он поглощает фотон и переходит опять в более низкое положение 2 (если он перейдет в положение 1, то опять произойдет взаимодействие с фотоном до тех пор, пока атом не попадет в состояние 2).

Продолжая движение, атом снова попадает в положение с более высокой потенциальной энергией и взаимодействует с фотоном. Это напоминает ситуацию, описанную в греческом мифе про Сизифа, который закатывал камень на гору, и как только он достигал вершины, камень срывался вниз, и приходилось начинать все сначала. Предельная энергия определяется энергией отдачи фотона и определяется из соотношения $kTR \sim h^2/M\lambda^2$, и для атома цезия предельная температура составляет около 0,1 мкК. Достижимая температура пропорциональна интенсивности излучения и обратно пропорциональна отстройке частоты δ , если δ больше ширины резонанса.

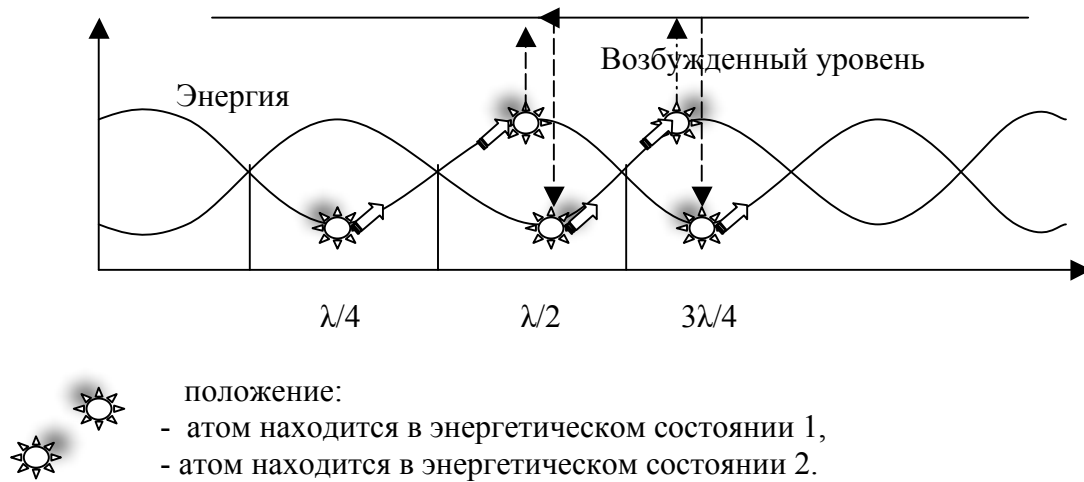


Рис. 3. Принцип сизифова охлаждения атомов. Энергия атомов зависит от их пространственного положения в поле стоячей волны. При движении атом теряет кинетическую энергию и при достижении максимальной потенциальной энергии взаимодействует с излучением и попадает опять в потенциальную яму

3.3 Подбрасывание атомов

Облако атомов можно подбросить вверх с контролируемой начальной скоростью путем использования эффекта Доплера. Рассмотрим еще раз схему на рис. 4. и предположим, что свет, распространяющийся вправо имеет частоту $\nu_L + \Delta\nu$, а свет, распространяющийся влево, имеет частоту $\nu_L - \Delta\nu$. Если атом движется вправо со скоростью v_0 , такой что $v_0 = c\Delta\nu_L/\nu_L = \Delta\nu_L\lambda_L$, то в системе координат, находящейся вместе с атомом в равномерном прямолинейном движении, все происходит так, как если бы частота светового пучка, движущегося влево, благодаря эффекту Доплера возросла на $\nu_L v_0/c = \Delta\nu_L$. В этой системе атом находится в покое и он воспринимает частоту лазерного пучка как ν_L . Аналогичные доводы показывают, что то же самое происходит и с пучком, движущемся вправо. Поэтому атомы захватываются оптической трясиной, движущейся со скоростью $v_0 = \nu_L\lambda_L$. Скорость подбрасывания определяется величиной $\Delta\nu_L$. Если $\Delta\nu_L = 5$ МГц, то для атомов цезия мы получим скорость 4,25 м/с.

3.4 Детектирование взаимодействия атомов с СВЧ полем

Атомы, накапливающиеся в зоне пересечения охлаждающих лучей, находятся в квантовом состоянии F4 с магнитными проекциями от $m=-4$ до $m=4$. Для уменьшения влияния спин-обменного взаимодействия в процессе подбрасывания вверх или позже (но в любом случае до первого пролета че-

рез резонатор) атомы переводятся либо в состояние F3, $m=0$, либо в состояние F4, $m=0$. Результаты детектирования не зависят от исходного состояния атомов.

Пусть атомы летят вверх в состоянии F3. При двукратном пролете через резонатор часть атомов перейдет в состояние F4, а часть атомов останется в состоянии F3 (если мы находимся на полуширине резонанса, то число атомов в состоянии F3 и F4 должно быть одинаковым). После второго прохождения резонатора атомы попадают в детектирующий лазерный пучок, представляющий стоячую волну, настроенную на циклический переход $F4 \leftrightarrow F'5$, как показано на рис. 4.

Способ детектирования

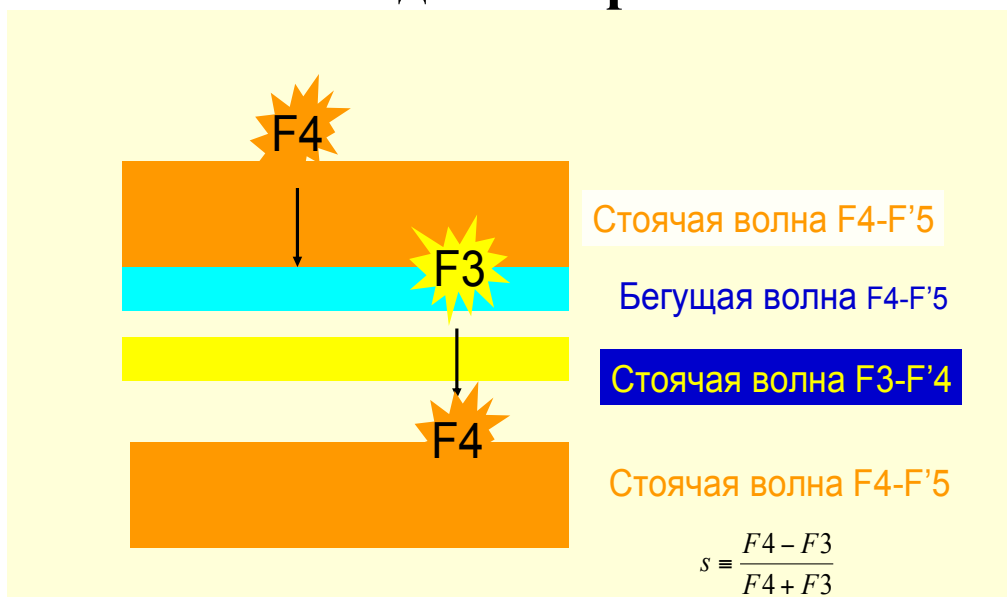


Рис. 4

Из возбужденного состояния F'5 атомы могут в результате спонтанного переизлучения попасть только в состояние F4. В результате мы имеем процесс многократного взаимодействия атома со световым полем. Если ширина детектирующего луча составляет 5 мм и скорость атома равна 5 м/с, то время взаимодействия составляет порядка 1 мс. За это время при пролете через детектирующий пучок атом переизлучает несколько десятков тысяч фотонов, изотропно распределенных по всем направлениям. Часть этих фотонов попадает в телесный угол зрения фотодетектора. Даже если телесный угол составляет несколько процентов от полного угла, фотодетектор регистриру-

ет состояние атома, так как от одного атома на фотодетектор попадают сотни фотонов. Таким образом, на фотодетекторе появляется сигнал, пропорциональный числу атомов в состоянии F4.

После прохождения этого луча атомы попадают в бегущую волну, настроенную на переход $F4 \leftrightarrow F'5$ и удаляются (сдуваются) из области детектирования. Во время этих процессов атомы в состоянии F3 с оптическим полем не взаимодействуют.

Детектирование атомов только в одном состоянии недостаточно эффективно для работы стандарта частоты, так как детектированный сигнал зависит не только от числа атомов в состоянии F4, но и от общего числа атомов, летящих вверх в данном запуске (выстреле). Число атомов от выстрела к выстрелу может меняться в пределах 10% и более, и это изменение общего числа атомов также определяет величину сигнала на фотодетекторе. Поэтому необходимо детектирование атомов также и в состоянии F3. При этом мы детектируем все атомы, прошедшие через СВЧ резонатор и для настройки на вершину атомного резонанса используем нормированный сигнал

$$S=(F4-F3)/(F4+F3).$$

Атомы в состоянии F3 в принципе можно детектировать с помощью циклического перехода $F3 \leftrightarrow F'2$. Однако этот способ не используется из-за низкой эффективности взаимодействия атомов с этим излучением и из-за усложнения схемы детектирования, так как атомы могут оптически накачиваться в так называемые «темные» состояния и необходима такая схема детектирования, которая предотвращает или исключает оптическую накачку в «темные» состояния.

Для детектирования атомов в состоянии F3 их сначала с помощью дополнительного излучения переводят в состояние F4. На рисунке показана стоячая волна, настроенная на переход $F3 \leftrightarrow F'4$ (можно также использовать волну, настроенную на переход $F3 \leftrightarrow F'3$). После нескольких актов взаимодействия все атомы оптически перекачиваются в состояние F4.

Далее атомы опять попадают в стоячую волну, настроенную на циклический переход $F4 \leftrightarrow F'5$, и мы получаем на втором фотодетекторе сигнал, пропорциональный числу атомов в состоянии F3.

3.5. Зондирующий сигнал

Типичная добротность атомного резонанса на фонтане холодных атомов составляет величину $Q \approx 10^{10}$, что соответствует ширине порядка 1 Гц. Из этого следует, что для зондирования такого резонанса пробный сигнал должен иметь очень высокую кратковременную стабильность. Фонтан работает в импульсном режиме, и типичная длительность одного цикла составляет секунды. Поэтому даже чтобы только прописать атомный резонанс, нестабильность зондирующего сигнала должна быть не хуже 10^{-11} . *Предположим,*

Альманах современной метрологии, 2016, №8

что неисключенная систематическая относительная погрешность воспроизведения частоты перехода должна быть на уровне порядка 10^{-15} на интервале в одни сутки (однократное измерение). Если нестабильность частоты определяется только белым шумом, то исходная нестабильность зондирующего сигнала должна составлять 10^{-13} за 1 секунду. Тогда нестабильность за 10 000 секунд будет $(\delta\nu/\nu)\approx 10^{-13}\sqrt{\tau} \approx 10^{-15}$.

Необходима не только высокая кратковременная стабильность, но и высокая спектральная чистота зондирующего сигнала. Так как фонтан работает в импульсном режиме, то в сигнале ошибки появляются высокочастотные фурье-компоненты, взаимодействующие со спектральными компонентами зондирующего сигнала и приводящие к сдвигу частоты, если высокочастотные компоненты в зондирующем сигнале несимметричны. Поэтому разработка системы синтеза зондирующего сигнала требует особого внимания.

3.6 Система управления

Из импульсного режима работы фонтана следует, что в процессе работы необходимо изменять параметры системы по определенным законам. Рассмотрим цикл работы лазерной системы на примере работы макета фонтана ВНИИФТРИ (рисунок 5).

В начальной фазе охлаждения мощность охлаждающих лучей должна составлять 100%, а частота охлаждающих лучей должна быть ниже резонансной частоты циклического перехода примерно на ширину резонанса (доплеровское охлаждение, начальная отстройка может зависеть от конструктивных особенностей). В нашем случае длительность доплеровского охлаждения составляет 0,6 с и частота лазеров отстроена от частоты циклического перехода на 8 МГц.

Следующий этап – подбрасывание атомов вверх. На этом этапе не изменяется частота горизонтальных лучей, частота вертикального луча вниз понижается на величину Δ , определяемую необходимой скоростью запуска атомов вверх, а частота вертикального луча вверх, соответственно повышается на величину Δ . Время этого цикла составляет единицы миллисекунд, в нашем случае 0,8 мс.

Пока атомы находятся в охлаждаемой зоне в процессе их полета вверх включается фаза сизифова доохлаждения. Для этого по определенному закону уменьшается на порядок мощность всех охлаждающих лучей и увеличивается частота отстройки вниз всех охлаждающих лучей примерно на 60 МГц. Типичное время этого цикла также составляет единицы миллисекунд.

После доохлаждения в течение нескольких миллисекунд лазерные лучи работают при минимальной мощности и при низшей частоте, и во время этого цикла возможен перевод атомов из состояния F4 в состояние F3. Длительность этого цикла составляет несколько миллисекунд.

Далее идет время опроса и все лазерные лучи должны быть выключены для исключения светового сдвига, и после детектирования атомов после их взаимодействия с СВЧ излучением ($\approx 0,5$ с) цикл повторяется.

Кроме управления частотой и мощностью охлаждающих оптических лучей, необходимо управлять мощностью, частотой и фазой зондирующего сигнала, а также накапливать и обрабатывать по заданному алгоритму сигнал ошибки для определения частоты атомного резонанса.

Таким образом, для осуществления работы атомного фонтана необходима разработка как программного обеспечения, так и интерфейсов для компьютерного управления лазерными пучками, затворами, СВЧ источником, накоплением и обработкой сигнала ошибки и контролем параметров системы.

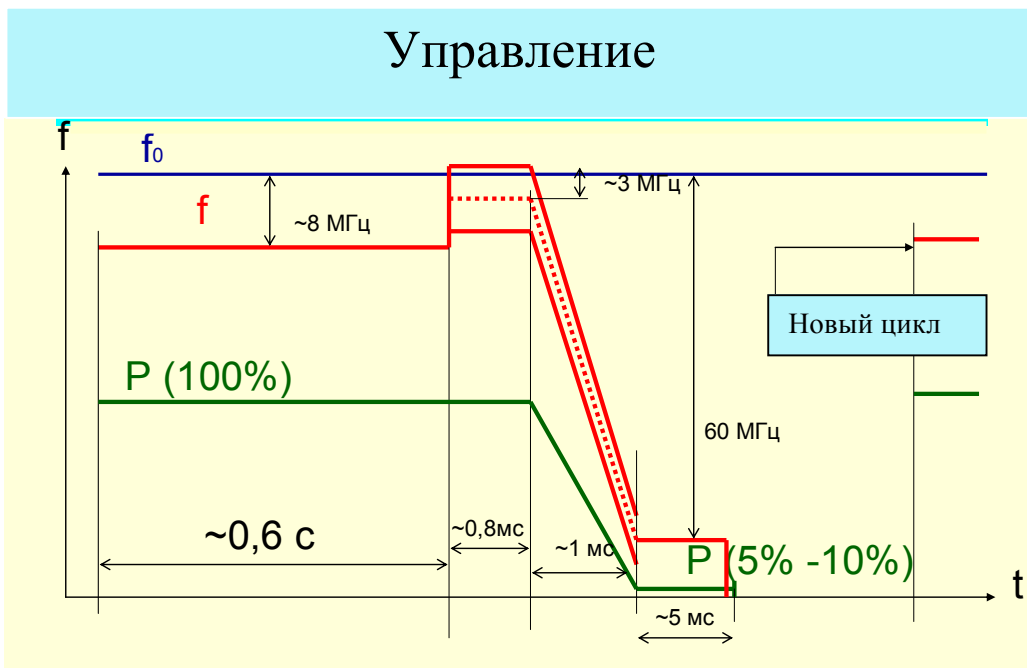


Рис. 5

3. Фонтан ВНИИФТРИ

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод, что в составе МЦР «Фонтан» обязательно должны присутствовать следующие узлы и системы:

1. Атомный спектроскоп. Он должен обеспечивать высокий вакуум для предотвращения атомных столкновений как с остаточным газом, так и с атомами цезия. Это необходимо как для работы по охлаждению атомов, так и для исключения столкновительных сдвигов. Материал вакуумной

камеры, оптических и СВЧ вводов не должен искажать магнитное поле. Должна быть обеспечена однородность магнитного С-поля, достаточная для того, чтобы квадратичный эффект Зеемана не превышал 10^{-15} . При этом конструкция спектроскопа должна предусматривать ввод широких оптических пучков для охлаждения и детектирования атомов.

2. Лазерно-оптическая система. Лазерно-оптическая система должна генерировать достаточное число оптических пучков для охлаждения и управления движением атомов. Также необходима генерация лазерных пучков для управления населенностью и для детектирования квантовых состояний. Число атомов в оптической «трясине» зависит от ширины оптических лучей и плотности мощности излучения в пучке. Обычно необходима плотность мощности излучения на уровне в несколько милливольт на квадратный сантиметр. Это означает, что лазеры в одномодовом режиме должны генерировать мощности в сотни милливольт.
3. Аппаратура формирования зондирующего сигнала (СВЧ-синтезатор). СВЧ-синтезатор исходно определяет конечную величину неопределенности воспроизведения частоты перехода. Например, если нестабильность пробного сигнала составляет достаточно высокую, но не рекордную величину порядка 10^{-12} , то неопределенность воспроизведения частоты невозмущенного перехода на уровне 10^{-15} достигнута не будет, так как для выполнения только одного измерения требуется порядка 10 суток и для обеспечения статистики несколько месяцев. Очевидно, это не практично. Таким образом, необходимо разработать СВЧ-синтезатор с неординарными характеристиками по кратковременной стабильности и спектральной частоте сигнала.
4. Система управления. Работа атомного фонтана в импульсном режиме однозначно требует компьютерного управления работой атомного фонтана. Во время цикла работы необходимо обеспечить перевод лазерной системы в различные режимы, обеспечить контроль параметров системы, обеспечить синхронизированное управление частотой, мощностью и фазой СВЧ сигнала и, наконец, накопить и обработать сигнал ошибки по заданному алгоритму для получения наивысшей точности.
5. Система контроля и питания. МЦР «Фонтан» содержит большой комплекс электронной аппаратуры вспомогательного назначения: это блоки питания вакуумных насосов, блоки питания нагревательных элементов, блоки питания фотодетекторов, а также аппаратура управления и контроля работы различных систем и блоков. Например, контроль работы лазеров, аппаратура формирования сигналов акусто-оптических модуляторов, блок управления и формирования тока оптико-механических затворов и т.д.

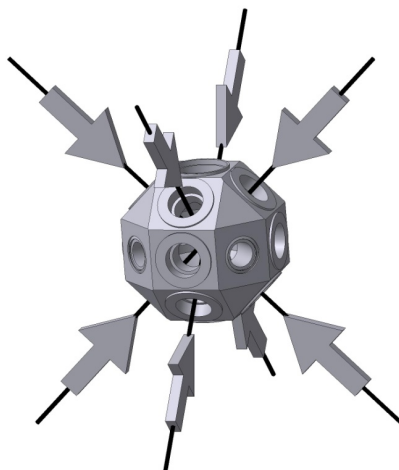


Рис. 6. Оптическая схема (1,1,1,1)

Для устранения конструктивных ограничений нами была предложена оптическая схема, которую можно обозначить как (1,1,1,1). Согласно обозначению в этой схеме присутствуют 4 волны (рис. 6).

Схема работает следующим образом. Пусть мы имеем горизонтальную плоскость ZZ и две вертикальные взаимно перпендикулярные плоскости XX и YY . В каждой вертикальной плоскости мы можем провести два взаимно перпендикулярных направления, наклоненные к горизонтальной плоскости под углом 45° . Пусть это будут направления расположения стоячих волн, образованных двумя встречными лучами. Уже в этом случае мы имеем конфигурацию (1,1,1,1), состоящую из восьми попарно встречных лучей в 4 взаимно перпендикулярных направлениях.

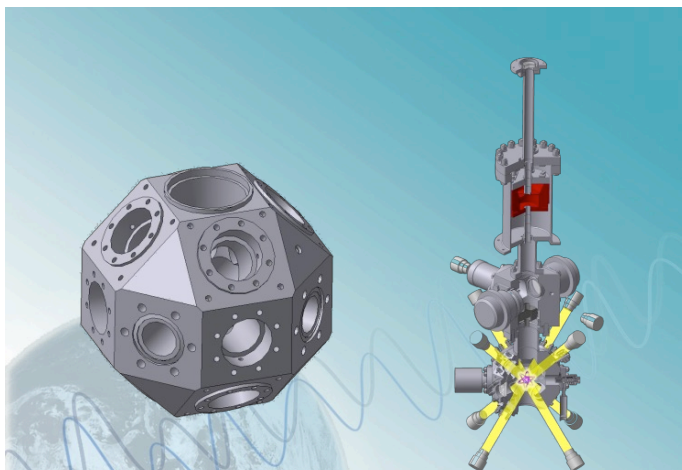


Рис. 7.

Выше дано компьютерное изображение основного элемента оптической «трясины» ($0^2, 1^4$) и схематический вид спектроскопа в конфигурации (1,1,1,1).

Выбор конфигурации (1,1,1,1) обеспечивает эффективность охлаждения, а конфигурация (02,14) основного элемента оптической «трясины» позволяет производить модификацию оптических схем после лабораторных исследований с целью достижения оптимальных параметров работы экспериментального образца МЦР «Фонтан».

Таблица 2

Систематические сдвиги частоты и их вклад в бюджет ошибок экспериментального образца МЦР «Фонтан»

Физический эффект	Смещение	Погрешность
Эффект Зеемана 2-го порядка	106950	<0.1
Спин-обменное взаимодействие	0	0.1
Излучение «черного тела»	-164.4	1
Гравитационный потенциал	244.3	0.5
Зависимость от СВЧ мощности	0	0.1
Затягивание резонатором	<0.1	<0.1
Затягивание Раби	<0.1	<0.1
Затягивание Рэмси	<0.1	<0.1
Спектральная чистота	<0.1	<0.1
Световой сдвиг	<0.1	<0.1
Распределение фаз резонатора	<0.1	0.1
Майорановские переходы	<0.1	<0.1
Давление остаточного газа	<0.1	0.1
Общая величина ошибки типа В	1149.2	2.4
Единицы выражены в долях 10^{-16}		

По точностным характеристикам российский МЦР «Фонтан» является одним из лучших фонтанов, дающих вклад в формирование Международной атомной шкалы TAI.

Литература

1. Markowitz W., Hall R.G., Essen L., Parry J.V.L. Frequency of cesium un terms ephemeris time// Phys Rev. Let. 1, 195-107, 1958.
2. Beehler R.E. A historical review of atomic frequency standards// Proc. IEE, 55, 792-805, 1967.
3. Domnin Yu., Gaigerov B., Koshelyaevsky N., Pushkin, F.Rusin S., Tatarenkov V. and Yolkin G. Fifty years of atomic time-keeping at VNIIFTRI// Metrologia, 42, №3, S55-S61, 2005.

4. Essen L. Parry J.V.L. The cesium resonator as a standard of frequency and time// *Phil. Trans. R. Soc. London Ser. A*, 250, 45-69. 1957.
5. Басов Н. и др. Разработка и исследование квантового генератора на пучке водорода, Труды Физического института им. П.Н. Лебедева. Радиофизика, т.31, 1965.
6. Forman P. Atomichron: The atomic clock from concept to commercial product// *Proc.IEEE*, 73, 1181- 1204, 1985.
7. Clairon A., Laurent P., Santarelli G., Ghezali S., Lea S.N., Bouhara M. A cesium fountain frequency standard: preliminary measurement// *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 44, 128-131, 1995.
8. Домнин Ю.С., Барышев В.Н., Бойко А.И., Елкин Г.А., Новоселов А.В. Копылов Л.Н., Купалов Д.С. Цезиевый репер частоты фонтанного типа МЦР-Ф2// *Измерительная техника*, 2012, №10, с 26-30.