

ФИЗИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И НАНОЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.387.322

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МИНИАТЮРНОГО
ИОНИЗАЦИОННОГО ВАКУУММЕТРИЧЕСКОГО
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ОРБИТРОННОГО ТИПА****В. А. Коротченко**, д.т.н., профессор кафедры ЭП РГРТУ, Рязань, Россия;

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

В. Э. Скворцов, генеральный директор ООО «МЭЛЗ», МО пос. Запрудня, Россия

orcid.org/0000-0002-3942-6450, e-mail: videoelektronic@yandex.ru

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. В. Прадед, инженер кафедры ЭП РГРТУ, Рязань, Россия;

orcid.org/0000-0001-6779-9476, 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

*Разработан и исследован опытный образец миниатюрного ионизационного манометрического преобразователя орбитронного типа. Диаметр и длина коллектора ионов 16 и 32 мм, анода – 0,5 и 30 мм, катода – 0,07 и 9 мм. Напряжение анод-коллектор 300 В, катод-коллектор (10 – 30) В. Численным моделированием движения электронов показано, что они перемещаются вдоль анода по челночно-спиральной траектории с радиусом (1-6) мм, шагом ~ 9 мм, периодом вращения ~ 5 нс и челночным периодом ~ 30 нс. Время движения ~ 7 мкс, число оборотов ~ 1500, длина пути ~ 1000 см. Экспериментально подтверждена способность орбитрона регистрировать давление газа в интервале (0,1 – 20) мкТорр при токе эмиссии катода 5 мкА и вакуумметрической чувствительности 2000 Торр⁻¹, что на два порядка больше, чем у ионизационного манометра ПМИ-2, при существенно (в 2,5 раза) меньшей величине рабочего объема. Показано, что верхний предел измерительного диапазона прибора повышается до 7 мТорр, если потенциал экрана увеличить от нуля до 100 В. **Цель работы** заключается в создании высокочувствительного миниатюрного ионизационного манометрического преобразователя орбитронного типа, в исследовании происходящих в нём физических процессов и в экспериментальной оценке параметров опытного образца прибора.*

Ключевые слова: вакуумметр, ионизационный манометрический преобразователь, орбитронный вакуумметрический датчик, компьютерное моделирование, движение электронов.

DOI: 10.21667/1995-4565-2019-70-158-168**Введение**

Ионизационный манометрический преобразователь орбитронного типа, является одним из наиболее чувствительных приборов, в которых не используется магнитное поле [1-4]. В орбитроне электроны, эмитированные накаливаемым катодом, входят в электростатическое поле между двумя концентрическими цилиндрами, имея определенные значения энергии и углового момента движения, обеспечивающие очень большой (до 10000 см [4]) средний путь электронов до попадания на анод. Благодаря этому прибор позволяет измерять давление в области сверхвысокого (до 10⁻¹¹ Торр) вакуума, что крайне необходимо для развития многих инновационных направлений электроники.

Совершенствованию орбитронных манометрических преобразователей и исследованию происходящих в них физических процессов посвящено достаточно большое число работ [5-

14]. Однако весьма высокий потенциал орбитрона до настоящего времени не реализован в серийном вакуумметрическом датчике. Одной из основных причин этого является недостаточно полное выяснение механизма формирования сложной многовитковой (тысячи оборотов) спирально-челночной траектории электронов в орбитронной ловушке. В то же время немаловажное значение может иметь и тот факт, что объем орбитронов существенно больше, чем у обычного ионизационного прибора Баярда-Альперта.

Этот недостаток орбитрона частично устранен в работе [11], в которой представлен прибор с диаметром 5 см и длиной 10 см («рабочий» объем около 200 см^3). Представляется возможной более кардинальная миниатюризация датчика, которая представляет значительный интерес для разработчиков современных вакуумметров.

Цель настоящей работы заключается в разработке высокочувствительного миниатюрного термоэлектронного ионизационного манометрического преобразователя орбитронного типа, в исследовании происходящих в нём физических процессов, в экспериментальной оценке параметров опытного образца прибора и в получении данных, необходимых для совершенствования вакуумметрической техники.

Разработка конструкции орбитрона

Конструкция прибора разработана на основе анализа литературных данных [1, 4-11] с учетом практических требований массовой вакуумметрической техники (высокая чувствительность, малый ток эмиссии катода, анодное напряжение не более 300 В, сравнительная простота изготовления и миниатюрность преобразователя). Учитывались также результаты численного моделирования движения электронов и полученные нами ранее данные о физическом механизме улавливания электронов в орбитроне [12, 13] и о параметрах опытного образца прибора [14].

Схематическое изображение электродной системы разработанного и исследуемого в настоящей работе миниатюрного орбитрона представлено на рисунке 1. Система смонтирована на многоштырьковой дисковой ножке из стекла С53 (рисунок 1, в). Коллектор ионов представляет собой тонкостенный (0,2 мм) никелевый цилиндр, на оси которого расположен проволочный анод. Торец коллектора со стороны ножки закрыт дисковым никелевым экраном (толщина 0,2 мм) с отверстием для анода и боковой прорезью для прямонакального вольфрамового катода, выполненного в виде петли (рисунок 1, б, напряжение накала 1,4 В ток накала 0,8 А).

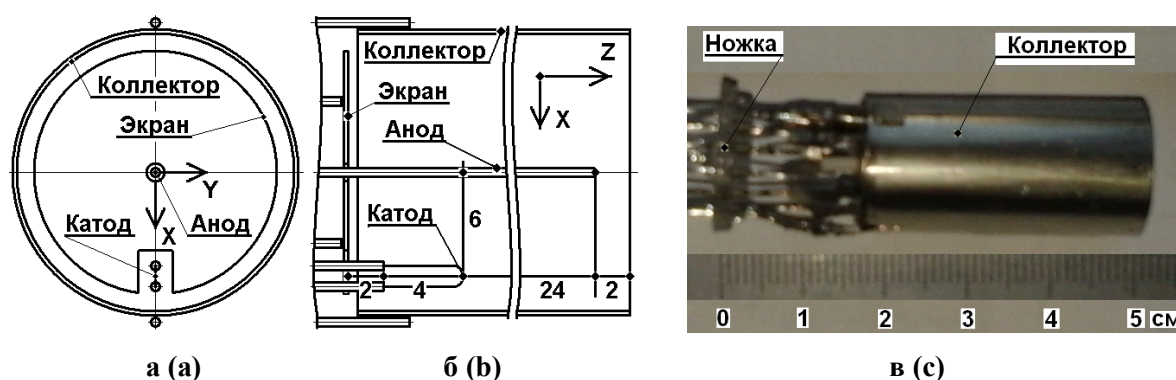


Рисунок 1 – Электродная система опытного образца орбитрона: а и б – проекции на плоскости X-Y и X-Z, (цифры – значения расстояния между точками, мм); в – внешний вид системы
Figure 1 – Electrode system of test orbitron: a and b – projections on the surface X-Y and X- Z, (digits –values of distance between the dots, mm); c – system appearance

Значения постоянного электрического потенциала, диаметра и длины электродов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения потенциала, диаметра и длины электродов
Table 1 – Electrode potentials, diameters and lengths

№	Детали	Потенциал, В	Диаметр, мм	Длина, мм
1	Коллектор	0	16	32
2	Анод	300	0,5	30
3	Катод	10-30	0,07	9
4	Экран	0	14	–
5	Ножка	–	17	–

Приведенные данные показывают, что размеры разработанного орбитрона существенно меньше, чем у приборов, описанных в литературе [4-11]. Рабочий объем прибора $6,43 \text{ см}^3$ (в 30 раз меньше, чем у орбитрона, представленного в работе [11]). Основное отличие электродной системы преобразователя заключается в конструкции катодного узла. Традиционно катод выполняется в виде короткого (до 3 мм) отрезка тонкой (до 25 мкм) проволоки, ориентированной вдоль анода и экранированной от него одной из траверз катода, параллельной аноду [1]. Малая длина катода позволяет локализовать источник электронов в осевом направлении и обеспечить для большинства из них эффективный захват орбитронной ловушкой. Локализация может быть достигнута выполнением экрана в виде цилиндра со щелью для выхода электронов [14].

Оба варианта локализации источника электронов затрудняют изготовление катодного узла при миниатюризации орбитрона. В связи с этим в разработанном приборе длина катода увеличена до 9 мм (с увеличением диаметра до 70 мкм), а локализация обеспечивается естественным уменьшением температуры катода по мере удаления от его центра. На рисунке 2 представлены расчетные зависимости температуры вольфрамового катода (кривая 1) и плотности тока термоэлектронной эмиссии (кривая 2) от расстояния до центра катода. Максимальная температура – 2004 К; плотность тока – $1,28 \text{ мА/см}^2$; ток эмиссии – 5 мкА; ток и напряжение накала – 0,853 В; ток накала – 0,7938 А. При численном решении дифференциальных уравнений температура катода на концах задавалась равной 600 К.

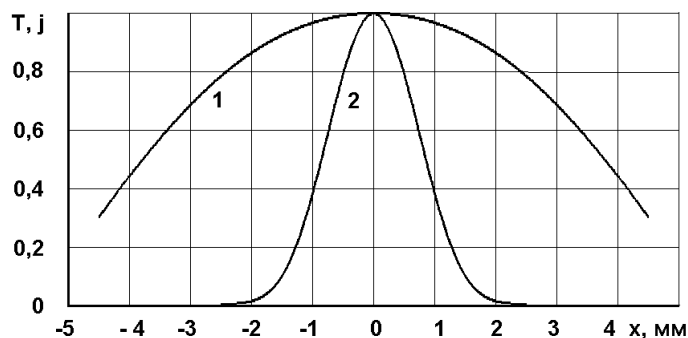


Рисунок 2 – Зависимости нормированных значений температуры катода (1) и плотности тока электронной эмиссии (2) от расстояния до центра

Figure 2 – Temperature (1) and emission current density (2) versus distance from filament centre

Из рисунка 2 следует, что плотность тока термоэмиссии по мере удаления от центра катода спадает значительно круче, чем температура. Электроны в основном выходят из катода на длине около 2 мм (при общей длине 9 мм). Точнее, – 90 % электронов эмитируются с центрального участка длиной 2,3 мм, что соизмеримо с длиной щели в экране катода [14]. Падение напряжения на этом участке – около 0,3 В.

В исследуемом орбитроне, кроме увеличения длины катода, изменена и его форма – катод выполнен в виде петли (рисунок 1, б) и одновременно устранено экранирование эмиттера от анода с помощью одной из траверз катода. Такое решение упрощает изготовление катодного узла, что важно при миниатюризации прибора, и ослабляет локальное искажение поля массивной траверзой, которое может приводить к сходу электронов со стабильных траекторий при реверсных поворотах вблизи катодной области. Частично экранирование обеспечи-

вается боковым (верхним на рисунке 1, б) участком петлевого катода, имеющим пониженную температуру и практически не эмитирующим электроны.

Компьютерное моделирование и эксперименты показали, что время удержания электронов в орбитронной ловушке и манометрическая чувствительность существенно зависят от расположения вершины петлевого катода. На основе результатов моделирования и экспериментов выбраны следующие координаты вершины (см. рисунок 1): $X_0 = 6$ мм; $Y_0 = 0$; $Z_0 = 6$ мм (координата $Z = 0$ на поверхности экрана).

Моделирование движения электронов

В процессе разработки орбитрона экспериментально оценивалась манометрическая чувствительность опытных образцов приборов, отличающихся размерами электродов, их расположением и параметрами электрического режима. Численное моделирование движения электронов, стартующих с центра катода показало, что высокая чувствительность достигается в тех случаях, когда время движения велико (больше 5 мкс) в широком (около 10 В) интервале изменений потенциала катода. Это объясняется тем, что ионизирующий ток реально содержит электроны, которые стартуют не только с центра катода, но и с его периферийных участков, имеющих различные потенциалы и координаты. В таких условиях способность орбитрона эффективно улавливать электроны независимо от потенциала точки старта обеспечивает высокую чувствительность.

Для разработанного орбитрона зависимость времени движения электронов, стартующих с центра катода, от его потенциала представлена на рисунке 3. Зависимость получена численным моделированием при потенциале анода 300 В и начальной тепловой энергии электронов 0,25 эВ, соответствующей температуре эмиттера 2000 К. Тепловая скорость направлена по оси Y (рисунок 1, а). Потенциалы коллектора и экраны равны нулю. Напряжение накала катода при моделировании не учитывалось. Потенциал катода изменялся от 3 В до 30 В с шагом 0,5 В, который уменьшался до 0,1 В вблизи резких изменений зависимости.

Число шагов расчета по времени задавалось равным $5 \cdot 10^6$, при числе элементов расчетной сетки $1,85 \cdot 10^6$, что соответствовало максимальному времени расчета около 7 мкс. Если электрон завершал движение на аноде раньше, расчет автоматически прекращался, и фиксировалось время движения частицы («время жизни» или «время пролета» [9]). Когда расчет заканчивался из-за окончания заданного числа шагов без ухода электрона на анод, время жизни условно отсчитывалось по моменту остановки расчета.

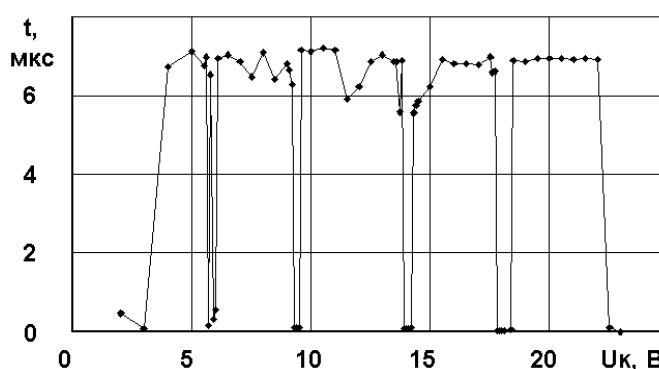


Рисунок 3 – Зависимость времени движения электронов от потенциала катода
Figure 3 – Temperature (1) and emission current density (2) vs. distance from filament centre

Как следует из представленного графика, в интервале потенциалов катода (5-22) В более 90 % соответствуют времени удержания электронов в орбитронной ловушке более 6 мкс. Это подтверждает возможность получения высокой манометрической чувствительности орбитрона. Падение напряжения накала на центральном эмитирующем участке катода, как указано выше (рисунок 2), равно приблизительно 0,3 В. Если, например, потенциал центра катода

выбран равным 20 В, то потенциалы на краях участка будут 19,85 В и 20,15 В, что не приведет к уменьшению времени движения электронов (рисунок 3).

Примеры трехмерных траекторий электронов (боковой вид в направлении нормали к плоскости Y-Z) при ряде значений потенциалов катода, полученные в ходе моделирования движения частиц, представлены на рисунке 4 на фоне сечений электродов орбитрона плоскостью Y-Z при нулевом значении координаты X. Рисунок 4, а соответствует потенциалу катода 3 В и малому (88 нс) времени движения электрона, заканчивающегося ударом в анод. Как видно на рисунке, частица движется по спирально-челночной траектории (~ 20 витков), начальная и конечная точки которой обозначены S и F. Расстояние электрона от оси прибора (условный радиус спирали) изменяется в широком интервале, так что проекция траектории на плоскость X-Y имеет не круговую, а «лепестковую» форму.

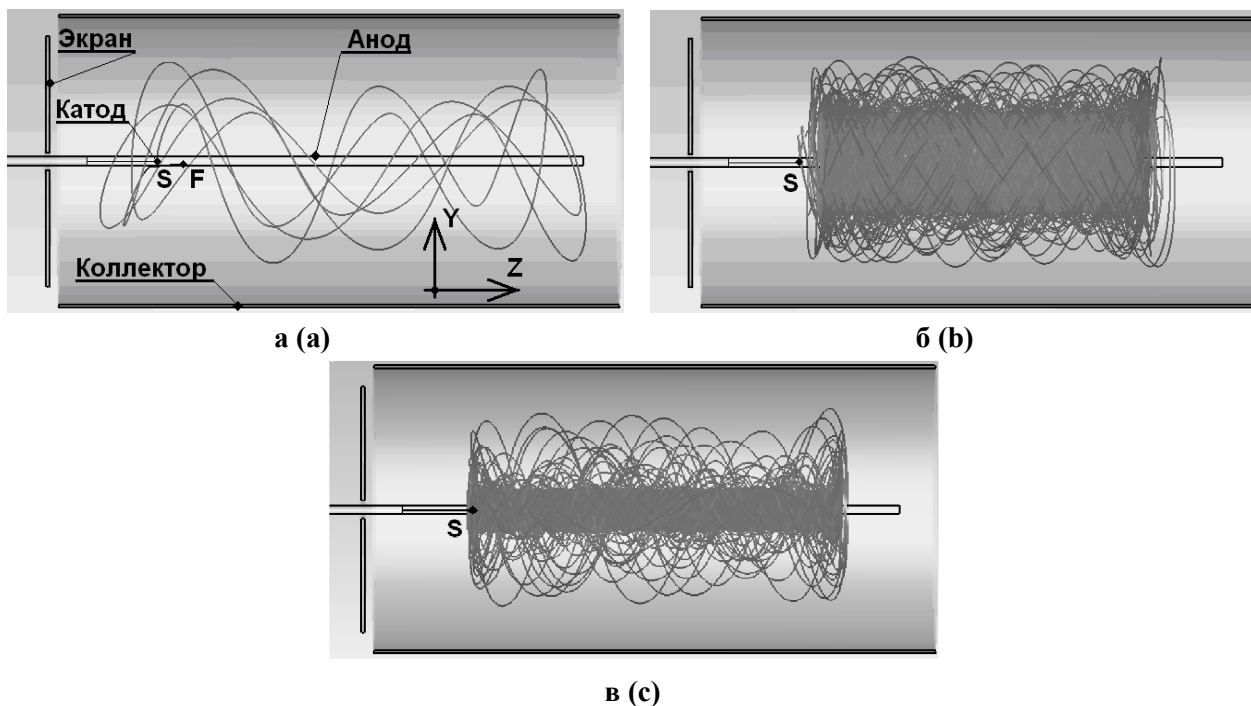


Рисунок 4 – Проекция трехмерных траекторий электронов на плоскость Y-Z при различных значениях потенциала катода U_k и времени движения: 3 В (а – 88 нс); 10 В (б – 7,12 мкс) и 20 В (в – 6,98 мкс). S и F – точки старта и финиша частицы
Figure 4 – Projections of electron 3-D trajectories on plate Y-Z at rather filament potentials and motion times: 3 V (a – 88 ns); 10 V (b – 7,12 μs) and 20 V (c – 6,98 μs). S and F – point of start and finish

На рисунке 4, б изображена траектория, соответствующая потенциалу катода 10 В, при котором время движения электрона резко возрастает до 7,12 мкс, причем электрон за время расчета на анод не уходит (рисунок 3). Число витков челночной спирали увеличивается приблизительно до 1000, что определяет появление на рисунке сплошной темной области вдоль анода с радиусом около 3 мм. Левая граница этой области расположена на некотором расстоянии от точки старта S, а правая – от конца анода. Спираль как бы «сжимается» с течением времени, что соответствует физическому механизму осевого захвата электрона орбитронной ловушкой [13]. Основой механизма является накопление импульсов осевого торможения частицы в начале движения при многократных пересечениях локальной катодной области с пониженными значениями потенциалов.

На рисунке 4, в приведено изображение траектории электрона для потенциала катода 20 В. В этом случае время движения, как следует из рисунка 3, также велико (7 мкс) и ограничено заданным числом временных шагов расчета, а не соударением электрона с анодом. Число витков спирали тоже около 1000, и на рисунке 4, в наблюдается сплошная темная область вдоль анода. Отличие заключается в том, что радиус области уменьшился приблизи-

тельно до 1 мм, а левая граница области не смещена вправо, как на рисунке 4, б, и «сжатие» спирали не происходит.

Это свидетельствует о наличии механизма осевого захвата электрона орбитронной ловушкой, отличного от рассмотренного нами ранее [13]. Вероятно, он заключается в уменьшении радиуса спирали в начале движения до величины, при которой электрон не пересекает локальную катодную область с пониженными значениями потенциалов. Уменьшение радиуса может происходить при реверсных поворотах электрона в процессе отражения от «электростатических зеркал» [9] на концах спирали.

Количественные данные о параметрах траектории движения частицы при потенциале катода 3 В представлены на рисунке 5 в виде графиков зависимостей расстояния электрона R до оси орбитрона и его координаты Z от времени.

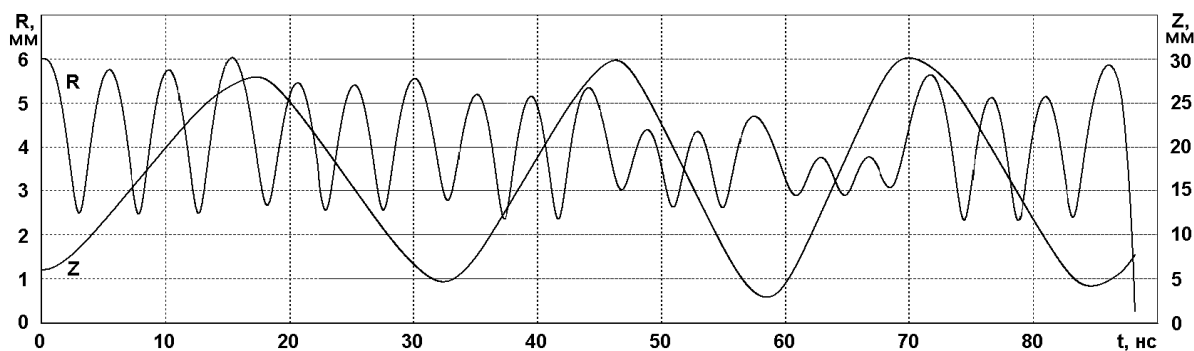


Рисунок 5 – Зависимости расстояния электрона R до оси орбитрона и его координаты Z от времени при потенциале катода 3 В и уходе электрона на анод через 88 нс (радиус анода 0,25 мм)

Figure 5 – Electron distance R and coordinate Z versus time at filament potential 3 V and electron going on anode for 88 ns (anode radius is 0,25 mm)

Из рисунка 5 следует, что на отрезке времени 88 нс укладывается примерно 18,5 колебаний радиуса траектории в интервале (6 – 2,3) мм, причем в конце графика он становится равным радиусу анода 0,25 мм. Это означает, что электрон попадает на анод, его движение прекращается, и расчет автоматически заканчивается. Каждый период колебаний радиуса соответствует обороту частицы вокруг оси орбитрона, так что среднее время одного оборота составляет около 5,5 нс. Энергия электронов изменяется в интервале (20 – 200 В).

Координата Z на рассматриваемом отрезке времени периодически изменяется примерно 3,1 раза в интервале (3 – 30) мм, так что средний период челночной составляющей движения электрона равен 28,5 нс, и на нем укладывается около трех витков спирали (шаг ~ 9 мм). Экстремумы Z соответствуют реверсным поворотам электронов, при которых направление осевой составляющей скорости движения изменяется на противоположное. Вблизи экстремумов изменяется размах колебаний радиуса как в сторону уменьшения, например, при минимуме около 60 нс, так и в сторону увеличения (около 70 нс). Между экстремумами размах колебаний радиуса практически не изменяется.

Зависимости радиуса и осевой координаты от времени получены и для потенциалов катода 10 В и 20 В. Для начального отрезка времени около 100 нс они в основном аналогичны представленным на рисунке 5. Однако средний период колебаний радиуса уменьшился от 5,5 нс до 4,6 нс и до 3,8 нс соответственно, а период изменения координаты Z – увеличился от 28,5 нс до 38 нс и 37 нс. Указанные изменения периодов сравнительно невелики и являются следствием уменьшения глубины «провала» потенциала в области катода, в которой электроны приобретают азимутальную и осевую составляющие начальной скорости.

Более значительные изменения, как показало моделирование, наблюдаются в микросекундном интервале времени движения электронов. В нем амплитуда колебаний радиуса постепенно уменьшается до очень малых значений – происходит азимутальное «нивелирование» траекторий, приобретающих круговую форму [13]. При потенциале катода 10 В радиус

стабилизируется на уровне $2,7 \pm 0,15$ мм через 4 мкс, а при потенциале 20 В – на уровне $1,2 \pm 0,14$ мм через 1,5 мкс. Уменьшение амплитуды продолжается до 6 мкс. Причины эффекта пока неизвестны.

Представленные результаты моделирования получены при нулевом потенциале экрана, который устраняет притяжение электронов отрезком проволоки, соединяющим анод с вводом ножки. Моделирование движения электронов при положительных потенциалах экрана показало, что шаг спирали уменьшается с ростом потенциала, и при его значении около 100 В челночная составляющая движения практически исчезает. При этом электрон быстро уходит на анод или экран. Такой способ уменьшения манометрической чувствительности прибора представляет интерес при измерении давлений свыше (10^{-4} – 10^{-5}) Торр, при которых в орбитронах нарушается линейность градуировочной характеристики. Подобный способ («неорбитронный режим») описан в литературе [4].

Экспериментальные исследования

Цель экспериментов заключалась в определении параметров разработанного миниатюрного ионизационного манометрического преобразователя орбитронного типа. Основными параметрами прибора являются вакуумметрическая чувствительность (отношение ионного тока к электронному и к давлению газа) и измерительный диапазон.

Опытный образец электродной системы орбитрона, собранной на стеклянной ножке, закреплялся на металлическом фланце, вводы которого соединялись с электродами прибора, и помещался в вакуумную камеру из нержавеющей стали. Камера герметизировалась с помощью алюминиевой прокладки и откачивалась форвакуумным и магниторазрядным насосами. Давление газа в камере изменялось напуском азота через игольчатый натекаль при постоянной откачке и измерялось с помощью вакуумметра ВИ-14 с датчиком ПМИ-27, расположенном в непосредственной близости от орбитрона.

После откачки в течение нескольких суток достигалось предельно малое давление около $5 \cdot 10^{-8}$ Торр. В ходе откачки производилось длительное обезгаживание орбитрона путем включения катода в номинальный режим и отбора электронного тока на анод. Без длительного прогрева орбитрона газовыделение из его деталей и стеклянной ножки приводило к тому, что после включения накала катода ионный ток возрастал примерно на порядок, тогда как давление в камере увеличивалось приблизительно в два раза.

Электрическая схема включения орбитронного вакуумметрического датчика представлена на рисунке 6.

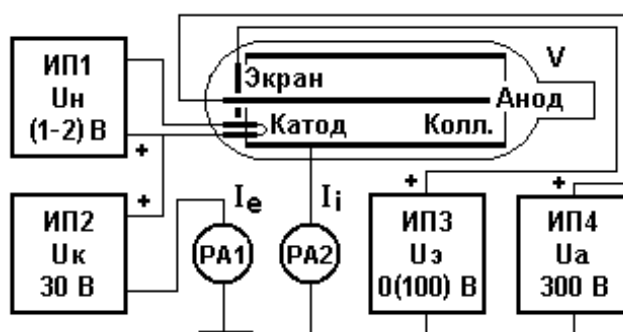


Рисунок 6 – Блок-схема включения опытного образца орбитрона в вакуумметрический режим
Figure 6 – Bloc-schema of experimental unit for vacuum orbitron gauge testing

Обозначения на рисунке: V – орбитрон; (ИП1 – ИП4) – стабилизированные источники питания, обеспечивающие накал катода (U_n) и задание постоянных потенциалов катода (U_k), экрана (U_ε) и анода (U_a) относительно «корпуса»; РА1 и РА2 – измерители тока катода (I_e) и тока коллектора ионов (I_i). Значения напряжений указаны на рисунке (на блоках питания). Ток накала катода (около 0,8 А) регулировался с целью поддержания электронного тока 5 мкА. Ток коллектора ионов регистрировался в интервале от 0,1 нА до 2 мкА.

На первом этапе экспериментального исследования снималась зависимость тока коллектора ионов орбитрона от потенциала катода при неизменном давлении азота 0,15 мкТорр и электронном токе 5 мкА, который обеспечивался напряжением накала катода 1,4 В, током накала 0,82 А и потенциалом анода 300 В. Экран соединялся с нулевой точкой схемы. График зависимости представлен на рисунке 7.

График коррелирует в основном с результатами моделирования движения электронов (рисунок 3) и с экспериментальными данными, представленными в работах [6, 9, 11]. Большие значения ионного тока наблюдаются при потенциалах катода порядка 10 % от потенциала анода. Выше этой величины ионный ток уменьшается в результате снижения разности потенциалов между катодом и окружающим его пространством, которая сообщает электронам азимутальную и осевую составляющие начальной скорости. Расхождения связаны с приближенностью численной модели, неэквипотенциальностью катода и с погрешностями его установки в межэлектродном пространстве. На основании зависимости, представленной на рисунке 7, значение потенциала катода в вакуумметрическом режиме опытного образца орбитрона выбрано равным 30 В.

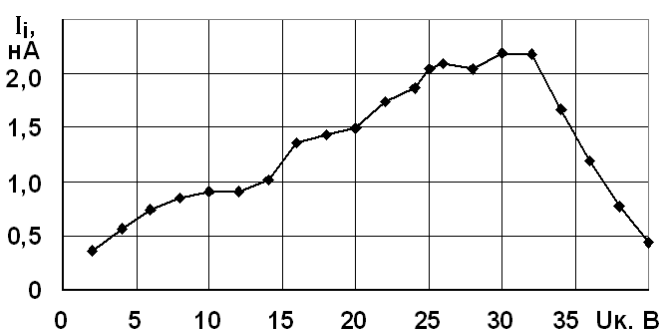


Рисунок 7 – Зависимость ионного тока орбитрона от потенциала катода при давлении остаточных газов 0,15 мкТорр и электронном токе 5 мкА

Figure 7 – Orbitron ion current versus filament potential at residual gases pressure 0,15 μ Torr and electron current 5 μ A

Реальная вакуумметрическая способность разработанного орбитрона оценивалась путем измерения тока коллектора ионов при различных значениях давления азота с помощью представленной выше блок-схемы. График полученной зависимости совместно с кривой изменения манометрической чувствительности, рассчитанной путем деления значений ионного тока на давление и на ионизирующий электронный ток, приведен на рисунке 8, а.

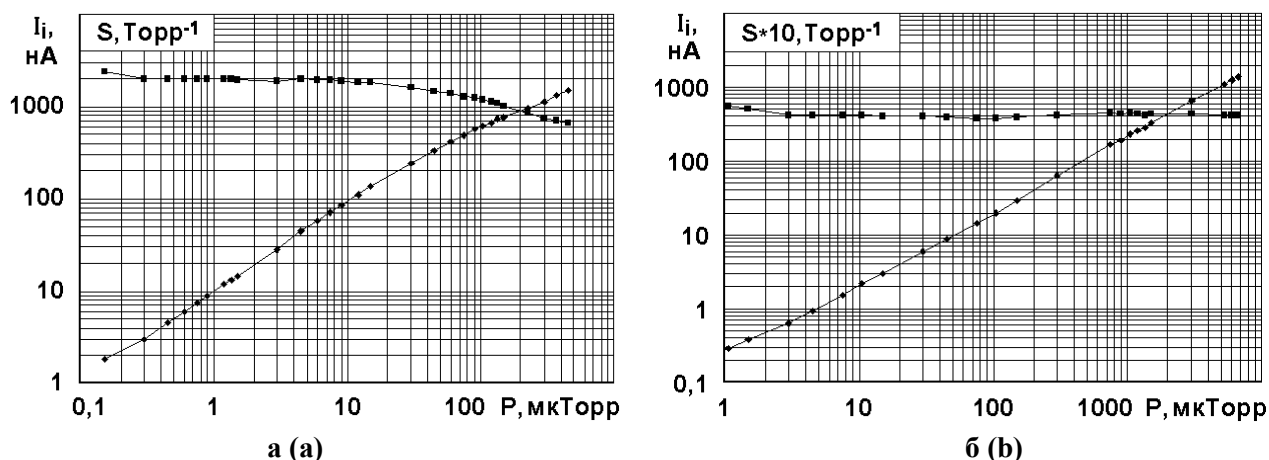


Рисунок 8 – Зависимости ионного тока I_i (1) и манометрической чувствительности S (2) от давления азота при электронном токе 5 мкА для потенциалов экрана 0 (а) и 100 В (б)

Figure 8 – Temperature (1) and emission current density (2) vs. distance from filament centre

Из рисунка 8, а (кривая 1) следует, что ионный ток орбитрона приблизительно линейно увеличивается с ростом давления азота в диапазоне (0,1 – 450) мкТорр. Наибольшая величина ионного тока в конце диапазона около 2 мкА, что меньше электронного тока 5 мкА (классическое условие работы ионизационного вакуумметра), но приближается к нему, что является одной из причин нарушения линейности графика (вместе с возможным искажением распределения потенциала пространственным зарядом электронов). Отклонение от линейности на начальном участке кривой вызвано газовой выделением электродов орбитрона и подтверждает необходимость принятия специальных мер для обезгаживания деталей прибора.

Кривая 2 на рисунке 8, а показывает, что манометрическая чувствительность разработанного миниатюрного орбитрона в интервале (0,1 – 20) мкТорр равна 2000 Торр^{-1} , что на два порядка больше, чем для распространенного ионизационного манометрического преобразователя ПМИ-2 [2]. В сравнении с этим преобразователем орбитрон выгодно отличается тем, что у него на два порядка меньше электронный ионизирующий ток, в несколько раз меньше мощность накала катода и существенно (в 2,5 раза) меньше рабочий объем.

Из рисунка 8, а следует, что при давлении газа, превышающем 20 мкТорр, манометрическая чувствительность в несколько раз снижается, что ведет к увеличению погрешности измерения. Эффект может быть устранен повышением потенциала экрана от нулевого значения до величины 100 В. Это подтверждают графики, представленные на рисунке 8, б. Из них следует, что в диапазоне от 20 мкТорр до 7 мТорр чувствительность практически не изменяется и линейная связь ионного тока с давлением не нарушается. Это подтверждает, что причина нарушения линейности связана с накоплением электронов между анодом и коллектором ионов при большом значении среднего пути электронов в орбитронном режиме.

В «неорбитронном» режиме абсолютное значение чувствительности уменьшается примерно в 5 раз (в сравнении с рисунком 8, а), но это не затрудняет процесс измерения, поскольку ионный ток увеличивается за счет роста давления газа (около 1 мкА при давлении 7 мТорр, что соизмеримо с электронным током).

Заключение

В ходе проведения работы получены следующие основные результаты.

1. Разработана электродная система, определен электрический режим и исследован опытный образец миниатюрного термоэлектронного ионизационного манометрического преобразователя орбитронного типа. Диаметр и длина коллектора ионов 16 и 32 мм, анода – 0,5 и 30 мм, катода – 0,07 и 9 мм. Напряжение анод-коллектор 300 В, катод-коллектор (10 – 30) В, потенциал экрана – нулевой. Рабочий объем электродной системы прибора – $6,43 \text{ см}^3$, что в 30 раз меньше, чем у малогабаритного орбитрона, представленного в литературе.

2. На основе численного моделирования движения электронов в разработанном орбитроне определены координаты расположения катода, его длина и форма, которые позволяют удерживать электроны в орбитронной ловушке в течение длительного (до 7 мкс) времени при большинстве значений потенциала катода в интервале (4 – 22) В. Этим подтверждена возможность получения высокой манометрической чувствительности прибора.

3. Численным моделированием установлено, что в разработанном орбитроне электроны перемещаются вдоль анода по челночно-спиральной траектории с радиусом (1 – 6) мм, шагом ~ 9 мм, периодом вращения ~ 5 нс и челночным периодом ~ 30 нс. Общее число оборотов в модели ~ 1500, время движения ~ 7 мкс, длина пути около 1000 см. Энергия электронов изменяется в интервале (20 – 200) эВ.

4. Моделированием движения электронов при положительных значениях потенциала экрана показано, что шаг спирали уменьшается с ростом потенциала, и при его значении около 100 В челночная составляющая движения практически исчезает, а электрон быстро уходит на анод или экран. Предложено использовать эффект для снижения манометрической чувствительности с целью повышения верхнего предела вакуумметрического диапазона.

5. Для опытного образца орбитрона экспериментальным путем установлено, что ток коллектора ионов практически линейно возрастает от 2 нА до 200 нА при увеличении давления азота в интервале (0,15 – 20) мкТорр. Манометрическая чувствительность при этом остается постоянной и равной 2000 Торр^{-1} , что на два порядка выше, чем у наиболее распространенного ионизационного манометрического преобразователя ПМИ-2. В сравнении с ним орбитрон выгодно отличается тем, что электронный ионизирующий ток меньше на два порядка, в несколько раз меньше мощность накала катода (около 1 Вт) и существенно (в 2,5 раза) меньше рабочий объем.

6. Экспериментально подтверждено, что верхний предел измерительного диапазона разработанного миниатюрного орбитрона повышается до 7 мТорр при увеличении потенциала экрана до 100 В. В интервале изменения давления азота от 20 мкТорр до 7 мТорр манометрическая чувствительность сохраняется постоянной и равной 400 Торр^{-1} , а линейная связь ионного тока с давлением не нарушается.

Библиографический список

1. Mourad W. G., Pauly T., Herb R. G. Orbitron Ionization Gauge // Review of Scientific Instruments. 1964, vol 35, no. 6, pp. 661-665.
2. Кузьмин В. В., Левина Л. Е., Творогов И. В. Вакуумметрическая аппаратура техники высокого вакуума и течеискания. М.: Энергоатомиздат, 1984. 240 с.
3. Востров Г. А., Розанов Л. Н. Вакуумметры. Л.: Машиностроение, 1967. 236 с.
4. Meyer E. A., Herb R. G. Performance Study of the Orbitron Ionization Gauge // Journal of Vacuum Science & Technology. 1967, vol. 4, no. 2, pp. 63-70.
5. Gosselin C. M., Beitel G. A., Smith A. Study of Low Pressure Application of the Orbitron Ion Gauge // Journal of Vacuum Science & Technology. 1970, vol. 7, no. 1, pp. 233-236.
6. Gammon R.G. Electron trajectories and ion current characteristics of orbitron vacuum gauges // Vacuum. 1967, vol. 17, no. 7, pp. 379-385.
7. Blechschmidt D. Low pressure limitation of the orbitron ionization gauge // Japanese Journal of Applied Physics. January 1974, pp. 1-6.
8. Feidt M. L., Paulmier D. F. Influence of ionization phenomena and electron space charge on condition of electronic injection into an orbitron device // Vacuum. 1978, vol. 28, no. 8/9, pp. 333-336.
9. Petit B., Feidt M. L. Theoretical determination of ionization efficiency for an orbitron device and variation with the main working parameters // Journal of Vacuum Science & Technology. 1983, vol. 1, no. 2, pp. 163-167.
10. Turner D. J. Electrostatic ionization pumps and gauges – criterion for charged particles orbiting in a logarithmic field // Vacuum. 1964, vol. 14, pp. 477-478.
11. Fitch R. K. and Thatcher W. J. A small volume orbitron gauge with stable ion current characteristics // Journal of Scientific Instruments (Journal of Physics E). 1968. Series 2, vol. 1, pp. 317-319
12. Базылев В. К., Жидков А. М., Коротченко В. А., Скворцов В. Э. Компьютерное моделирование движения электронов в орбитронном вакуумметрическом датчике // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2016. № 58. С. 146 – 152.
13. Коротченко В. А., Скворцов В. Э., Базылев В. К., Жидков А. М., Андреасян Т. Н. Физический механизм функционирования орбитронной электронной ловушки в ионизационном манометре // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2017. № 62. С. 163-170.
14. Коротченко В. А., Скворцов В. Э., Базылев В. К., Жидков А. М., Андреасян Т. Н. Разработка и исследование ионизационного вакуумметрического преобразователя орбитронного типа // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2018. № 64. С. 137-149.

UDC 621.387.322

CREATION AND RESEARCH OF MINIATURE IONIZATION VACUUM GAUGE OF ORBITRON TYPE

V. A. Korotchenko, Dr. Sc (Tech.), full professor, department of electronic devices, RSREU, Ryazan, Russia;
orcid.org/0000-0003-4068-768X, e-mail: ett@rsreu.ru

V. E. Skvortsov, CEO, MELZ, Zaprudnya; Russia;
orcid.org/0000-0002-3942-6450, e-mail: videoelektronik@yandex.ru

V. K. Bazylev, Ph.D. (Tech.), associate professor, RSREU, Ryazan, Russia;
orcid.org/0000-0002-3580-3407, e-mail: bazylev.v.k@rsreu

V. V. Praded, engineer, department of electronic devices, RSREU, Ryazan, Russia;
orcid.org/0000-0001-6779-9476, e-mail: ett@rsreu.ru

A. M. Zhidkov, engineer, department of electronic devices, RSREU, Ryazan, Russia;
orcid.org/0000-0002-0199-8402, e-mail: zhidkov.a.m.1989@mai.ru

*A miniature ionization vacuum gauge of orbitron type was created and studied. Diameter and length of ion collector is 16 and 32 mm, of anode – 0,5 and 30 mm, filament – 0,07 and 9 mm. Anode- collector voltage is 300 V, filament-collector – (10 – 30) V. Numerical simulation of electron motion has shown that particles travel along anode at spiral-shuttle trajectory with radius (1 – 6) mm, step ~ 9 mm, time on turn ~ 5 ns, shuttle period ~ 30 ns. Motion time is about 7 μ s, number of turn is about 1500, path length ~ 1000 cm. We have experimentally proved that created orbitron gauge permits to measure pressure of gases in the range between (0,1 – 20) μ Torr at filament emission current 5 μ A and sensitivity 2000 Topp⁻¹, being three orders of magnitude higher than for ion manometer PMI-2, having working volume essentially (in 2,5 time) less. Gauge high measurement limit has shown to increase to 7 mTorr if screen potential rises from zero to 100 V. **The aim of the work** is to create miniature ionization orbitron gauge with high sensitivity and experimentally estimate its test vacuum sensor characteristics.*

Key words: orbitron vacuum gauge, numerical simulation, computer modeling, motion of electrons, residual gas pressure measurement.

DOI: 10.21667/1995-4565-2019-70-158-168

References

1. Mourad W. G., Pauly T., Herb R. G. Orbitron Ionization Gauge. *Review of Scientific Instruments*. 1964, vol. 35, no. 6, pp. 661-665.
2. Kuzmin V. V., Levina L. E., Tvorogov I. V. *Vakuummetricheskai apparatura tekhniki vyisokogo vakuuma i techeiskaniia* (Vacuum measurement apparatus of high vacuum technics and leak find), Moscow, Energoatomizdat, 1984, 240 p. (in Russian).
3. Vostrov G. A., Rozanov L. N. *Vakuummetryi* (Vacuum gauges). Leningrad, Mashinostroenie, 1967, 236 p. (in Russian).
4. Meyer E. A., Herb R. G. Performance Study of the Orbitron Ionization Gauge. *Journal of Vacuum Science & Technology*. 1967, vol. 4, no. 2, pp. 63-70.
5. Gosselin C. M., Beitel G. A., Smith A. Study of Low Pressure Application of the Orbitron Ion Gauge. *Journal of Vacuum Science & Technology*. 1970, vol. 7, no. 1, pp. 233-236.
6. Gammon R.G. Electron trajectories and ion current characteristics of orbitron vacuum gauges. *Vacuum*. 1967, vol. 17, no. 7, pp. 379-385.
7. Blechschmidt D. Low pressure limitation of the orbitron ionization gauge. *Japanese Journal of Applied Physics*. January 1974, pp. 1-6.
8. Feidt M. L., Paulmier D. F. Influence of ionization phenomena and electron space charge on condition of electronic injection into an orbitron device. *Vacuum*. 1978, vol. 28, no. 8/9, pp. 333-336.
9. Petit B., Feidt M. L. Theoretical determination of ionization efficiency for an orbitron device and variation with the main working parameters. *Journal of Vacuum Science & Technology*. 1983, vol. 1, no. 2, pp.163-167.
10. Turner D. J. Electrostatic ionization pumps and gauges – criterion for charged particles orbiting in a logarithmic field. *Vacuum*. 1964, vol. 14, pp. 477-478.
11. Fitch R. K. and Thatcher W. J. A small volume orbitron gauge with stable ion current characteristics. *Journal of Scientific Instruments (Journal of Physics E)*. 1968, series 2, vol. 1, pp. 317-319.
12. Bazylev V. K., Zhidkov A. M., Korotchenko V. A., Skvortsov V. E., Kompjuternoe modelirovanie dvizheniy elektronov v orbitronnom vakuummetricheskom datchike (Computer modelling of motion of electrons in orbitron vacuum sensor). *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2016, no. 58, pp. 146-152. (in Russian).
13. Korotchenko V. A., Bazylev V. K., Skvortsov V. E., Zhidkov A. M., Andreasyan T. N. Fizicheskiy mehanizm funkcionirovaniya orbitronnoy elektronnoy lovushki v ionizacionnom manometre (Physical mehanism operation of orbitron electronic trap in ionization gauge). *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radio-tehnicheskogo universiteta*. 2017, no. 62, pp. 163-167. (in Russian).
14. Korotchenko V. A., Skvortsov V. E., Bazylev V. K., Zhidkov A. M., Andreasyan T. N. Razrabotka i issledovanie ionizacionnogo vakuummetricheskogo preobrazovatelia orbitronnogo tipa (Creation and research of ionization vacuum gauge of orbitron type). *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2018, no. 64, pp. 137-149. (in Russian).