

ЭЛЕКТРОНИКА И НАНОЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.387.322

**ФИЗИЧЕСКИЙ МЕХАНИЗМ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ
ОРБИТРОННОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ЛОВУШКИ
В ИОНИЗАЦИОННОМ МАНОМЕТРЕ****В. А. Коротченко**, д.т.н., профессор кафедры ЭП, РГРТУ; ett@rsreu.ru**В. Э. Скворцов**, генеральный директор ООО «МЭЛЗ», videoelektronic@yandex.ru**В. К. Базылев**, к.т.н., доцент кафедры ЭП, РГРТУ; bazylev.v.k@rsreu.ru**А. М. Жидков**, аспирант РГРТУ; zhidkov.a.m.1989@mail.ru**Т. Н. Андреасян**, магистрант РГРТУ; ett@rsreu.ru

Представлены результаты численного моделирования движения электронов в известном высокочувствительном ионизационном вакуумметрическом датчике орбитронного типа при спирально-челночной траектории частиц с временем на виток около 10 нс, периодом осевых колебаний 50 нс, общим числом витков порядка 4000 и длиной пути до 200 м. На основе полученных результатов раскрыт физический механизм удерживания электронов в орбитронной ловушке. На первом этапе (радиальный захват) электрон в процессе выхода из катодной области с пониженными потенциалами приобретает азимутальную составляющую скорости, что предотвращает его попадание на анод. На втором (осевой захват) – частица при пересечении катодной области после нескольких витков спирали испытывает осевое торможение, что ведёт к уменьшению амплитуды продольных колебаний. Третий этап (азимутальное нивелирование) проявляется в значительном (почти на порядок) уменьшении амплитуды колебаний радиуса спирали.

Целью работы является выявление физического механизма оптимального функционирования орбитронной электронной ловушки в ионизационном вакуумметрическом датчике.

Ключевые слова: орбитронный вакуумметрический датчик, компьютерное моделирование, движение электронов.

DOI: 10.21667/1995-4565-2018-63-1-133-141**Введение**

Орбитронный ионизационный манометрический преобразователь, кратко именуемый – орбитрон [1], имеет целый ряд несомненных достоинств. Главное из них – высокая манометрическая чувствительность (коэффициент пропорциональности между отношением ионного тока к электронному и давлением газа). Если чувствительность распространенного преобразователя ПМИ-2 составляет 20 Торр^{-1} [2], то для орбитрона она достигает почти 10^5 Торр^{-1} [3]. Пороговая чувствительность орбитрона (до 10^{-11} Торр) также очень высока. Не менее важны и другие достоинства прибора: малая (около 0,1 Вт) мощность накала катода и низкий уровень газовой выделенности, малый (1 мкА) электронный ионизирующий ток и соответственно низкий уровень десорбции молекул газа с анода

под ударами электронов, простота конструкции датчика (не используется магнитное поле).

Основой вакуумметрического датчика является орбитронная ловушка (Orbitrap, Kingdon R.D., 1923), применение которой для улавливания ионов является перспективным направлением развития масс-спектрометрии [5, 6]. В орбитроне ловушка используется для улавливания эмиттируемых термокатодом электронов. После удержания в ловушке в течение определенного времени электроны уходят на анод. За это время они проходят очень большой путь (до 92 м при длине прибора около 20 см [3]) и часть из них ионизирует молекулы остаточных газов, образуя полезный сигнал вакуумметрического датчика (ток коллектора ионов).

Время удержания является ключевым параметром ловушки, поскольку оно определяет дли-

ну пути электронов и соответственно – чувствительность манометра, однако в литературе отсутствуют сведения о способах оценки времени на основе моделирования движения электронов. Приводимые значения среднего пути получены по экспериментальным величинам ионного и электронного токов манометра при известном давлении газа [3].

Компьютерное моделирование движения электронов выполнено нами ранее [7] для идеализированной конструкции орбитрона, в которой время удержания принципиально не ограничено. В настоящей работе представлены результаты моделирования с учетом локального искажения электрического поля пониженным потенциалом катода (в сравнении с потенциалами близлежащих точек). Установлены зависимости времени удержания от параметров электронной ловушки. Выявлен физический механизм её функционирования при большом времени удержания.

Объект исследования

В литературе [1, 3, 8, 9] представлен ряд орбитронов, отличающихся конструкцией, геометрическими размерами и параметрами электрического режима. В качестве объекта исследования выбран высокочувствительный прибор, для которого сравнительно подробно указаны размеры и потенциалы электродов [3].

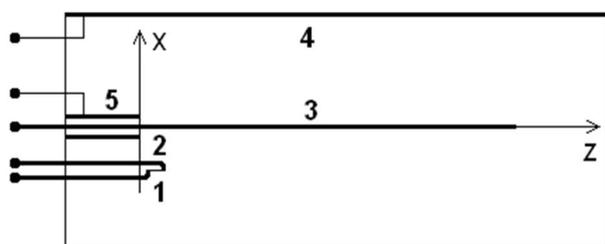


Рисунок 1 – Электродная система орбитрона:
1 – катод (+30 В), 2 – экран (+31 В),
3 – анод (+540 В), 4 – коллектор ионов (0 В),
5 – рефлектор (– 55 В)

Электродная система орбитрона (рисунок 1) содержит два концентрических цилиндра (внутренний – анод 3, наружный – коллектор ионов 4), малогабаритный термоэлектронный катод 1 вблизи края цилиндров, экран 2, обеспечивающий локальную экранировку катода от потенциала анода и являющийся одновременно токоподводящей траверзой катода, рефлектор 5, выполненный в виде небольшого концентрического с анодом цилиндра, расположенного вблизи катода.

В компьютерную модель заложены следующие размеры (в мм) деталей конструкции [3]. Диаметр анода 0,24, длина 100 (от начала коор-

динат X – Z на рисунке 1). Диаметр коллектора ионов 50, длина 115 (от начала координат). Диаметр рефлектора 4, длина 15. Диаметр катода 0,025, длина 4. Координаты центра катода (точки старта электрона) $X = -8$, $Y = 0$, $Z = 4$. Диаметр экранирующей траверзы 0,5, длина 6 (по оси Z от начала координат), расстояние центра траверзы по оси X от начала координат 7.

Катод прибора представляет собой отрезок тонкой (25 мкм) проволоки из торированного вольфрама. Коллектор ионов выполнен путем нанесения тонкой прозрачной проводящей пленки на внутреннюю поверхность стеклянной вакуумной оболочки прибора. Такая же пленка на поверхности кварцевой нити, расположенной по оси прибора, является анодом. Используемая технология обеспечивает малую металлоемкость и низкий уровень газовой выделенности датчика.

Между анодом и коллектором ионов приложено напряжение 540 В, потенциал коллектора нулевой. Потенциал катода +30 В, мощность накала ~ 0,1 Вт, ток эмиссии ~ 1 мкА. Потенциалы экрана и катода почти равны, поскольку напряжение накала не превышает 1 В. Потенциал рефлектора варьировался от нуля до – 55 В.

Под действием электрического поля между анодом и коллектором ионов электроны, эмитированные катодом, удаляются от него по спиралевидной траектории (вдоль оси Z с вращением вокруг нее). Краевое поле вблизи противоположного катода конца анода изменяет направление осевой составляющей скорости на противоположное [7]. Далее аналогичный эффект происходит в прикатодной области. В результате возникает спирально-челночное движение электронов, в ходе которого электроны до попадания на анод проходят расстояние, на несколько порядков превышающее габариты прибора [1].

Часть электронов на своем пути ионизирует молекулы остаточных газов. Ионы уходят на коллектор. Попадание электронов на него предотвращается тем, что потенциал катода выше, чем коллектора. Характеристики орбитрона представлены в таблице и на рисунке 2.

Таблица

Параметры	Потенциал рефлектора		
	0	– 28	– 55
Средний путь электронов, м	42	70	92
Ионный ток при электронном токе 1 мкА и давлении 10^{-9} Торр, пА	43	72	94
Пороговая чувствительность, 10^{-12} Торр	14	7,6	5,9

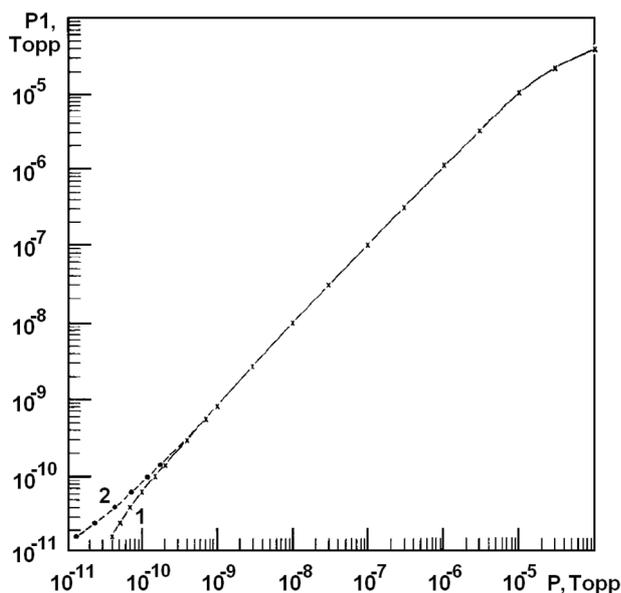


Рисунок 2 – Зависимости показаний орбитрона от давления азота, измеренного манометром Байярда - Альперта без коррекции (1) и с коррекцией (2). Электронный ток орбитрона 1,2 мкА, манометра Байярда - Альперта – 8 мА

Как следует из рисунка 2, орбитрон обеспечивает измерение давления в широком диапазоне (10^{-11} – 10^{-5}) Торр и значительно (почти на 4 порядка) превосходит наиболее распространенный манометр Байярда – Альперта (далее – Б.-А.) по манометрической чувствительности. Не менее важным является то, что электронный ток орбитрона почти на четыре порядка меньше, чем манометра Б.-А. Это позволяет существенно уменьшить собственное газовыделение манометра и, следовательно, повысить достоверность результатов измерения.

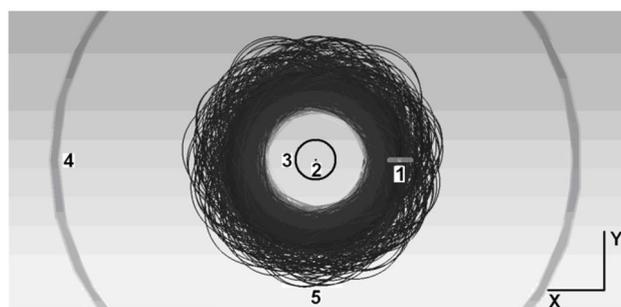
Высокая манометрическая чувствительность обеспечивается за счет большой длины пути электронов в орбитроне. Представленные в таблице средние значения пути рассчитаны как отношения экспериментальных величин ионного тока к току электронов и давлению газа, умноженным на коэффициент 0,1, учитывающий сечение ионизации молекул азота [3].

Результаты моделирования

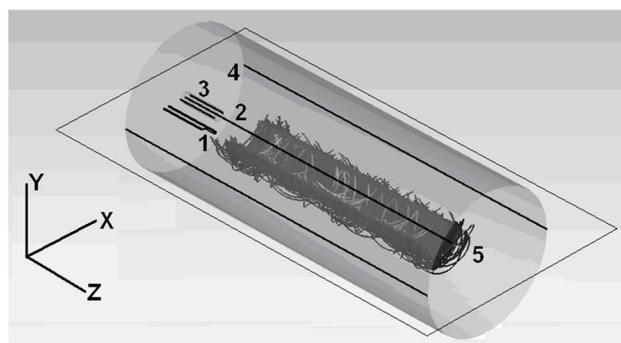
Формирование траектории электрона

Полученная численным моделированием траектория электрона в орбитроне при потенциале рефлектора – 52 В представлена на рисунке 3.

Траектория соответствует временному интервалу около 40 нс с большим (порядка 4000) числом витков челночной спирали. Максимальное время ограничено выбранным числом шагов расчета (10^7). За это время электрон на анод не уходит.



а



б

Рисунок 3 –Траектория электрона в орбитроне в плоскости X – Y (а) и сечение трехмерного изображения прибора (б): 1 – катод, 2 – анод, 3 – рефлектор, 4 – коллектор ионов, 5 – витки челночной спирали

Для выявления деталей процесса представлены (рисунок 4) графики зависимостей основных параметров траектории от времени на начальном (до 250 нс) отрезке. В число параметров входят координаты частицы, её расстояние до оси анода (R – условный радиус траектории) и энергия электрона W .

Из представленных данных следует, что на наблюдаемом отрезке времени 250 нс укладывается около 22 периодов изменения координат X и Y в диапазоне ± 10 мм. Следовательно, электрон совершает 22 оборота вокруг анода с длительностью периода около 10 нс. Координата Z при этом изменяется с периодом приблизительно 50 нс в диапазоне (4 – 100) мм. Траектория электрона – челночная спираль, содержащая около пяти витков за период изменения осевой координаты. Расстояние электрона от анода (радиус R на рисунке) в процессе движения изменяется в интервале (4 – 11) мм, что существенно меньше радиуса коллектора ионов (25 мм). Отсюда следует, что проекция траектории электрона на плоскость X – Y имеет «лепестковую» форму. Соответствующим образом изменяется и кинетическая энергия электрона W (20 – 180) эВ. При среднем значении радиуса условно круговой траектории 8 мм (см. рисунок 4) и длине окружности около 50 мм азимутальная длина траектории электрона за

2,5 витка составляет около 125 мм, что приблизительно равно длине анода (100 мм).

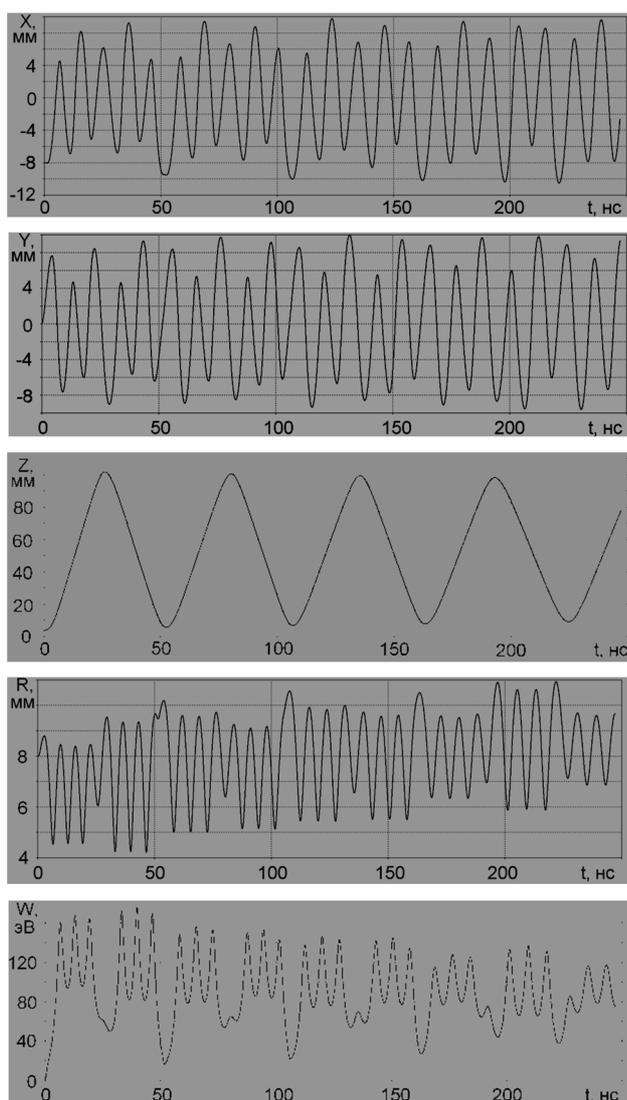


Рисунок 4 – Зависимости координат электрона X, Y, Z, радиуса его траектории и кинетической энергии частицы от времени на начальном участке движения

Пространственный шаг спирали имеет сравнительно большое значение (около 30 мм). Это объясняется тем, что в манометрическом датчике электрон вводится в орбитронную ловушку способом, в котором начальные значения азимутальной и осевой составляющих скорости задаются параметрами локальной катодной области с пониженными электростатическими потенциалами точек пространства (в сравнении с потенциалами близлежащих точек). Эта область именуется далее – потенциальная яма. Заметим, что такая яма отличается от энергетической потенциальной ямы тем, что электрон при входе в неё тормозится, а при выходе из неё ускоряется, а не расходует энергию. Параметры ямы иллюстрирует рисунок 5.

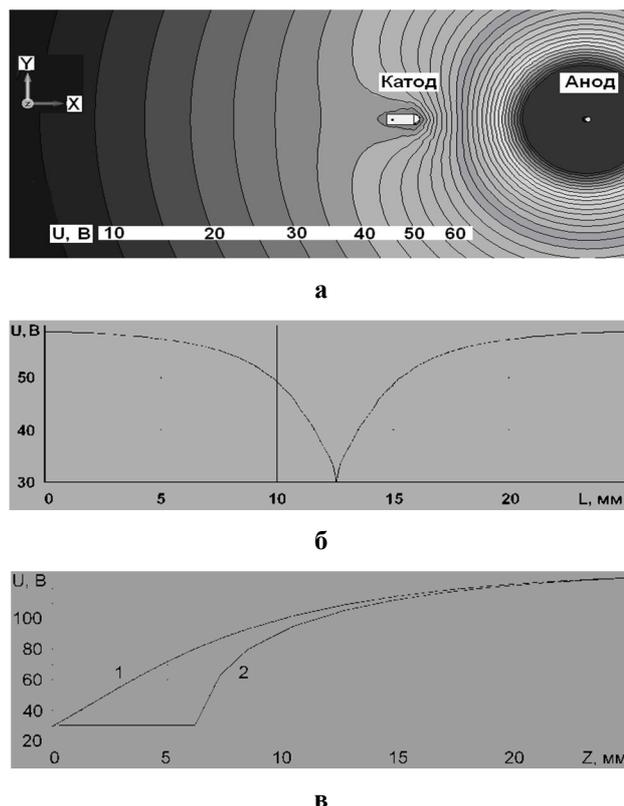


Рисунок 5 – Потенциальная яма катода: а – эквипотенциальные линии (интервал 5 В, Z=4); б – распределение потенциала вдоль полуокружности, проходящей через точку старта электрона; в – распределение потенциала вдоль осевых прямых, проходящих через точки $X_1 = 8$ (1) и $X_2 = -8$ (2) при $Y = 0$

Из рисунка 5, а следует, что катод, имеющий потенциал 30 В, окружен замкнутой областью с потенциалом до 35 В, что подтверждает эффективное действие экранирующей траверзы, предотвращающей существенное ускорение электронов к аноду в радиальном направлении. Электроны ускоряются в азимутальном направлении, в котором, как следует из рисунка 5, б, глубина и ширина потенциальной ямы равны соответственно ~ 30 В и ~ 15 мм. Почти с такой же интенсивностью они ускоряются и в осевом направлении, что подтверждают кривые осевого распределения потенциала (рисунок 5, в) вдоль линий, проходящих через точку старта электрона (1) и через зеркально отображающую её точку с противоположной стороны анода (2), где отсутствует локальная потенциальная яма. Заметим, что сразу после старта ($Z = 4$ мм) электроны вдоль оси анода не ускоряются, поскольку потенциал увеличивается лишь после $Z = 6$ мм (рисунок 5, в, кривая 2). Относительно большой шаг спирали объясняется значительным осевым ускорением, получаемым частицами в процессе выхода из потенциальной ямы.

Механизм захвата электрона

Представленные на рисунке 5 данные позволяют сформулировать суть первого этапа улавливания электрона орбитронной ловушкой: в локальной потенциальной яме катода электроны ускоряются в азимутальном направлении и приобретают скорость, достаточную для движения вокруг анода. В наиболее простом случае круговой траектории сила притяжения потенциалом анода равна центробежной силе и радиус траектории не изменяется [1]. В общем случае радиус изменяется, но не может стать меньше радиуса анода, что эквивалентно «радиальному захвату» частицы ловушкой. Условие захвата детально рассмотрено в [1, 3, 11].

Покидая потенциальную яму, электроны получают не только азимутальную, но и осевую составляющую скорости, удаляются по спирали от катода и вновь возвращаются к нему после «отражения» вблизи противоположного конца анода (рисунок 4). Если электрон попадет в область потенциальной ямы катода, он может уйти на траверзы или резко изменить направление движения и попасть на анод. В исследуемом приборе этого не происходит. Можно считать, что в нем происходит второй этап улавливания – «осевой захват» электрона ловушкой, в результате которого обеспечивается многократное (тысячи периодов) возвратно-поступательное (челночное) осевое движение.

Физический механизм осевого захвата в литературе детально не раскрывается. Полученные в настоящей работе результаты моделирования позволяют устранить этот пробел. Механизм заключается в том, что в процессе катодного осевого поворота электрона за счет тормозящей напряженности электрического поля [7] он проходит через локальную катодную область, в которой потенциалы ниже, чем в окружающем пространстве (кривая 2 на рисунке 5 ниже кривой 1). В результате компонента скорости по оси Z уменьшается (с увеличением других компонент).

Нахождение электрона вблизи потенциальной ямы при осевом повороте в катодной области подтверждают зависимости его координат от времени (рисунок 4): минимумы координаты Z соответствуют координатам точки старта частицы $X = -8$ мм и $Y = 0$. Накопление тормозящих воздействий при пересечениях ямы проявляется в том, что за четыре осевых периода минимальное значение координаты Z увеличивается от 4 мм до 10 мм, а максимальное уменьшается от 102 мм до 98 мм. Амплитуда колебаний координаты уменьшается, поскольку снижается осевая

составляющая скорости, и частица при повороте в тормозящем поле проходит меньший путь.

Уменьшение амплитуды с дальнейшим течением времени, можно считать, прекращается, когда минимальные значения осевой координаты стабилизируются с небольшими колебаниями в диапазоне (12 – 14) мм (рисунок 6). Это происходит приблизительно через 1,5 мкс и продолжается до максимального времени расчета около 40 мкс (на рисунке показано только до 5 мкс для удобства наблюдения).

Физически стабилизация минимальных значений осевой координаты в указанном диапазоне связана с тем, что электрон практически больше не пересекает локальную потенциальную яму катода. Из рисунка 5 следует, что при $Z = (12 - 14)$ мм разность потенциалов между кривыми 1 и 2 в несколько раз меньше, чем при $Z = 8$ мм, соответствующем первому катодному повороту. Одновременно приблизительно в такой же степени уменьшается протяженность части траектории, которая пересекает яму. Поэтому эффект осевого торможения падает примерно на порядок и становится пренебрежимо малым.

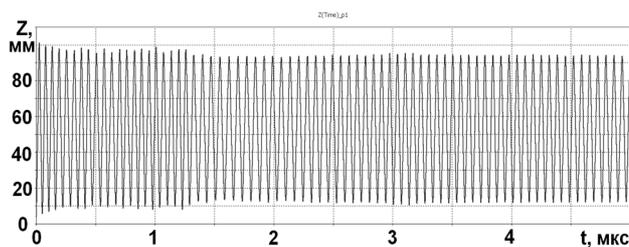


Рисунок 6 – Зависимость осевой координаты электрона от времени движения

Таким образом, результаты моделирования подтверждают осевой захват электрона орбитронной ловушкой. Условие захвата можно сформулировать следующим образом: первый цикл спирально-челночного движения электрона должен содержать целое число оборотов вокруг анода и заканчиваться пересечением потенциальной ямы катода с небольшим (около 5 мм) отступом от точки старта частицы в сторону увеличения осевой координаты. Увеличивать или уменьшать число оборотов в цикле можно увеличением (уменьшением) потенциала катода, длины анода, а также уменьшением (увеличением) анодного напряжения.

Третий этап физического механизма функционирования электронной ловушки в орбитронном манометре заключается в значительном (в несколько раз) уменьшении интервала изменений радиуса спирально-челночной траектории, что можно назвать её азимутальным нивели-

рованием. Своеобразное «причесывание» траектории демонстрирует временная зависимость радиуса траектории (расстояния частицы от оси Z), представленная на рисунке 7.

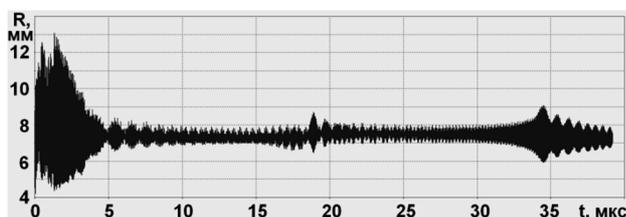


Рисунок 7 – Зависимость расстояния электрона от оси Z (радиуса траектории R) от времени движения

Из рисунка следует, что радиус траектории на начальном участке изменяется в интервале (4,5 – 13) мм. Приблизительно через 3 мкс интервал значительно уменьшается и после 10 мкс становится равным (7 – 8) мм. Можно считать, что на этом этап азимутального нивелирования траектории завершается, поскольку радиус изменяется относительно среднего значения не более чем на 7 % и траектория становится практически круговой. Это повышает вероятность длительного удержания частицы в ловушке и устойчивость к различным возмущениям, проявившимся, например, на рисунке 7 при значениях времени 20 мкс и 35 мкс.

Как показало моделирование, полная энергия электронов изменяется в достаточно узком интервале (60 – 80) эВ. Такая энергия вполне достаточна для эффективной ионизации молекул газа. Средние значения параметров траектории в установившемся режиме (для 10 мкс): время одного витка спирали – 10,1 нс, период осевого движения частицы – 68,8 нс, число витков за период – 6,82.

Для выявления физических процессов, приводящих к нивелированию траектории, необходимы дополнительные исследования. Можно лишь отметить, что при нивелировании энергия, связанная с составляющей скорости по оси X, частично переходит в энергию, связанную с составляющей скорости по оси Y, и наоборот. Переход, наиболее вероятно, происходит при азимутальных поворотах вблизи анода, когда полная энергия частицы значительно увеличивается с уменьшением радиуса (рисунок 4), но всегда остается равной половине произведения суммы квадратов составляющих скорости по осям и массы частицы.

Переход не связан с локальной потенциальной ямой катода, поскольку он происходит и без неё (в идеальном случае [7]).

Влияние потенциала катода

Представленные выше результаты численного моделирования получены для электрического режима, в котором обеспечиваются наилучшие вакуумметрические характеристики (рисунок 2). Целесообразно расширить направление исследования путем моделирования процессов в режимах, отличающихся от оптимального. Одним из основных параметров режима является величина потенциала катода, которая определяет ускорение электрона после старта по азимутальному и осевому направлениям, а следовательно, – последующую траекторию частицы. В литературе всегда отмечается необходимость подбора оптимального значения потенциала [1 – 4], но данные о зависимости манометрической чувствительности от потенциала не приводятся или представляются для нехарактерных конструкций орбитрона (например, [9, 10]). В связи с этим названная зависимость изучалась для исследуемого орбитрона с помощью численного моделирования движения электрона. В качестве величины, характеризующей чувствительность, использовалось время удержания частицы в ловушке.

В оптимальном режиме при потенциале катода 30 В это время полагалось равным времени наблюдения (10^7 временных шагов расчета), поскольку электрон не покидал ловушку. Однако, как будет показано далее, при небольшом (0,1 В) отклонении потенциала время удержания значительно меньше времени наблюдения и может быть использовано для характеристики степени снижения чувствительности. Зависимость времени удержания от потенциала катода представлена на рисунке 8.

Из рисунка следует, что в интервале потенциалов катода (30 – 35) В (область **B**) обеспечивается время удержания больше (37 – 40) мкс. За такое время электрон совершает приблизительно 4000 оборотов и проходит путь порядка 200 м, что в основном соответствует экспериментальным значениям, приведенным ранее в таблице.

Сравнительно большая ширина интервала имеет важное практическое значение, поскольку она позволяет эффективно улавливать электроны, несмотря на то, что потенциалы точек прямокального катода существенно (до 0,5 В) отличаются между собой, а осевые координаты стартовых точек разнятся на (0,5 – 1) мм.

При оптимальном значении потенциала 30 В первый катодный поворот электрона, имеющий важное значение для осевого захвата частицы, происходит почти сразу после окончания 5-го витка спирали в непосредственной близости от

катода (рисунок 4). Как показал анализ траекторий, с уменьшением потенциала катода условная точка окончания 5-го витка ($Y = 0$) приближается к катоду по оси Z . Причиной этого является увеличение глубины локальной потенциальной, которое вызывает рост осевой составляющей скорости, приобретаемой электроном по мере выхода из ямы. Одновременно возрастает и азимутальная составляющая скорости, но время одного оборота частицы вокруг оси остается приблизительно постоянным, поскольку увеличивается радиус траектории.

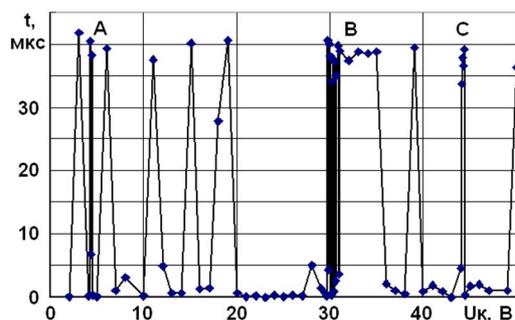


Рисунок 8 – Зависимость времени удержания от потенциала катода: область

А – первый катодный поворот происходит после четырех витков спирали, В – после пяти, С – после шести

В результате приближения точки поворота к катоду тормозящее воздействие в процессе пересечения ямы становится больше оптимального, условия осевого захвата ухудшаются и время удержания при уменьшении потенциала катода до 20 В резко падает (рисунок 8).

При дальнейшем снижении потенциала число витков спирали, укладываемых на длине анода до первого катодного поворота, становится близким к четырем. В соответствии с изложенным выше механизмом осевого захвата следует ожидать, что его эффективность увеличится. Результаты моделирования подтвердили это ожидание: время удержания в области *A* на рисунке 8 возросло до (38,1 – 41,7) мкс при уменьшении потенциала до (2 – 6) В. Траектории электронов вблизи точки первого катодного поворота после 4-го витка хорошо коррелируют с траекториями при повороте после 5-го витка.

Увеличение потенциала катода до (44,1 – 44,4) В приводит к тому, что первый катодный поворот происходит после 6-го витка спирали. Здесь также наблюдаются высокие значения времени удержания (33 – 39) мкс (область *C* на рисунке 8). Анализ траекторий показывает, что изложенный выше механизм осевого захвата частицы в основном функционирует, что проявляется, например, в осевом «сжатии» спирали в установившемся режиме. Однако стабилизация затрудня-

ется тем, что при первом катодном повороте электрон проходит вблизи анода и пересекает лишь край потенциальной ямы катода. В результате действие осевого торможения оказывается малым, и монотонное уменьшение амплитуды осевых колебаний происходит через более длительное (~ 3 мкс) время.

Обнаруженные особенности процессов в случае, когда первый катодный поворот происходит после 6-го витка, позволяют предположить существование механизма осевого захвата электрона, в основе которого лежит значительное уменьшение радиуса траектории (меньше расстояния анод-катод). В этих условиях осевое перемещение частицы обеспечивается без существенного взаимодействия с потенциальной ямой, что должно приводить к эффективному улавливанию электронов.

Возможность стабилизации движения при малом радиусе траектории, вероятно, связана с описанной выше стадией азимутального нивелирования траектории. Такая стабилизация может являться причиной появления больших значений времени удержания при значениях потенциала катода 50 В, 39 В и в интервале (10 – 20) В. Для более полного выявления механизма процесса необходимы дополнительные исследования.

Основные результаты

Проведено численное моделирование движения электронов в характерном ионизационном вакуумметрическом датчике орбитронного типа (диаметр 50, длина анода 100 мм [3]) при спирально-челночной траектории частиц с временем на виток около 10 нс, числом витков порядка 4000 и длиной пути до 200 м.

Представлены графики зависимостей от времени на начальном (до 250 нс) отрезке координат электрона, его расстояния до оси анода (условный радиус траектории) и энергии, которые показывают, что в рабочем режиме орбитрона частица движется по спирально-челночной траектории с радиусом (4 – 11) мм, периодом движения вдоль анода около 50 нс, шагом спирали ~ 30 мм и энергией (20 – 180) эВ.

Определены параметры локальной потенциальной ямы катода, которые задают начальные значения азимутальной и осевой составляющих скорости. Глубина ямы равна (30 – 50) В, ширина (10 – 15) мм (в зависимости от направления).

Раскрыт физический механизм удерживания электрона орбитронной ловушкой. На первом этапе (радиальный захват) частица, покидая потенциальную яму катода, приобретает азимутальную составляющую скорости, предотвращающую её попадание на анод. На втором (осевой

захват) – электрон, пересекая область потенциальной ямы катода, тормозится, что удаляет точку последующих поворотов частицы от катода и снижает вероятность её взаимодействий с ямой, приводящих к уходу на электроды. Третий этап (азимутальное нивелирование) проявляется в значительном (приблизительно на порядок, до 7 %) уменьшении амплитуды колебаний радиуса траектории электронов.

Численным моделированием определена зависимость времени удержания электронов в орбитронной ловушке от потенциала катода, который определяет начальные составляющие скорости по азимуту и по оси. Большие значения времени зафиксированы при значениях потенциала (2 – 6) В, (30 – 35) В и (44,1 – 44,4) В, что соответствует случаям первого катодного поворота после четырех, пяти и шести витков спирали. Это подтверждает достоверность изложенного выше механизма осевого захвата частицы.

Библиографический список

1. Mourad W. G., Pauly T., Herb R. G. Orbitron Ionization Gauge. Review of Scientific Instruments. 1964. Vol 35, Num 6. P. 661 – 665.
2. Востров Г. А., Розанов Л. Н. Вакуумметры. Л.: Машиностроение, 1967. 236 с.
3. Meyer E. A., Herb R. G. Performance Study of the Orbitron Ionization Gauge. Journal of Vacuum Science & Technology. 1967. Vol 4, Num 2. P. 63 – 70.
4. Gosselin Charles M., Beitel George A., and Smith Alphonsa. Study of Low Pressure Application of the Orbitron Ion Gauge. Journal of Vacuum Science & Technology. 1970. Vol 7, Num 1. P. 233 – 236.
5. Perry R. H., Cooks R. G., Noll R. J. Orbitrap Mass Spectrometry: Instrumentation, Ion Motion and Application. Wiley Periodicals, Inc., Mass Spec Rev. 2008. Vol 27. P. 661 – 699.
6. Makarov A. A. Electrostatic axially harmonic orbital trapping: A high-performance technique of mass analysis. Anal Chem. 2000. Vol 72. P. 1156 – 1162.
7. 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.
8. Blechschmidt D. Low pressure limitation of the orbitron ionization gauge. // Japanese Journal of Applied Physics. January 1974/ P. 1 – 6.
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, Num. 2. P. 163 – 167.
10. 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, Num. 8/9. P. 333 – 336
11. Turner D. J. Electrostatic ionization pumps and gauges – criterion for charged particles orbiting in a logarithmic field. Vacuum. 1964. Vol. 14. P. 477 – 478.

UDC 621. 387.322

DESIGN AND RESEARCH OF ORBITRON IONIZATION MANOMETRIC CONVERTER

V. K. Bazylev, PhD (technical sciences), associate professor, RSREU, Ryazan; bazylev.v.k@rsreu.ru
 A. M. Zhidkov, post-graduate student, RSREU, Ryazan; zhidkov.a.m.1989@mai.ru
 V. A. Korotchenko, PhD (technical sciences), professor RSREU, Ryazan; ett@rsreu.ru
 V. E. Skvortsov, General manager, MELP, Zaprudnya; videoelektronic@yandex.ru
 T. N. Andreasyan, student, RSREU, Ryazan; tigran2911@mail.ru

*An electrode system was developed, an electric mode was determined, and experimental sample of ionization manometric converter of orbitron type with low (up to 300 V) anode voltage and high vacuum sensitivity was performed. Using numerical simulation, it was shown that at cathode potentials (10 – 50) V the characteristic values of retention time of electrons in orbitron trap are (0,1 – 1) μ s, but there are cases of retention for a long (up to 33 μ s) time. Data about mechanism of electron trap formation and characteristic of electrons motion are presented. It is shown that the steady-state mode of motion occurs approximately after 5 μ s. In the interval (5 – 33) μ s, the radius of shuttle spiral is stabilized on the level $6 \pm 0,3$ mm, and the energy is 95 ± 7 eV. Single pass time of the electron around anode is 6,5 ns, the axial oscillations period is 120 ns, lead of spiral is 4,6 mm, number of rotations is about 5000, path length is about 200 m. The ability of the orbitron developed to record gas pressure in the range (5 – 35) μ Torr at an average value of orbitron gauges sensitivity equal to 2200 Torr^{-1} , which is approximately two orders of magnitude greater than for the widely distributed PMI-2 ionization manometer has been experimentally proved. **The aim of the work** is to improve ionization vacuum sensors by increasing their manometric sensitivity, reducing the level of gassing in sensors and reducing ionic pumping of gases during the operation of gauges.*

Key words: *vacuum gauge, ionization manometer converter, orbitron vacuum sensor, computer modelling, motion of electrons.*

DOI: 10.21667/1995-4565-2018-63-1-133-141

References

1. **Vostrov G. A., Rozanov L. N.** Vakuummety (Vacuum gauge) // Leningrad.: Mashinostroenie, 1967, 236 p. (in Russian).
2. **Mourad W. G., Pauly T., Herb R. G.** Orbitron Ionization Gauge. Review of Scientific Instruments. 1964. Vol 35, Num 6. P. 661 – 665.
3. **Meyer E. A., Herb R. G.** Performance Study of the Orbitron Ionization Gauge. Journal of Vacuum Science & Technology. 1967. Vol 4, Num 2. P 63 – 70.
4. **Gosselin Charles M., Beitel George A., and Smith Alphonsa.** Study of Low Pressure Application of the Orbitron Ion Gauge. Journal of Vacuum Science & Technology. 1970. Vol 7, Num 1. P 233 – 236.
5. **Korotchenko V. A., Bazylev V. K., Skvortsov V. E., Zhidkov A. M.** Computer modelling of motion of electrons in an orbitron vacuum sensor // Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta. 2016. no. 58, pp. 146 – 152 (in Russian).
6. **Korotchenko V. A., Bazylev V. K., Skvortsov V. E., Zhidkov A. M., Andreyan T. N.** Physical mechanism operation of orbitron electronic trap in ionization gauge // Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta. 2017. no. 61, pp. 61 – 67 (in Russian).
7. **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, Num. 2. P.163 – 167.