

УДК 621.317.766

## О МЕТОДИКЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЯЧЕЕК ДЛЯ РУБИДИЕВОГО СТАНДАРТА ЧАСТОТЫ

*А. И. Пихтелев, М. П. Беспалова, Ю. М. Сапожников, Г. А. Мишаков*

Приведен анализ и результаты исследования методики составления газовой смеси, обеспечивающей малый температурный коэффициент частоты ячеек, а также методики их наполнения этой смесью. Применена калибровка ячеек по частоте атомного перехода в  $\text{Rb}^{87}$  с высокой точностью воспроизведения частоты.

Повышение точности воспроизведения частоты одного из основных типов квантовых стандартов частоты — стандарта на газовой ячейке с парами  $\text{Rb}^{87}$  — представляет в настоящее время важную задачу. Основным фактором, определяющим этот параметр стандарта, является смещение частоты атомного перехода в  $\text{Rb}^{87}$  под действием газа-наполнителя ячейки, зависящее от давления, температуры и состава газа. Наряду с высокой точностью воспроизведения ячейка должна иметь малый температурный коэффициент частоты (ТКЧ), что достигается подбором соответствующей смеси газов. Необходимо отметить, что литературные данные по составу смеси газов, дающему минимальный ТКЧ [1, 3], не согласуются между собой, что указывает на необходимость дальнейших исследований.

Настоящая работа посвящена исследованию состава газовых смесей, обеспечивающих малый ТКЧ ячеек, и методике наполнения ячеек этой смесью с использованием калибровки давления газа по смещенной частоте атомного перехода в  $\text{Rb}^{87}$ , что дает наиболее высокую точность воспроизведения частоты.

### 1. ИССЛЕДОВАНИЕ ТКЧ ЯЧЕЙКИ И МЕТОДИКА СОСТАВЛЕНИЯ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ

Относительное смещение частоты атомного перехода в  $\text{Rb}^{87}$  под действием газа-наполнителя ячейки легко связать с количеством столкновений атомов рубидия с атомами буферного газа в единицу времени:

$$\Delta = \beta n \bar{v}, \quad (1)$$

где  $\beta$  — некоторый коэффициент, пропорциональный сечению столкновений и в общем случае зависящий от скорости атомов  $\text{Rb}^{87}$  и, следовательно, от температуры ячейки [4];  $n$  — плотность атомов буферного газа;  $\bar{v}$  — средняя относительная скорость атомов  $\text{Rb}^{87}$ .

Выражая скорость через температуру [4], а плотность через исходные параметры (давление  $p_0$  и температуру  $T_0$ ), определяемые условиями наполнения ячейки газом, получим для относительного смещения частоты на единицу давления

$$\frac{\Delta}{p_0} = \alpha(T) \sqrt{\frac{T}{T_0}}, \quad (2)$$

где  $\alpha(T) = 2,26 \beta / \sqrt{k \mu T_0}$ ,  $\mu = m_{Rb} m_r / (m_{Rb} + m_r)$  — приведенная масса,  $k$  — постоянная Больцмана. ТКЧ ячейки определится дифференцированием соотношения (2) по температуре  $T$ :

$$\delta(T) = \frac{1}{P_0} \frac{d\Delta}{dT} = \sqrt{\frac{T}{T_0}} \left( \frac{d\alpha}{dT} + \frac{\alpha}{2T} \right). \quad (3)$$

Для получения малого ТКЧ необходимо использовать смесь из двух газов, для которых индивидуальные ТКЧ противоположны по знакам. К такой паре можно отнести, например, аргон и неон. Для указанной смеси будем иметь

$$\delta_{см}(T) = \gamma \delta_{Ar}(T) + (1-\gamma) \delta_{Ne}(T), \quad (4)$$

где

$$\gamma = P_{Ar} / P_0, \quad P_0 = P_{Ar} + P_{Ne}.$$

Как следует из (4), нулевой ТКЧ возможен при

$$\gamma(T) = - \frac{\delta_{Ne}(T)}{\delta_{Ar}(T) - \delta_{Ne}(T)}. \quad (5)$$

Проведенные нами измерения ТКЧ ячеек с неоновым и аргоновым наполнением при температуре  $\sim 47^\circ\text{C}$  дали следующие величины:

$$\delta_{Ne} = +3,3 \cdot 10^{-10} \text{ (см рт. ст. град)}^{-1}, \quad (5a)$$

$$\delta_{Ar} = -4,4 \cdot 10^{-10} \text{ (см рт. ст. град)}^{-1}.$$

Согласно (5), при данной температуре ячейки нулевой ТКЧ должен обеспечиваться смесью 42,8% Ar и 57,2% Ne. При этом неопределенность по ТКЧ  $d\sigma$ , определяемая из соотношения (4), равна

$$d\sigma = (\delta_{Ar} - \delta_{Ne}) d\gamma, \quad (6)$$

где  $d\gamma$  — погрешность в составе смеси.

Из (6) видно, что для обеспечения  $d\sigma = 10^{-11}$  (см. рт. ст. град) $^{-1}$  должно быть  $d\gamma \simeq 10^{-2}$ .

Для составления и анализа газовых смесей использовалась специальная вакуумная установка и масс-спектрометр типа МИ-1305. Предварительно масс-спектрометр калибровался с нужной точностью по каждому из газов. Затем в отдельный стеклянный баллон (смесительный объем) производился напуск газов. Для обеспечения малой погрешности  $d\gamma$  полученная смесь тщательно перемешивалась в течение длительного времени (от нескольких часов до суток). При этом на масс-спектрометре осуществлялся контроль за установлением однородной смеси, производились анализ и коррекция смеси до нужного процентного соотношения. Данная методика позволяла составлять и воспроизводить газовые смеси с точностью порядка 1%. Приготовленные таким способом смеси использовались для наполнения ячеек, для каждой из которых измерялся ТКЧ. При этом неопределенность по ТКЧ (6) достигла величины порядка  $5 \cdot 10^{-12} \div 1 \cdot 10^{-11}$  (град. см рт. ст.) $^{-1}$ .

Экспериментальная зависимость ТКЧ от процентного содержания аргона в аргон-неоновой смеси при температуре ячейки  $47^\circ\text{C}$  представлена на рис. 1. Ми-

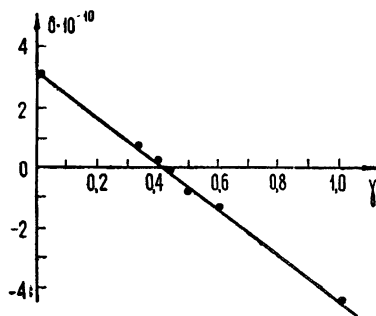


Рис. 1. Зависимость ТКЧ ячейки от процентного соотношения аргон-неоновой смеси в ней.

нимальный ТКЧ получается у смеси 43,2% Ag и 56,8% Ne, что находится в достаточном соответствии с результатом, полученным из (5) и (5а). Полученный результат приближается к данным работы [1] и несколько отличается от данных работы [3]. К сожалению, неполное описание методики в [1, 3] не позволяет провести более детального сравнения результатов.

## 2. МЕТОДИКА НАПОЛНЕНИЯ ЯЧЕЙКИ СМЕСЬЮ ГАЗОВ С КАЛИБРОВКОЙ ДАВЛЕНИЯ ПО СМЕЩЕННОЙ ЧАСТОТЕ АТОМНОГО ПЕРЕХОДА В $Rb^{87}$

Наполнение ячеек, их калибровка и отпайка производится на калибровочном стенде, блок-схема которого представлена на рис. 2. Калибровка давления газовой смеси осуществляется непосредственно по смещенной частоте атомного перехода в  $Rb^{87}$ . Соответственно с этим калибровочный стенд включает измерительный стандарт частоты, систему сравнения частоты этого стандарта с эталонной и вакуумную установку с устройствами наполнения ячеек. Изготавливаемые ячейки объединены общей вакуумной системой. Одна из этих ячеек (измерительная) служит для контроля частоты и помещается в измерительный стандарт. Перед наполнением (после необходимой вакуумной обработки и отжига) ячейки помещаются в разборные термостаты: измерительная—в термостат измерительного стандарта частоты, а остальные—в отдельный термостат, имеющий ту же температуру, что и первый. Выходная частота измерительного стандарта сверяется с частотой опорного.

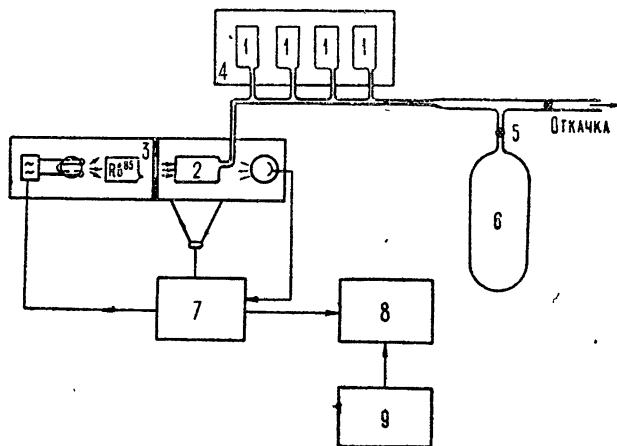


Рис. 2. Блок-схема калибровочного стенда: 1—наполняемые ячейки, 2—измерительная ячейка, 3—атомный дискриминатор на  $Rb^{87}$ , 4—термостат наполняемых ячеек, 5—краны, 6—баллон со смесью газов, 7—электронная схема измерительного рубидиевого стандарта частоты, 8—блок измерения частоты, 9—опорный стандарт частоты.

Погрешность воспроизведения частоты  $\sigma$  определяется при этом погрешностью измерения частоты  $\sigma_{изм}$ , температурной погрешностью частоты  $\sigma_T$  (обусловленной неточностью воспроизведения температур в термостатах 2 и 4) и технологическим разбросом частоты  $\sigma_{техн}$  (обусловленным неточностью воспроизведения давления):

$$\sigma \approx \sqrt{\sigma_{изм}^2 + \sigma_{техн}^2 + \sigma_T^2} \quad (7)$$

Радиоаппаратура обеспечивала относительную погрешность измерения  $\sigma_{изм} = (2-3) \cdot 10^{-11}$ . Точность воспроизведения температур в тер-

мостатах составила  $0,1-1^{\circ}\text{C}$ . Технологический разброс вызывается двумя причинами: перераспределением давления в системе за счет прогрева при отпайке и газоотделением во время отпайки. Для его уменьшения необходимо уменьшить диаметр канала и, таким образом, избежать прогрева большой массы стекла при отпайке. В то же время в связи с необходимостью перегонки по каналу щелочного металла диаметр канала нельзя сделать менее  $2-5$  мм. Нами использовалась двухканальная система наполнения ячеек, в которой по одному каналу производится перегонка щелочного металла в ячейку, а по второму каналу (капилляру) — ее наполнение буферным газом.

По достижении внутри ячеек вакуума порядка  $10^{-5}-10^{-6}$  мм ячейки обезгаживаются обычным способом [5] при температуре  $350-380^{\circ}\text{C}$  в течение  $3-4$  часов. После отжига щелочной металл перегоняется в ячейки по первому каналу и производится отпайка этого канала. Выделившиеся при этом газы откачиваются через второй канал-капилляр с тонкими стенками диаметром менее  $1$  мм. Через него же ячейки наполняются буферными газами, и после калибровки их давления по эталонной частоте атомного перехода производится окончательная точечная отпайка ячейки по капилляру. Данный способ наполнения позволил значительно уменьшить технологический разброс частоты, который при наполнении ячеек смесью ( $\text{Ar} = 43,2\%$  и  $\text{Ne} = 56,8\%$ ) до давления  $20$  мм рт. ст. находился в пределах погрешности измерения и составлял  $\sigma_{\text{техн}} = 2,5 \cdot 10^{-11}$ .

Температурная погрешность частоты  $\sigma_T$  обусловлена неточностью воспроизведения температур в термостатах  $\Delta T$ , что приводит к неодинаковой плотности атомов в ячейках и разделению газовых смесей, обусловленному термодиффузией [4]. Наблюдаемая нами экспериментально температурная погрешность для газовой смеси аргон — неон составила  $1,5 \cdot 10^{-10}$  град $^{-1}$ .

Максимальная суммарная погрешность частоты (7) при наполнении ячеек по данной методике определилась величиной  $(1-2) \cdot 10^{-10}$ .

В заключение авторы выражают глубокую благодарность А. Ф. Крупнову за обсуждение результатов работы и полезные замечания.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. P. Davidovits, R. Novick, Proc. IEEE, 54, 155 (1966).
2. В. В. Григорьянц, М. Е. Жаботинский, В. Ф. Золин, Квантовые стандарты частоты, изд. Наука, М., 1968.
3. Ю. Г. Гужва, В. С. Жолнеров, Вопросы радиоэлектроники, вып. 20, 125 (1968).
4. И. К. Кикоин, А. К. Кикоин, Молекулярная физика, ГИФМЛ, М., 1963.
5. Б. И. Королев, Основы вакуумной техники, Гостехиздат, М.—Л., 1958.

Поступила в редакцию  
17 сентября 1968 г.,  
после доработки  
30 декабря 1969 г.

#### THE METHOD OF CELL FORMATION FOR RUBIDIUM FREQUENCY STANDARD

A. I. Pikhtelev, M. P. Bespalova, Yu. M. Sapozhnikov, G. A. Mishakov

The analysis is presented, as well as the results of investigation of the method of making up the gas mixture providing a small temperature coefficient of the cell frequency and the procedure of filling them with this mixture. The calibration of the gas pressure is made using the biased frequency of the atom transition in  $\text{Rb}^{87}$  with a high accuracy of the frequency estimation.