

*На правах рукописи*

**Солдатов Виктор Васильевич**

**ДЕГРАДАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ГАЗОРАЗРЯДНЫХ  
ЗНАКОСИНТЕЗИРУЮЩИХ ИНДИКАТОРАХ**

специальность 05.27.02 – Вакуумная и плазменная электроника

**АВТОРЕФЕРАТ**

*диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук*

Рязань 2009

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении  
высшего профессионального образования  
«Рязанский государственный радиотехнический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Гуров Виктор Сергеевич  
Консультант: кандидат технических наук  
Связов Александр Алексеевич

Официальные оппоненты:  
доктор физико-математических наук, профессор  
Волков Степан Степанович  
доктор физико-математических наук, профессор  
Чиркин Михаил Викторович  
Ведущая организация: ОАО «Плазма» г. Рязань

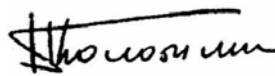
Защита состоится «17» ноября 2009 в 11 час. 30 мин. на заседании  
диссертационного совета Д 212.211.03 в ГОУВПО «Рязанский государственный  
радиотехнический университет» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина,  
д.59 /1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУВПО «Рязанский  
государственный радиотехнический университет»

Автореферат разослан «16» октября 2009 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета Д 212.211.03

доктор технических наук, профессор



Колотилин Б.И.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

Приборы тлеющего разряда с холодным катодом широко используются в устройствах отображения информации (УОИ). Особое место занимают матричные УОИ, характеризующиеся высокой скоростью отображения информации и простотой пользования. Среди матричных индикаторов наибольшее распространение получили газоразрядные знакосинтезирующие индикаторы (ГЗСИ), имеющие высокую надежность, плоскую конструкцию, малые габариты, высокую яркость свечения, возможность получения полутоновых и цветных изображений. На этапе разработки и изготовления требуется выполнять измерения параметров в реальном масштабе времени, а также проводить форсированные и экспрессные испытания новых приборов. Важнейшие параметры ГЗСИ - напряжение возникновения разряда  $U_{в.р}$ , напряжение поддержания разряда  $U_{под.р}$ , ток разряда, протекающий через ячейку, время готовности, яркость и долговечность - определяются условиями горения разряда в ячейках ГЗСИ. Условия горения делятся на внешние (величина и длительность приложенного импульса напряжения, частота и т.д.) и внутренние (состав и давление газовой смеси, материал электродов и степень его обработки). На начальной стадии измерение параметров ячеек осуществлялось с помощью аналоговых приборов. Из-за отсутствия автоматизации процесс измерений не обеспечивал приемлемой точности и обладал высокой степенью трудоемкости. Актуальность работы в том, что ускоряется процесс тренировки при проектировании и производстве ГЗСИ, исключается субъективный фактор, повышается точность и достоверность результатов измерений. Автоматизирован процесс испытаний и конкретизирован его режим. Выполнены требования к точности, хранению и обработке измеряемой информации в течение всего срока испытаний, а также архивация полученных данных.

Конкретизация режима испытаний включает определение границ для внешних и внутренних условий поддержания разряда, за пределами которых появляются качественные отличия деградационных процессов от реализующихся при эксплуатации ГЗСИ. В последнем случае деградация ячеек под действием разряда приобретает неконтролируемый лавинообразный характер. Кроме того, для объективной оценки влияния стимулирующих воздействий на параметры приборов необходимо исключить взаимоионизацию и самоподготовку ячеек.

### Цель и задачи исследования

**Цель настоящей работы** заключается в создании методики экспрессных испытаний газоразрядных знакосинтезирующих индикаторов, обеспечивающей возможность автоматизации.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи.

1. Выполнить теоретический анализ эрозионного разрушения катода ГЗСИ и установить зависимость потока частиц материала катода на лицевую поверхность ячейки от ее размеров, давления и рода газа, времени воздействия разряда и коэффициента диффузии продуктов распыления в газовой среде.

2. Оценить корреляции между долговечностью ГЗСИ и следующими параметрами газового разряда в ячейке:

- напряжением возникновения разряда  $U_{в.р}$ ;
- напряжением поддержания разряда  $U_{под.р}$ ;
- током разряда, протекающим через ячейку в процессе испытаний;
- яркостью свечения  $B$ .

3. Экспериментально проверить достоверность результатов теоретического анализа эрозии электродов и определить предельно возможные параметры разряда, при которых результаты испытаний отражают особенности деградационных процессов в условиях эксплуатации ГЗСИ.

4. Разработать автоматизированный стенд для измерения в условиях реального времени напряжения  $U_{в.р}$ , времени запаздывания разряда  $\tau_{зап.р}$  и напряжения  $U_{под.р}$  ГЗСИ.

5. Разработать рекомендации по конструированию новых типов приборов и оптимальных режимов эксплуатации ГЗСИ.

### Научные положения, выносимые на защиту

1. Определение диффузионного потока распыленных атомов катода на лицевую поверхность ячейки ГЗСИ с помощью соотношения:

$$\frac{Q}{Q_0} = \frac{2a \operatorname{tg} \left( \frac{\pi\sqrt{2}}{a} c \right) \left( 1 - \exp \left( -D\pi^2 \left[ \frac{2}{a^2} + \frac{1}{(2c)^2} \right] \cdot t_1 \right) \right)}{\pi\sqrt{2}Dc[1 + (\pi c/a)^2 / 6](16/a^2 + 12/c^2)},$$

где  $Q$  – поток частиц на лицевую поверхность,  $Q_0$  – поток частиц с катода,  $t_1$  – длительность импульса тока,  $a$  – длина и ширина ячейки,  $c$  – высота ячейки,  $D$  – коэффициент диффузии, позволяет прогнозировать срок службы приборов с доверительной вероятностью 0,7 – 0,8.

2. Зависимость потока распыленных в паузе между импульсами частиц к лицевой поверхности ячейки от её высоты имеет максимум, обусловленный балансом между накоплением распыленных частиц в газоразрядном промежутке за время протекания тока и осаждением частиц на боковые стенки.

3. Срок службы резко (на порядок) уменьшается за счет запыления лицевой поверхности ГЗСИ, если плотность разрядного тока или длительность импульса превышают на 20 – 30 % критические значения этих параметров, которые лежат в диапазоне  $10^{-3} \div 10^{-2}$  А/см<sup>2</sup> и 80 % от длительности катодного импульса соответственно.

## Научная новизна

1. Получено и обосновано аналитическое выражение для потока частиц материала катода как функции размеров ячейки, коэффициента диффузии и времени воздействия разряда. Использование найденного соотношения позволило оценить степень покрытия распыленным материалом катода лицевой поверхности ячеек и оценить влияние режима работы на долговечность ГЗСИ.

2. Разработана методика экспрессных испытаний и автоматизирован процесс измерения основных параметров ГЗСИ. Методика испытаний обеспечивает требуемую достоверность получения и хранения параметров и удовлетворяет существующим нормативам и ГОСТам.

3. Для практически значимого диапазона параметров установлено, что увеличение высоты ячейки от 0,06 см до 0,6 см снижает запыление поверхности более чем на два порядка.

4. Показано, что время статистического запаздывания разряда в ячейках ГЗСИ уменьшается до пренебрежительно малых (около 1 мкс) значений, если импульсный ток разряда ячеек превышает величину 5 мА.

## Практическая значимость

Результаты, полученные в ходе выполнения работы, использованы при создании нескольких типов ГЗСИ (ИГПП 32x32,64x64, ГИП 10000), крупноэлементных ГЗСИ, различного типа свечения (красного, зеленого, синего, желтого), с ртутным наполнением и без него. Получены характеристики крупноэлементных ГЗСИ и проведены исследования рабочих и нерабочих поверхностей анодов и катодов. Исследование характера разрушения методами электронной микроскопии подтвердило предполагаемый механизм разрушения электродов ГЗСИ в условиях форсированного режима работы. Практические результаты подтвердили выводы теории о неравномерности воздействия разряда на поверхность, обусловленной не только шероховатостью покрытия с различной работой выхода, но и в значительной мере резко неоднородной геометрией самого катода, наличием острых краев, границ поверхностей, способствующих образованию в этих местах участков с повышенной напряженностью поля.

## Достоверность результатов работы

Достоверность результатов работы подтверждается соответствием результатов теоретического анализа и экспериментов, внедрением и практическим использованием разработанной методики и стенда для испытаний ГЗСИ.

## Личный вклад автора

Результаты, представленные в работе, получены автором самостоятельно либо при его определяющем участии. Разработка автоматизированного комплекса для измерения напряжения возникновения разряда, времени запаздывания возникновения разряда и напряжения поддержания разряда ГЗСИ выполнена под руководством и при непосредственном участии автора.

## Публикации и апробация работы

По материалам диссертации опубликовано 9 печатных работ. Полученные результаты были представлены на семинарах и конференциях РГРТУ, 5-й Международной научно – технической конференции «К.Э. Циолковский – 150 лет со дня рождения. Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика» (г. Рязань, 2007 г.), XIII Всероссийской научно – технической конференции молодых ученых и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании» (г. Рязань, 2008 г.).

## Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Полный объём диссертации составляет 138 страниц, включая 91 рисунок, 2 таблицы и список литературы из 160 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность работы, сформулирована её цель, перечислены основные результаты, представляющие научную и практическую ценность, приведены положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** представляет собой обзор, в котором проанализированы различные типы и устройства отображения информации (УОИ). Показано, что надежное и быстрое измерение информативных параметров, характеризующих качество ГЗСИ, возможно лишь при использовании цифровых методов обработки результатов их регистрации. Обзор литературы завершается конкретизацией задач диссертационной работы.

**Вторая глава** посвящена разработке автоматизированного испытательного стенда и методик регистрации информативных параметров ГЗСИ.

Реализованный автоматизированный стенд позволяет определить математическое ожидание времени запаздывания возникновения разряда в ячейке  $\tau_{зан.p}$ , вероятность  $P$  и число переходов ячейки в проводящее состояние  $N_{пер}$ , напряжение поддержания разряда  $U_{под.p}$  и среднеквадратичное отклонение для времени запаздывания  $\delta_{зан}$ .

В качестве управляющих параметров выбраны напряжение на газоразрядном промежутке, скважность импульсов тока, число сканирований, период следования импульсов, внешняя освещенность:

$$\bar{\tau}_{зан} = \sum \frac{\tau}{N_{неп}}; U_{под.р} = \sum_1^{\infty} \frac{U_i}{N_{неп}}; \delta_{зан} = \sqrt{(\sum_{i=1}^{N_{неп}} (\tau_{зан} - \bar{\tau}_{зан})^2 / N_{неп})^{-1}}. \quad (1)$$

Для полученной выборки времен  $\tau_{зан}$  и напряжений поддержания разряда  $U_{под.р}$  определялись нижние  $\tau_{\min.зан.р}$  и  $U_{\min.под.р}$  и верхние  $\tau_{\max.зан.р}$  и  $U_{\max.под.р}$  границы. Для оценки разброса параметров использованы их дисперсии (среднеквадратичные отклонения). Вероятность оцениванием по среднему значению совокупности  $\bar{X}$  истинного значения  $m$ :

$$P \{m-d \leq \bar{X} \leq m+d\} = 1-\alpha, \quad (2)$$

где  $\bar{X}$  -выборочное среднее,  $\alpha$  - степень достоверности,  $(1-\alpha)$ -вероятность, что интервал  $(m \pm d)$  содержит  $\bar{X}$ . Случайная погрешность измерения  $U_{под.р}$  зависит от нестабильности блока источника питания +5 В, управляющего работой схемы сдвига уровня входного сигнала аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и нестабильности источника опорного напряжения АЦП. Передача массивов данных в ПК осуществлялась через USB (Universal Serial Bus) универсальную последовательную шину. Пропускная способность USB в full-speed (полноскоростном) режиме составляет 12 Мбит/с, что вполне достаточно для обработки данных, поступающих с устройства измерения  $\tau_{зан.р}$  и напряжения  $U_{под.р}$ . Вся информация передается по шине USB в виде пакетов. Каждый пакет начинается с поля синхронизации (SYNC), за которым следует идентификатор пакета (PID). Пакеты данных передавались по прерываниям (*Interrupt transfers*), так как требовалось гарантированно передавать одиночные пакеты данных небольшого размера за ограниченное время, а передачи носят спонтанный (случайный) характер.

**В третьей главе** выполнен теоретический анализ последствий эрозионного разрушения катода ГЗСИ. Физический механизм эрозии находит свое объяснение в термической гипотезе: падающий на катод ион возбуждает локальное высокотемпературное поле, при котором выход атомов происходит в результате поверхностного испарения. Локальность предполагает испарение с поверхности не только отдельных атомов, но и макроскопических образований - кластеров.

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 ситуация складывается при плотности ионного тока на катоде ГЗСИ  $j$  в диапазоне  $10^{-3} \div 10^{-2}$  А/см<sup>2</sup>.

При увеличении плотности тока ГЗСИ начинает работать в форсированном режиме.

Локальные высокотемпературные поля отдельных ионов перекрываются, 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 пара материала катода. Локальное высокотемпературное поле, возбуждаемое падающим ионом на катод с энергией  $U_1$ , описывается распределением температуры вида:

$$T(r, t) = \frac{U_1}{\frac{3}{2} t^2} \cdot e^{-\left[\frac{r^2}{4a^2 t}\right]}, \quad (3)$$

где  $a^2 = \frac{\lambda}{c_v}$ ;  $\lambda$  - теплопроводность катода;  $c_v$  - теплоемкость единицы объема катода;  $U_1$  - энергия иона, переданная решетке материала катода.

Выполненный анализ позволил определить полное число атомов, распыленных одним ионом, т.е. коэффициент распыления  $N_a$ . Коэффициент распыления характеризует лишь величину распыления электрода ГЗСИ, но не отражает связи токового режима с параметрами ГЗСИ – яркостью и долговечностью. Эти параметры, кроме коэффициента  $N_a$ , существенно зависят от диффузионных процессов материала распыления в ячейке ГЗСИ, определяющих осаждение материала на все участки, в том числе и на лицевую поверхность ГЗСИ. Долговечность ГЗСИ определяется прозрачностью лицевой поверхности, которая в процессе эксплуатации покрывается продуктами распыления катода.

На основании решения нестационарного уравнения диффузии найдено количество вещества, осаждающегося на поверхности ГЗСИ. Ячейку рассматриваем как прямоугольный параллелепипед с площадью основания  $S = a \cdot b$  и высотой  $c$ . Если с поверхности плоского катода под действием ионной бомбардировки испускается в разрядный промежуток поток нейтральных атомов материала катода  $Q_0$  с плотностью  $q_0$ , то распределение концентрации распыленных частиц является решением нестационарного уравнения диффузии с нулевыми граничными условиями в плоскостях, дополненным условием на поверхности катода:

$$D \frac{\partial n}{\partial z} \Big|_{z=c} = q_0. \quad (4)$$

Распределение концентрации описывается выражением:

$$n = \frac{16q_0 a}{D\pi^3 \sqrt{2}} \sum_{j=1}^{\infty} \frac{\sin\left(\frac{j\pi}{a}x\right) \sin\left(\frac{j\pi}{b}y\right) \sin\left(\frac{j\pi z}{a}\right) \sqrt{2}}{j^2 \sin\left(\frac{j\pi c}{a}\right) \sqrt{2}} \left( 1 - e^{-D\pi^2 \left[ \left(\frac{j}{a}\right)^2 + \left(\frac{j}{b}\right)^2 + \left(\frac{k}{2c}\right)^2 \right] \cdot t} \right). \quad (5)$$

Здесь учтена квадратная конфигурация основания ячейки ( $a=b$ ). Поток частиц на лицевую поверхность ГЗСИ пропорционален производной от концентрации в плоскости  $z=0$ :



$$D \frac{\partial n}{\partial z} \Big|_{z=0} = \frac{16q_0}{\pi^2} \sum_{j=1}^{\infty} \frac{\sin(\frac{j\pi}{a}x) \sin(\frac{j\pi}{b}y)}{j^2 \cos(\frac{j\pi c}{a}\sqrt{2})} (1 - e^{-D\pi^2 [(\frac{j}{a})^2 + (\frac{j}{b})^2 + (\frac{k}{2c})^2] \cdot t}). \quad (6)$$

В разложении (6) с точностью не хуже 10 % можно пренебречь всеми гармониками, кроме основной. Число частиц, попадающих на видимую поверхность ячейки индикаторной панели за время протекания тока через нее, определяется интегрированием (6) по координатам и времени действия импульса

$$Q \cong \frac{Q_0}{\cos \frac{\pi c}{a} \sqrt{2}} \left[ t_1 - \frac{1 - e^{-D\pi^2 [\frac{2}{a^2} + \frac{1}{4c^2}] t_1}}{D\pi^2 (\frac{2}{a^2} + \frac{1}{4c^2})} \right], \quad Q_0 = a^2 q_0. \quad (7)$$

Распределение концентрации в ячейке и поток частиц на лицевую панель ГЗСИ после снятия напряжения источника анодного питания ГЗСИ определяется разложениями вида:

$$n = \frac{32q_0 a t g(\frac{j\pi\sqrt{2}}{c}c) (1 - e^{-D\pi^2 [\frac{2}{a^2} + \frac{1}{(2c)^2}] \cdot t_1})}{D\pi^4 \sqrt{2}} ; \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{k+1} \sin(\frac{j\pi}{a}x) \sin(\frac{j\pi}{b}y) \sin(\frac{k\pi}{2c}z)}{j^2 k [1 + \frac{2c^2}{(ka)^2}] e^{-D\pi^2 [(\frac{j}{a})^2 + (\frac{j}{b})^2 + (\frac{k}{2c})^2] \cdot t}}$$

$$D \frac{\partial n}{\partial z} \Big|_{z=0} = \frac{32q_0 a t g(\frac{j\pi\sqrt{2}}{c}c) (1 - e^{-D\pi^2 [\frac{2}{a^2} + \frac{1}{(2c)^2}] t_1})}{\pi 3\sqrt{2}c} \quad (9)$$

$$\sum_{j=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{k+1} \sin(\frac{j\pi}{a}x) \sin(\frac{n\pi}{b}y)}{j^2 [1 + \frac{2c^2}{(ka)^2}] e^{-D\pi^2 [2(\frac{j}{a})^2 + (\frac{k}{c})^2] \cdot t}}$$

Полное количество частиц, попадающих на внешнюю поверхность панели, является результатом интегрирования (9) по координатам и по времени от момента окончания импульса до бесконечности:

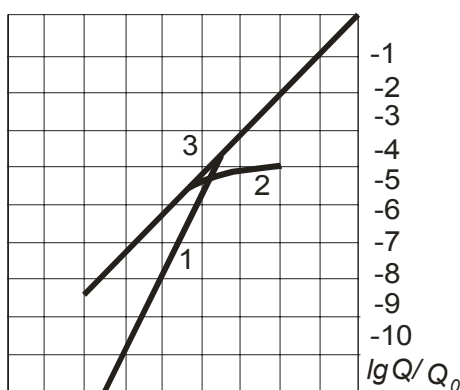
$$Q \cong \frac{2q_0 a^3 t g(\frac{\pi\sqrt{2}}{a}c) (1 - e^{-D\pi^2 [\frac{2}{a^2} + \frac{1}{(2c)^2}] \cdot t_1})}{\pi\sqrt{2}c D(1 + \frac{(\pi c)^2}{6a^2})(\frac{16}{a^2} + \frac{12}{c^2})}. \quad (10)$$

Отметим, что постоянная распада  $\tau$  металлического облака при  $D = 6 \text{ см}^2/\text{с}$ , а  $a=3 \text{ мм}$ ,  $c=0,6\text{мм}$  характеризуется величиной  $2 \cdot 10^{-4} \text{ с}$ . Следовательно, при длительности импульса тока  $t_1 = 100 \text{ мкс}$  и частоте повторения не более  $3 \text{ кГц}$  металлическое облако успевает полностью распасться за время паузы между импульсами. Обозначая поток частиц с катода  $Q_0 = a^2 q_0$ , получаем окончательно:

$$\frac{Q}{Q_0} = \frac{2a \operatorname{tg}\left(\frac{\pi\sqrt{2}}{a}c\right)(1 - e^{-D\pi^2\left[\frac{2}{a^2} + \frac{1}{(2c)^2}\right] \cdot t_1})}{\pi\sqrt{2}Dc\left(1 + \frac{(\pi c)^2}{6a^2}\right)\left(\frac{16}{a^2} + \frac{12}{c^2}\right)}. \quad (11)$$

На рисунках 1 – 3 представлены теоретические зависимости количества напыляемого на лицевую поверхность вещества за один импульс от длительности импульса, высоты ячейки и коэффициента диффузии. Распыление материала катода на поверхности практически линейно зависит от длительности импульса тока.

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



**Рисунок 1 - Зависимость относительного запыления лицевой поверхности ГЗСИ от длительности импульса**

*1 – во время протекания импульса, 2- в послеразрядный период, 3- суммарное напыление, на один импульс, катод Ti+Al, наполнение Ne+15 % Xe, P=14000 Па, a=3 мм, c=0,6мм*

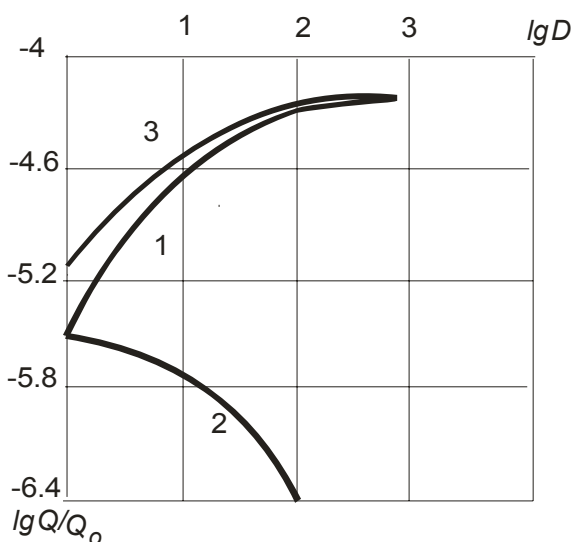
$\lg c$ , мм -2 -1



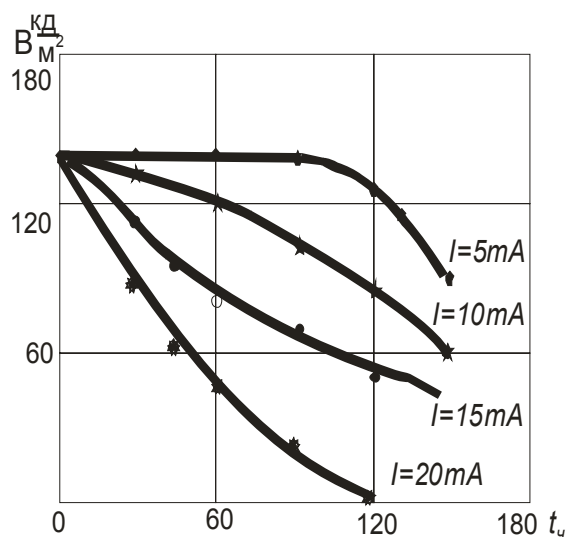
**Рисунок 2 - Зависимость относительного запыления лицевой поверхности ГЗСИ от высоты ячейки**

Обращает на себя внимание существенное отличие в ходе кривых напыления в проводящую и непроводящую части периода (рисунок 2). Во время протекания тока через ячейку ГЗСИ напыление монотонно возрастает с уменьшением высоты ячейки. При высотах, меньших  $0,1 \text{ мм}$ , напыление практически перестает зависеть от высоты, так как металлические частицы летят по объему ячейки с небольшим числом столкновений с атомами газа. В послеразрядный период зависимость интенсивности распыления от высоты  $c$  имеет ярко выраженный максимум. Физически его происхождение 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. На рисунке 4 приведены экспериментальные данные зависимости яркости  $B$  от времени наработки  $t$  при различных токах и отчетливо заметен линейный спад яркости от времени наработки.



**Рисунок 3** - Зависимости интенсивности напыления от коэффициента диффузии 1 - во время протекания импульса, 2- в послеразрядный период, 3- суммарное напыление, на один импульс



**Рисунок 4** - Экспериментальные зависимости яркости свечения при различных значениях импульсного разрядного тока ячеек ГЗСИ катод  $Ti+Al$ , наполнение  $Ne+15\% Xe$ ,  $P=14000$  Па,  $a=3$  мм,  $c=0,6$  мм

Отметим, что увеличение высоты ячейки от 0,06 см до 0,6 см снижает запыление поверхности более чем на два порядка (рисунок 3). В период проводимости с ростом коэффициента диффузии количество металлических частиц монотонно нарастает, насыщаясь в области больших значений ( $D > 100$  см<sup>2</sup>/с), 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 суммарная интенсивность запыления убывает с уменьшением коэффициента диффузии. В действительности зависимость интенсивности напыления лицевой поверхности ГЗСИ от коэффициента диффузии должна быть выражена более резко, так как количество выходящих с катода частиц существенно снижается с ростом давления, что в расчетах не учитывалось.

Вычислим число атомов металла, попадающих на лицевую поверхность ячейки ГЗСИ на один импульс, при реальных геометрических размерах ( $a = 3$  мм), ( $c = 0,6$  мм), коэффициенте диффузии ( $D = 6$  см<sup>2</sup>/с),

длительности ( $t_1 = 100$  мкс) и силе тока в импульсе ( $I = 10$  мА). Учитывая, что на катоде весь ток переносится ионами, находим поток ионов на катод:

$$q_i = \frac{I}{e} = 6,25 \cdot 10^{16}, c^{-1} \quad Q_0 = 6,25 \cdot 10^{14} c^{-1},$$

где  $Q_0$  - число выбиваемых атомов. Из формулы (11) получим:

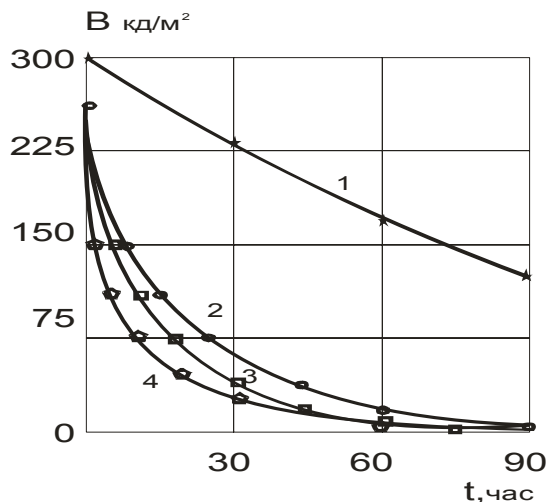
$$\frac{Q}{Q_0} = 5 \cdot 10^{-5}; Q = 3 \cdot 10^{10} \text{ атомов/за импульс. Площадь атома:}$$

$SN = 7 \cdot 10^{-20} m^2$ . Для покрытия поверхности ячейки монокристаллическим слоем требуется  $\frac{(3 \cdot 10^{-3})^2}{7 \cdot 10^{-20}} = 1,28 \cdot 10^{14}$  атомов. При этом число импульсов будет равно:

$$\frac{1,28 \cdot 10^{14}}{3 \cdot 10^{10}} = 4,3 \cdot 10^{12} \text{ импульсов.}$$

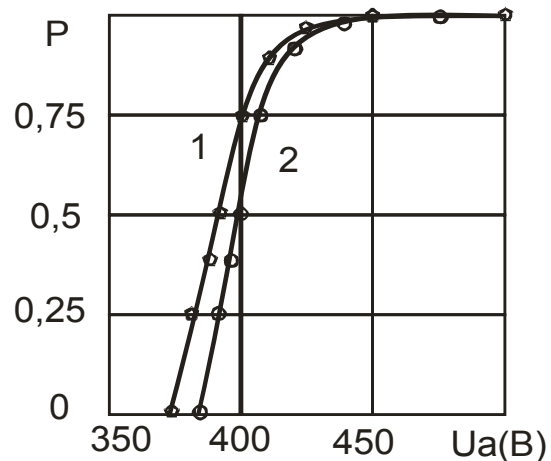
Изложенный способ приблизительной оценки долговечности ГЗСИ может быть полезен для приборов различных типов.

**В четвертой главе** исследовано влияние конструкции ячейки и режима подержания разряда на параметры ГЗСИ. На рисунках 5–8 представлены результаты экспериментальных исследований ГЗСИ с люминофором ФГЧ 627/593, с наполнением неона при давлении 17333 Па с ртутью, размер ячейки 5x5 мм и 3x3 мм. При измерении параметров ГЗСИ длительность подключения анода и катода равнялась половине периода следования импульсов подключения ячеек, а сопротивление балластного резистора в цепи анода равнялось 22 кОм.

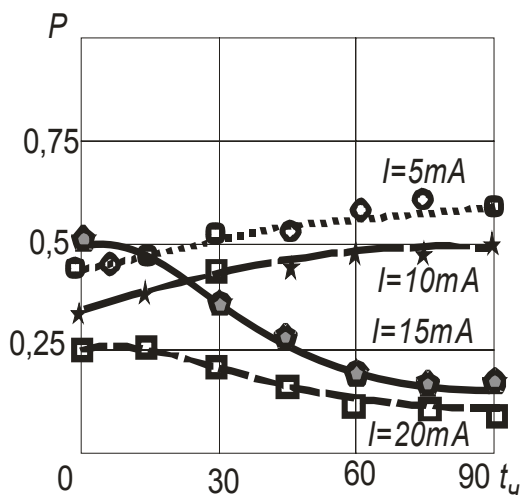


**Рисунок 5 - Зависимости яркости свечения от работы при различных токах**

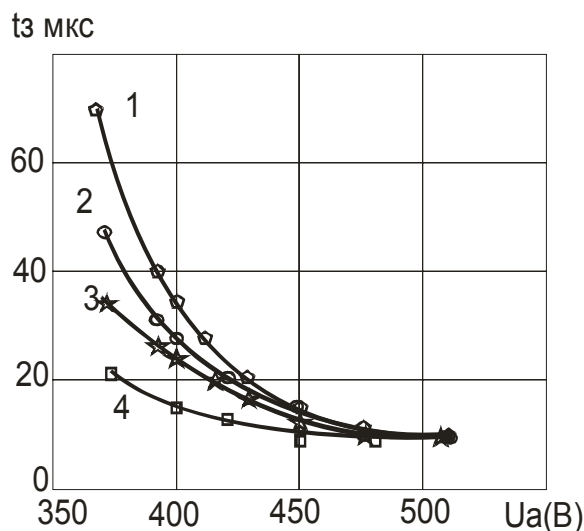
$Q=32$ ;  $U_a=400$ В; 1-  $F=625$ Гц; 1-  $I_{я}=5$  мА; 2-  $I_{я}=10$  мА; 3-  $I_{я}=15$  мА; 4-  $I_{я}=20$  мА



**Рисунок 6 - Зависимости вероятности возникновения разряда от напряжения.  $F=625$  Гц,  $Q=32$ , 1 – E = 150 лк, 2 – E = 40 лк**



**Рисунок 7** - Зависимости вероятности возникновения разряда  $P$  от времени наработки при различных токах  $I$   $U_a = 370 \text{ В}$ ,  $Q = 32$ ,  $E = 40 \text{ лк}$



**Рисунок 8** - Зависимости времени запаздывания возникновения разряда от напряжения  $E = 150 \text{ лк}$ ,  $Q = 32$ , частота повторения импульсов ( $\Gamma_{\text{ц}}$ ): 1 - 50, 2 - 150, 3 - 310, 4 - 625

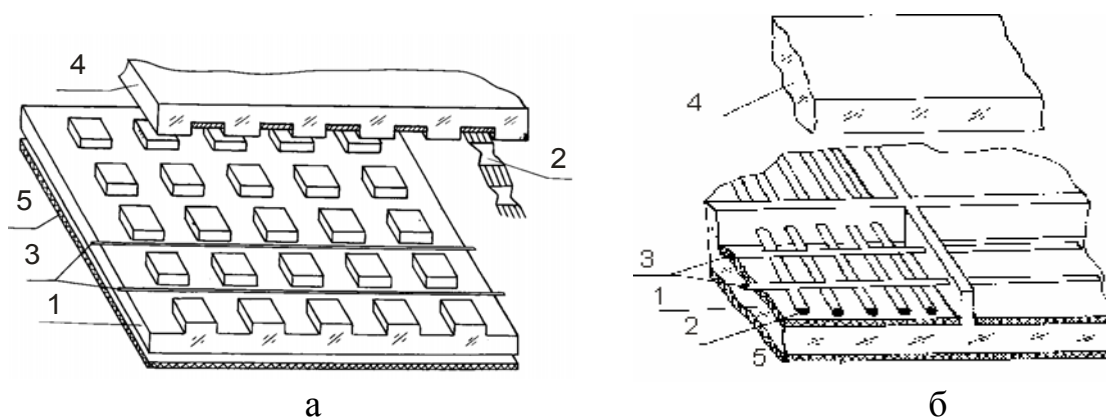
Яркость свечения ГЗСИ уменьшается при увеличении времени работы и увеличении импульса тока, протекающего через ячейку (рисунок 5). С уменьшением освещенности вероятность возникновения разряда уменьшается (рисунок 6).

Имеются различия вероятности возникновения разряда в ячейках от времени тренировки при различных токах (рисунок 7).

Вероятность возникновения разряда стремится к единице для ячеек, через которые протекал ток 5 мА при напряжении  $U_a = 400 \text{ В}$ , однако для увеличения срока службы ГЗСИ ток через ячейки не должен превышать 3 мА в импульсе (средний ток 75 мкА). Время запаздывания возникновения разряда уменьшается с увеличением частоты повторения импульсов (рисунок 8). Вероятность возникновения разряда  $P = 0,9$  при напряжении питания  $U_a \geq 425 \text{ В}$  для всех частот регенерации. Частота регенерации должна быть выбрана в интервале  $150 \div 300 \text{ Гц}$ , что связано с увеличением вероятности  $P$ . Длительность импульса подключения анода должна составлять не менее 80 % от периода следования импульсов подключения катодов. Освещенность должна быть не менее 100 лк.

В пятой главе приведены результаты исследования эрозии катода ГЗСИ в процессе срока службы. Схематическая конструкция прибора ИГГ1 32x32 изображена на рисунке 9,а. Прибор содержит нижнюю стеклопластину 1, катодную 2 и анодную 3 системы электродов и верхнюю лицевую 4 стеклопластину. Пакет герметизируется слоем стеклокристаллического цемента. К пакету из перечисленных деталей прикрепляется печатная плата 5, на которой производится распайка выводов электродов. В верхней стеклопластине имеются

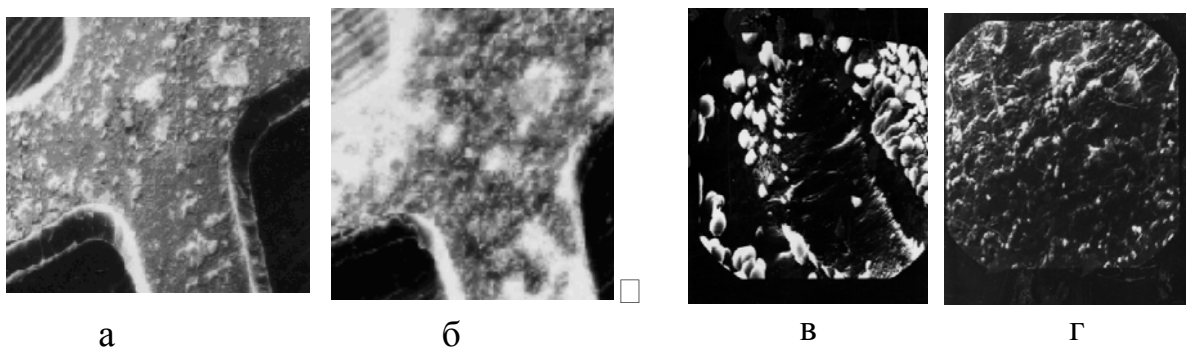
пазы, ширина которых соответствует ленточным катодным электродам. В нижней стеклопластине методом фрезерования образованы выступы напротив пазов. Таким образом, собирая стеклопакет, получаем 32x32 изолированные ячейки размером 3x3. Катодные электроды изготавливаются из титановой ленты методом фотолитографии. На рабочую поверхность катода напыляется слой алюминиевой пленки для предохранения титана от окислов в процессе термообработки пакета. Конструкция крупноэлементной ГЗСИ изображена на рисунке 9,б. Прибор содержит нижнюю 1 и верхнюю 2 пластины, на которых методом трафаретной печати сформированы ячейки размером 4.9x4.9 мм. Анодная 3 и катодная система электродов 2 – проволока 47НД.



**Рисунок 9 - Конструкция ГЗСИ**

*с титановым катодом (а) и катодом (б) из сплава 47НД*

Воздействие тлеющего разряда оставляет следы на поверхности электрода. Изменение режима работы ГЗСИ сопровождается изменением характера тлеющего разряда, выделяющейся мощности и ее распределения по электроду. На рисунке 10(а,б) приведены фотографии поверхностей титановых электродов, покрытых алюминием испарением в вакууме.



**Рисунок 10 - Изображение поверхности титанового катода с алюминиевым покрытием (а,б) и катода из сплава 47НД (в,г)**

*а - после тренировки в течение 80 часов, при импульсном токе 5мА (средний ток 75мкА), увеличение 70; б - после тренировки в течение 80 часов, при токе 15мА, средний ток 215 мкА увеличение 70; в - после тренировки в течение 80 часов, при токе 20мА, увеличение 3000, г- до тренировки, увеличение 600*

Поскольку алюминий при испарении осаждается на титан как в жидком, так и в твердом виде конденсированной фазы, то при увеличении в 70 раз (рисунок 10,а) хорошо видна неоднородность и шероховатость покрытия, затвердевшие каплевидные образования на поверхности титана.

Основной несущий скелет сплава 47НД составляют зерна никеля (рисунок 10,в). Каждое зерно представляет собой монокристалл, а конгломераты зерен образуют систему отдельных звеньев скелета. В зависимости от кристаллографической ориентировки зерен рельеф их субмикроструктуры различен.

Тлеющий разряд взаимодействует с поверхностью зерен никеля или с поверхностью титана, покрытого неоднородной сильно шероховатой пленкой алюминия, имеющей многочисленные разрывы и островные образования. Неравномерное воздействие разряда на поверхность обусловлено не только шероховатым покрытием с различной работой выхода, но и в значительной мере резко неоднородной геометрией самого катода, наличием острых краев, границ поверхностей, способствующих образованию в этих местах участков с повышенной напряженностью поля. Такими участками являются, в первую очередь, границы отверстий, края проволочных электродов и участки, покрытые крупными алюминиевыми частицами неправильной геометрической формы. Диэлектрические окисные пленки, частично покрывающие алюминий, способствуют эмиссии электронов благодаря воздействию сильного электрического поля.

Поверхность катода ионов по гипотезе “теплового пятна” разогревает поверхность катода и способствует испарению его. Количественная сторона при горении нормального и аномального тлеющих разрядов различна. В нормальном тлеющем разряде плотность мощности такова, что обеспечивается лишь травление поверхности, т.е. испарение отдельных атомов или небольших групп атомов. В аномальном тлеющем разряде плотность мощности (за счет одновременного увеличения плотности тока  $j$  и напряжения  $U$ ) такова и распределение ее столь неравномерно, что возможен разогрев локального микроучастка практически мгновенно до температуры плавления. Тогда принципиально изменяется характер испарения: создается плотная струя пара, которая может служить основанием для возникновения опорного пятна для микродуги. В форсированном режиме испытания ГЗСИ в разрядном промежутке возникает новая форма разряда – аномальный тлеющий разряд с отдельными участками микродуг. На возникновение микродуг в отдельных участках указывают резкие колебания напряжения горения. Подтверждением возникновения микродуг являются результаты анализа поверхности электрода. При возникновении на катоде нескольких очагов с малой работой выхода весь ток на катоде практически обеспечивается ими, а остальная часть поверхности катода все меньше и меньше поставляет электронов в разряд. Поэтому напряжение горения на разрядном промежутке должно несколько уменьшаться. Получается, что в межэлектродном промежутке имеет место уже не однородный тлеющий разряд, а тлеющий разряд, пронизанный узкими шнурами микродуг со

значительной плотностью тока. Высокая плотность тока в катодном пятне микродуги приводит к созданию высокотемпературного поля на микроучастке, что сопровождается интенсивным испарением и образованием кратера.

### Основные результаты работы

1. Получено аналитическое соотношение для определения относительного потока частиц материала катода на лицевую поверхность ячеек в зависимости от размеров ячейки, давления газа, коэффициента диффузии и времени воздействия разряда. Использование соотношения позволяет оценить степень запыления лицевой поверхности прибора и прогнозировать долговечность ГЗСИ.

2. Показано, что поток распыленных атомов (РА) на лицевую поверхность ГЗСИ линейно возрастает с увеличением длительности импульса в диапазоне 0,1мкс - 0,1с, а рост потока РА в паузе между импульсами практически прекращается при длительности свыше 100мкс.

3. Установлено, что распыление материала катода значительно возрастает (на два порядка) с уменьшением высоты ячейки, в диапазоне меньших 0,01 см напыление не зависит от высоты, так как металлические частицы пересекают промежуток с небольшим числом столкновений с атомами газа.

4. Установлено, что время запаздывания возникновения разряда уменьшается при увеличении частоты регенерации изображения, напряжения питания анода и импульсного тока через ячейки. Вероятность возникновения разряда близка к единице при частоте выше 300 Гц, анодном напряжении 375 – 425В и импульсном значении тока 3 – 5 мА. При этом длительность импульса подключения анода должна составлять не менее 80 % от периода следования импульсов подключения катодов, а освещенность должна быть не менее 100 лк.

5. Исследованием методами электронной микроскопии поверхности катодов ячеек выявлен механизм разрушения электродов ГЗСИ в условиях форсированного режима работы, заключающийся в распылении металла микродуговыми разрядами.

6. Установлено, что неравномерное воздействие разряда на поверхность катодов ГЗСИ обусловлено шероховатым покрытием с различной локальной работой выхода, резко неоднородной геометрией катода и наличием острых краев на границах поверхностей, способствующих образованию участков с повышенной напряженностью поля. Такими участками являются границы отверстий, края проволочных электродов и участки, покрытые крупными алюминиевыми частицами.

7. Выявлена закономерность эрозии катодов ГЗСИ при их тренировке в форсированном режиме. Показано, что при тренировке нормальным или слабоаномальным тлеющим разрядом поверхность катода распыляется равномерно в результате “ионного” травления. При переходе к области аномального разряда (импульсный ток ячейки больше 20мА, а плотность тока



$j \geq 20 \text{ A/cm}^2$ ) характер эрозии принципиально изменяется в результате возникновения микродуговых разрядов, интенсивность эрозии резко возрастает и на поверхности образуются кратеры-воронки. Применение такого режима нецелесообразно.

8. Разработан и изготовлен стенд для измерения параметров ГЗСИ постоянного тока: напряжения возникновения разряда, напряжения поддержания разряда, тока разряда в ячейках и времени готовности. Устройство обеспечивает автоматизацию измерения, обработки и архивации данных и исключает влияние субъективного фактора на результаты контроля приборов.

9. Разработана методика измерения параметров ГЗСИ, обеспечивающая высокую достоверность получения и хранения результатов и удовлетворяющая существующим нормативам и ГОСТам.

### **Список работ, опубликованных по теме диссертации**

1. Связов А.А., Солдатов В.В. Автоматизированные устройства научных исследований параметров газоразрядных знаков синтезирующих индикаторов постоянного тока // Вестник РГРТУ. Рязань, 2008. – Вып.24. – С. 109-114.
2. Солдатов В.В. Режимные факторы, влияющие на долговечность газоразрядных индикаторных панелей // Вестник РГРТУ. Рязань, 2008. - Вып. 25. - С. 85.
3. Солдатов В.В. Опыт использования мультимедийных аудиторий в учебном процессе // Информатизация университета. Сборник документов, регламентирующих деятельность службы информатизации вуза. Под ред. проректора по информатизации РГРТУ, профессора д.т.н. Каширина И.Ю. Рязань, 2007. - Вып. 1. - С. 160-162.
4. Связов А.А., Солдатов В.В. Экспериментальные исследования факторов влияющих на параметры газоразрядных индикаторных панелей // Вестник РГРТУ. Рязань, 2009. - Вып. 27. - С. 71.
5. Гуров В.С. Солдатов В.В. Влияние величины тока на разрушение электродов газоразрядных индикаторных панелей // Вестник РГРТУ. Рязань, 2008. - Вып. 28. - С. 85.
6. Солдатов В.В. Автоматизированные средства мониторинга параметров ГЗСИ постоянного тока для экранов коллективного пользования в рамках программы “НАЦИОНАЛЬНАЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ БАЗА” // Тез. докл. 55-й научно – технической конференции РГРТУ// Рязань, 2007. - С. 57.
7. Солдатов В.В. Автоматизированные системы мониторинга и измерения параметров ГЗСИ постоянного тока для экранов коллективного пользования на основе ПК // Тез. докл. XIII Всероссийской научно – технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов “Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании” РГРТУ // Рязань, 2008. - С.22.

8. Солдатов В.В. Методика измерения параметров газоразрядных знаковосинтезирующих индикаторов // Вестник РГРТУ. Рязань, 2009. - Вып. 29. - С. 71.

9. Солдатов В.В. Алгоритм измерения параметров газоразрядных знаковосинтезирующих индикаторов// Математическое и программное обеспечение вычислительных систем: Межвуз. сб. научн. трудов / под. ред. А.Н. Пылькина – М.,2009: Горячая линия – Телеком. С.59.

**Солдатов Виктор Васильевич**

**ДЕГРАДАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ГАЗОРАЗРЯДНЫХ  
ЗНАКОСИНТЕЗИРУЮЩИХ ИНДИКАТОРАХ**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Подписано в печать 28.09.09. Формат бумаги 60X84 1/16.

Бумага газетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,0.

Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 100 экз.

Рязанский государственный радиотехнический университет.

390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ.

