

Численное исследование магнитного электроразрядного датчика низкого давления

* А. И. Жакин, А. А. Гримов, А. А. Луценко, В. А. Пиккиев

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Юго-Западный государственный университет», ул. 50 лет Октября, 94, г. Курск, 305040, Россия, * e-mail: zhakin@mail.ru

Излагаются результаты численного анализа ионизационных процессов в азотно-кислородной плазме низкого давления ($1 \text{ Па} < p < 10^{-3} \text{ Па}$) в скрещенных электрическом и магнитном полях. Исследуются траектории и столкновительные ионизационные процессы, на основании которых рассчитывается размер ионизационной зоны. Вычисленные траектории и размер ионизационной зоны позволяют выбрать оптимальные характеристики датчика.

Ключевые слова: ион, электрон, датчик, ионизация, давление, численное моделирование.

УДК 537.58

ВВЕДЕНИЕ

Одним из эффективных методов измерения низкого давления является электроразрядный датчик [1–4] (рис. 1). Проблема модификации таких преобразователей (компактизации и повышение точности измерения) требует детального изучения ионизационных процессов в азотно-кислородной плазме. Работа является продолжением исследований [5–7] с целью дальнейшего анализа ионизационных процессов на основе экспериментальных данных. Основная задача данной работы – расчет величины зоны ионизационных процессов в азотно-кислородной плазме, на основе которой определяются оптимальные характеристики датчика.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Расчеты будем проводить на примере преобразователя ПММ-32, в котором используются скрещенные электрические магнитные поля (рис. 1а).

Выбор модели ионизационных процессов в газе основывается на сравнении геометрических размеров ионизационной области со средней длиной свободного пробега заряженных частиц (электронов и ионов) $l_c = 1/(\pi d^2 n)$, где d , n – диаметр и частичная концентрация ионизируемых молекул [6]. Оценивая n из уравнения состояния идеального газа $p = nkT$ (k – постоянная Больцмана) и принимая $p \leq 1 \text{ Па}$, $d = 40 \text{ нм}$ и $T \sim 300^\circ \text{ К}$ (комнатная температура), получим $l_c \geq 3 \text{ см}$. Концентрации частиц n и длины свободного пробега l_c при различных давлениях $p = 1 \text{ Па}$ составляют $n = 2,5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, $l_c = 3,3 \text{ см}$, а при $p = 10^{-2} \text{ Па}$ соответственно $n = 2,5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$, $l_c = 3,3 \text{ м}$. Эти данные показывают, что при малых давлениях $p < 0,1 \text{ Па}$ длина свободного пробега может значительно превышать линейные

размеры ионизационной области датчика, поэтому в таких случаях движение электронов можно рассматривать в бесстолкновительной задаче.

Для расчета характеристик столкновительных процессов (частоты столкновений, частоты синхротронных излучений и т.д.) можно принять упрощенную схему на основе экспериментальных данных. Эксперименты показали, что зона наиболее яркого свечения расположена вблизи центрального электрода (анода) и имеет толщину порядка его диаметра (рис. 2). Поэтому на первом этапе численные расчеты можно упростить, взяв в качестве модели плоскую задачу (2D модель).

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАЕКТОРИЙ И ЗОНЫ ИОНИЗАЦИИ В 2D МОДЕЛИ

В силу того что энергию, необходимую для ионизации нейтральных молекул, заряды приобретают за счет электрического поля на длине свободного пробега, необходимо исследовать закономерности движения зарядов на длине l_c . Ясно, что основные закономерности можно проследить на примере плоской задачи. Вводя декартовую систему координат (x, y) с центром на оси симметрии, получим следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned} m_e d^2 x / dt^2 &= -e \partial \Phi / \partial x + e B dy / dt, \\ m_e d^2 y / dt^2 &= -e \partial \Phi / \partial y - e B dx / dt, \end{aligned} \quad (1)$$

где m_e , e – масса и заряд зарядов, $\Phi = -U_* \ln(r/R_2)$ – потенциал электрического поля, $U_* = U / \ln(R_2/R_1)$, U – напряжение на электродах, $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ – радиальное расстояние, B – магнитная индукция, t – время.

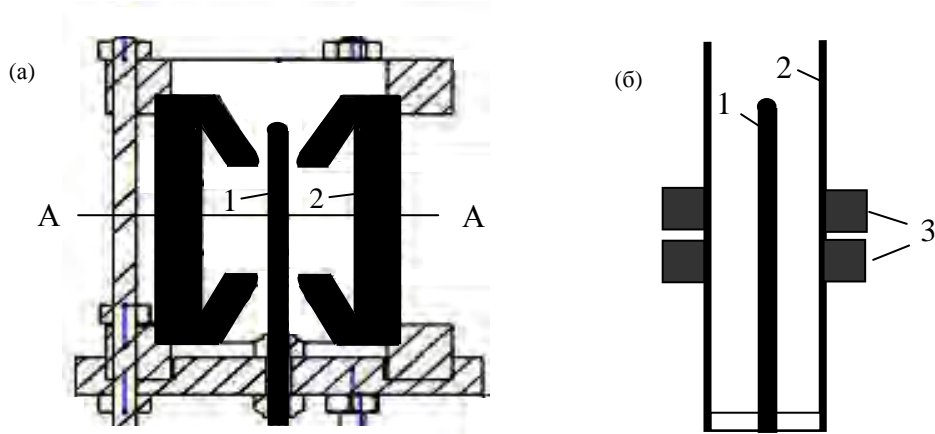


Рис. 1. Схемы электроразрядных датчиков: 1 – анод; 2 – катод (магнитопровод); (а) ПММ-32 [1–3]; (б) датчик с кольцевыми магнитами 3 [4].

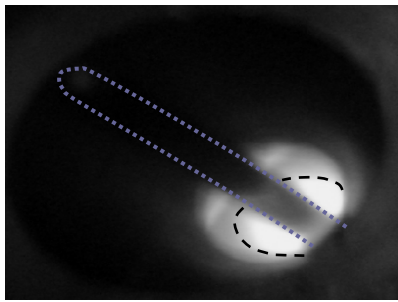


Рис. 2. Свечение внутри электроразрядного датчика ПММ-32. Анод и зона наиболее яркого свечения околнурены.

Начальные условия к системе (1) запишем в виде:

$$\begin{aligned} t = 0: \quad x &= r_0, \quad dx/dt = V_T \cos \varphi_0, \\ y &= 0, \quad dy/dt = V_T \sin \varphi_0, \end{aligned} \quad (2)$$

где r_0 – начальное радиальное расстояние вдоль оси x , φ_0 – начальный угол вылета, отсчитываемый от направления, противоположного оси x , V_0 – начальная тепловая скорость, определяемая как $V_T = \sqrt{8kT / (\pi m_e)}$.

Умножая первое уравнение на dx/dt , второе – на dy/dt и складывая полученные уравнения, получим закон сохранения энергии в виде:

$$\Delta K = U_* \ln((r + \Delta r)/r), \quad K = m_e V^2 / 2, \quad (3)$$

где ΔK – изменение кинетической энергии при смещении заряда с расстояния $r + \Delta r$ от оси симметрии на расстояние r .

Выражение (3) показывает, что рост кинетической энергии зарядов обусловлен только электрическим полем, тогда как магнитное поле влияет лишь на форму траекторий, то есть на частоту столкновений зарядов с нейтральными атомами, именно на ионизационные процессы. В силу сложности аналитического решения системы (1) исследование траекторий будем производить численным методом.

Запишем систему (1) в безразмерном виде, выбрав в качестве безразмерных переменных следующие величины времени t : $\tau_e = r_0 \sqrt{m_e / (|e|U_*)}$, координат x , y : r_0 . Так как величина $\sqrt{m_e / (|e|U_*)}$ определяет характерную скорость движения под действием электрического поля, то τ_e – порядок времени приближения заряда к центральному электроду. В случае отрицательных зарядов уравнения (1) в безразмерном виде (в прежних обозначениях) запишем как:

$$\begin{aligned} d^2 x / dt^2 &= -x / r^2 + A_H dy / dt, \\ d^2 y / dt^2 &= -y / r^2 - A_H dx / dt, \end{aligned} \quad (4)$$

$$A_H = Br_0 \sqrt{|e| / (m_e U_*)}.$$

Обратим внимание на то, что вид траекторий зависит только от безразмерного параметра A_H . Поэтому его значение будет определять размер ионизационной зоны, то есть полный ток, который, в свою очередь, определяет точность измерений давления при сверхнизких давлениях.

Граничные условия (2) в безразмерных переменных запишем в виде:

$$\begin{aligned} t = 0: \quad x &= 1, \quad dx/dt = V_0 \cos \varphi_0, \quad y = 0, \\ dy/dt &= V_0 \sin \varphi_0, \end{aligned} \quad (5)$$

где $V_0 = V_T \tau_e / r_0$.

После столкновения заряда с нейтральной молекулой уравнение движения будет определяться также уравнениями (4), а граничные условия в i -й точке столкновения (x_i, y_i) в момент времени t_i ($i = 1, 2, 3, \dots$) запишем как:

$$t = t_i : x = x_i, \quad dx_i/dt = V_i \cos \varphi_i, \quad y = y_i, \\ dy/dt = V_i \sin \varphi_i, \quad (6)$$

где V_i – величина скорости заряда после столкновения в лабораторной системе координат, определяемая задачей упругого или неупругого столкновения [7], φ_i – случайный угол рассеяния.

Проведем оценки значений параметров при электронной ионизации нейтральных молекул, принимая следующие значения радиуса внутреннего электрода R_1 (анода), внешнего (катода) R_2 , напряжения на электродах U , температуры T и напряженности магнитной индукции B :

$$R_1 = 0,1 \text{ см}, R_2 = 1 \text{ см}, U = 2 \text{ кВ}, \\ T = 297^\circ\text{К}, B = 0,1 \text{ Тл}. \quad (7)$$

В силу того что масса электрона m_e значительно меньше массы нейтрального атома m_a : $m_e/m_a \leq 5 \cdot 10^{-4}$, скорости электронов незначительно изменяются при столкновениях с нейтралами. При упругих столкновениях скорость электрона после столкновения \vec{v}_e связана со скоростью электрона \vec{V}_{e0} и нейтрала \vec{V}_{a0} до столкновения с учетом $|\vec{V}_{a0}|/|\vec{V}_{e0}| \cong \sqrt{m_e/m_a} \ll 1$, как [8], $\vec{v}_e = V_{e0}\vec{n} + \vec{V}_{a0} \cong V_{e0}\vec{n}$, где \vec{n} – единичный вектор вдоль направления скорости электрона после столкновения в системе центра масс. Таким образом, величина скорости электрона изменяется при столкновении незначительно, изменяется только направление рассеяния электронов. Неупругие столкновения обусловлены процессами ионизации и возбуждением молекул и ионов азотно-кислородного газа. Причем энергия ионизации имеет порядок 15 эВ, а энергия электронов – порядок сотен эВ и выше. Действительно, согласно (3), даже незначительные смещения электрона $\Delta r = 0,1r$ при $U = 2$ кВ дают прирост кинетической энергии 83 эВ, а вблизи центрального электрода энергия электронов имеет порядок 2 КэВ. По этой причине скорость электрона после столкновений изменяется незначительно.

Чувствительность датчика определяется величиной разрядного тока, который, в свою очередь, зависит от размера ионизационной области и числа столкновений зарядов с нейтральными молекулами. Задача усложняется тем, что после столкновений заряды могут рассеиваться на электроды той же полярности, что и полярность

зарядов, что, во-первых, уменьшает частоту столкновений, и, во-вторых, не дает вклад в суммарный ток. Таким образом, основная задача исследования процессов ионизации состоит в определении координатной области и частоты ионизационных столкновений. На основании полученных данных можно выбрать оптимальные величины электрических и магнитных параметров, при которых разрядный ток при заданном давлении в газе будет максимальным.

Решение задачи будем проводить в несколько этапов. Во-первых, в силу разреженности газа будем рассматривать только парные столкновения. Далее из физических соображений следует выбирать напряжение на электродах по возможности максимальным, то есть фиксированным и ограниченным (для предотвращения развития стримерного разряда). Поэтому будем исследовать траектории при варьировании только напряженности магнитной индукции B и начальной скорости зарядов. В заключение исследуем траектории при столкновении заряда с нейтралами, что позволит определить размер и форму ионизационной области и дать оценку частоты столкновений. Вычисления будем проводить для электронов при значениях параметров (7).

Обсудим общие закономерности траекторий электронов после столкновения с нейтралами. Согласно закону сохранения энергии (3), максимальная размерная скорость электронов V_{em} при напряжении $U = 2$ кВ равна $V_{em} = 265 \cdot 10^5$ м/с, то есть увеличивается примерно в 265 раз по сравнению с тепловой (начальной) скоростью. Поэтому после столкновений с нейтралами безразмерная скорость электронов V_{st} изменяется в пределах $0,0088 \leq V_{st} \leq V_m$, где $V_m = 2,3$ – максимальная безразмерная скорость электронов. При этом кинетическая энергия электронов K_e изменяется в пределах $0,025 \text{ эВ} \leq K_e \leq 2 \text{ КэВ}$. Пусть E_i – энергия ионизации нейтралов. Тогда область ионизации $R_1 \leq r \leq R_*$ будет сосредоточена в окрестности центрального электрода, а ее размер R_* определяется из условия $\Delta K_e = |e|\Phi(R_*) = E_i$, где $\Phi(R_*) = -U_* \ln(R_*/R_2)$, что с учетом (3) дает $R_* = R_2 \exp(-E_i/eU_*)$. Отсюда следует, что при типичных $E_i = 15$ эВ и параметрах (7) область ионизации занимает практически все межэлектродное пространство. Поэтому ионизационный ток определяется только углами рассеивания и частотой столкновения электронов.

Перейдем к анализу численного решения задач (4)–(6). Решение уравнений (4) при начальных условиях (5) показало, что при тепловой (безразмерной) начальной скорости $V_0 = 0,0088$

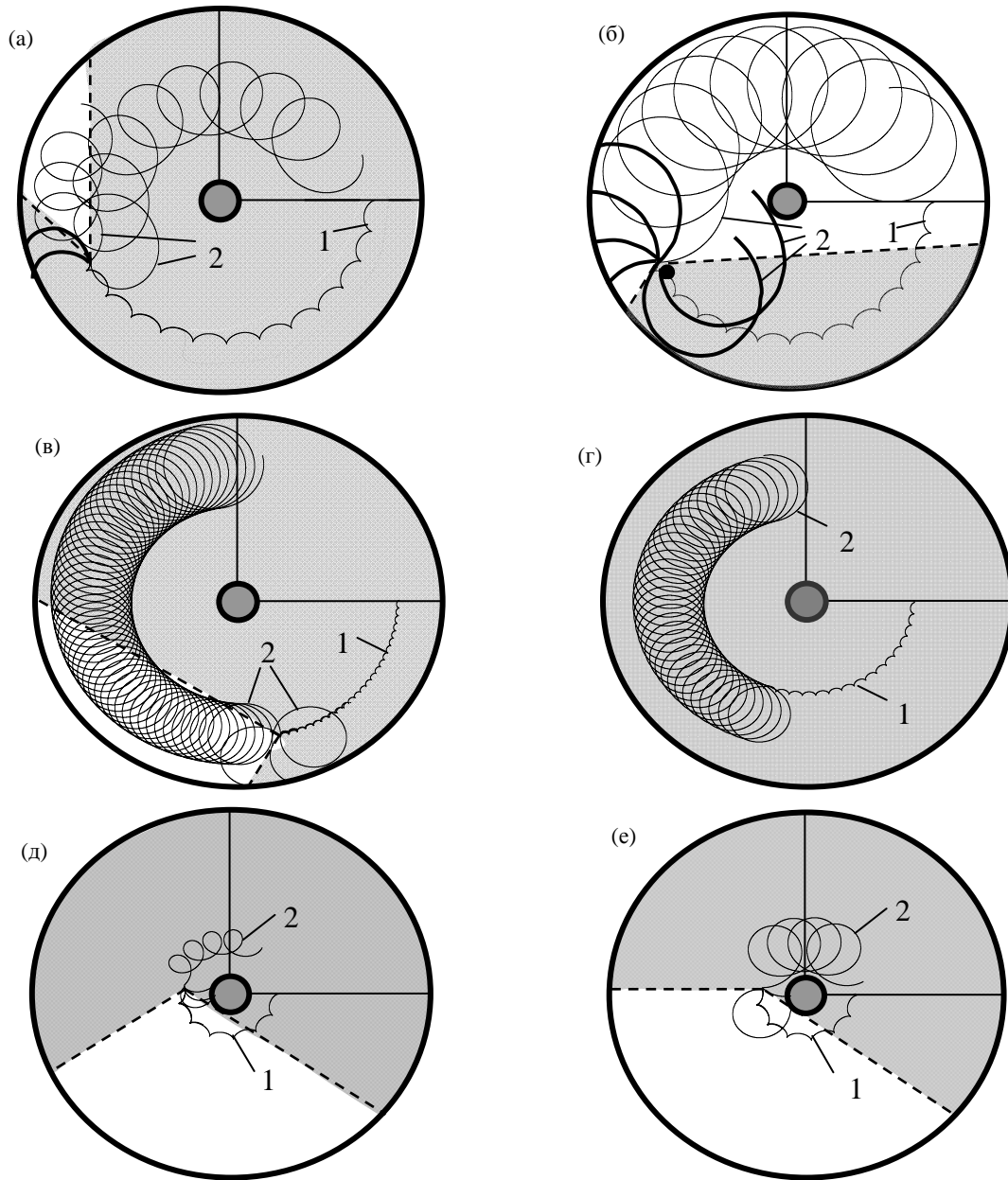


Рис. 3. Траектории движения электронов при различных углах рассеяния; 1 – тепловые; 2 – ионизирующие траектории: (а), (б) – $r_0 = 7,5$ мм, $B = 0,05$ Тл; (а) – $V_{st} = 1,2$; (б) – $r_0 = 7,5$ мм, $V_{st} = 2,3$; (в) – $B = 0,1$ Тл, $V_{st} = 2,3$; (г) – $r_0 = 5$ мм, $B = 0,1$ Тл; (д), (е) – $r_0 = 2,5$ мм, $B = 0,1$ Тл, (д) – $V_{st} = 1,2$; (е) – $V_{st} = 2,3$.

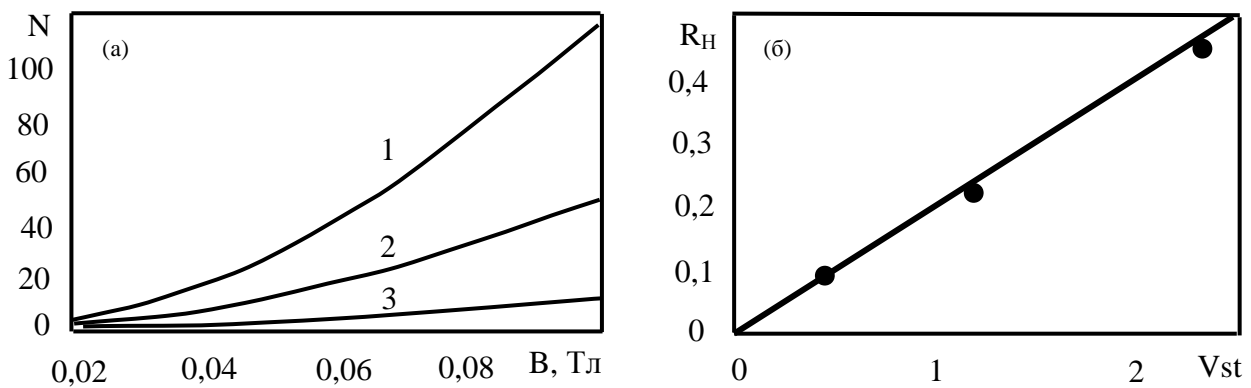


Рис. 4. Зависимости (а) числа пульсаций N от напряженности магнитной индукции B при тепловых скоростях и различных расстояниях r_0 от оси симметрии: 1 – $r_0 = 7,5$ мм; 2 – $r_0 = 5$ мм; 3 – $r_0 = 2,5$ мм; (б) радиуса R_H от скорости рассеяния V_{st} при $B = 0,1$ Тл и $r_0 = 5$ мм.

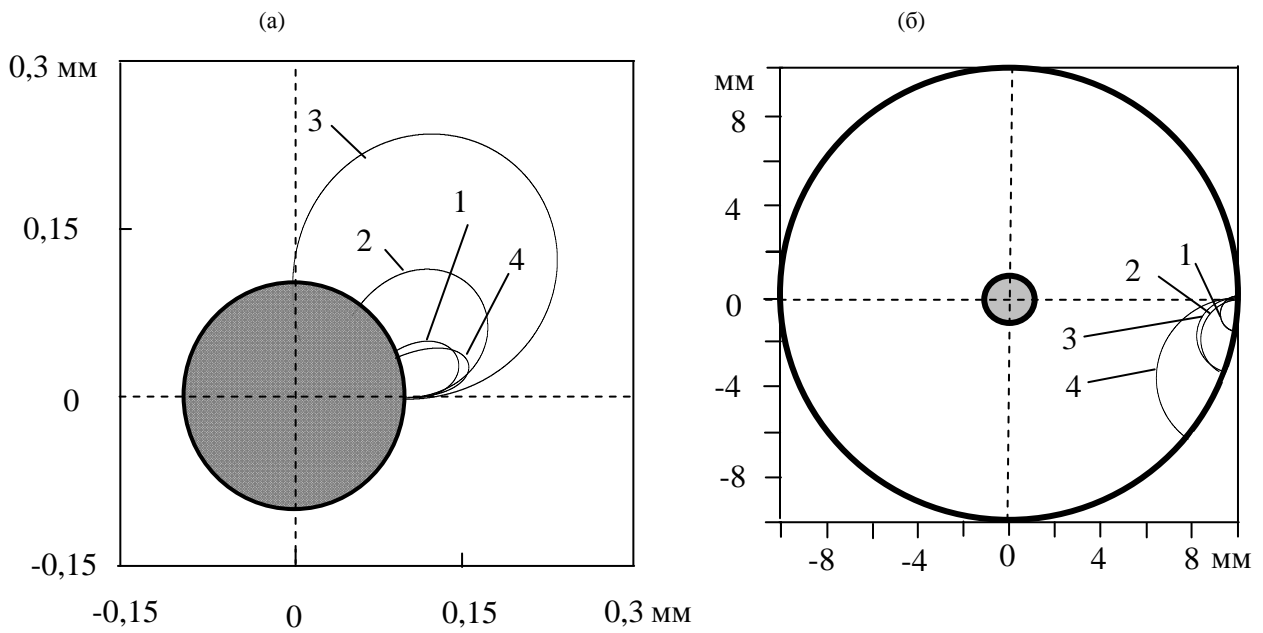


Рис. 5. Траектории электронов при эмиссии с анода (а) $B = 0,1$: 1 – $V_{st} = 1$; 2 – $V_{st} = 1,5$; 3 – $V_{st} = 2,3$; 4 – $B = 0,05$, $V_{st} = 1$; с катода (б) $B = 0,1$: 1 – $V_{st} = 1$; 3 – $V_{st} = 2,3$; $B = 0,05$: 2 – $V_{st} = 1$; 4 – $V_{st} = 2,3$.

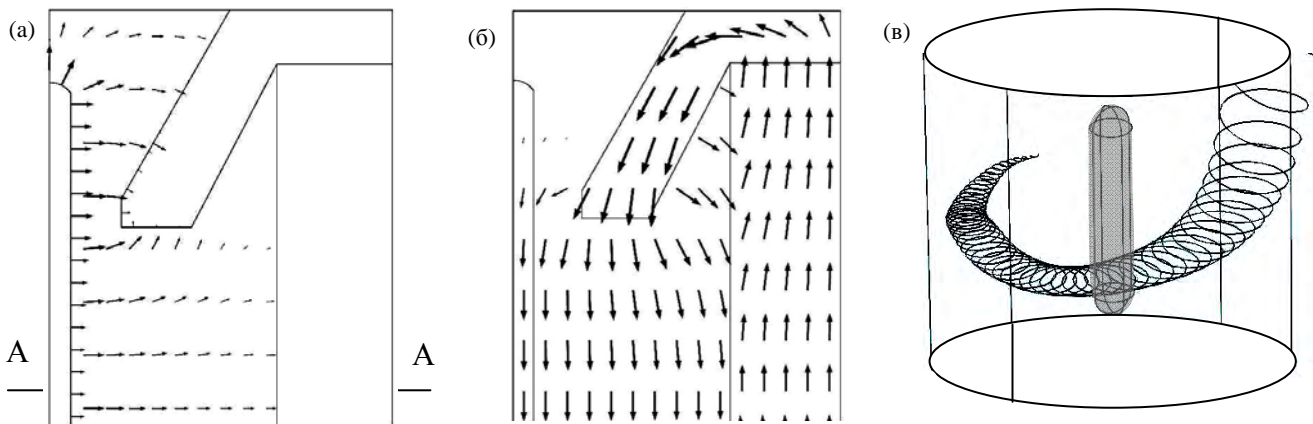


Рис. 6. Распределения напряженности электрического поля (а) и магнитной индукции (б) внутри датчика ПММ-32; (в) – траектория электрона в симметричной электродной системе.

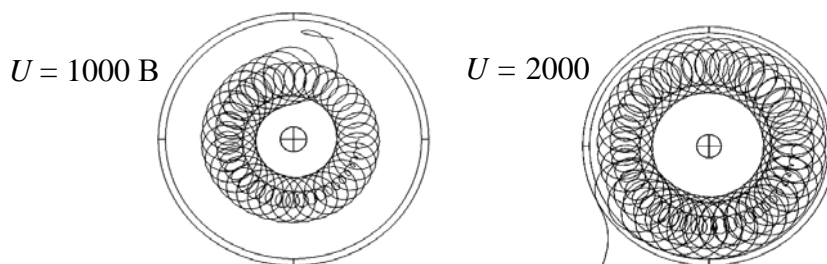


Рис. 7. Траектории электронов внутри зоны ионизации при различных напряжениях.

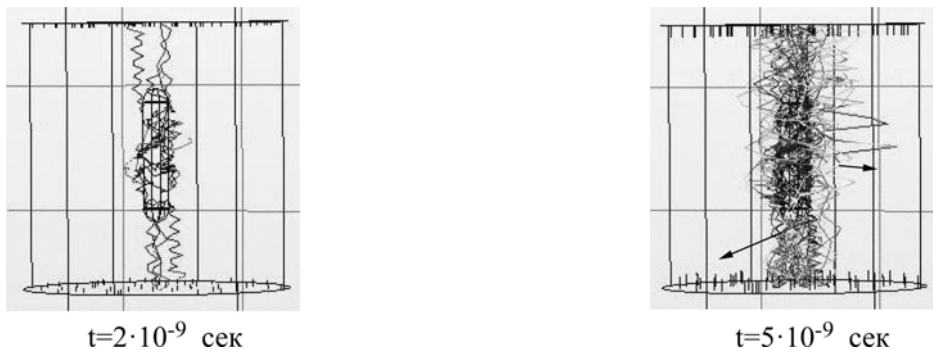


Рис. 8. Траектории вторичных электронов, инжектируемых за счет ударной эмиссии из анода, в симметричной электродной системе.

(размерная скорость $V_e = 1,07 \cdot 10^5$ м/с) электроны совершают круговые осциллирующие движения около центрального электрода (рис. 3). Причем с ростом напряженности магнитной индукции B в пределах (0,02–0,1)Тл число осцилляций N при одном обороте около центрального электрода возрастает (рис. 4а), а амплитуда осцилляций уменьшается. С увеличением скорости частицы радиус пульсаций возрастает по линейному закону (рис. 4б). Исследование траекторий после столкновений проводилось путем численного решения уравнений (4) при начальных условиях (6). Вычисления показали, что рассеяние на катод имеет место в прикатодной области. Траектории при различных углах рассеяния показаны на рис. 3, на котором затененные области указывают на положения траекторий, не соприкасающихся с электродами. Траектории в этих областях будем называть ионизирующими, а область расположения этих траекторий – ионизационной.

Обсудим теперь влияние параметров задачи (напряженности магнитной индукции B , скорости V_{st} и положения точки рассеяния r_0) на размеры ионизационной области. Из рис. 3а,б видно, что в окрестности внешнего электрода (катода) с увеличением скорости рассеяния V_{st} размеры области ионизации уменьшаются. Из сравнения рис. 3б,в можно видеть, что с увеличением напряженности магнитной индукции B размер ионизационной области увеличивается.

Вычисления показали, что в центральной межэлектродной области в достаточно сильных полях ($B \geq 0,1$ Тл, $U = 2$ кВ) все траектории являются ионизирующими (рис. 3г). Наконец, в области центрального электрода (анода) вновь появляются траектории, пересекающие электрод (рис. 3д,е).

Исследование траекторий электронов при ударной эмиссии с электродов показало следующие закономерности (рис. 5). При типичных напряженностях магнитной индукции $B \geq 0,05$ Тл электроны движутся по траекториям, близким к круговым, причем всегда возвращаются обратно на эмитируемый электрод. Расстояние вылета вторичных электронов возрастает с ростом скорости вылета.

Проведенный численный анализ позволяет сделать следующие выводы. Зона ионизации занимает центральную часть межэлектродной области, то есть в пределах $1,2R_1 \leq r \leq 0,75R_2$. При этом значение оптимизационного параметра $A_H \sim 1$. Электроны в приэлектродных областях $R_1 \leq r \leq 1,2R_1$, $0,75R_2 \leq r \leq R_2$ при столкновениях встречаются с электродами, инициируя вылет вторичных электронов, которые возвращаются обратно в электроды.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАЕКТОРИЙ И ЗОНЫ ИОНИЗАЦИИ В 3D МОДЕЛИ

Расчеты в 3-мерной постановке проводим на основе метода конечных элементов с помощью пакета COMSOL 5.2а. Однако здесь необходимо иметь в виду следующие обстоятельства. Численные сеточные методы расчетов имеют, как правило, точность порядка шага сетки, поэтому они применимы при плавном изменении переменных. Следовательно, точность расчета электронных траекторий тестировалась при симметричных электродах и вертикально ориентированным однородным магнитным полем на предельно мелкой сетке (рис. 6).

Вычисления проводились при следующих геометрических размерах: радиус центрального электрода (анода) $R_1 = 0,5$ мм, радиус внешнего электрода (катода) $R_2 = 10$ мм. Напряжение на электродах $U = 2000$ В, магнитная индукция $B = 0,1$ Тл. Расчеты показали, что в центральной области датчика (сечение А-А на рис. 1) электрическое поле близко к полю осесимметричного конденсатора. Напряженность электрического поля увеличивается примерно в 3 раза вблизи торца центрального электрода (анодом) с радиусом закругления, равным радиусу анода, и в зазоре между анодом и магнитопроводом, где поле увеличивается примерно в 2 раза (рис. 6а). Расчеты также показали, что напряженность магнитной индукции в зоне ионизации направлена вдоль оси симметрии и близка к однородному (рис. 6б).

Следующим этапом в численном исследовании является расчет траекторий, эмитированных из анода электронов. Для задания времени расчета проведем оценки типичных скоростей движения электрона при различных кинетических энергиях. При тепловых скоростях средняя скорость электрона \bar{V} вычисляется по формуле $\bar{V} = \sqrt{8kT / (\pi m_e)}$. При комнатной температуре $T = 293$ К получаем $\bar{V} = 10^5$ м/с. Оценим теперь скорость электрона, ускоренного электрическим полем. В этом случае скорость электрона V , ускоренного разностью потенциалов ϕ , определяется на основании равенства электростатической $e\phi$ и кинетической $m_e V^2 / 2$ энергий, откуда получаем $V = \sqrt{2e\phi / m_e}$. Принимая $\phi = 2000$ В, получаем $V = 2,652 \cdot 10^7$ м/с. Эти данные показывают, что при радиусе внешнего электрода $R_2 = 10^{-2}$ м время пересечения межэлектродного промежутка t_* для тепловых электронов составляет $t_* = 10^{-7}$ с, для электронов, ускоренных электрическим полем (быстрых электронов), $t_* = 10^{-9}$ с. Эти значения

определяют порядок задания времени расчета при численном моделировании.

Основная задача численных расчетов траекторий движения зарядов – определить структуру ионизационной зоны. Так как наиболее быстрыми зарядами являются электроны, то расчет проводился для электронов.

На рис. 7 и 8 представлены результаты численных расчетов. Из рис. 7 видно, что электроны в ионизационной зоне движутся по петлеобразным орбитам, совершая пульсационное движение, причем с ростом напряжения частота пульсаций увеличивается. Обратим внимание на близость результатов расчетов траекторий электронов в 2D и 3D случаях. На рис. 8а представлены траектории движения электронов, эмитированных из центрального электрода (анода). Видно, что электроны также совершают петлеобразные движения и удерживаются вблизи анода магнитным полем. Однако с течением времени они покидают ионизационную зону, двигаясь вдоль анода, то есть вдоль силовых линий магнитного поля. Результаты численных расчетов позволяют сделать вывод, что ионизационная зона концентрируется вблизи анода. Это подтверждается и экспериментальными наблюдениями свечения ионизационной зоны (рис. 8б).

ВЫВОДЫ

1. Ионизационная зона распределена по всему объему датчика.

2. Наиболее интенсивная ионизация происходит вблизи центрального электрода (анода).

3. Оптимальный размер ионизационной зоны определяется критерием $A_H = Br_o \sqrt{|e| / (m_e U_*)} \sim 1$.

4. Уход зарядов вдоль силовых линий магнитного поля снижает интенсивность ионизационных процессов, то есть полный ток, а тем самым чувствительность датчика в области сверхнизких давлений.

Авторы благодарят компанию COMSOL за предоставление бесплатной версии программы COMSOL 5.2a – trial.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дворянков В.Л., Лазебников Ю.Е. *Вакуумметр*. А.с. СССР № 771487. Приоритет от 18.12.78. Оpubл. 15.10.80, Бюл. № 38.
2. Биршерт А.А., Григорьев А.М., Творогов И.В., Абрамович С.М. и др. *Ионизационный вакуумметр*. А.с. СССР № 697850. Приоритет от 13.04.78. Оpubл. 15.11.79, Бюл. № 42.
3. Пенчко Е.А., Костин Л.А. *Ионизационный вакуумметр*. А.с. СССР SU № 1472777. Приоритет от 11.08.87. Оpubл. 15.04.89, Бюл. № 14.
4. Drubetsky E., Taylor D.R. *Ionization Gauge Naving a Non-Time Varying Magnetic Field Generator of Separayed Opposed Magnets*. US Patent № 5,568,053 Oct. 22, 1996.
5. Жакин А.И., Луценко А.А. *ЭОМ*. 2012, **48**(2), 79–85.
6. Жакин А.И., Богомазов Р.Ю. *ЭОМ*. 2012, **48**(3), 88–92.
7. Жакин А.И., Луценко А.А. *ЭОМ*. 2017, **53**(1), 97–102.
8. Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. *Механика*. М.: Наука, 1973, 208 с.

Поступила 09.12.16

После доработки 24.01.17

Summary

The numerical analysis of ionization processes in nitrogen–oxygen plasma with low pressure ($10^{-3} < p < 1$ Pa) in crossed electric and magnetic fields has been carried out. The electron trajectories and impact processes have been investigated as the base for the calculation of the ionization zone dimensions. The calculated trajectories and the size of ionization zone make it possible to select the optimal sensor characteristics.

Keywords: ion, electron, detector, ionization, pressure, numerical simulation.