

УДК 621.387.322

ШИРОКОДИАПАЗОННЫЙ МАНОМЕТРИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ НА ОСНОВЕ РАССЕЯНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ МОЛЕКУЛАМИ ГАЗА

В. К. Базылев, к.т.н., доцент кафедры ЭП, РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0000-0002-3580-3407, e-mail: bazylev.v.k@rsreu

В. А. Коротченко, д.т.н., профессор кафедры ЭП, РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0000-0003-4068-768X, e-mail: ett@rsreu.ru

А. М. Жидков, инженер кафедры ЭП, РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0000-0002-0199-8402, e-mail: zhidkov.a.m.1989@mai.ru

Приведены результаты исследования широкодиапазонного манометрического преобразователя на основе рассеяния электронов молекулами газа в скрещенных электрическом и магнитном полях. Преобразователь выполнен в виде цилиндрического магнетрона, в котором источник электронов расположен на одном из торцевых электродов. В качестве источника электронов использовался вольфрамовый термокатод или фотокатод на основе плёнки галлия, устойчивый к действию воздуха при атмосферном давлении, который эмитировал электроны под действием ультрафиолетового излучения светодиода с длиной волны 265 нм. Мерой давления являлся ток электронов, рассеянных молекулами газа и собираемых анодом. Электроны, не испытавшие рассеяния, улавливались специальным коллектором. Приведены результаты моделирования движения электронов в преобразователе. Получены экспериментальные зависимости тока анода от давления азота, которые в основном коррелируют с расчётными, соответствуют теоретическим представлениям и подтверждают возможность измерения давления газа в широком диапазоне от 10^{-7} Торр до 760 Торр.

***Цель работы** заключается в создании манометрического преобразователя для диапазона давлений 10^{-7} – 760 Торр, на основе рассеяния электронов молекулами газа.*

***Ключевые слова:** манометрический преобразователь, давление газа, рассеяние электронов, скрещенные электрическое и магнитное поля, фотокатод, моделирование.*

DOI: 10.21667/1995-4565-2022-81-89-95

Введение

В современных вакуумметрах регистрация давления в диапазоне от 10^{-7} Торр до 760 Торр обычно осуществляется с помощью двух манометрических преобразователей. В области высокого и среднего вакуума используются манометр Байярда – Альперта с термокатодом или магниторазрядный манометр, а при низком вакууме – тепловой манометр [1]. Недостатками такого решения являются наличие измерительного блока для каждого типа преобразователя, ограниченный срок службы преобразователей с накаливаемым катодом (не более 2000 часов), загрязнение поверхностей электродов для инверсно-магнетронных манометрических преобразователей, приводящее к росту погрешности измерения. В работе [2] показано, что широко распространенный ионизационный манометрический преобразователь ПМИ-2 можно использовать как тепловой манометр сопротивления с контролем сопротивления катодной нити. Такое решение исключает необходимость применения двух преобразователей, однако оно не устраняет большинство других указанных выше недостатков.

В то же время существуют и разрабатываются широкодиапазонные манометрические преобразователи. Для измерения давления газа в диапазоне от 10^{-7} мм рт. ст. до 760 мм рт. ст. может быть использован компрессионный манометр [1]. Однако он не позволяет производить непрерывное измерение давления, громоздок и поэтому не нашёл применения в промышленности. Для измерения давления в данном диапазоне может использоваться широкодиапазонный вязкостный вакуумметр (10^{-12} – 10^3 мм рт. ст.) [3]. Принцип его действия осно-

ван на измерении времени, в течение которого вращающийся ротор сферической формы из феррита, подвешенный в магнитном поле, после выключения статора уменьшит число оборотов в секунду до заданного значения. Данный вакуумметр имеет сложную конструкцию, чувствителен к вибрациям и также не позволяет производить непрерывные измерения давления. В основном он используется для калибровки вакуумметров. Манометрический преобразователь на основе рассеяния электронов молекулами газа в скрещенных электрическом и магнитном полях при индукции магнитного поля, большей критической [4] реализован на основе конструкции цилиндрического магнетрона с расположением источника электронов на осевом электроде. Измерение давления с его помощью возможно в диапазоне 10^{-5} – 760 Торр. Нижний предел измерения ограничен рассеянием электронов на электродах.

В настоящей работе исследована возможность расширения нижнего предела измерения давления в способе измерения давления на основе рассеяния электронов на молекулах газа в скрещенных электрическом и магнитном полях путём перемещения источника электронов с осевого электрода преобразователя на торцевой [5].

Устройство и принцип действия манометрического преобразователя

Объектом исследования служил манометрический преобразователь открытого типа в виде цилиндрического магнетрона с установленной магнитной системой, обеспечивающей индукцию магнитного поля вдоль оси прибора 63 мТл. Конструкция манометрического преобразователя (рисунок 1) содержала вольфрамовый прямонакальный катод (1) с диаметром нити 75 мкм и радиусом 2 мм, расположенный на первом торцевом электроде (2), осевой электрод (3), анод (4), второй торцевой электрод (5), коллектор электронов (6), изоляторы (7), полюсные наконечники (8), цилиндрические ниобиевые магниты (9). Первый торцевой электрод был электрически соединён с осевым электродом. Второй торцевой электрод был изолирован от осевого электрода. Торцевые электроды имели диаметр 31 мм. Анод был выполнен в виде цилиндра с внутренним диаметром 33 мм, осевой цилиндрический электрод имел наружный диаметр 9 мм. Расстояние между катодом и вторым торцевым электродом составляло 20 мм.

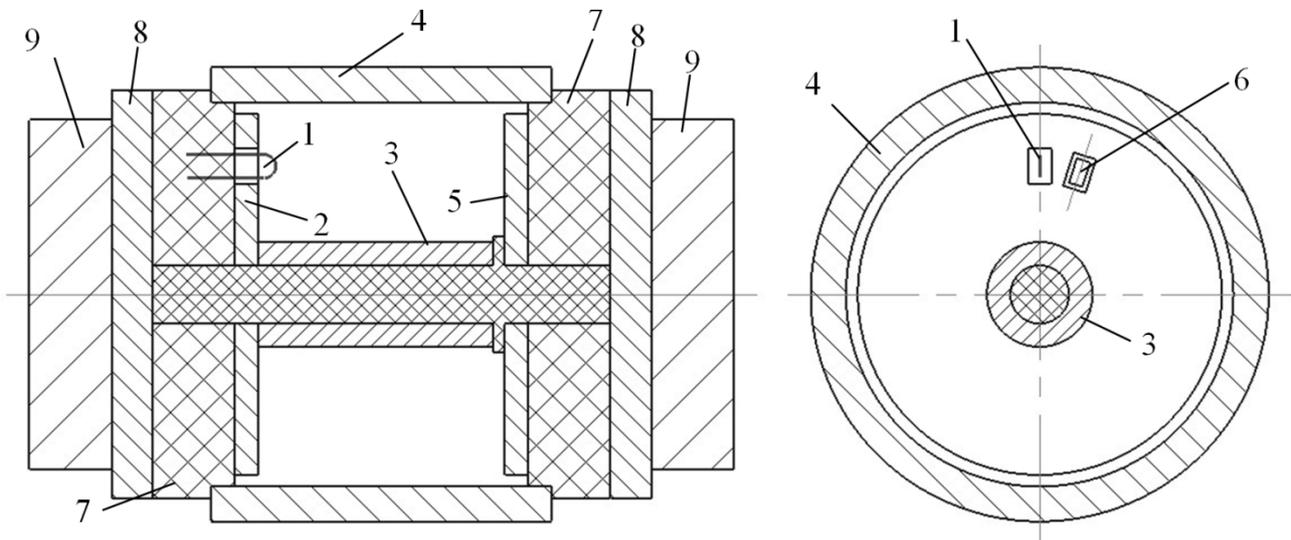
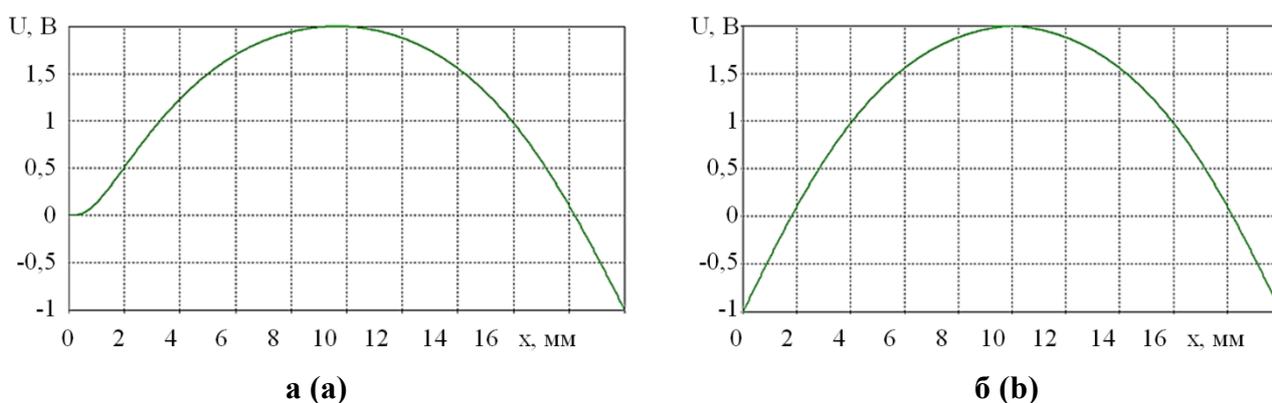


Рисунок 1 – Конструкция манометрического преобразователя с торцевым расположением источника электронов

Figure 1 – Design of a pressure gauge converter with end arrangement of electron source

При подаче на анод и коллектор электронов положительного напряжения относительно катода, а на торцевые электроды – отрицательного вектор электрического поля в межэлектродном промежутке будет иметь радиальную и направленную параллельно оси, составляющие напряжённости электрического поля. Под действием осевой составляющей электроны, выходящие из катода, будут перемещаться в направлении второго торца вдоль линий индук-

ции магнитного поля. Радиальная составляющая электрического поля перпендикулярна к направлению магнитного поля. Поэтому электроны, двигаясь параллельно оси одновременно под действием радиальной составляющей, будут двигаться по эпициклоиде смещаясь относительно направления, определяемого осевой составляющей. Поскольку на торцевых электродах напряжение отрицательное относительно катода, электроны, не достигая второго электрода, повернут назад и будут двигаться к первому электроду. За счёт движения по эпициклоиде электроны не вернуться на катод, а затормозятся у первого электрода и вновь начнут движение ко второму торцевому электроду. Многократное перемещение между торцевыми электродами будет происходить до тех пор, пока электроны не попадут на коллектор электронов, находящийся под положительным потенциалом относительно катода. На рисунке 2, а представлено распределение потенциала электрического поля по направлению вдоль оси катода до второго торцевого электрода при напряжении на аноде 4 В, на торцевых электродах минус 1 В и 3 В на коллекторе электронов, полученное при численном моделировании. На рисунке 2, б – распределение потенциала между торцевыми электродами.



**Рисунок 2 – Распределение потенциала катод – второй торцевой электрод (а) и первый торцевой электрод – второй торцевой электрод (б)
Figure 2 – Potential distribution cathode – second end electrode (a) and first end electrode – second end electrode (b)**

На рисунке 3 представлена траектория электрона в межэлектродном промежутке манометрического преобразователя при напряжении на аноде 4 В относительно катода, напряжении на торцевых и осевом электродах минус 1 В, напряжении на коллекторе электронов 3 В при индукции магнитного поля 63 мТл. При движении в межэлектродном промежутке часть электронов рассеивается на молекулах газа и достигает анода. Ток анода является мерой давления газа. Если предположить, что все рассеянные на молекулах газа электроны попадают на анод, то ток анода рассчитывается путём решения следующего дифференциального уравнения с разделяющимися переменными:

$$dI_a(x) = [I_c - I_a(x)] \frac{\sigma P}{kT} dx, \quad (1)$$

где $I_a(x)$ – ток анода, I_c – ток катода, x – путь, пройденный электроном, вылетевшим из катода, до рассеяния на молекуле газа, P – давление газа, σ – сечение рассеяния электрона на молекуле газа, k – постоянная Больцмана, T – температура. При граничном условии $I_a(0) = 0$ решение имеет вид

$$I_a = I_c \left[1 - \exp\left(-\frac{\sigma PL}{kT}\right) \right], \quad (2)$$

где L – путь электрона от катода до коллектора после многократных колебаний между торцевыми электродами. На рисунке 4, а изображена зависимость отношения тока анода к току катода от давления газа при длине траектории электрона от катода до коллектора электронов 212 см. Зависимость снималась при электронном токе 1 нА. Однако не все рассеянные электроны попадут на анод, часть из них осядет на коллекторе электронов. На рисунке 4, б пред-

ставлено распределение потенциала по прямой между коллектором электронов и вторым торцевым электродом при напряжении на коллекторе электронов 3 В. Вследствие такого распределения потенциала часть рассеянных электронов, потерявших кинетическую энергию в направлении коллектора электронов, меньшую глубины минимума потенциала, достигнет коллектора электронов, что уменьшит ток анода по сравнению с расчётным значением по соотношению 2.

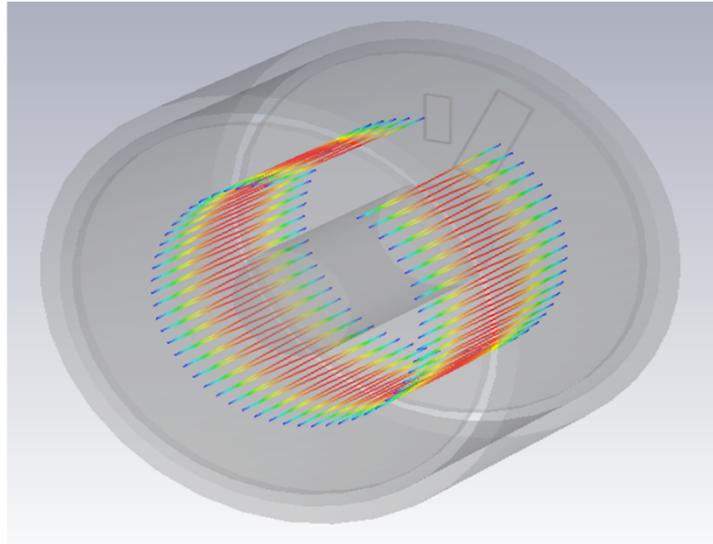


Рисунок 3 – Траектория электрона от катода до коллектора электронов
Figure 3 – Electron trajectory from cathode to electron collector

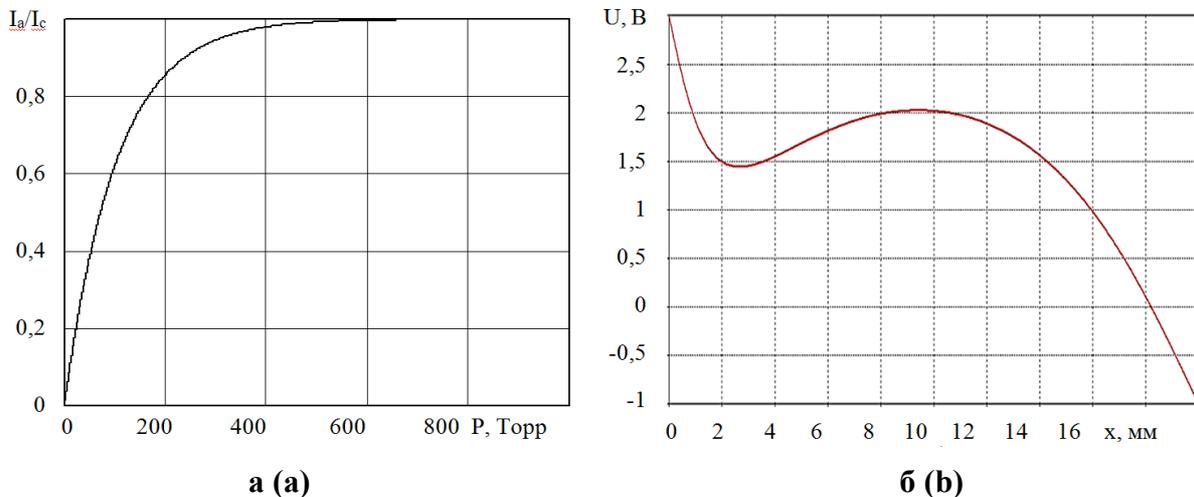
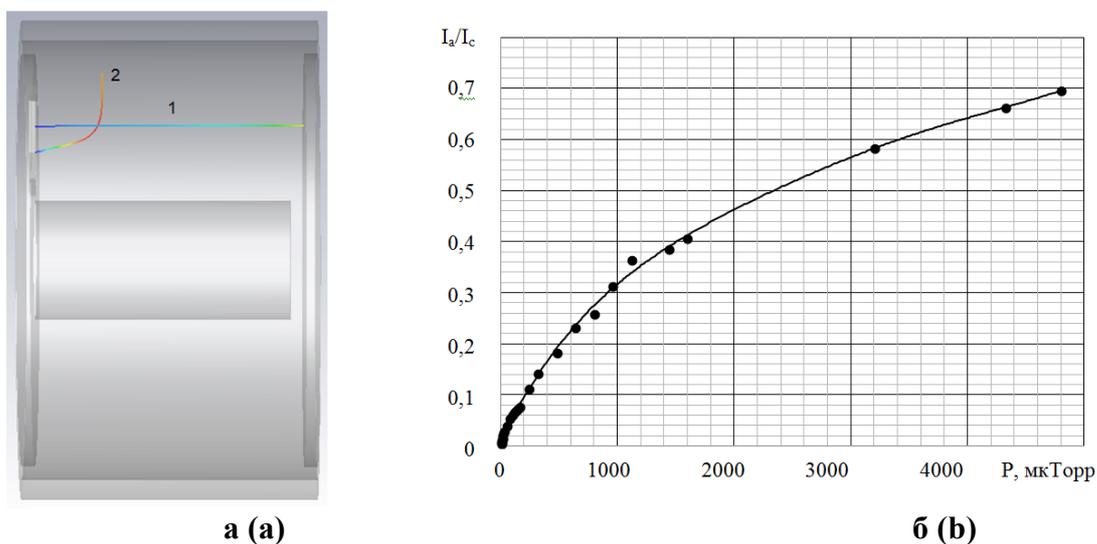


Рисунок 4 – Зависимость отношения тока анода к току катода от давления азота (а) и распределение потенциала между катодом и вторым торцевым электродом (б)
Figure 4 – Ratio dependence of anode current to cathode current on nitrogen pressure (a) and potential distribution between cathode the second end electrode (b)

Экспериментальная часть и обсуждение результатов

Манометрический преобразователь с термокатодом помещался в камеру из немагнитной нержавеющей стали и откачивался форвакуумным и магниторазрядным насосами. Давление азота изменялось с помощью игольчатого натекателя и измерялось вакуумметром ВИ-14 с манометрическим преобразователем ПМИ-27. На анод исследуемого преобразователя подавалось напряжение 5 В относительно катода, на коллектор электронов – 3 В, на торцевые электроды и осевой электрод – минус 1 В. Индукция осевого магнитного поля составляла 63 мТл. Поскольку за счёт поверхностной ионизации термокатод испускает отрицательные ионы для установки электронной компоненты тока катода использовался следующий способ.

На второй торцевой электрод подавалось положительное напряжение 7 В. На коллектор электронов подавалось напряжение 30 В для сбора отрицательных ионов. Это напряжение не могло существенно изменить траекторию движения электронов за счёт действия осевого магнитного поля с индукцией 63 мТл. На рисунке 5, а представлена траектория движения иона азота электрона, полученная при численном моделировании их движения в режиме установки электронной компоненты тока катода. На рисунке 5, б представлена зависимость отношения тока анода к току катода от давления азота в режиме измерения тока анода, полученная при электронной компоненте тока катода 1 нА. В диапазоне от 0,1 до 10 мкТорр зависимость тока анода от давления была практически линейной. Путём интерполяции её до пересечения с осью ординат, была получена компонента ионного тока на анод. Она составила 3,5 пА, в то время как электронная компонента тока на анод при давлении 5 мкТорр составила 5,5 пА. Отсюда следует, что поверхностная ионизация будет вносить существенную погрешность измерения при давлении, меньшем 10 мкТорр. Другими словами, применение термокатода в области среднего вакуума для реализации способа измерения давления на основе рассеяния электронов на молекулах газа нецелесообразно. Сравнение расчётной зависимости тока анода от давления (рисунок 4, а) и экспериментальной (рисунок 5, б) показывает, что в целом эксперимент подтверждает расчёт и принципиальную возможность измерения давления в области высокого вакуума предложенным способом.



**Рисунок 5 – траектория движения электрона (1) и иона азота (2) в режиме установки электронной компоненты тока катода (а), зависимость отношения тока анода к току катода от давления азота (б)
Figure 5 – The trajectory of electron (1) and nitrogen ion (2) in the mode of setting electronic component of cathode current (а), ratio dependence of anode current to cathode current on nitrogen pressure (b)**

Для оценки возможности реализации способа измерения давления в области среднего и низкого вакуума в конструкцию преобразователя были внесены изменения. Вместо накаливаемого катода был установлен фотокатод площадью 2x4 мм, устойчивый к действию воздуха при атмосферном давлении, на основе плёнки галлия. На полюсном наконечнике напротив фотокатода был установлен светодиод ТО-3535BC-UVC265-30-6V-E с мощностью излучения от 2 до 4 мВт на длине волны 265 нм. Поскольку ширина диаграммы направленности его излучения составляла 120°, то в отверстии для прохода излучения во втором торцевом электроде была установлена кварцевая линза для фокусировки излучения на поверхность фотокатода. Перед линзой располагалась металлическая сетка с 50 %-ным пропусканием излучения светодиода, электрически соединённая со вторым торцевым электродом. Преобразователь помещался под колпак установки вакуумного напыления и откачивался ворвакуумным и турбомолекулярным насосами. Давление воздуха под колпаком изменялось натекателем и

измерялось в диапазоне 10^{-5} – 10^{-2} Торр ионизационным манометром ВИТ-2, в диапазоне $4 \cdot 10^{-2}$ – 100 Торр вакуумметром ВДГ, в диапазоне 100 – 760 Торр деформационным манометром. На анод и коллектор электронов подавалось напряжение 9 В относительно катода, на торцевые электроды и осевой электрод подавалось напряжение минус 2 В. Индукция осевого магнитного поля составляла 63 мТл. Ток фотокатода устанавливался при давлении 10^{-4} , при токе светодиода 30 мА равным 5,7 пА. На рисунке 6 представлены зависимости тока анода и фотокатода от давления воздуха.

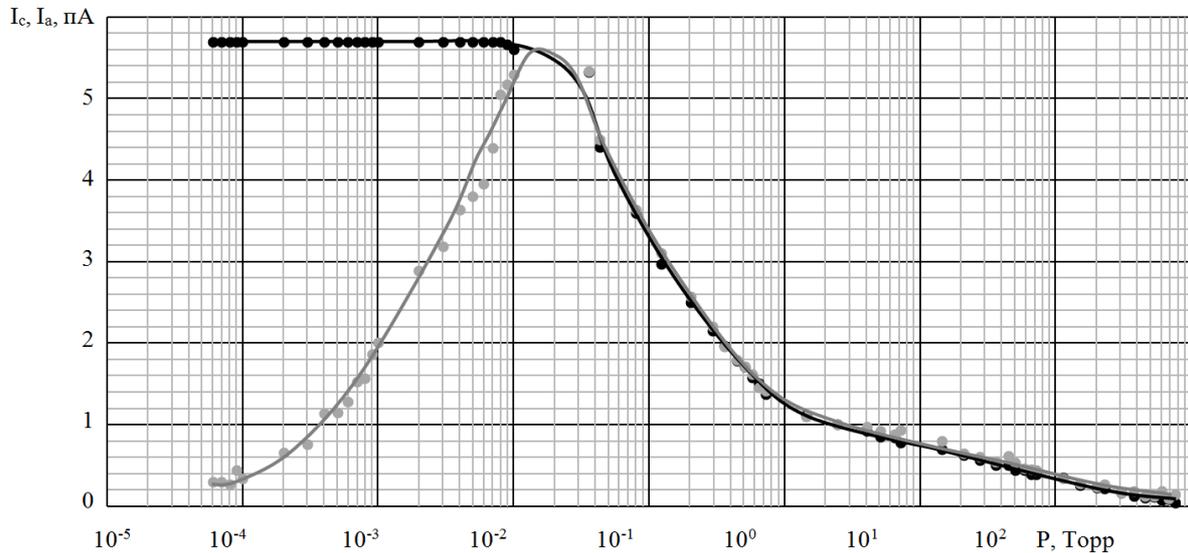


Рисунок 6 – Зависимости тока фотокатода и анода от давления воздуха
Figure 6 – Dependences of photocathode and anode current on air pressure

Зависимость тока анода от давления имеет максимум. Уменьшение токов анода и фотокатода с ростом давления воздуха обусловлено возвратом части электронов на фотокатод за счёт столкновения с молекулами газа в условиях, когда длина свободного пробега электрона становится меньше расстояния между фотокатодом и вторым торцевым электродом. При давлении 10^{-2} Торр длина свободного пробега электрона практически равна расстоянию между фотокатодом и вторым торцевым электродом. С ростом давления будет расти доля электронов, возвращающихся на фотокатод. Другой причиной уменьшения тока фотокатода может быть ограничение его тока объёмным зарядом рассеянных электронов. На падающем участке зависимости ток анода практически равен току фотокатода. Это обусловлено тем, что площадь коллектора электронов намного (в 115 раз) меньше площади анода. Поэтому ток коллектора электронов во столько же раз меньше тока анода. Для исключения неоднозначности определения давления по току анода необходимо измерять ток фотокатода. Если токи фотокатода и анода равны, то давление газа должно определяться по падающей ветви зависимости. Если ток анода меньше тока фотокатода, то давление газа необходимо определять по левой ветви зависимости анодного тока от давления.

Заключение

Проведённое исследование показало возможность реализации широкодиапазонного манометрического преобразователя на основе рассеяния электронов молекулами газа в скрещенных электрическом и магнитном полях с фотокатодом устойчивым к действию воздуха при атмосферном давлении.

Библиографический список

1. Востров Г. А., Розанов Л. Н. Вакуумметры. Л.: Машиностроение, 1967. 236 с.
2. Скворцов В.Э., Базылев В. К., Коротченко В. А., Жидков А. М. Тепловой манометр с контролем сопротивления катода датчика ПМИ-2 в режиме импульсного нагрева // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2018. № 64. С. 137-149.

3. Патент SU 1793289 A1. Вакуумметр. **В. И. Галкин, Е. А. Измайлов, А. А. Маслов.**
4. **Базылев В. К.** Изв. РАН. Сер. Физ. 2000. Т. 64. № 7. С. 1382-1383.
5. Патент РФ № 2771640 от 04.03.2022. Широкодиапазонный манометрический преобразователь. **В.К.Базылев, В.А. Коротченко, А.М. Жидков.** Бюллетень изобретений № 14.

UDC 621. 387.322

WIDE-RANGE PRESSURE GAUGE CONVERTER BASED ON ELECTRON SCATTERING GAS MOLECULES

V. K. Bazylev, Ph.D. (Tech.), associate professor, the Department of electronic devices, RSREU, Ryazan, Russia;

orcid.org/0000-0002-3580-3407, e-mail: bazylev.v.k@rsreu

V. A. Korotchenko, Dr. Sc. (Tech.), professor, the Department of electronic devices, RSREU; Ryazan, Russia;

orcid.org/0000-0003-4068-768X, e-mail: ett@rsreu.ru

A. M. Zhidkov, engineer, the Department of electronic devices, RSREU; Ryazan, Russia;

orcid.org/0000-0002-0199-8402, e-mail: zhidkov.a.m.1989@mai.ru

The results of studying wide-range gauge converter based on electron scattering by gas molecules in crossed electric and magnetic fields are presented. The converter is made in the form of a cylindrical magnetron, in which the electron source is located on one of the end electrodes. A tungsten thermocathode or photocathode based on a gallium film, resistant to air at atmospheric pressure, was used as an electron source, which emitted electrons under the action of ultraviolet radiation from LED with wavelength of 265 nm. The pressure measure was the current of electrons scattered by gas molecules and collected by the anode. The electrons that did not experience scattering were captured by a special collector. The results of modeling the motion of electrons in a converter are presented. Experimental dependences of anode current on nitrogen pressure are obtained, which mainly correlate with the calculated ones, correspond to theoretical concepts and confirm the possibility of measuring gas pressure in a wide range from 10^{-7} Torr to 760 Torr.

The aim of the work is to create a pressure gauge converter for pressure range of 10^{-7} - 760 Torr, based on the scattering of electrons by gas molecules.

Key words: pressure gauge converter, gas pressure, electron scattering, crossed electric and magnetic fields, photocathode, modeling.

DOI: 10.21667/1995-4565-2022-81-89-95

References

1. **Vostrov G. A., Rozanov L. N.** Vakuummeter (Vacuum meters). L.: Mechanical engineering, 1967, 236 p. (in Russian).
2. **Skvortsov V.E., Bazylev V.K., Korotchenko V.A., Zhidkov A.M.** Teplovoj manometr s kontrolom soprotivleniya katoda datchika PMI-2 v rezhime impul'snogo nagreva. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2018, no. 64, pp. 137-149. (in Russian).
3. Patent SU 1793289 A1. Vakuummeter. **Galkin V.I., Izmailov I. A., Maslov A. A.** (in Russian).
4. **Bazylev V.K.** Izv. RAN. Ser. Fiz. 2000, vol. 64, no. 7, pp. 1382-1383. (in Russian).
5. Patent RF no. 2771640 ot 04.03.2022. *Shirokodiapazonnyj manometricheskij preobra-zovatel'*. **V.K. Bazylev, V.A. Korotchenko, A.M. Zhidkov.** Byulleten' izobretenij no. 14. (in Russian).