

## Резонансный датчик давления газа на отрезке коаксиальной линии

Д. В. Янин, А. Г. Галка, А. В. Костров, С. Э. Привер, А.И. Смирнов

*Разработана и апробирована резонансная диагностическая система, позволяющая проводить измерения давления газа в вакуумных системах и его динамики во времени при инжекции молекулярных пучков. Работа системы основана на измерении диэлектрической проницаемости газа, величина которой зависит от концентрации и дипольного момента его молекул. При известной температуре газа однозначно определяется его давление. Показано, что чувствительность диагностической системы порядка 0,6 Торр для гелия, 0,1 Торр для аргона и воздуха. Диапазон рабочих давлений от  $10^{-1}$  Торр до 1 атм. Временной масштаб изменения давления, регистрируемый датчиком, порядка  $10^{-7}$  с.*

*Ключевые слова:* СВЧ-резонатор, датчик давления, диэлектрическая проницаемость газа.

### Введение

Самыми распространенными приборами для измерения среднего вакуума, в частности для контроля предварительного разрежения в вакуумных системах являются тепловые вакуумные датчики (ПМТ-2, ПМТ-4М, ПМТ-6-3). Действие тепловых вакуумметров основано на зависимости теплопроводности разреженных газов от концентрации газа а, следовательно, от давления. Основным элементом теплового преобразователя давления является нагретый пропусканием тока проводник (нагреватель), по изменению температуры которого либо по изменению электрической мощности, расходуемой для поддержания неизменной температуры, судят о давлении. По способу контроля температуры тепловые вакуумметры подразделяют на термопарные, в которых мерой давлений служит термоЭДС термопары, соединенной с нагревателем, и на вакуумметры сопротивления, где ис-

пользуется температурная зависимость электрического сопротивления нагревателя. Показания тепловых вакуумметров зависят от рода газа. Эта зависимость особенно резко проявляется при давлениях выше 0,7 Торр. Колебания окружающей температуры также искажают результаты измерений, поскольку теплопроводность газа зависит от его температуры. Поэтому типовые градуировочные характеристики в паспорте таких устройств приводятся для внешней температуры +20 °С. Относительная погрешность измерений давления тепловыми датчиками порядка 30–50 % от измеряемой величины.

Данная статья посвящена разработке и апробации малогабаритного резонансного СВЧ-датчика, предназначенного для измерения давления газов от  $10^{-1}$  Торр до 1 атм и его динамики во времени при инжекции молекулярных пучков. Работа предлагаемой системы основана на измерении диэлектрической проницаемости газа с помощью высокодобротного коаксиального СВЧ-резонатора. Смещение резонансной частоты измерительной системы, которое зависит от диэлектрической проницаемости газа и, следовательно, от концентрации и дипольного момента его молекул, позволяет при известной температуре газовой среды однозначно определить давление в вакуумном объеме.

### Описание измерительной системы

Диагностический датчик представляет собой полый резонатор в виде полуволнового отрезка коаксиальной линии, закороченной на обоих кон-

---

**Янин Дмитрий Валентинович**, научный сотрудник, к.ф.-м.н.  
**Галка Александр Георгиевич**, младший научный сотрудник.  
**Костров Александр Владимирович**, заведующий лабораторией, д.ф.-м.н.  
**Привер Станислав Эдуардович**, ведущий инженер-электроник.  
**Смирнов Александр Ильич**, заведующий отделом, д.ф.-м.н.  
 Институт прикладной физики РАН.  
 Россия, 603950, БОКС-120, г. Нижний Новгород,  
 ул. Ульянова, 46.  
 Тел. +7(831) 436-80-71. E-mail: dyanin@appl.sci-nnov.ru

Статья поступила в редакцию 18 января 2017 г.

© Янин Д. В., Галка А. Г., Костров А. В., Привер С. Э., Смирнов А. И., 2017

цах, как это показано на рис. 1. Возбуждение резонатора и приём его отклика осуществляются посредством петель магнитной связи, размещенных в резонаторе вблизи короткозамкнутого конца. Длина резонатора  $l = 15$  см, диаметры внешнего и внутреннего проводников соответственно 20 мм и 5 мм. Собственная резонансная частота измерительной системы в вакууме  $f_0 = 1031,6$  МГц, добротность  $Q_0 = 452$ . Вдоль внешнего проводника коаксиальной линии, образующей резонатор, выполнено две диаметрально симметричных прорези шириной 2 мм, посредством которых внутренний

объем резонатора сообщается с внешним газовым пространством. Наличие газовой среды в объеме резонатора приводит к смещению резонансной кривой (к изменению резонансной частоты), причем это смещение определяется диэлектрической проницаемостью газа, зависящей от давления. Динамические параметры измерительной системы определяются добротностью резонатора: характерный временной масштаб изменения давления (диэлектрической проницаемости газа), регистрируемый датчиком, должен быть больше характерного времени затухания колебаний в резонаторе  $Q_0/(2\pi f_0) \sim 10^{-7}$  с.

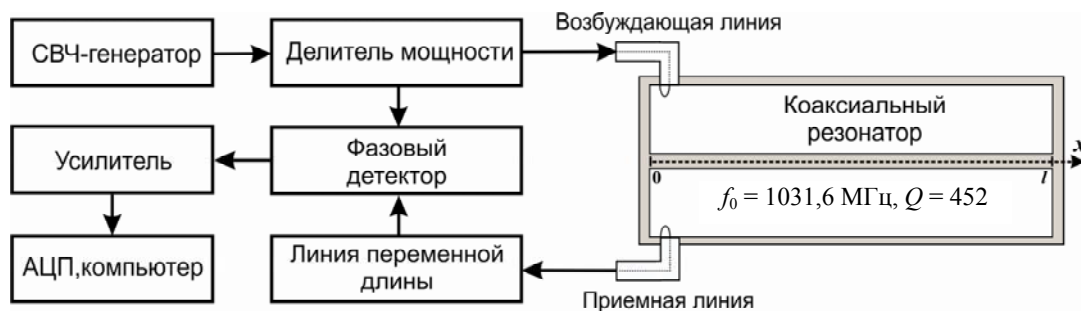


Рис. 1. Блок-схема резонансной диагностической системы для измерения давления газа.

Блок-схема включения резонансного датчика представлена на рис. 1. Для регистрации малых вариаций резонансной частоты диагностический системы в зависимости от давления газа был использован метод измерения фазового сдвига [1]. В качестве источника высокочастотного сигнала использовался свип-генератор в виде быстродействующего синтезатора частот на основе однопетлевой системы ФАПЧ с возможностью генерации на фиксированной частоте. Стабильность частоты генератора была на уровне  $10^{-8}$ . Сигнал генератора амплитудой  $U_{Г} = 2,5$  В и частотой  $f_0 = 1031,6$  МГц, соответствующей собственной резонансной частоте датчика в вакууме, с помощью резистивного делителя мощности делится на два равных сигнала  $U_{Г} / 2$ , один из которых с помощью коаксиального кабеля подводится к возбуждающей петле резонатора, а второй — к фазовому детектору в качестве опорного сигнала. Фазовый детектор был выполнен на микросхеме ADE-R2ASKLH+ с коэффициентом ослабления  $k_1 = -8$  дБ в рабочем диапазоне частот. Высокочастотный сигнал  $U_{res}$  с приемной петли связи посредством коаксиального кабеля (приемная линия) подводился к линии переменной длины, после которой поступал на вход фазового детектора, формирующего сигнал, зависящий от амплитуды сигнала  $U_{res}$  и разности фаз  $\Delta\phi$  между  $U_{res}$  и опорным сигналом  $U_{Г} / 2$ .

Суммарное затухание высокочастотного сигнала в возбуждающей и приемной линиях резонатора составляло  $k_2 = -8,3$  дБ. Сигнал с фазового детектора подавался на вход усилителя с коэффициентом усиления  $k_3 = 40$  дБ. Результирующий сигнал  $U_{out}$  оцифровывался с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и записывался в память компьютера для дальнейшей обработки.

При нахождении измерительной системы в начальном вакууме (при давлении порядка  $10^{-2}$  Торр) с помощью линии передачи переменной длины на частоте  $f_0$  между сигналами  $U_{res}$  и опорным  $U_{Г} / 2$  устанавливалась разность фаз  $90^\circ$ . Наличие газовой среды в объеме резонатора приводило к смещению резонансной частоты датчика на величину  $\Delta f$  относительно  $f_0$  и появлению дополнительного набега фазы  $\Delta\phi$  прошедшего через него сигнала, причем выполнялось следующее соотношение для выходного сигнала  $U_{out}$ :

$$U_{out} = k U_{res} \sin(\Delta\phi), \quad k = k_1 k_2 k_3. \quad (1)$$

При практическом использовании датчика необходимо было учитывать температуру окружающей среды, вариации которой могут приводить к изменению его собственной резонансной

частоты. В данной работе тестирование измерительной системы проводилось при температуре 22 °С.

### Электродинамическая модель измерительной системы

Математическое описание работы датчика, согласно [2, 3], сводится к решению системы телеграфных уравнений для комплексных амплитуд тока  $I$  и напряжения  $U$  в резонаторе:

$$\begin{cases} dU/dx = -i\omega L_0 I + E\delta(x+0), \\ dI/dx = -i\omega C_0 U \end{cases} \quad (2)$$

с граничными условиями

$$U|_{x=0, l} = 0, \quad dI/dx|_{x=0, l} = 0. \quad (3)$$

В выражениях (2) и (3) введены следующие обозначения:  $L_0$  и  $C_0$  – погонная индуктивность и емкость передающей линии, образующей резонатор;  $1/\sqrt{L_0 C_0} = c$ ,  $c$  – скорость распространения электромагнитной волны в передающей линии,  $\sqrt{L_0/C_0} = \rho$ ,  $\rho$  – волновое сопротивление линии, образующей резонатор;  $E = -i\omega M(I_2 + I_3)$  – сосредоточенная вблизи  $x=0$  ЭДС взаимной индукции;  $M$  – коэффициент взаимной индукции между петлями связи и резонатором;  $I_2$  и  $I_3$  – комплексные амплитуды токов соответственно в передающей и приемной петлях связи.

Индуктивное сопротивление петель связи  $\omega L_c$  мало по сравнению с волновым сопротивлением  $\rho_c$  приёмной и передающей линий ( $\omega L_c \ll \rho_c$ ),  $L_c$  близка по величине к  $M$ , волновое сопротивление  $\rho$  порядка  $\rho_c$ . В соответствии с этим, учитывая наводимую в передающей петле связи ЭДС в виде  $-i\frac{\omega M}{\rho_c}I|_{x=0}$ , можно получить выражения для токов  $I_2$  и  $I_3$ .

$$I_2 = 2I_0 - i\frac{\omega M}{\rho_c}I|_{x=0}, \quad I_3 = -i\frac{\omega M}{\rho_c}I|_{x=0}, \quad (4)$$

$$I_0 = iU_0/\rho_c \quad (5)$$

где  $I_0$  и  $U_0$  – амплитуды тока и напряжения зондирующей волны в возбуждающей линии.

При наличии газовой среды с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon = 1 + \Delta\varepsilon$  ( $\Delta\varepsilon \ll 1$ ) в объе-

ме резонатора его погонная емкость может быть представлена в виде  $C = C_0(1 + \Delta\varepsilon)$ , где  $C_0$  – погонная емкость в начальном вакууме.

На частотах  $\omega$ , близких к собственной резонансной частоте датчика  $\omega_0 = \pi c/l$  в вакууме ( $\omega = \omega_0 + \Delta\omega$ ,  $|\Delta\omega| \ll \omega_0$ ), решение задачи (2)–(5) можно искать в виде асимптотического ряда по малому параметру  $\gamma$ :

$$\begin{aligned} I &= I^{(0)} + I^{(1)} + I^{(2)} + \dots, \\ U &= U^{(0)} + U^{(1)} + U^{(2)} + \dots, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\gamma \sim \max \left\{ \frac{\Delta\omega}{\omega_0}, \Delta\varepsilon, \left( \frac{\omega M}{\rho} \right)^2, \left( \frac{\omega M}{\rho_c} \right)^2, \left| \frac{I_1}{I_0} \right| \right\} \ll 1. \quad (7)$$

Здесь  $I^{(j)}$  и  $U^{(j)}$  – члены асимптотического разложения тока и напряжения по степеням  $\gamma^{(j)}$ .

Следуя [2, 3], после подстановки (6) в систему (2)–(5) в первом порядке малости по  $\gamma$  можно получить следующие выражения для амплитуды  $I_3$  и набеге фазы  $\Delta\varphi$  прошедшего через резонатор сигнала:

$$I_3 = \frac{I_0}{\sqrt{Q_0^2 (2\Delta\omega/\omega_0 + \Delta\varepsilon)^2 / 4 + 1}} \quad (8)$$

$$\operatorname{tg}(\Delta\varphi) = Q_0 (2\Delta\omega/\omega_0 + \Delta\varepsilon) / 2 \quad (9)$$

где  $Q_0$  – собственная добротность резонатора.

Как видно из (8), сдвиг резонансной частоты  $\Delta\omega$  датчика определяется диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon = 1 + \Delta\varepsilon$  газовой среды, находящейся в его внутреннем объеме:

$$\Delta\omega = -0,5\omega_0\Delta\varepsilon. \quad (10)$$

Поскольку в измерительной схеме к датчику подводится сигнал, соответствующий собственной резонансной частоте ( $\delta\omega = 0$ ), а для газовой среды  $Q_0\Delta\varepsilon \ll 1$ , при помощи (5), (8) и (9) выражение (1), соответствующее усиленному в  $k$  раз сигналу с фазового детектора, переписывается в следующем виде:

$$\begin{aligned} U_{out} &= kU_0 \sqrt{(1 + 0,25Q_0^2\Delta\varepsilon^2)} \sin(Q_0\Delta\varepsilon/2) \approx \\ &\approx kU_0Q_0\Delta\varepsilon/2. \end{aligned} \quad (11)$$

Таким образом, найдена связь выходного сигнала измерительной системы с изменением диэлектрической проницаемости газовой среды в объеме резонатора. С учетом (10), из (11) можно получить выражение, связывающее амплитуду выходного сигнала  $U_{out}$  со сдвигом резонансной частоты  $\Delta f = \Delta\omega / (2\pi)$ :

$$U_{out} \approx kU_0Q_0\Delta f / f_0. \quad (12)$$

При  $k = 23,7$  дБ,  $U_0 = U_T / 2 = 1,25$  В,  $Q_0 = 452$ ,  $f_0 = 1031,6$  МГц (при температуре  $T_0 = 22$  °С) имеем  $U_{out}(B) \approx 1,7 \times 10^{-5}(f - f_0)$ . Изменение сигнала  $U_{out}$  диагностической системы на 1 мВ в нашем случае соответствует изменению резонансной частоты датчика на 170 Гц.

Очевидно, что при изменении температуры резонатора, вследствие температурного расширения, изменяется его длина  $l$  и собственная резонансная частота  $\omega_0$ . Этот эффект необходимо учитывать при регистрации малых сдвигов резонансной частоты системы. Относительное изменение длины  $l$  резонатора при изменении его температуры  $T$  на 1 К определяется через коэффициент линейного теплового расширения  $\alpha = l^{-1}dl/dT$ . Учитывая, что  $\omega_0 = \pi c / l$ , нетрудно получить выражение для температурной коррекции  $\omega_0$ :  $\omega_0(T) = \omega_0(T_0)(1 - \alpha(T/T_0 - 1))$ , где  $\omega_0(T_0)$  – собственная резонансная частота датчика при температуре  $T_0$ .

Согласно [4–6], диэлектрическая проницаемость газовой среды  $\epsilon$  связана с концентрацией частиц  $n$  линейной зависимостью  $\epsilon - 1 = \beta n$ , где коэффициент пропорциональности  $\beta$  определяется сортом газа. С учетом уравнения состояния идеального газа  $P = nkT$  ( $k$  – постоянная Больцмана,  $P$  – давление газа,  $T$  – температура газа в К) получаем, что справедливо соотношение:

$$\epsilon - 1 = \beta P / kT. \quad (13)$$

Таким образом, в соответствии с (10) и (13), при известной температуре  $T$  газовой среды и в приближении идеального газа его давление  $P$  однозначно определяется изменением резонансной частоты системы  $\Delta\omega$ .

### Экспериментальные результаты

Тестирование измерительной системы проводилось в вакуумной камере объемом 1 м<sup>3</sup>. От-

качка вакуумной камеры осуществлялась с помощью форвакуумного насоса НВР-16Д до давления  $2 \times 10^{-2}$  Торр. Такое давление остаточного газа не оказывало влияние на резонансную частоту датчика, так как его величина значительно ниже предела чувствительности измерительной системы. Датчик располагался в центре камеры. Возбуждающая и приемная линии датчика заводились в камеру через вакуумные коаксиальные вводы. Температура установки, газовой среды в ее объеме и резонансного датчика составляла 22 °С.

Калибровка измерительной системы осуществлялась следующим образом. При достижении в камере давления  $2 \times 10^{-2}$  Торр отключалась вакуумная откачка. Далее в вакуумный объем с помощью игольчатого натекаателя напускался рабочий газ, а именно: аргон, гелий, воздух влажностью 23 %, воздух влажностью менее 1 %. Для удаления из воздуха влаги использовался силикагель. Контроль давления в диапазоне  $2 \times 10^{-2}$ –10 Торр осуществлялся посредством датчика Pfeiffer-ПКР251, в диапазоне 10 Торр – 1 атм с помощью вакуумметра ДВ 05100ДВ. В процессе напуска регистрировалось изменение амплитуды сигнала с разработанной диагностической системы в зависимости от давления рабочего газа. Результаты измерений представлены на рис. 2. Экспериментальные данные для воздуха влажностью менее 1 % совпадают с результатами для аргона.

Калибровочные кривые показывают линейную зависимость выходного сигнала с измерительной системы от давления газа  $P$ . При уровне шумовой составляющей сигнала  $U_{out}$  порядка 0,5 мВ минимальное давление, регистрируемое диагностической системой, а также ее чувствительность – порядка 0,1 Торр для аргона и воздуха, для гелия – около 0,6 Торр.

На основе калибровочных данных были рассчитаны диэлектрические проницаемости используемых газов при давлении 1 атм. Использовалась зависимость  $U_{out}(B) \approx 8,8 \times 10^3(\epsilon - 1)$ , соответствующая выражению (11). Было получено, что  $\epsilon_{Ar} = 1,0005473$ ,  $\epsilon_{He} = 1,0000721$ , для воздуха влажностью менее 1 % –  $\epsilon_{Возд} = 1,0005512$ . Отклонения полученных значений величины  $\epsilon - 1$  от табличных данных [7, 8] составляют порядка 5–10 %.

Для демонстрации возможности измерительной системы по диагностике профиля давления газовых пучков были проведены предварительные эксперименты по импульсному напуску газа в вакуумную камеру. Импульсный напуск газа осуществлялся с помощью электромагнитного клапана КВУМ-16Л. В качестве рабочего газа использовался воздух с влажностью 23 %, давление

на входе клапана составляло 1 атм. После открытия клапана газ в вакуумную камеру поступал через металлическую трубку с внутренним диаметром 12 мм, сваренную в корпус камеры напротив датчика. На рис. 3. представлен профиль давления в центре инжектируемого газового пучка длительностью 0,33 с, измеренный с помощью резонанс-

ной диагностической системы. Начальное давление в камере составляло  $2 \times 10^{-1}$  Торр, конечное – 2,5 Торр. После закрытия клапана на осциллограмме наблюдались затухающие колебания давления, по-видимому, связанные с переотражением газовых потоков от стенок камеры.

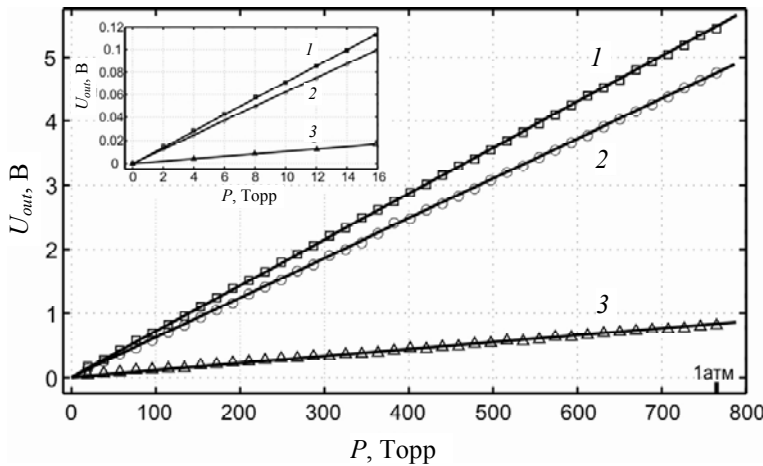


Рис. 2. Зависимость амплитуды сигнала с диагностической системы от давления рабочего газа для воздуха влажностью 23 % (1), воздуха влажностью <1 % и аргона (2), гелия (3) при температуре 22 °С.

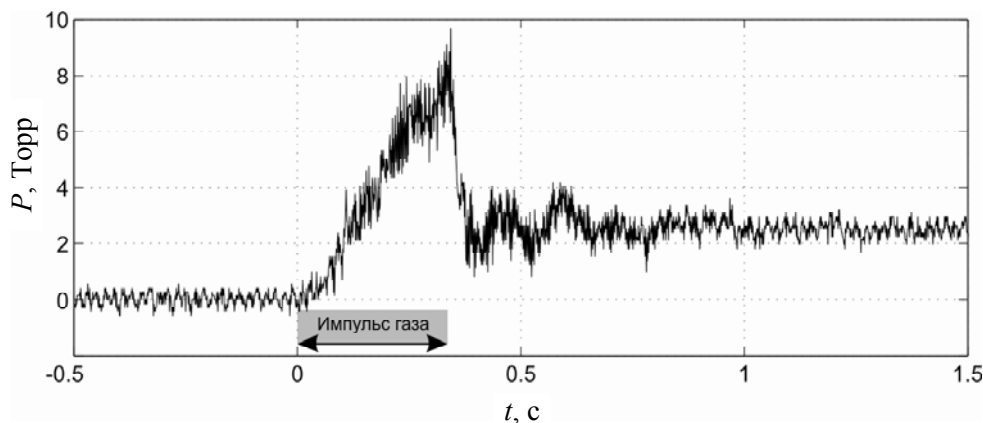


Рис. 3. Осциллограмма давления в центре вакуумной камеры при импульсном напуске газа: длительность напуска 0,33 с, начальное давление в камере –  $2 \times 10^{-1}$  Торр, конечное – 2,5 Торр, рабочий газ – воздух влажностью 23 % при температуре 22 °С.

### Заключение

Разработан и апробирован резонансный СВЧ-датчик для регистрации давления газа от 0,1 Торр до 1 атм. Датчик представляет собой полуволновый коаксиальный резонатор с собственной резонансной частотой 1031,6 МГц и добротностью порядка 450. Смещение резонансной частоты измерительной системы относительно значения при хорошем вакууме ( $P \leq 10^{-2}$  Торр) определяется диэлектрической проницаемостью газа и, следовательно, концентрацией его молекул. При известной температуре газовой среды по результатам измерений однозначно определяется ее давление.

Для регистрации малых отклонений резонансной частоты диагностической системы был использован метод измерения фазового сдвига. С помощью метода возмущений проведен анализ системы телеграфных уравнений для комплексных амплитуд тока и напряжения в резонаторе. Получены выражения для амплитудно-частотной и фазочастотной характеристики измерительной системы. Таким образом, была установлена связь между выходным сигналом датчика и диэлектрической проницаемостью исследуемого газа.

Калибровочные кривые для аргона, гелия, воздуха (при температуре 22 °С), связывающие амплитуды выходного сигнала СВЧ-датчика с давлением исследуемых газов, были получены в

вакуумной камере объемом  $1 \text{ м}^3$ . Экспериментально установлено, что минимальное давление, регистрируемое датчиком, а также его чувствительность – около 0,6 Торр для гелия и 0,1 Торр для аргона и воздуха. Верхняя граница давления, до которой проводилось тестирование датчика, равнялось 1 атм.

При давлении 1 атм. были рассчитаны диэлектрические проницаемости  $\varepsilon$  исследуемых газов. Получено, что отклонение полученных значений величины  $\varepsilon - 1$  от табличных данных составляет 5–10 %.

Заметим, что по рабочему диапазону давлений и точности измерений резонансный СВЧ-датчик давления (при известной температуре) превосходит тепловые вакуумные лампы.

При практическом использовании измерительной системы необходимо в его корпус устанавливать датчик температуры, поскольку вследствие температурного расширения материала резонатора изменяется его собственная резонансная частота  $f_0$ . Коррекция  $f_0$  в зависимости от температуры осуществляется с помощью теоретической зависимости, приведенной в статье.

Возможности разработанного датчика не ограничиваются только измерением стационарного значения давления газа. Высокое временное разрешение измерительной системы (порядка  $10^{-7}$  с) позволяет осуществлять диагностику нестационарных

газовых процессов, например, измерять динамику импульсного напуска газа в вакуумную камеру. Малые размеры датчика позволяют передвигать его в вакуумной системе с целью изучения растекания газа в камере и измерять градиенты плотности этого газа.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-32-00650 мол\_а, гранта РНФ № 17-12-01528.*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Bossisio R. G., Giroux M., Coudere D. Journal of Microwave Power. 1970. Vol. 5. P. 25.
2. Кондратьев И. Г., Костров А. В., Смирнов А. И., Стриковский А. В., Шашурин А. В. // Физика плазмы. 2002. Т. 28. № 11. С. 977.
3. Янин Д. В., Костров А. В., Смирнов А. И., Гуцин М. Е., Коробков С. В., Стриковский А. В., Гундорин В. И., Назаров В. В., Стародубцев М. В. // Журнал технической физики. 2012. Т. 82. Вып. 4. С. 42.
4. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных сотрудников и инженеров. – М.: Наука, 1968.
5. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика. Электродинамика сплошных сред. Т. 8. – М.: Наука. 1982.
6. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Электричество. – М.: Наука. 1983.
7. Брандт А. А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах. – М.: Физматгиз. 1963.
8. Кикоин И. К. Таблицы физических величин. – М.: Атомиздат. 1976.

PACS: 07.30.Dz

## A resonant microwave sensor based on the half-wave coaxial line for gas pressure measurements

*D. V. Yanin, A. G. Galka, A. V. Kostrov, S. E. Priver, and A. I. Smirnov*

Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences  
46 Ul'yanov str., Nizhny Novgorod, 603950 Russia  
E-mail: dyanin@appl.sci-nnov.ru

*Received January 18, 2017*

*The resonant diagnostic system, which enables to make measurements of a gas pressure in vacuum systems and its time dynamics during injection of molecular bunches, has been developed and tested. The system operation is based on measurement of a gas permittivity which depends on the density and dipole moment of its molecules. At given temperature of gas, its pressure is defined identically. It is displayed that responsivity of the diagnostic system is approximately 0.6 torr for helium, 0.1 torr for argon and air. The range of working pressure is from  $10^{-1}$  torr to 1 at. The time scale of changes of the pressure to be registered by microwave sensor is approximately  $10^{-7}$  s.*

*Keywords:* microwave resonator, pressure sensor, gas permittivity.

#### REFERENCES

1. R. G. Bossisio, M. Giroux, and D. Coudere, *Journal of Microwave Power* **5**, 25 (1970).
2. I. G. Kondratev, A. V. Kostrov, A. I. Smirnov, A. V. Strikovskiy, and A. V. Shashurin, *Plasma Phys. Rep.* **28**, 977 (2002).
3. D. V. Yanin, A. V. Kostrov, A. I. Smirnov, M. E. Gushchin, S. V. Korobkov, A. V. Strikovskii, V. I. Gundorin, V. V. Nazarov, and M. V. Starodubtsev, *Technical Physics* **57**, 468 (2012).
4. G. Korn and T. Korn, *Mathematical Handbook for Scientists and Engineers* (McGraw-Hill, Inc., New York, 1968).
5. L. D. Landau and E. M. Lifshitz, *Electrodynamics of Continuous Media. Vol. 8* (Pergamon Press, 1960).
6. D. V. Sivukhin, *General Course of Physics* (Nauka, Moscow, 1983) [in Russian].
7. A. A. Brandt, *Investigation of Dielectrics at Microwave Frequencies* (Moscow: Fizmatgiz, 1963) [in Russian].
8. I. K. Kikoin, *Tables of Physical Quantities*. (Moscow, Atomizdat, 1976) [in Russian].