

РЕЗОНАНСНЫЙ ВАКУУММЕТР

© В. Н. Горобей, Р. Э. Кувандыков, Р. А. Тетерук

ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева»
(ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»),
г. Санкт-Петербург, Россия
E-mail: V. N. Gorobey@vniim.ru

Поступила в редакцию – 05 февраля 2020 г., после доработки – 17 февраля 2020 г.
Принята к публикации – 01 марта 2020 г.

Данная статья посвящена разработке и исследованию метрологических характеристик преобразователя, реализующего резонансный метод и предназначенного для измерения абсолютного давления в широком диапазоне 10 до 10000 Па.

Ключевые слова: вакуум, давление, резонансный метод, МЭМС преобразователь

DOI: 10.20915/2687-0886-2020-16-1-17-23

RESONANT VACUUM GAUGE

© V. N. Gorobey, R. E. Kuvandykov, R. A. Teteruk

D. I. Mendeleev Institute for Metrology (VNIIM),
Sankt Petersburg, Russia
E-mail: V. N. Gorobey@vniim.ru

Received – 05 February, 2020. Revised – 17 February, 2020.
Accepted for publication – 01 March, 2020.

This article is devoted to development and research of sensitive elements, transducers and vacuum gauges created by resonant method and intended for measuring absolute pressure in a wide range from 10 to 10⁴ Pa.

Keywords: vacuum, pressure, resonant method, MEMS transducer

Введение

На сегодняшний день в области измерений низкого абсолютного давления (вакуума) существует ряд проблем, связанных, в первую очередь, с отсутствием на рынке высокоточных отечественных средств измерений (СИ) низких абсолютных давлений. Можно обозначить следующие основные проблемы.

Ссылка при цитировании:

Горобей В. Н., Кувандыков Р. Э., Тетерук Р. А. Резонансный вакуумметр // Эталоны. Стандартные образцы. 2020. Т. 16. № 1. С. 17–23.
DOI 10.20915/2687-0886-2020-16-1-17-23.

For citation:

Gorobey V. N., Kuvandykov R. E., Teteruk R. A. Resonant vacuum gauge. Measurement standards. Reference materials. 2020; 16(1): 17–23.
DOI 10.20915/2687-0886-2020-16-1-17-23 (In Russ.).

1. Отсутствие серийно выпускаемых отечественных высокоточных СИ, соответствующих эталонам 1 и 2 разрядов по ГОСТ 8.107–81. С 2008 г. по настоящее время прошли испытания в целях утверждения типа всего два вакуумметра отечественного производства из более чем тридцати испытанных, причем их метрологические характеристики не удовлетворяют требованиям к эталонам 1 и 2 разрядов [1].

2. Санкционные ограничения, введенные западными странами, не позволяют осуществлять закупку целого ряда высокоточных СИ иностранного производства.

Для решения указанных проблем во ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» проводится разработка отечественных вакуумметров [2], к которым предъявлены следующие требования:

- компактные размеры чувствительных элементов;
- слабая зависимость от рода газа;
- комплектующие отечественного производства;
- низкая стоимость.

Обзор

В настоящее время преобразователи, измеряющие низкое и среднее абсолютное давление газа по принципу действия, подразделяют на следующие типы: деформационные, гидростатические, тепловые, ионизационные, магнитные, кинето-молекулярные, вязкостные.

Чувствительный элемент деформационного вакуумметра состоит из ячейки, разделенной на две части туго натянутой плоской вакуумпрочной диафрагмой (мембраной), образуя сравнительную и измерительную камеры. В сравнительной камере с помощью откачных средств постоянно поддерживается давление газа на 3–4 порядка ниже измеряемого давления газа. Деформационный метод измерения вакуума основан на измерении величины деформации вакуумпрочной

диафрагмы чувствительного элемента, пропорциональной разности давлений в измерительной и сравнительной камерах. Из недостатков данного метода можно выделить: сложность изготовления вакуумпрочной мембраны, необходимость поддерживать давление в сравнительной камере, кроме того, метод не является абсолютным.

Гидростатический метод основан на измерении высоты столбца рабочего тела, компенсирующего разность давлений. Недостатки гидростатического метода измерения вакуума: требуется поддержание давления в сравнительной камере.

Тепловой метод измерения вакуума основан на косвенном измерении давления газа через измерение параметров теплового переноса (например, теплопроводность). Из недостатков можно выделить зависимость от рода газа, температуры газа, а также то, что метод не является абсолютным.

Ионизационные и магнитные методы используют косвенное измерение вакуума через измерение параметров электрического тока, протекающего через газ. Из недостатков можно выделить зависимость от рода газа, температуры газа. Эти методы также не являются абсолютными.

Кинето-молекулярные и вязкостные методы измеряют вакуум через косвенное измерение параметров движения чувствительных элементов преобразователей. Из недостатков можно выделить зависимость от рода газа, температуры газа, также методы не являются абсолютными.

Материалы и методы

Для устранения зависимости от рода газа при разработке отечественного вакуумметра был использован резонансный метод измерения давления газа. В данном

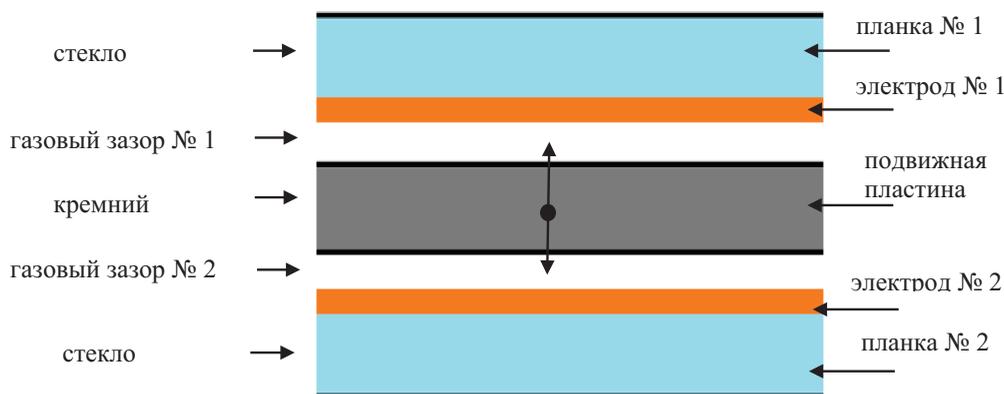


Рис. 1. Пневматическая схема

Fig. 1. Pneumatic circuit

методе роль упругого подвеса колеблющейся массы выполняет газовая пружина. Пневматическая схема чувствительного элемента представлена на рис. 1. В процессе колебания, при плоскопараллельном движении подвижной пластины (ПП) в сторону одного из электродов, объем газа в одном из зазоров уменьшается, а давление увеличивается. В другом зазоре объем увеличивается, а давление падает. Это приводит к возникновению пневматической силы, действующей на ПП и направленной против смещения ПП, и создает условия для возникновения гармонических колебаний. При достаточно большом соотношении линейных размеров ПП и величины зазоров, а также большой частоте колебаний ПП перетеканием газа на границах зазоров можно пренебречь и считать объем газа в зазорах постоянным.

Преобразователь вакуумметра, измеряющий абсолютное давление газа через жесткость газовой пружины, изготовленный по технологии МЭМС, конструктивно представляет из себя кремниевую пластину на упругих подвесах, плоскопараллельно расположенную между стеклянными планками с напылёнными металлическими электродами. Схематично конструкция изображена на рис. 2.

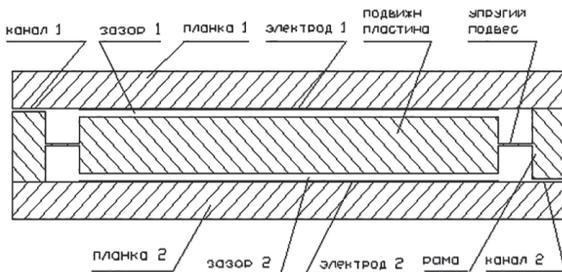


Рис. 2. Схематичная конструкция преобразователя давления

Fig. 2. Schematical design of the pressure transmitter

Метрологически значимые размеры преобразователя изображены на рис. 3.

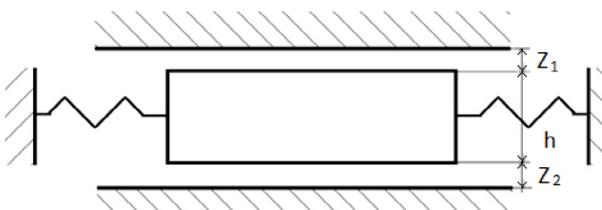


Рис. 3. Метрологически значимые размеры преобразователя

Fig. 3. Metrologically relevant dimensions of the transmittite,

где h – толщина подвижной пластины,

Z_1 – исходное значение величины зазора (толщина газовой пружины) № 1,

Z_2 – исходное значение величины зазора № 2.

Резонансная частота колебаний пластины зависит от жесткости газовой пружины согласно формуле [3] при условии малой амплитуды перемещения подвижной пластины:

$$f_p^2 = \frac{G_M + G_{II}}{4 \times \pi^2 \times m} \quad (1)$$

где G_M – механическая жесткость подвеса,

G_{II} – пневматическая жесткость газовой пружины, m – масса подвижной пластины.

Эквивалентная электрическая схема преобразователя представлена на рис. 4.

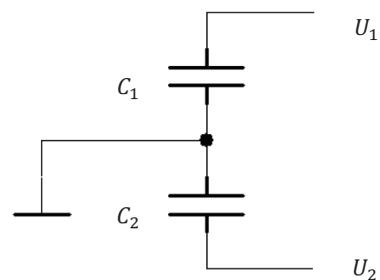


Рис. 4. Электрическая схема преобразователя

Fig. 4. Electric circuit of the transmittite

Обкладки эквивалентных конденсаторов образованы напыленными металлическими электродами и кремниевой подвижной пластиной (общая обкладка).

В общем случае параметры движения кремниевой пластины описываются следующим выражением [4]:

$$m \cdot \frac{(d^2 y)}{(dt^2)} + B \cdot \frac{dy}{dt} + G_M \cdot y - \frac{(\epsilon \cdot \epsilon_0)}{2 \cdot (Z + y)^2} \cdot (U_1^2 - U_2^2) \cdot S = 0 \quad (2)$$

где $y = a \cdot \sin(\omega \cdot t)$ – функция движения пластины,

a – амплитуда колебаний,

ω – циклическая частота колебаний,

B – коэффициент силы вязкого трения газовой среды,

G_M – механическая жесткость подвеса,

ϵ – диэлектрическая проницаемость газовой среды,

ϵ_0 – диэлектрическая постоянная,

U_1 и U_2 – электрические напряжения на электродах,

S – площадь пластины.

Зависимость резонансной частоты колебаний пластины от давления газа можно также получить методом

малых перемещений [5], приравняв количество энергии, запасаемой в газовых пружинах, к изменению механической энергии колебательной системы. Вычислим амплитудное значение энергии, запасаемой в газовых пружинах.

$P_1 = P \cdot (1 + \frac{y}{Z})$ – давление в первой газовой пружине.

$P_2 = P \cdot (1 - \frac{y}{Z})$ – давление во второй газовой пружине.

$\Delta P = P \cdot 2 \cdot \frac{y}{Z}$ – дифференциальное пневматическое давление, действующее на пластину, где P – измеряемое давление.

$F = S \cdot P \cdot 2 \cdot \frac{y}{Z}$ – сила, действующая на пластину.

$E = \int_0^a F dy = P \cdot S \cdot \frac{a^2}{Z}$ – максимальная энергия, запасаемая в газовых пружинах.

Приравниваем амплитудное значение энергии, запасаемой в газовых пружинах при давлении P , приращенную энергии колебательной системы при возрастании измеряемого давления от нуля до P , при одинаковых амплитудах.

$$P \cdot S \cdot \frac{a^2}{Z} = m \cdot \frac{a^2 \cdot \Delta \omega^2}{Z}, \quad (3)$$

имея в виду, что $m = h \cdot S \cdot \rho$,

где ρ – плотность материала пластины и $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$.

Получаем формулу зависимости измеряемого давления газа от частоты колебаний пластины.

$$P = 2 \cdot \pi^2 \cdot \rho \cdot h \cdot Z \cdot (f_{p.}^2 - f_{p.m.}^2), \quad (4)$$

где $f_{p.}$ – частота колебаний, $f_{p.m.}$ – резонансная частота механическая предварительно измеренная при $P=0$ (абсолютном давлении газа на 3 порядка ниже измеряемого).

Зависимость давления от квадрата частоты колебаний по теории линейна.

$$P = K \cdot f^2,$$

где $K = 2 \cdot \pi^2 \cdot \rho \cdot h \cdot Z$ – коэффициент преобразования, который может быть вычислен из плотности материала и значений геометрических размеров преобразователя.

Чувствительный элемент (ЧЭ) резонансного типа был изготовлен с применением технологий микросистемной техники. Из-за особенностей способа производства ЧЭ с применением технологий микросистемной техники конструирование изделия и подготовку электронной информации о топологии необходимо делать исходя из послоевого представления изделия. В состав изделия входят слои, представленные в табл. 1.

На рис. 5–11 показаны оцифрованные данные в этих слоях.

Конструктивно ЧЭ имеет габариты 4,3×4,3 мм. Подвижная пластинка подвешена на четырех S-образных торсионках. Электроды привода и сенсора требуют 4 электрических вывода. Еще 2 вывода предназначены для создания контактов к массе и рамке. Данная конструкция моделировалась для уточнения параметров функционирования.

Внешний вид ЧЭ, датчика и экспериментального вакуумметра в сборе показаны на рис. 12,13 и 14.

Таблица 1. Технологические слои чувствительного элемента МЭМС

Table 1. Technological layers of the MEMS sensitive element

Название слоя	Номер слоя	Описание
Si_active	51	Подвижный слой кремния – собственная конструкция подвижной пластинки, а также рама и контактные площадки. Толщина 75 мкм.
Si_bonding_top	52	Слои, обеспечивающие зазор в 3 мкм между пластинкой и плоскостями. По этим слоям осуществляется сварка кремния со стеклянными пластинами. Толщина 3 мкм.
Si_bonding_bottom	53	
Al_met_top	54	Слои внутренней металлизации, с электродами привода и сенсора. Толщина 0,15 мкм.
Al_met_bottom	55	
Outer_met	56	Слой внешней металлизации, предназначенной для формирования электрических выводов
Holes	57,58	Слой, описывающий расположение переходных отверстий в стеклянной пластине

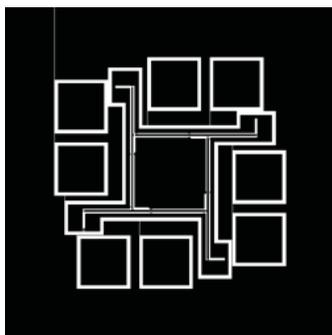


Рис. 5. Слой № 51
Fig. 5. Layer № 51

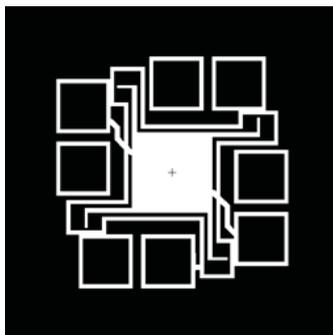


Рис. 6. Слой № 52
Fig. 6. Layer № 52

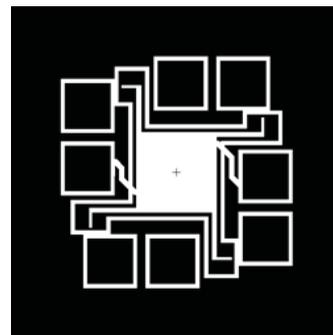


Рис. 7. Слой № 53
Fig. 7. Layer № 53



Рис. 8. Слой № 54
Fig. 8. Layer № 54



Рис. 9. Слой № 55
Fig. 9. Layer № 55

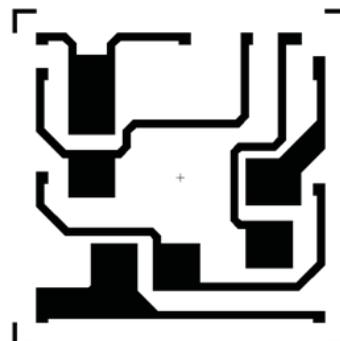


Рис. 10. Слой № 56
Fig. 10. Layer № 56

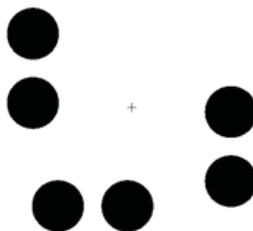


Рис. 11. Слои № 57, 58
Fig. 11. Layer № 57, 58



Рис. 12. Чувствительный элемент резонансного типа
Fig. 12. The sensitive element of the resonance type



Рис. 13. Датчик
Fig. 13. The sensor



Рис. 14. Вакуумметр резонансного типа
Fig. 14. The resonance type vacuum gauge

Результаты

В ходе приемочных испытаний опытного образца была произведена исследования метрологических характеристик с помощью эталонного вакуумметра MKS Baratron 690 (верхний предел измерений 1000 Па), входящего в состав ГЭТ 49–2016 Государственного первичного специального эталона (ГПСЭ) единицы давления для области абсолютных давлений в диапазоне $1 \cdot 10^{-6}$ –

$1 \cdot 10^3$ Па¹. Результаты трех серий измерений представлены в табл. 2.

Как видно из таблицы, относительная погрешность показаний опытного образца не превысила 1 %.

Выводы

Результаты исследований позволяют сделать вывод о перспективности работы по созданию серийно производимого отечественного прецизионного вакуумметра на основе резонансного метода измерения абсолютного давления.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

¹ГЭТ 49–2016 Государственный первичный специальный эталон единицы давления для области абсолютных давлений в диапазоне $1 \cdot 10^{-6}$ - $1 \cdot 10^3$ Па // Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений [Официальный сайт]. <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/12/items/397929>

Таблица 2. Результаты измерений, полученные с экспериментального вакуумметра и эталонного вакуумметра MKS Baratron 690

Table 2. The measurement results obtained with the experimental vacuum gauge and standard vacuum gauge MKS Baratron 690

1 серия			2 серия			3 серия			Средн., %	СКО, %
Рез., Па	Бар., Па	Υ, %	Рез., Па	Бар., Па	Υ, %	Рез., Па	Бар., Па	Υ, %		
59.84	59.41	0.7	61.44	61.75	-0.5	60.68	60.64	0.1	0.1	0.6
91.24	91.00	0.3	92.26	92.66	-0.4	91.70	91.81	-0.1	-0.1	0.4
112.0	110.9	1.0	112.4	112.0	0.4	111.6	111.0	0.5	0.6	0.3
303.2	303.7	-0.2	302.8	303.1	-0.1	301.5	301.7	-0.1	-0.1	0.1
598.1	598.3	0.0	603.8	598.9	0.8	600.3	599.5	0.1	0.3	0.4
893.5	893.4	0.0	897.8	892.7	0.6	897.4	893.0	0.5	0.4	0.3

ЛИТЕРАТУРА

1. Испытания современных вакуумметров в целях утверждения типа за последние 10 лет / А. И. Анцукова [и др.] // Вакуумная техника и технологии – 2018: 25 Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием (5–7 июня 2018, Санкт-Петербург): Труды. Санкт-Петербург, 2018.
2. Горобей В. Н., Гаршин А. Я., Кувандыков Р. Э. Резонансный вакуумметрический преобразователь, созданный по технологии МЭМС // Вакуумная техника и технологии – 2017: 24 Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием (6 июня 2017, Санкт-Петербург): Труды. Санкт-Петербург, 2017.
3. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Краткий курс теоретической физики. Механика. М.: Наука, 1969. 304 с.
4. Kurth S. et al. A new vacuum friction gauge based on a Si tuning fork // Sensors and Actuators A: Physical, 2002, V. 97, pp. 167–172.
5. Авдонин А. С. Прикладные методы расчета оболочек и тонкостенных конструкций. М.: Машиностроение, 1969. 405 с.

REFERENCE

1. Antsukova A. I., Gorobei V. N., Pimenova A. A., Chernyshenko A. A. Ispytaniia sovremennykh vakuummetrov v tseliakh utverzhdeniia tipa za poslednie 10 let [Tests of modern vacuum gauges for type approval over the past 10 years]. Trudy 25-i Vserossiiskoi

- nauchno-tehnicheskoi konferentsii s mezhduнародnym uchastiem «Vakuumnaia tekhnika i tekhnologii–2018» [Proceedings of the 25th All-Russian Scientific and Technical Conference with international participation «Vacuum Engineering and Technology–2018»]. Sankt-Petersburg, 5–7 June 2018. (In Russ.).
2. Gorobei V. N., Garshin A. Ia., Kuvandykov R. E. Rezonansnyi vakuummetricheskii preobrazovatel', sozdannyi po tekhnologii MEMS [Resonance vacuum gauge created using MEMS technology]. Trudy 24-i Vserossiiskoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii s mezhduнародnym uchastiem «Vakuumnaia tekhnika i tekhnologii–2017» [Proceedings of the 24th All-Russian Scientific and Technical Conference with international participation «Vacuum Engineering and Technology–2017»]. Sankt-Petersburg, 6 June 2017. (In Russ.).
 3. Landau L. D., Lifshits E. M. Kratkii kurs teoreticheskoi fiziki. Mekhanika [Short course of theoretical physics. Mechanics.]. Nauka Publ., Moscow, 1969. 304 p. (In Russ.).
 4. Kurth S. et al. A new vacuum friction gauge based on a Si tuning fork. Sensors and Actuators A: Physical. 2002;97:167–172.
 5. Avdonin A. S. Applied methods for calculating shells and thin-walled structure. Mashinostroenie Publ., Moscow, 1969. 405 p. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Горобей Владимир Николаевич – канд. техн. наук, руководитель лаборатории ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева».

Российская Федерация, 190005,
г. Санкт-Петербург, Московский пр., 19
e-mail: V. N. Gorobey@vniim.ru

Кувандыков Рустам Эгамбердыевич – ведущий инженер ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева».

Российская Федерация, 190005,
г. Санкт-Петербург, Московский пр., 19
e-mail: ruskuw@mail.ru

Тетерук Роман Анатольевич – канд. техн. наук, руководитель научно-исследовательского отдела государственных эталонов в области измерений давления ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева».

Российская Федерация, 190005,
г. Санкт-Петербург, Московский пр., 19
e-mail: R. A. Teteruk@vniim.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vladimir N. Gorobey – PhD (Engineering), head of laboratory D. I. Mendeleev Institute for Metrology.

19 Moskovsky ave.,
St. Petersburg, 190005,
Russian Federation
e-mail: V. N. Gorobey@vniim.ru

Rustam E. Kuvandykov – engineer, D. I. Mendeleev Institute for Metrology.

19 Moskovsky ave.,
St. Petersburg, 190005,
Russian Federation
e-mail: ruskuw@mail.ru

Roman A. Teteruk – PhD (Engineering), head of the research department of state standards in the field of pressure measurements, D. I. Mendeleev Institute for Metrology.

19 Moskovsky ave.,
St. Petersburg, 190005,
Russian Federation
e-mail: R. A. Teteruk@vniim.ru