

УДК 621.384.647:29.27.43

В.В. Солдатов

РЕЖИМНЫЕ ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ГАЗОРАЗРЯДНЫХ ИНДИКАТОРНЫХ ПАНЕЛЕЙ

Исследовались параметры крупноэлементных газоразрядных знаковинтезирующих индикаторов без ртутного наполнения. Цель исследования - выработка рекомендаций по режимам эксплуатации ГЭСИ, обеспечивающих наибольшую долговечность. Получены характеристики крупноэлементных ГЭСИ, и проведен анализ диффузионных процессов в ячейках ГЭСИ в приближении прямоугольного параллелепипеда. Результаты будут использованы при разработке новых типов ГЭСИ без ртутного наполнения, работающих в широком диапазоне температур.

Введение. Увеличение частоты регенерации в крупноэлементных ГЭСИ на порядок (от 80 до 800 Гц) примерно на порядок уменьшает разброс и среднее значение времени запаздывания возникновения разряда [1]. Среднее время запаздывания возникновения разряда снижается примерно на 15 % с увеличением уровня внешней освещенности с I до 150 лк. В случае высокой освещенности (сотни люкс) время запаздывания возникновения разряда снижается до 1 микросекунды, но при этом падает контрастность изображения. Поэтому величина освещенности, при которой производится измерение параметров ГЭСИ, должна быть 40-60 лк. Основные факторы, влияющими на время запаздывания возникновения разряда:

- 1) предварительная ионизация разрядного промежутка [2];
- 2) воздействий плазмы соседних рабочих элементов индикации [3];
- 3) введение изотопов в газовую смесь [4];
- 4) катодное покрытие.

Создание предварительной ионизации возможно за счет создания постоянно светящихся линий, что снижает контрастность изображения. Влияние режима работы ГЭСИ на ее параметры физически объясняется взаимодействием плазмы разряда с поверхностью электродов. Именно в зависимости от режима работы ГЭСИ это взаимодействие может приводить к изменению параметров потому, что изменяется состав газовой среды вследствие усиления эрозионных процессов на электродах, а также изменяется и прозрачность лицевого стекла прибора вследствие осаждения материала электродов.

Важнейшие параметры ГЭСИ - яркость и долговечность определяются условиями горения разряда в ячейках ГЭСИ. Под условиями горения понимают внешние условия (величина и дли-

тельность приложенного импульса напряжения, частота и т.д.) и внутренние (характер и давление газовой смеси, материал электродов и степень его обработки). На изменение внутренних условий и, следовательно, яркости существенное влияние оказывает распыление (эрозия) электродов. Она приводит к изменению состояния поверхности электрода и газовой среды, а следовательно, к изменению прозрачности стекла благодаря оседанию материала распыления [5, 6]. Физический механизм эрозии находит свое объяснение в термической гипотезе: падающий на катод ион возбуждает локально высокотемпературное поле, при котором выход атомов происходит в результате поверхностного испарения. Локальность предполагает испарение с поверхности как отдельных атомов, так и целых атомных соединений - кластеров. Термическая гипотеза заключается в том, что совместное действие падающих на катод в данный момент ионов не сопровождается образованием общего температурного поля, а сводится к возбуждению отдельными ионами остро локализованных и разрозненных высокотемпературных полей. Такая температурная ситуация складывается на катоде в связи с малой плотностью тока ионов на катоде ГЭСИ, где $j \approx 10^{-3} \div 10^{-2}$ А/см². При увеличении плотности тока ГИП работает в форсированном режиме. Локальные высокотемпературные поля отдельных ионов перекрывают друг друга, что приводит к интенсивному испарению с более обширного участка, создавая участок с высокой плотностью пара материала катода, вызывая возникновение катодного пятна микродуги с высокой плотностью. Долговечность ГЭСИ определяется прозрачностью лицевой поверхности ГЭСИ, которая в процессе эксплуатации покрывается продуктами распыления катода. Цель работы – получение аналитической зависимости

для количества вещества, осаждаемого налицевую поверхность ячейки за время одного импульса тока разряда.

Теоретический анализ процесса эрозионного разрушения электрода ГЗСИ. На основании решения нестационарного уравнения диффузии определим количество вещества, осаждающегося на поверхности ГЗСИ. При этом ячейку рассматриваем как прямоугольный параллелепипед с площадью основания $S = a * b$ и высотой c . Решение проведем при следующих предположениях. С плоского катода под действием ионной бомбардировки вылетает поток нейтральных атомов материала катода Q_0 с плотностью q_0 . Считаем, что металлические частицы оседают на стенках прибора, не отражаясь. Концентрация n частиц на всех ограничивающих разрядный промежуток поверхностях равна нулю, за исключением поверхности катода. Таким образом, граничные условия запишутся в следующем виде:

$$n \left| \begin{array}{l} 0 \\ x=0 \\ x=a \\ y=b \\ z=0 \end{array} \right. D \partial n / \partial z \left| \begin{array}{l} =q_0, \text{ или } \partial n / \partial z \\ \\ \\ \\ \\ \end{array} \right. \left| \begin{array}{l} \\ \\ \\ \\ z=0 \end{array} \right. = -q_0/D$$

Приведем решение уравнения для стационарного случая $\partial n / \partial t = 0$.

Уравнение диффузии в этом случае имеет вид:

$$\partial^2 n / \partial x^2 + \partial^2 n / \partial y^2 + \partial^2 n / \partial z^2 = 0.$$

Решение будем искать в виде произведения трех функций, из которых каждая является функцией только одной координаты:

$$n(x, y, z) = X(x) * Y(y) * Z(z).$$

Подставляя это произведение в уравнение диффузии и деля на него каждый член уравнения, находим:

$$(1/x) * (\partial^2 n / \partial x^2) + (1/y) * (\partial^2 n / \partial y^2) + (1/z) * (\partial^2 n / \partial z^2) = 0.$$

Перенесем первый член уравнения в правую часть:

$$(1/y) * (\partial^2 n / \partial y^2) + (1/z) * (\partial^2 n / \partial z^2) = -(1/x) * (\partial^2 n / \partial x^2).$$

Каждую из частей уравнения приравняем к постоянной величине λ^2 , получим:

$$(1/x) * (\partial^2 n / \partial x^2) = -\lambda^2 \tag{1}$$

$$(1/y) * (\partial^2 n / \partial y^2) + (1/z) * (\partial^2 n / \partial z^2) = \lambda^2,$$

решение уравнения (1) запишется в виде:

$$x = A * \sin \lambda x + B * (\cos(\lambda * x)).$$

Используя граничные условия, будем иметь:

$$dx \left| \begin{array}{l} \\ x=0=B \\ \end{array} \right. X \left| \begin{array}{l} \\ x=a=0=A * \sin \lambda a. \end{array} \right.$$

Предположим:

$$A * \sin \lambda a = 0.$$

Это возможно при $a \lambda = n \pi$, $n=1,2,3,4, \dots$

Отсюда найдем λ и расстояние x .

$$\lambda = n \pi / a; x = A * \sin((n \pi / a) * x).$$

Аналогично найдем Y и Z .

$$-d^2 Y / dy^2 = (1/z) * (d^2 Z / dz^2) + \lambda^2 = p^2$$

$$Y = C * \sin(p * y) + D * \cos(p * y);$$

$$Y \left| \begin{array}{l} \\ y=0 \\ \end{array} \right. = D \quad Y \left| \begin{array}{l} \\ y=b \\ \end{array} \right. = C * \sin(p * b) = 0, p * b = 0,$$

$$p * b = k \pi; p = k \pi / b; p = 1, 2, 3, \dots Y = C * \sin(k \pi / b)$$

$$(1/z) * (\partial^2 n / \partial z^2) = \lambda^2 + p^2$$

$$Z = E * sh \sqrt{(\lambda^2 + p^2) * z} + D * sh \sqrt{(\lambda^2 + p^2) * z}.$$

Общее решение уравнения диффузии получим суммированием произведения XYZ по всем гармоникам:

$$n = \sum_{n=1,2,3}^{\infty} \sum_{k=1,2,3}^{\infty} M(\sin x \pi n / a) * (\sin y k \pi / b) * sh \sqrt{(\frac{n \pi}{a})^2 + (\frac{k \pi}{b})^2} * z,$$

где $M = ACE$.

Для нахождения M воспользуемся последним граничным условием:

$$\frac{\partial n}{\partial z} \Big|_{z=c} = \sum_{n=1,2,3}^{\infty} \sum_{k=1,2,3}^{\infty} M \sin \frac{n \pi}{a} x * \sin \frac{k \pi}{b} y *$$

$$sh \sqrt{(\frac{n \pi}{a})^2 + (\frac{k \pi}{b})^2} * c * \sqrt{(\frac{n \pi}{a})^2 + (\frac{k \pi}{b})^2} = -\frac{q_0}{D}.$$

Умножим обе части полученного выражения

на: $\sin \frac{i \pi}{a} * x * dx * \sin \frac{i \pi}{b} * y * dy$, где $i=1,2,3, \dots$,

и проинтегрируем от 0 до a и от 0 до b . Воспользуемся свойствами ортогональности собственных функций:

$$\int_0^a \sin \frac{n \pi}{a} * x * \sin(\frac{i \pi}{a} * x * dx) = \begin{cases} 0, & \text{при } n \neq i \\ \frac{a}{2}, & \text{при } n=i \end{cases}$$

При этом члены ряда исчезают и остаются только члены с $i=n$.

$$M * \frac{a}{2} * \frac{b}{2} * ch \sqrt{\left(\frac{n\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{k\pi}{b}\right)^2} * c *$$

$$\sqrt{\left(\frac{n\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{k\pi}{b}\right)^2} = \frac{q_0}{D} * \int_0^a \sin \frac{n\pi}{a} * x * dx *$$

$$\int_0^b \sin \frac{k\pi}{b} * y * dy$$

Вычислим: a

$$\int_0^a \sin \frac{n\pi}{a} * x * dx = -\frac{a}{n\pi} * \cos \frac{n\pi}{a} * x \Big|_0^a =$$

$$= -\frac{a}{n\pi} * (\cos n\pi - 1) = \frac{a}{n\pi} * (-\cos n\pi + 1) = 0$$

при $n=2,4,6...$ и равно $\frac{2a}{n\pi}$ при $n=1,3,5....$

Аналогично $\int_0^b \sin \frac{k\pi}{b} * y = 0$ при $k=2,4,6...$

и равняется $\frac{2b}{k\pi}$ при $k=1,3,5....$

Следовательно, для коэффициента M имеем:

$$M = \frac{16q_0}{D(n\pi)^2 \sqrt{A^2 + B^2} * ch \sqrt{A^2 + B^2} * c}, (2)$$

где $A = \frac{n\pi}{a}$, $B = \frac{n\pi}{b}$

Здесь учтено, что $k=n$ и являются целыми числами. Подставим M в выражение для концентрации:

$$n = \frac{16q_0 * ab}{D\pi^3 \sqrt{a^2 + b^2}} \sum_{n=1,3,5...} \frac{\sin A * x * \sin B * y}{n^3 ch A * AB} *$$

$$* \frac{shAB \sqrt{a^2 + b^2} * z}{\sqrt{a^2 + b^2} * c} (3)$$

Решаем нестационарную задачу в виде суммы двух членов $n=n_\infty + n_1$, где n_∞ - найденное выше (3) распределение концентрации в установившемся состоянии при $t \rightarrow \infty$, n_1 - добавка, учитывающая изменение концентрации во времени. Находим граничные условия для изменяющейся составляющей n_1 , используя исходные граничные условия и соответствующие значению для постоянной составляющей:

$$n \Big|_{x=0} = 0 = n_\infty \Big|_{x=0} + n_1 \Big|_{x=0} =$$

$$= \frac{16q_0 * ab}{D\pi^3 * \sqrt{a^2 + b^2}} * \sum_{n=1,3,5...} \frac{\sin 0 * \sin \frac{n\pi}{b} * y}{n^3 ch \frac{n\pi}{ab}} *$$

$$\frac{ch \frac{n\pi}{ab} \sqrt{a^2 + b^2} * z}{\sqrt{a^2 + b^2} * c} + n_1,$$

значение $n_1 = 0 - 0 = 0$, при $x=0$.

$$n \Big|_{\substack{x=a \\ y=0 \\ y=b \\ z=0}} = 0, \quad \frac{\partial n}{\partial z} = -\frac{q_0}{D} = \frac{16q_0}{D\pi} *$$

$$\sum_{n=1,2,3} \frac{\sin \frac{n\pi}{a} * x * \sin \frac{n\pi}{by}}{n^2} + \frac{\partial n_1}{\partial z} \Big|_{z=a}$$

Ряд, стоящий в правой части равенства,

представляет собой разложение $-\frac{q_0}{D}$ по синусам,

поэтому $\frac{\partial n_1}{\partial z} = 0$ при $z=a$

Подставляем $n=n_\infty + n_1$ в уравнение диффузии (2):

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 n_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 n_1}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 n_1}{\partial z^2} \right).$$

Решение ищем в виде произведения 4-х функций, из которых каждая является функцией только одной переменной, $n_0 = 0$:

$$n_1 = T(t)X(x)Y(y)Z(z).$$

Подставляя n_1 в уравнение диффузии(2) и деля его на $DXYZ$, получаем:

$$\frac{1}{DT} \frac{dT}{dt} = \frac{1}{x} \frac{d^2 x}{dx^2} + \frac{1}{Y} \frac{d^2 Y}{dy^2} + \frac{1}{Z} \frac{d^2 Z}{dz^2}.$$

По аналогии с задачей стационарного распределения найдем:

$$x = A \sin \frac{n\pi}{a} x; Y = C \sin \frac{n\pi}{b} y; Z = E \sin gz.$$

Используем последнее граничное условие:

$$\frac{dZ}{dz} \Big|_{z=c} = Eg * \cos(gc) = 0$$

Нетривиальное решение возможно при $\cos(gc)=0$, т.е $g = \frac{k\pi}{2c}$, где $k=1,2,3,....$ При этом:

$Z = E \sin \frac{n\pi}{2c} z$. Уравнение для определения $T(t)$

имеет вид: $\frac{1}{DT} \frac{dT}{dt} = -\left(\frac{n\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 + \left(\frac{k\pi}{2c}\right)^2$.

Его решением является функция:

$$T = F * e^{-D\pi\left(\left(\frac{n}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{k}{2c}\right)^2\right)t}$$

Здесь F – постоянная интегрирования. Обозначая $M = ACEF$, запишем решение n_1 .

$$n_1 = \sum_n \sum_k M * \sin \frac{n\pi}{a} x * \sin \frac{n\pi}{b} y * \sin \frac{k\pi}{2c} z$$

Как и при решении стационарной задачи, используем свойство ортогональности собственных функций:

$$M = -\frac{32g_0ab}{D\pi^3\sqrt{a^2+b^2} * c * n^3 * ch\sqrt{a^2+b^2} * c} * \int_0^a sh \frac{n\pi}{ab} \sqrt{a^2+b^2} * z * \sin \frac{k\pi}{2c} * z dz. \quad (4)$$

Вычислим значение интеграла и подставим в формулу (2), найдем:

$$M = -\frac{128q_0c(-1)^{k+1}}{D\pi^4 n^2 k^2 \left[1 + \frac{4(a^2+b^2)(nc)^2}{(kab)^2}\right]}$$

Число частиц, попадающих на видимую поверхность ячейки индикаторной панели за время протекания тока через нее, определяется интегрированием по координатам и времени действия импульса:

$$Q = \frac{Q_0}{ch \frac{\pi}{a} \sqrt{2} * c} \left[t_1 - \frac{1 - e^{-D\pi^2\left(\frac{2}{a^2} + \frac{1}{4c^2}\right)t_1}}{D\pi^2\left(\frac{2}{a^2} + \frac{1}{4c^2}\right)} \right], \quad (5)$$

где $Q_0 = a^2 * q_0$.

Выясним поток металлических частиц на поверхность ячейки в послеразрядный период. Будем считать, что при прохождении тока через ГЗСИ амплитуды всех гармоник много меньше амплитуды первой гармоники. Поэтому при завершении прохождения импульса тока на момент t_1 металлическое облако начинает распадаться при нулевых граничных условиях и начальном условии (3). При этом решение для распределения концентрации при $t=0$ будет иметь вид:

$$n(x, y, z, t) = \sum M \sin \frac{n\pi}{a} x \sin \frac{n\pi}{a} y \sin \frac{k\pi}{c} z.$$

Чтобы найти полное количество частиц, попадающих на внешнюю поверхность панели, необходимо полученное значение потока проин-

тегрировать по координатам и по времени от момента окончания импульса до бесконечности:

$$Q = \frac{2q_0a^3 th \frac{\pi\sqrt{2}}{a} c(1 - e^v)}{\pi\sqrt{2}cD\left(1 + \frac{(\pi c)^2}{6a^2}\right)\left(\frac{16}{a^2} + \frac{12}{c^2}\right)}, \quad (6)$$

где $v = -D\pi^2\left(\frac{2}{a^2} + \frac{1}{4c^2}\right)t_1$.

Следует отметить, что постоянная распада τ металлического облака при $D=6 \text{ см} \frac{\text{см}^2}{c}$, а

$a=3*10^{-1} \text{ см}$, $c=6*10^{-2} \text{ см}$

$$\tau = \frac{1}{\pi^2 D \left[\frac{2}{a^2} + \frac{1}{c^2} \right]} \approx 2 * 10^{-4} \text{ с}$$

При длительности импульса тока $t_1=100 \text{ мкс}$ и частоте повторения 3кГц и ниже металлическое облако успевает полностью распасться за время паузы между импульсами. Обозначая $Q_0 = a^2 * q_0$ поток частиц с катода, получаем окончательно:

$$\frac{Q}{Q_0} = \frac{2a th \frac{\pi\sqrt{2}}{a} c(1 - e^v)}{\pi\sqrt{2}Dc\left(1 + \frac{(\pi c)^2}{6a^2}\right)\left(\frac{16}{a^2} + \frac{12}{c^2}\right)}. \quad (7)$$

На рисунках 1, 2, 3 представлены построенные теоретически зависимости количества напыляемого на лицевую поверхность вещества за один импульс от длительности импульса, высоты ячейки и коэффициента диффузии. При увеличении длительности импульса напыления за время действия импульса и суммарное напыление возрастает. Напыление в послепроводящий период имеет насыщение, определяемое концентрацией металлических частиц в ячейке ГЗСИ в установившемся режиме. Следует отметить, что полное распыление материала катода на поверхности практически линейно зависит от длительности импульса тока. Обращает на себя внимание существенное отличие в ходе кривых напыления в проводящую и непроводящую части периода, рисунок 3.

Во время протекания тока через ячейку ГЭСИ напыление монотонно возрастает с уменьшением высоты ячейки. При высотах, меньших 0,01 см, напыление практически перестает зависеть от высоты, так как металлические частицы летят по объему ячейки с небольшим числом столкновений с атомами газа. В послеразрядный период интенсивность распыления имеет ярко выраженный максимум. Физически его проис-

хождение объясняется тем, что, с одной стороны, при увеличении высоты ячейки увеличивается количество частиц, накапливаемых в объеме в течение протекания импульса тока, а с другой - уменьшением потока частиц, достигающих противоположной катоду поверхности. Отметим, что увеличение высоты ячейки от 0,06 см до 0,6 см снижает запыление поверхности более чем на два порядка. Также качественно различно ведут себя интенсивности напыления в проводящий и послеразрядный периоды, рисунок 3.

$\lg t$ -8 -7 -6 -5 -4 -3 -2 -1

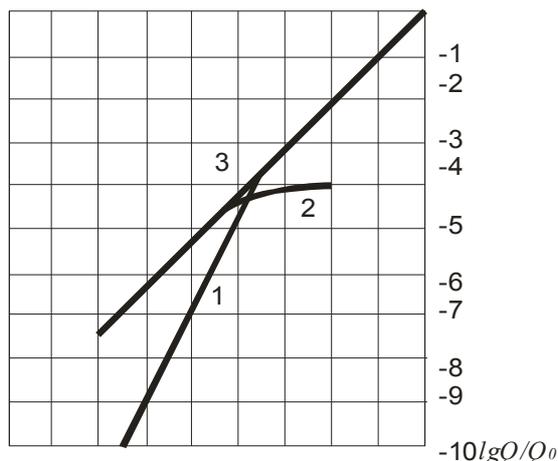


Рисунок 1 – Зависимость относительного напыления лицевой поверхности ГИП от длительности импульса:

- 1- во время протекания импульса;
- 2- в послеразрядный период;
- 3- суммарное напыление на один импульс.

$\lg C$ -3 -2 -1

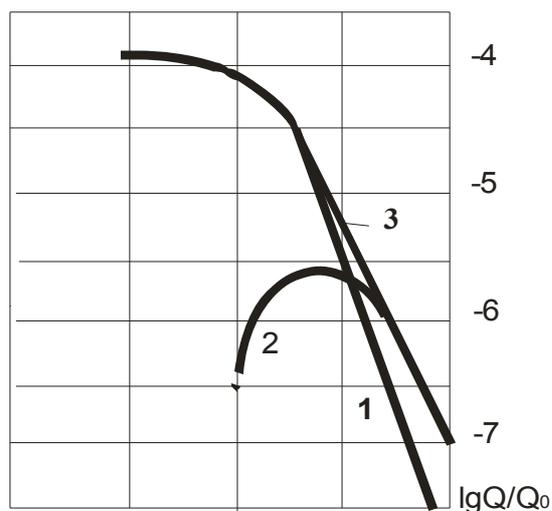


Рисунок 2 – Зависимость относительного запыления лицевой поверхности ГИП от высоты ячейки:

- 1- во время протекания импульса;
- 2- в послеразрядный период;
- 3- суммарное напыление на один импульс.

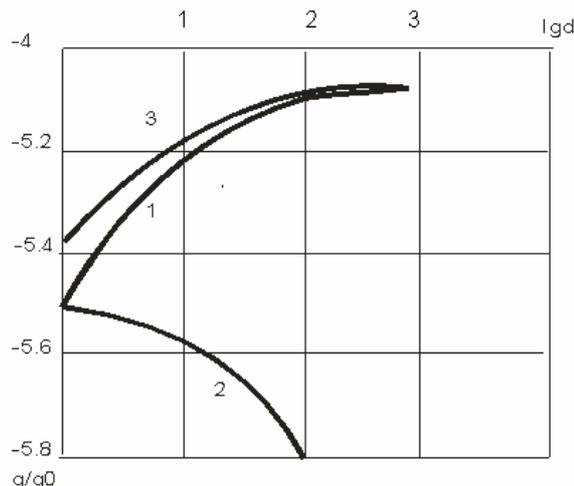


Рисунок 3 – Зависимости интенсивности напыления от коэффициента диффузии:

- 1- во время протекания импульса;
- 2- в послеразрядный период;
- 3- суммарное напыление за один импульс.

В период проводимости с ростом коэффициента диффузии количество металлических частиц монотонно нарастает, насыщаясь в области больших значений ($D=190$ и выше), что связано с уменьшением сопротивления газовой среды потоку выбиваемых с катода частиц. Снижение запыленности слоя в послеразрядный период объясняется уменьшением накопления в объеме материала распыления катода в проводящую часть периода. В целом же суммарная интенсивность запыления убывает с уменьшением коэффициента диффузии.

В действительности зависимость напыления лицевой поверхности ГЭСИ от коэффициента диффузии должна быть выражена более резко, так как количество выходящих с катода частиц существенно снижается с ростом давления, что в расчете нами не учитывалось. Вычислим число атомов металла, попадающих на лицевую поверхность ячейки ГЭСИ на один импульс, при реальных геометрических размерах ($a=3 \cdot 10^{-1}$ см), ($c=6 \cdot 10^{-2}$ см), коэффициент диффузии ($D=6$ см²/с), длительности ($t_1=100$ мкс) и силе тока импульса ($I=10$ мА). Учитывая, что на катоде весь ток переносится ионами, находим поток ионов на катоде:

$$q_i = \frac{I}{e} = \frac{10^{-2}}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 6,25 \cdot 10^{16} \frac{1}{c}$$

Число выбиваемых атомов равно:

$$Q_0 = 6,25 \cdot 10^{16} \cdot 10^{-2} = 6,25 \cdot 10^{14} \frac{1}{c}$$

Расчетное: $Q/Q_0 = 5 \cdot 10^{-5}$

$Q=6,25*10^{14}*5*10^{-5} = 3*10^{10}$ атомов/за импульс. Площадь атома:

$$SN = \frac{(3*10^{-10})^2}{4} = 7*10^{-20} m^2.$$

Для покрытия поверхности ячейки моноатомным слоем требуется:

$$\frac{(3*10^{-3})^2}{7*10^{-20}} = 1,28*10^{14} \text{ атомов,}$$

что соответствует:

$$\frac{1,28*10^{14}}{3*10^{10}} = 4,3*10^3 \text{ импульсов тока разряда.}$$

Выводы

В результате теоретического рассмотрения получено аналитическое выражение для относительного потока частиц материала катода как функции размеров ячейки, коэффициента диффузии и времени воздействия разряда. Использование найденного соотношения позволяет оценить степень покрытия материалом катода лицевой поверхности ячеек ГИП и оценить

влияние режима работы на долговечность индикаторных панелей.

Библиографический список

1. Орлов Ю.И., Покрывайло А.Б. Крупноэлементные знакографические панели для наборных экранов, Электронная промышленность. 1982. 5,6.
2. Алексеев. Г.А., Крютченко О.Н, Орлов Ю.И. и др. Исследование различных факторов, влияющих на характеристики индикаторов постоянного тока Электронная техника серия 4. Электровакуумные и газоразрядные приборы 1984 выпуск 5 .
3. Алексеев.Г.А., Орлов Ю.И. Факторы, определяющие время перехода ГИП постоянного тока в информационный режим Электронная техника, серия 4. Электровакуумные и газоразрядные приборы. 1982 выпуск 1 .
4. Глубоков Г.Г. Лобан В.И. Матричный газоразрядный индикатор на 10^4 элементов индикации с управлением от биполярных микросхем Электронная техника, серия 4. Электровакуумные и газоразрядные приборы, 1976 год выпуск 8 .
5. Mesyats G.A., Osipov V.V., Tarasenko V.F. Pulsed Gas Lasers. Billingham (Wash. USA): SPIE, 1995. 374 p.
6. Осипов В.В. Импульсный объемный разряд Соросовский образовательный журнал. 12 1998.