

На правах рукописи

**Цицура Владимир Николаевич**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРЯДНЫХ ПРОЦЕССОВ В УСЛОВИЯХ ДИСКРЕТНО-  
ЯЧЕЕЧНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ ГАЗОВОГО ОБЪЕМА ГАЗОРАЗРЯДНОГО  
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ВИДИМОЕ.**

Специальность:

**05.11.13 - «Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов  
и изделий»**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Томск – 2007 г.

Работа выполнена в Томском политехническом университете.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Кулешов Валерий Константинович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Смирнов Геннадий Васильевич  
  
кандидат технических наук, доцент  
Вавилов Станислав Платонович

Ведущая организация: ФГУП НИИ «Проект» г. Томск

Защита состоится 22 мая 2007г. в 17.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.09 при Томском политехническом университете по адресу: 634028, г. Томск, ул. Савиных, 7, библиотека НИИ Интроскопии.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Томского политехнического университета по адресу: г. Томск, ул. Белинского, 53.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2007 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

кандидат технических наук, доцент



Б.Б.Винокуров

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** Доминирующей тенденцией развития современной интроскопии является разработка новых преобразователей ионизирующего излучения и совершенствование уже существующих при использовании излучения для контроля качества материалов и изделий. Расширение области применения и улучшение технико-экономических показателей преобразователей ионизирующего излучения за счет применения принципиально новых подходов к выделению информационной составляющей получаемых изображений является актуальной проблемой современного приборостроения. Одним из наиболее важных направлений проблемы является создание усилителей рентгеновского изображения для систем малодозового контроля. Такие системы, например, используются в медицинских учреждениях, так же при проведении экспресс контроля в полевых условиях или в спецслужбах.

К данным системам предъявляются жесткие требования для обеспечения максимальной радиационной безопасности при проведении диагностики исследуемых объектов. В частности, при проведении экспресс контроля подозрительных объектов (вокзал, аэропорт) система должна обеспечить минимальный радиационный фон с максимальной информативностью получаемого изображения. Для обеспечения данного требования необходимо применение высокочувствительных преобразователей ионизирующего излучения. В этом плане перспективно применение газоразрядных преобразователей (ГРП), так как они удовлетворяют следующим требованиям: высокая дозовая чувствительность, большая площадь рабочего поля, низкая себестоимость (что важно при возможности разрушения регистратора), Работа ГРП может быть жестко синхронизирована с интересующей стадией процесса, преобразователь имеет малое время восстановления диэлектрической прочности газа, возможно регулирование времени памяти преобразователя.

Простейший газоразрядный преобразователь представляет собой плоскую герметичную двухэлектродную камеру, наполненную рабочей смесью на основе инертных газов при нормальном давлении. Один из электродов выполняется прозрачным и служит для наблюдения и регистрации изображений. Видимое изображение в ГРП формируется совокупностью локализованных электрических разрядов, развивающихся под действием электрического поля импульса питания и первичной ионизации, созданной в газовом объеме ГРП рентгеновским излучением.

Наиболее глубокие исследования ГРП были проведены в НИИ интроскопии при ТПУ. В этих исследованиях были предложены модели формирования изображения в ГРП, устанавливающие связь между режимом облучения и питания. Экспериментально было установлено, что ГРП имеет высокую дозовую чувствительность в области рентгеновского излучения 40 - 100 кэВ и в случае ксенонового наполнения ( $10^{-9}$  -  $10^{-10}$  Кл/кг), большие размеры рабочего поля ( 0,5 м и более ).

В результате исследований были получены следующие предельные параметры изображения: средняя яркость изображения при частоте 50 Гц - (30 - 40) Кд/м<sup>2</sup>, разрешающая способность 0,8 пар лин./мм, контрастная чувствительность 12 % . Несмотря на то, что был достигнут существенный прогресс в развитии ГРП, по основным интроскопическим характеристикам они уступают существующим усилителям рентгеновского изображения и не всегда удовлетворяют требованиям практических задач контроля. В данной диссертационной работе исследовались физические процессы формирования изображения в ГРП. Были разработаны математические модели и алгоритмы расчета этих процессов. Предложена новая конструкция газоразрядного преобразователя дискретно-ячеечной организацией газового объема, далее матричный газоразрядный преобразователь (МГРП).

В работе применен теоретико-экспериментальный метод исследования. Использована теория взаимодействия ионизирующего излучения с веществом, теория столкновений в слабоионизированной атомарной плазме, теорий столкновений в молекулярной плазме, методы численного решения систем интегро-дифференциальных и дифференциальных уравнений. Основные экспериментальные результаты получены с помощью современных измерительных средств, а также с использованием импульсных излучателей и генераторов питания наносекундной длительности.

**Целью диссертационной работы** является улучшения пространственно-временных параметров газоразрядного преобразователя путем разработки новых принципов повышения качества получаемых изображений, нахождение оптимальных конструктивных параметров.

Поставленная цель достигалась решением следующих **основных задач**:

- Анализ состояния вопроса теория газового разряда;

- Исследование физических процессов формирования изображения;
- Разработка и построение математических моделей для расчетов этих процессов;
- Проведение численных экспериментов с реальными конструктивными параметрами преобразователя.

**Методы исследования.** При выполнении работы применялись как теоретические, так и экспериментальные методы исследования, которые могли способствовать решению поставленных задач. Исследования проводились путем построения математических моделей, допускающих аналитическое или численное решение, а также алгоритмических моделей. При разработке использовались численные методы аппроксимации функций и адаптивного решения дифференциальных уравнений, методы решения уравнения переноса излучения. На всех этапах работы производилось сопоставление теоретических и экспериментальных результатов.

Достоверность и обоснованность научных положений, результатов, выводов и рекомендаций подтверждаются математическими доказательствами, базирующимися на общих положениях теории проектирования, теории дифференциальных и алгебраических уравнений, вычислительных методах и использовании современных инструментальных систем схемотехнического моделирования, проведении экспериментальных исследований.

**Научная новизна.** Решение поставленных задач определило новизну данной диссертационной работы, которая заключается в следующем:

- Предложены новые принципы построения газоразрядных преобразователей, с дискретной организации газового промежутка.
- Создана математическая модель газоразрядного преобразователя. реализующего предложенные методы и исследованы характеристики данного преобразователя в широком диапазоне влияющих величин.
- Впервые предложена методика проектирования газоразрядных преобразователей с учетом конкретных условий работы прибора контроля и основанная на принципах многокритериальной оптимизации.

**Практическая ценность работы.** В результате исследований предложена конструкция матричного газоразрядного преобразователя, получены соотношения для

расчета коэффициента усиления с учетом фотоионизации резонансно возбужденных атомов, рассчитаны оптимальные толщины материалов по выходу вторичных электронов, предложены алгоритмы расчетов изменения плотности ионизации. На предложенную конструкцию матричного газоразрядного преобразователя, получено положительное решение выдачи патента.

**Личный вклад автора** все исследования, определившие защищаемые положения, выполнены автором лично, либо при его непосредственном участии. Личный вклад автора состоит в:

- анализе состояния вопроса теория газового разряда;
- разработке математической модели, описывающей динамику изменений газового разряда в условиях дискретной организации газового объема;
- построении программно-технического комплекса для оценки качества изображения газоразрядного преобразователя в комплексе с генератором питания;
- анализе и интерпретации результатов экспериментальных исследований и выработке практических рекомендаций;

На различных этапах в исследованиях, постановке задач и обсуждении результатов принимали участие Ю. В. Алхимов В. К, Кулешов В. И. Беспалов.

**Апробация результатов** Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

- Пятая международная научно-практическая конференция «Качество - стратегия XXI века», г. Томск, 1999;
- Шестая научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современная техника и технологии», г. Томск, 2000;
- Четвертая международная конференция студентов, молодых ученых, преподавателей, аспирантов и докторантов «Актуальные проблемы современной науки» г. Самара 2003;
- Девятая научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современная техника и технологии», г. Томск, 2003;
- Восьмая международная научно-практическая конференция «Качество - стратегия XXI века», г. Томск, 2003;
- Четвертая международная научно-техническая конференция «Измерение,

контроль, информатизация» г. Барнаул 2003;

- The eight International Scientific and Practical Conference of Students, Post graduates and Young Scientists “Modern Technique and Technologies”, Tomsk, 2005;
- Одиннадцатая международная научно-практическая конференция «Качество - стратегия XXI века», г. Томск, 2003;

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 12 печатных работ из них 4 статей в центральных отечественных изданиях, 8 тезисов докладов. Получено положительное решение выдачи патента на изобретение.

**Структура и объем диссертации** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 90 библиографических ссылок (исключая публикации автора). Ее основной текст изложен на 125 страницах, 7 таблицах и иллюстрирован 39 рисунками.

#### **Основные положения, представляемые на защиту.**

В результате проведенных исследований установлено:

- использование в ГРП матричной технологии позволяет повысить разрешающую способность преобразователя до 2 - 3 пар лин. /мм.
- Теоретически установлена и подтверждена экспериментально пороговая плотность ионизации ксенона в ГРП  $8 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$  соответствующая максимальной контрастной чувствительности.
- установлено, что изменения дозы в импульсе от 1 до 100 мкР приводят к изменению интегральной яркости изображения ГРП на 8 % с сохранением качества изображения, когда амплитуда импульсов питания находится в пределах 20 - 25 кВ;

### **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**В введении** обоснованы актуальность, научная новизна и практическая значимость проблемы, сформулированы цель работы и задачи исследования, приведена краткая характеристика работы.

**В первой главе** рассмотрен механизм формирования скрытого изображения, усиление первичного ионизационного эффекта с помощью газового разряда и механизм образования видимого излучения. Рассмотрено влияние ассоциативной

ионизации на размножение электронов в лавине. Приведен анализ существующих газоразрядных преобразователей. Предложена конструкция матричного газоразрядного преобразователя (МГРП).

Газоразрядный преобразователь (ГРП) представляет собой герметичную плоско-параллельную двухэлектродную камеру (рис1), наполненную инертным газом. Расстояние между электродами, один из которых прозрачен для видимой части спектра излучения, обычно не превышает 1 см.

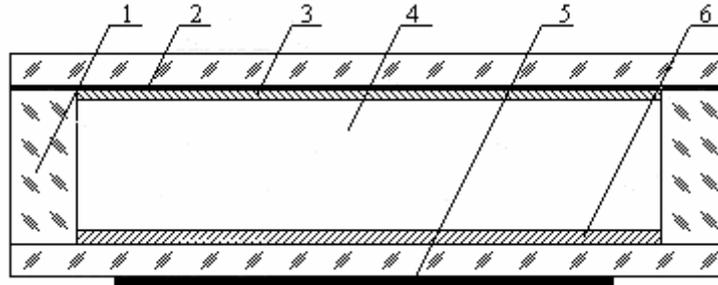


рис. 1– Газоразрядный преобразователь, 1-опорная диэлектрическая рамка; 2- прозрачный электрод; 3- люминесцентный слой; 4- газоразрядный объем; 5- непрозрачный электрод; 6- резистивный слой

Для ограничения тока в отдельных разрядах и их электрической развязки один из электродов отделен от газового объема диэлектриком.

При облучении преобразователя импульсным потоком ионизирующего излучения в результате первичной ионизации рабочего газа формируется скрытое изображение объекта контроля, которое сохраняется на время, определяемое свойствами газа. Плотность ионизации в различных участках разрядного промежутка отражает конфигурацию поля ионизирующего излучения.

При подаче на электроды импульса достаточно высокого напряжения в газе из областей первичной ионизации развиваются разряды, сопровождающиеся свечением.

В зависимости от параметров импульса напряжения общий разряд может прекратиться на лавинном, стримерной или промежуточной лавинно-стримерной стадии. Характерной особенностью и преимуществом лавинной стадии ряда является пропорциональность между первичным и результирующим ионизационными эффектами, а также яркостью свечения отдельных лавин.

Параметры ГРП, определяющие его качество во многом определяются на стадии формирования скрытого электронного изображения, и зависят от спектрального,

углового и пространственного распределения электронов и квантов, выходящих из электродов и образованных в газе после взаимодействия излучения с газовой средой.

Экспериментальный путь получения информации о данных характеристиках поля излучения в широком диапазоне энергий, для различных конструкций ГРП трудоемок и в настоящее время не представляется возможным.

Поэтому задача о получении подобной информации находилась путем решения соответствующих уравнений переноса. Система интегрально-дифференциальных уравнений, описывающих процесс распространения электронов и фотонов в бесконечной и однородной среде, имеет вид:

$$\begin{cases} [\bar{\Omega}\nabla + \sum_1 -\hat{k}_{11}] \Phi_1(\bar{x}) - \hat{k}_{12} \Phi_2(\bar{x}) = S_1(\bar{x}) \\ [\bar{\Omega}\nabla + \sum_2 -\hat{k}_{22}] \Phi_2(\bar{x}) - \hat{k}_{21} \Phi_1(\bar{x}) = S_2(\bar{x}) \end{cases} \quad (1)$$

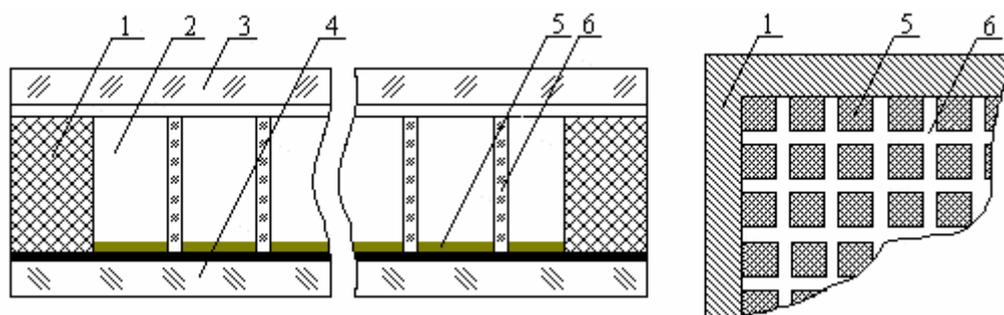
где  $\Phi_i(\bar{x}) - \Phi_i(\bar{r}, \bar{\Omega}, \bar{E})$  - дифференциальный по направлениям и энергии  $E$  поток электронов и позитронов (индекс 1) и квантов (индекс 2).

Ядрами операторов  $\hat{k}_{ij}$  являются соответствующие дифференциальные сечения  $\sum_{ij}$  процессов  $j \rightarrow i$

$$\begin{aligned} k_{ij} &= \int d\bar{\Omega}' \int dE' \sum_{ij} (\bar{\Omega}' \rightarrow \bar{\Omega}; E' \rightarrow E) \\ \sum_i &= \sum_j \int d\bar{\Omega}' \int dE' \sum_{ij} (\bar{\Omega} \rightarrow \bar{\Omega}'; E \rightarrow E') \end{aligned} \quad (2)$$

В условиях трехмерной геометрии (а именно такие задачи представляют наибольший интерес) система уравнений (1) зависит от шести переменных, кроме того, достаточно велико число различных типов взаимодействий, которые испытывают электроны и кванты при движении в веществе. Решение системы (1) осуществлялось численным методом Монте-Карло.

Проведенный обзор преобразователей показал невозможность получения высокой разрешающей способности в ГРП в связи размытием картины, вследствие ухода основного пучка электронов от оси распространения рентгеновского излучения. Основной выход излучения находится в области вакуумного ультрафиолета. Изотропное распространение УФ-излучения приводит к увеличению собственной нерезкости преобразователя. Перспективным решением данной проблемы является дискретно-ячеечная организация газового объема преобразователя, далее матричный газоразрядный преобразователь (МГРП), представленный на рисунке 2.



а – вид сбоку,

б – вид сверху

рис. 2 Матричный газоразрядный преобразователь рентгеновского излучения в видимое, 1 – опорная диэлектрическая рамка, 2 – газовый объем, 3 – выходной электрод, 4 – входной электрод, 5 – люминофор, 6 – матричная решетка

**Вторая глава** посвящена вопросам моделирования газоразрядных процессов в МГРП. Теоретически исследовано влияние конструктивных параметров МГРП с ксеноновым наполнением на его интроскопические характеристики. Рассчитаны оптимальные толщины по выходу вторичных электронов материалов, используемых в качестве входных электродов, для рентгеновского излучения. Рассмотрено влияние металлических покрытий и распределений первичной ионизации по глубине газового промежутка на параметры изображения ГРП. Произведен расчет оптимальных параметров ячейки МГРП. Проведен расчета коэффициента усиления в преобразователе, с учетом фотоионизации. Для предложенного преобразователя произведен расчет нерезкости и его частотно-контрастных характеристик.

На рис. 3. представлена геометрия расчета основных характеристик матричного преобразователя.

В таблице 1 представлены значения поглощенной энергии  $\Delta E$ , и эффективности регистрации при различных составах газового наполнения, для параметров реальных конструкций МГРП.

Варианты 6-10, рассмотренные в таблице 1 позволяют сделать вывод о том, что скрытое изображение в МГРП, наполненных ксеноном, криптоном и аргоном, формируется электронами, образованными при взаимодействии гамма квантов с атомами газа. В МГРП наполненных гелием и неонам скрытое изображение формируется электронами вышедшими из переднего и заднего электродов. Сравнение вариантов 5 и 11 таблицы 1, позволяет сделать вывод о том, что для тяжелого инертного газа наличие межъячеечного барьера сделанного из стекла толщиной 0,1 мм уменьшает поглощенную энергию в межэлектродном промежутке в 1,77 (на 43 %)

раза. Снижение эффективности взаимодействия фотонов с атомами газа, объясняется уменьшением площади взаимодействия рентгеновского излучения с газом.

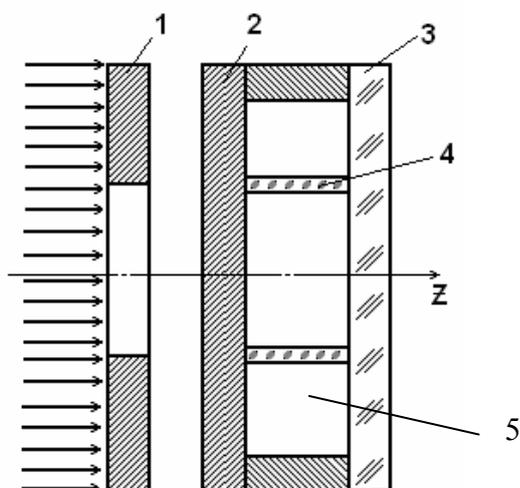


рис. 3 Геометрия расчета 1- коллиматор, 2- входной электрод  $d_1$ , 3- выходной электрод  $d_2$ , 4- межъячеечный барьер  $d_6$ , 5 – газовый объем

Таблица 1

Значения поглощенной энергии в газе  $\Delta E$ , в зависимости от размера ячейки МГРП

№	$d_1$ , мм	$d_r$ , мм	$d_2$ , мм	$d_{я}$ , мм	$d_6$ , мм	$E_{max}$ , кэВ	Газ	$\Delta E$ , МэВ/фотон в газе	$\Delta E$ , МэВ/фотон в барьере	$\xi_\gamma$ , %
1	2	0,5	2	0,3	0,05	120	He	$(0,87 \pm 0,27)10^{-8}$	$(1,2 \pm 0,24)10^{-4}$	---
2	2	0,5	2	0,3	0,05	120	Ne	$(1,83 \pm 0,95)10^{-7}$	$(1,28 \pm 0,19)10^{-4}$	---
3	2	0,5	2	0,3	0,05	120	Ar	$(0,48 \pm 0,06)10^{-6}$	$(1,33 \pm 0,1)10^{-4}$	0,01
4	2	0,5	2	0,3	0,05	120	Kr	$(0,7 \pm 0,1)10^{-5}$	$(1,38 \pm 0,22)10^{-4}$	0,1
5	2	0,5	2	0,3	0,05	120	Xe	$(2,98 \pm 0,2)10^{-9}$	$(1,44 \pm 0,15)10^{-4}$	0,8
6	0	0,5	0	0,3	0,05	120	He	$(0,2+0,09)10^{-9}$		---
7	0	0,5	0	0,3	0,05	120	Ne	$(4,6+1,1)10^{-8}$		---
8	0	0,5	0	0,3	0,05	120	Ar	$(2,56+0,44)10^{-5}$	$(1,41 \pm 0,1)10^{-3}$	0,11
9	0	0,5	0	0,3	0,05	120	Kr	$(0,89+0,12)10^{-4}$	$(1,42 \pm 0,15)10^{-3}$	0,46
10	0	0,5	0	0,3	0,05	120	Xe	$(2,1 \pm 0,21)10^{-4}$	$(1,42 \pm 0,1)10^{-3}$	1,5
11	2	0,5	2	0,3	0,1	120	Xe	$(1,68 \pm 0,24)10^{-5}$	$(2,46 \pm 0,19)10^{-4}$	0,5
12	2	0,5	0	0,3	0,05	120	Xe	$(1,04+0,14)10^{-5}$		0,2
13	0	0,5	2	0,3	0,05	120	Xe	$(2,07+0,15)10^{-4}$		1,43
14	4	0,5	2	0,3	0,05	120	Xe	$(2,63+0,05)10^{-5}$		0,1

Из таблицы 1 видно, что наибольшей эффективностью обладают МГРП, в которых в качестве рабочего газа используется ксенон (см. варианты 1-5 таблицы 1).

Наличие матричной системы оказывает существенное влияния на собственную нерезкость ГРП, как это видно из рисунка 4, где изображена зависимость радиального

распределения плотности потока электронов вылетающих из переднего электрода. Наличие барьера толщиной 0,05 мм позволяет исключить попадание электронов из одной ячейки в другую.

Изменение толщины входного электрода, выполненного из стекла в диапазоне 2 - 4 мм, не оказывает влияния на изменение поглощенной энергии в ксеноне (см. варианты таблицы 1 5,14)

Рассмотрим ЧКХ преобразователя. ЧКХ изображающего устройства – это отношение контраста на выходе и входе преобразователя в зависимости от пространственной частоты, при условии, что на вход устройства подано изображение синусоидального профиля. С помощью ЧКХ оценивается качество изображений (часто ЧКХ называют функцией передачи модуляции).

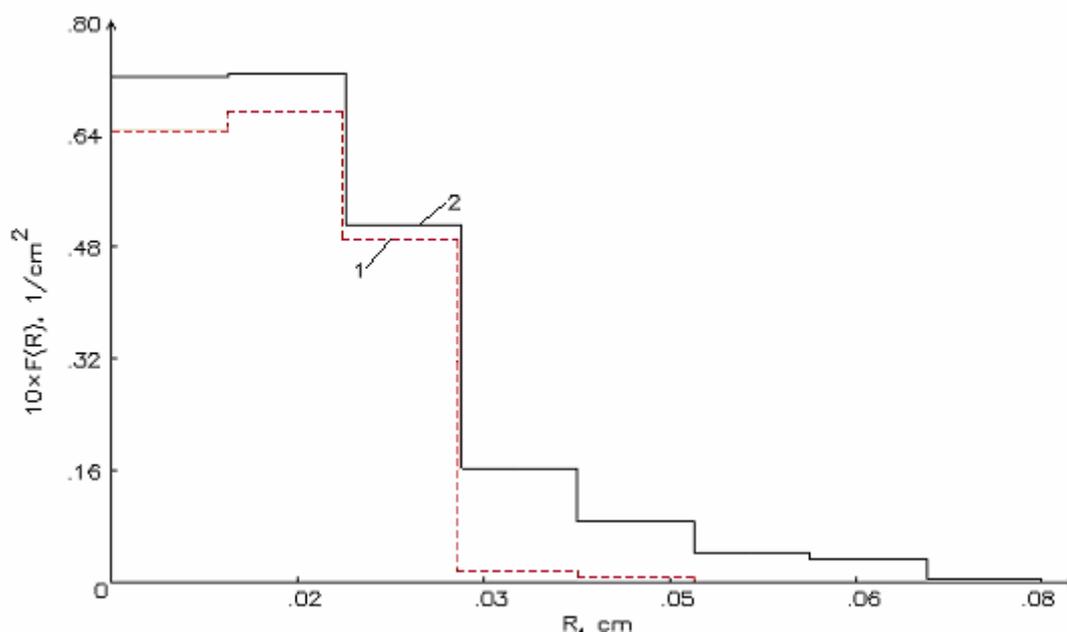


рис. 4 Радиальное распределение плотности потока электронов в газовом слое ,  
1-  $d_0=0,05$ мм, 2 -  $d_0=0$  мм.

ЧКХ отвечает требованию мультиплексности, то есть процесс формирования изображения при различных режимах работы можно рассматривать как цепь передачи изображений из  $k$  последовательных звеньев.

$$T_{\Sigma}(\nu) = \prod_{i=1}^k T_i(\nu), \quad (3)$$

ЧКХ каждого звена и системы в целом представляет собой преобразование Фурье – функции рассеяния линии  $\psi(x)$ :

$$T(\nu) = \int_{-\infty}^{\infty} \psi(x) \exp(-2\pi i x \nu) dx, \quad (4)$$

Начальное звено в процессе преобразования изображения в МГРП – формирование теневого изображения в виде пространственного распределения первичной ионизации. Для определения ЧКХ этой стадии преобразования можно использовать результаты моделирования переноса излучения в МГРП. Интегрируя функцию размытия точки (ФРТ), можно перейти к изображению резкого края полубесконечной границы, функция рассеяния линии (ФРЛ) получается дифференцированием функции от резкого края. Гистограммы радиального распределения плотности поглощенной энергии аппроксимировались кривой.

$$B(x) = B_0 + 0.5\Delta B \left[ 1 + 2\Phi \left( \frac{x - x_0}{\sigma} \right) \right], \quad (5)$$

где  $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt$  – функция Лапласа,  $\sigma$  – параметр распределения,

$x$  – координата.

Параметр распределения определяли по пограничной кривой в соответствии с методикой. В этом случае ЧКХ распределения первичной ионизации имеет вид:

$$T_i(\nu) = \exp[-2(\pi\sigma\nu)^2], \quad (6)$$

Будем считать, что в некоторый момент времени в точку  $R = 0$  падает квант. После прохождения на его «следе» образуются электроны, возбуждающие люминесценцию. Если предположить, что распределение поглощенной энергии равномерно, а яркость свечения люминесцентного слоя пропорциональна полному потоку фотонов упавших на входной электрод, то ФРТ (нормированное выражение яркости) имеет вид:

$$B(R) = \int_0^R \int_0^{d_c} \left( \frac{dE}{dx} \right) \frac{1}{\varepsilon_c} \frac{d\rho}{4\pi} \frac{zdz}{(z^2 + \rho^2)^{\frac{3}{2}}} = \frac{1}{2\pi d_c} \left[ \frac{1}{R} - \frac{1}{\sqrt{R^2 + d_c^2}} \right], \quad (7)$$

где  $d_c$  - толщина катода.

ФРЛ, характеризующую изображение от цепочки центров люминесценции, можно найти, используя выражение для ФРТ по формуле:

$$B^*(x) = 2 \int_x^\infty B(R) \sqrt{R^2 - x^2} \rho d\rho = \frac{1}{\pi d_c} \ln \sqrt{\left( 1 + \frac{d_c^2}{x^2} \right)}, \quad (8)$$

Краевая функция резкой полубесконечной границы определяется как:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x B^*(x) dx = \begin{cases} \frac{1}{\pi d_c} \left[ \frac{\pi d_c}{2} \right] + x \ln \sqrt{\left(1 + \frac{d_c^2}{x^2}\right)} + d_c \arccos \left(1 + \frac{d_c}{\sqrt{x^2 + d_c^2}}\right) & \text{при } x \geq 0 \\ \frac{1}{\pi d_c} \left[ \frac{\pi d_c}{2} \right] + |x| \ln \sqrt{\left(1 + \frac{d_c^2}{x^2}\right)} - d_c \arccos \left(1 + \frac{d_c}{\sqrt{x^2 + d_c^2}}\right) & \text{при } x < 0 \end{cases}, \quad (9)$$

На рис. 5 представлены зависимости радиального распределения поглощенной энергии в МГРП и ГРП. Как видно у МГРП радиальное распределение поглощенной энергии гораздо уже, что говорит о перспективности использования системы с диэлектрической матричной системой для улучшения качества получаемого изображения. Выражение для ЧКХ теневой картины ультрафиолетового излучения найдем, используя преобразование Ханкеля:

$$T_{UV}(\nu) = 2\pi \int_0^{\infty} B(R) J_0(2\pi R \nu) R dR = \frac{1}{2\pi \nu d_r} (1 - e^{-2\pi \nu d_r}), \quad (10)$$

где  $d_r$  – величина разрядного промежутка,  $J_0$  – функция Бесселя первого рода первого порядка.

ЧКХ нерассеивающего люминесцентного слоя работающего на «просвет»:

$$T_L(\nu) = \frac{K_0(\tau \sqrt{4\pi^2 \nu_0^2 + 1})}{K_0(\tau)}, \quad (11)$$

где  $K_0$  – функция Макдональда,  $\nu_0$  – безразмерная оптическая толщина.

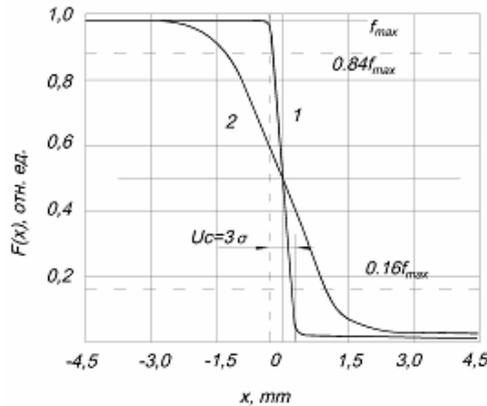


рис. 5 Зависимость распределения поглощенной энергии от резкого края полубесконечной границы (получена преобразованием ФРТ) 1 - для МГРП, 2 - для ГРП (толщина разрядного промежутка 5 мм). (Кривые нормированы по первому слою кривой 1).

Общая ЧКХ МГРП с учетом (6) будет иметь вид:

$$T_{МГРП}(\nu) = \frac{(1 - e^{-2\pi \nu d_c})(1 - e^{-2\pi \nu d_r}) K_0(\tau \sqrt{4\pi^2 \nu_0^2 + 1})}{(2\pi \nu)^2 d_c d_r K_0(\tau)}, \quad (12)$$

ЧКХ ГРП представляется в виде:

$$T_{МГРП}(v) = \frac{\exp[-2(\pi\sigma v)^2(1 - e^{-2\pi d_r})] K_0(\tau\sqrt{4\pi^2 v_0^2 + 1})}{2\pi v d_r K_0(\tau)}, \quad (13)$$

Отношение  $\xi = \frac{T_{МГРП}(v)}{T_{ГРП}(v)}$  во всем диапазоне пространственных частот превышает 1.

$$\xi = \frac{T_{МГРП}(v)}{T_{ГРП}(v)} = \frac{1 - e^{-2\pi d_r v}}{2\pi v d_r e^{-2(\pi\sigma v)^2}} > 1, \quad (14)$$

Из выражения (14) следует, что при любых значениях пространственных частот, разрешающая способность МГРП лучше, чем у ГРП. На рис. 6 показана зависимость  $T_{МГРП}(v)$  и  $T_{ГРП}(v)$ .

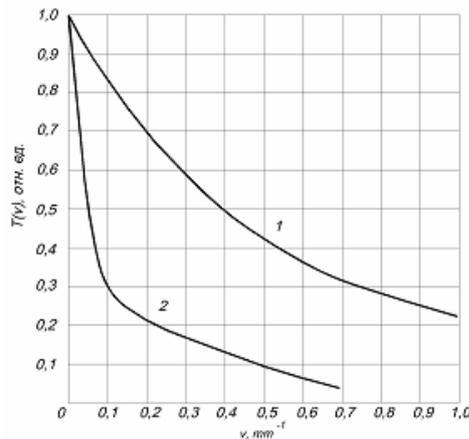


рис. 6 Зависимость ЧКХ  $T(v)$  от пространственной частоты.

**В третьей главе** рассмотрены вопросы питания газоразрядного преобразователя. Исследуются влияние формы импульса питания на параметры ГРП. Временные параметры газоразрядного преобразователя: время памяти, время восстановления диэлектрической прочности газа. Разработана физико-математическая модель изменения плотности ионизации от времени и предложены алгоритмы ее вычисления. На основании предложенной модели и экспериментальных исследований времени памяти ГРП, получено значение пороговой плотности ионизации ксенона в ГРП соответствующая максимальной контрастной чувствительности.

Для определения коэффициента контрастности ГРП методом численного эксперимента была разработана эквивалентная схема комплекса ГРП – генератор питания, которая представлена на рис. 7

В качестве генератора питания использовался RC – генератор с накопительной емкостью. На схеме пунктиром выделена эквивалентная схема ГРП для анализа

влияния параметров генератора питания и ГРП на коэффициент контрастности, в которой ГРП моделируется элементами:

- $C_2$  – емкость диэлектрика рабочей площади;
- $C_3$  – емкость газового промежутка рабочей площади;
- $C_4$  – емкость диэлектрика контрастного участка;
- $C_5$  – емкость газового промежутка контрастного участка;
- $I_6$  – ток газового разряда рабочей площади;
- $I_7$  – ток газового разряда контрастного участка.

Генератор питания представлен в схеме следующими элементами:

- $C_1$  – емкость накопительного конденсатора;
- $R_1$  – динамическое сопротивление коммутатора, определяемое соотношением
- $R_2$  – сопротивление разрядного контура;
- $L$  – индуктивность разрядного контура и соединительных проводов;
- $R_3$  – разрядное сопротивление;

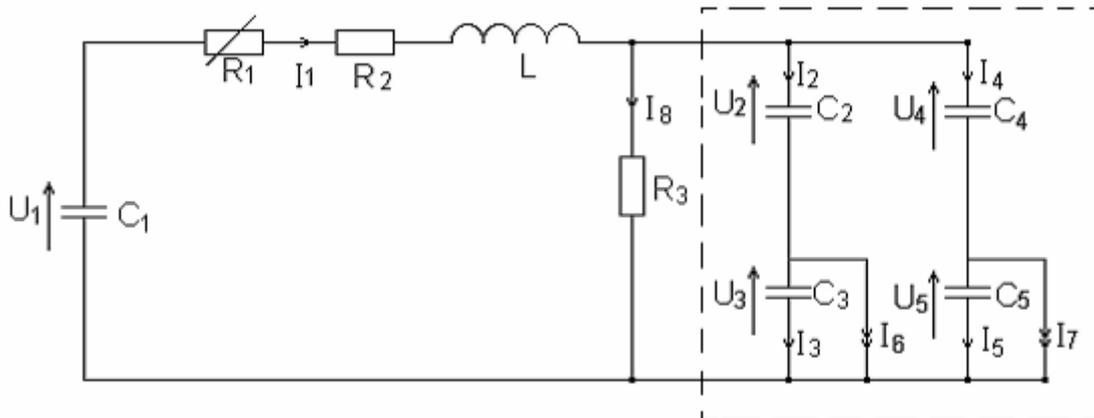


Рисунок 7– Эквивалентная схема комплекса ГРП – генератор питания

Электрические процессы в этой схеме описываются системой уравнений:

$$R_1 = T_k U_0^{2/3} b \left( \int_0^t I_1^{2/3} dt \right)^{-1}, \quad (15)$$

$$U_1 - U_2 - U_3 - I_1(R_1 + R_2) - L \frac{dI_1}{dt} = 0, \quad (16)$$

$$U_2 + U_3 = I_8 R_3, \quad (17)$$

$$I_1 = I_2 + I_4 + I_8, \quad (18)$$

$$I_2 = I_3 + I_6, \quad (19)$$

$$I_4 = I_5 + I_7, \quad (20)$$

$$\frac{dU_1}{dt} = -\frac{I_1}{C_1}, \quad (21)$$

$$\frac{dU_2}{dt} = \frac{I_2}{C_2}, \quad (22)$$

$$\frac{dU_3}{dt} = \frac{I_3}{C_3}, \quad (23)$$

$$\frac{dU_4}{dt} = \frac{I_4}{C_4}, \quad (24)$$

$$\frac{dU_5}{dt} = \frac{I_5}{C_5}, \quad (25)$$

$$I_4 = I_2 \frac{C_4}{C_2} - (I_6 \frac{C_4}{C_2} - I_7) \frac{C_2}{C_2 + C_3}, \quad (26)$$

$$I_6 = \frac{qN_1 N_2 v_1}{d}, \quad (27)$$

$$I_7 = \frac{qN_3 N_4 v_2}{d}, \quad (28)$$

$$\frac{dN_1}{dt} = N_1 \alpha_1 v_1, \quad (29)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = N_2 \alpha_2 v_2, \quad (30)$$

$$W_1 = \int_0^t U_3 I_6 dt, \quad (31)$$

$$W_2 = \int_0^t U_5 I_7 dt, \quad (32)$$

$$v_1 = f_1(U_3), \quad (33)$$

$$v_2 = f_1(U_5), \quad (34)$$

$$\alpha_1 = f_2(U_3), \quad (35)$$

$$\alpha_2 = f_2(U_5), \quad (36)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = -\frac{v_1}{d}, \quad (37)$$

$$\frac{dN_4}{dt} = -\frac{v_2}{d}, \quad (38)$$

На основе анализа экспериментальных данных для решения системы уравнений (15) – (38) в данной работе выбран метод решения дифференциальных уравнений с предсказанием по Адамсу-Балфорту с коррекцией по Адамсу-Милтону и модификацией, который для одномерной задачи Коши имеет следующий вид:

$$y_{k+1}^{\text{пред}} = y_k + \frac{1}{24} (55f_k - 59f_{k-1} + 37f_{k-2} - 9f_{k-3}) \Delta x, \quad (39)$$

$$y_{k+1}^{\text{мод}} = y_{k+1}^{\text{пред}} + \frac{251}{270} (y_k^{\text{кор}} - y_k^{\text{пред}}), \quad (40)$$

$$y_{k+1}^{\text{кор}} = y_k + \frac{1}{24} (9f_{k+1}^{\text{мод}} + 19f_k - 5f_{k-1} + f_{k-2}) \Delta x, \quad (41)$$

$$y_{k+1} = y_{k+1}^{\text{кор}} - \frac{19}{270} (y_{k+1}^{\text{кор}} - y_{k+1}^{\text{пред}}), \quad (42)$$

Выбор этого метода обусловлен тем, что на начальном этапе все изменения в комплексе сосредоточены в коммутаторе, и при оценке погрешности расчета процессами в ГРП можно пренебречь. В этом случае изменение всех величин будет происходить по закону трех вторых и, следовательно, в начальной процедуре расчета можно использовать метод Эйлера.

На рис. 8 представлены результаты моделирования процессов в гозорядном преобразователе в комплексе с генератором питания.

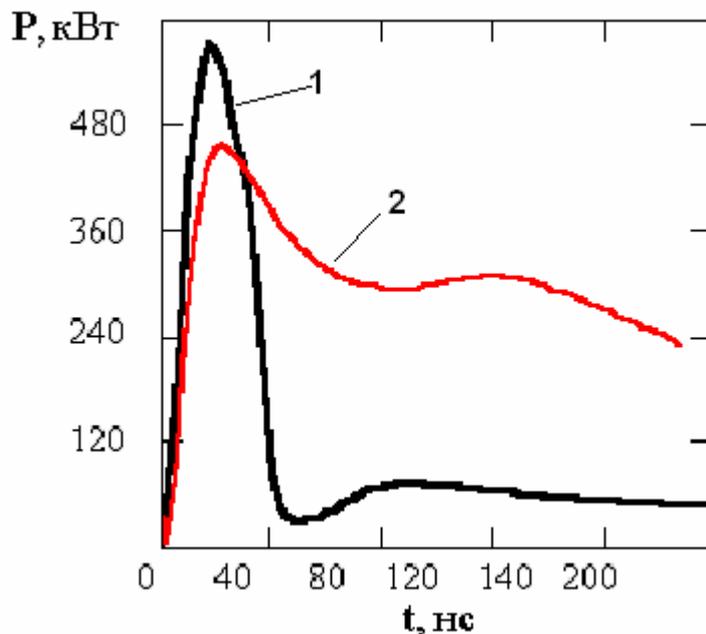


рис. 8 Мощность газоразряда ГРП, 1- генератор прямоугольных импульсов, 2- – RC- генератор.

При определении времени памяти и времени восстановления в качестве критерия возвращения газа в исходное состояние можно использовать плотность электронов, полученную расчетным путем из распределения краевой функции в чистом ксеноне при задержке импульса питания относительно импульса излучения на 1 мс. Возможность использования данного критерия подтверждается экспериментальными наблюдениями, где при задержке 1 мс изображение контролируемого объекта не проявлялось. Теоретические расчеты, проведенные

численными методами с использованием ранее приведенных соотношений дают величину  $\sim 8 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$ .

На рис 9 представлена функция распределения электронов резкой полубесконечной границы при различных задержках импульса питания относительно импульса излучения и при различных добавках воздуха.

Анализ расчетов по определению времени памяти ГРП по разрешающей способности ГРП, позволяет сделать вывод, что при изменении добавок воздуха к ксенону 0 - 10 мм. рт.ст. время памяти регулируется в пределах  $10^{-3}$  -  $10^{-7}$  с. Так как возможно, что время восстановления газа зависит от коэффициента усиления газового разряда, рассмотрим вопрос о влиянии на этот коэффициент параметров источника питания ГРП

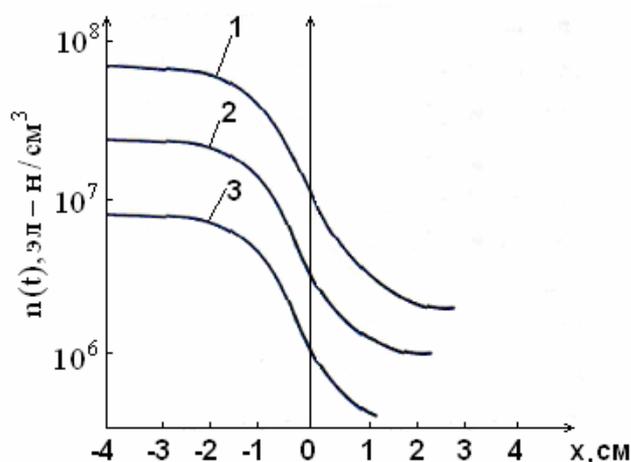


Рис. 9 Измерение плотности электронов резкой полубесконечной границы при различных задержках импульса питания относительно импульса излучения с воздушными добавками  $p=10$  мм. рт.ст. 1 -  $t_3 = 0$ , 2 -  $t_3 = 10$  мкс, 3 -  $t_3 = 100$  мкс.

В условиях ГРП газовый разряд формируется большим числом первоначальных электронов образованных при взаимодействии ионизирующего излучения с атомами газа, а, следовательно, имеет большое значение плотности тока. Это приводит к тому, что, начиная с некоторой стадии, на разряд в ГРП начинает влиять слой диэлектрика, напряжение на котором будет повышаться в результате зарядки его емкости током разряда. Это приводит в свою очередь к снижению напряжения на газовом зазоре, в результате чего практически прекращается размножение электронов. В свою очередь импеданс ГРП будет оказывать сильное шунтирующее влияние на процессы в генераторе питания. В ГРП мощность газового разряда нарастает лавинообразно, следовательно, основная информация о контролируемом объекте получается на

конечной стадии разряда, когда взаимное влияние ГРП и генератора питания велико, в этой связи нет смысла использовать сложные генераторы прямоугольных импульсов, ввиду невозможности реализации их преимуществ. На рис. 10 представлена зависимость коэффициента усиления газового разряда в зависимости от напряжения питания при различных дозах.

На начальной стадии, ГРП, как и искровая камера, ведет себя как чисто емкостная нагрузка, однако, вследствие отличия формы разряда и вида представляемой информации, требования к длительности фронта импульса питания ГРП менее жесткие. В ГРП при наличии переднего фронта у импульса питания происходит уменьшение числа электронов в рабочем объеме, что приводит к уменьшению информации об объекте контроля. Это компенсируется значительным увеличением длительности и амплитуды импульса питания. Кроме того, это позволяет использовать легкие и компактные генераторы, в основе которых лежит разряд накопительной емкости на сопротивление.

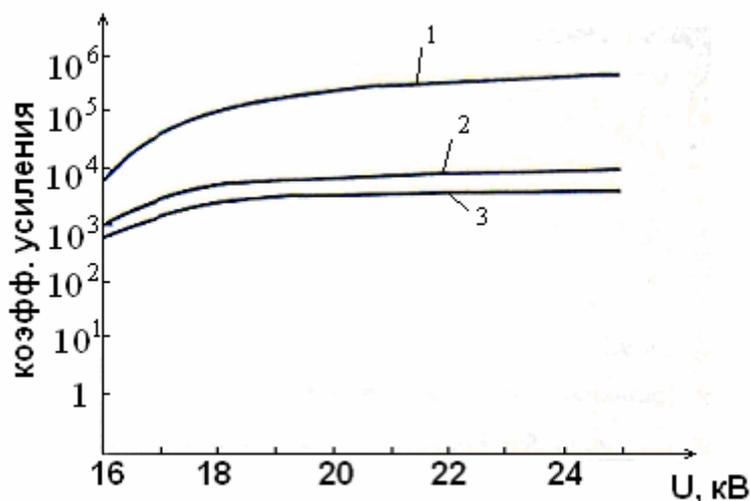


рис. 10 Зависимость коэффициента усиления газового разряда в зависимости от напряжения питания при различных дозах. 1 -  $D_{\text{эксп.}} = 1 \text{ мкР}$ , 2 -  $D_{\text{эксп.}} = 50 \text{ мкР}$ , 3 -  $D_{\text{эксп.}} = 100 \text{ мкР}$ .

**В четвертой главе** рассмотрены вопросы экспериментального исследования параметров изображения ГРП и МГРП.

Оценка абсолютной яркости свечения ГРП проводилась с использованием фотографической методики. Наличие зависимости относительной яркости от различных режимов работы преобразователя, наполненного одним из исследуемых газов, позволило определять абсолютную яркость только для одного случая. При этом

расстояния от поверхности детектора до передней главной плоскости объектива составило 52 см. Обработка результатов проводилась с использованием характеристических кривых для белого света.

Абсолютная яркость газоразрядных преобразователей, наполненных аргоном, криптоном, ксеноном, измеренная при частоте следования импульсов  $f = 25 \text{ Гц}$  на стадии перехода лавины в стример, составила  $\sim 2 \cdot 10^{-2} \text{ нит}$ ; у ГРП наполненных неоном – 0,2 нит, ГРП наполненных аргоном – 0,02 нт.

Более высокая яркость преобразователей, наполненных неоном, обусловлена большим числом фотонов, приходящихся на один акт ионизации, в этом газе по сравнению с другими в рассматриваемом диапазоне напряжённостей поля.

Качество оптического изображения, образуемого на экране преобразователя, существенно зависит от его разрешающей способности и частотно-контрастной характеристики. Последняя наиболее полно характеризует связь между разрешающей способностью (РС) и контрастом изображения. РС определяется с помощью микроскопа или по собственной нерезкости детектора и зависит от контраста изображения.

При минимальном контрасте, близком к пороговому, в области исследованных энергий рентгеновского излучения разрешающая способность ГРП, наполненных неоном, составляет 0,17 линий на мм, аргона – 0,25 линий на мм, криптоном – 0,6 – 0,8 линий на мм, ксеноном – 0,85 – 1,2 линий на мм.

**В заключении** приведены основные результаты исследований, проведенных в данной работе.

#### **Основные результаты работы заключаются в следующем:**

1. В условиях разряда в ГРП с ксеноновым наполнением вклад ассоциативной ионизации в размножение электронов не превышает  $10^{-2} \%$ .
2. Увеличение экспозиционной дозы в плоскости ГРП приводит к сужению области лавинно-стримерного перехода.
3. Для практических целей наиболее эффективно применение отпаянных газоразрядных преобразователей, обладающих высокой стабильностью параметров и практически неограниченным ресурсом работы.
4. Использование в ГРП матричной технологии позволяет повысить разрешающую способность преобразователя до 2 - 3 пар лин. /мм.

5. В МГРП толщина межъячеечных стенок 0,05 мм из стекла не влияет на первичное распределение поглощенной энергии. Увеличение толщины в 2 раз уменьшает энергию, поглощенную в газе на 46 %.
6. Наличие металлического покрытия на входном электроде ГРП приводит к увеличению поглощенной энергии в газе. Для оловянного покрытия толщиной 10 мкм поглощенная энергия увеличивается на 18 %.. Для медного в 2 раза
7. Плотность стекла барьера не позволяет проникнуть УФ- излучению в соседние ячейки, что приводит к снижению собственной нерезкости преобразователя. Собственная нерезкость МГРП будет определяться толщиной межъячеечного барьера.
8. Теоретически установлена и подтверждена экспериментально пороговая плотность ионизации ксенона в ГРП  $8 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$  соответствующая максимальной контрастной чувствительности.
9. Установлено, что изменения дозы в импульсе от 1 до 100 мкР приводят к изменению интегральной яркости изображения ГРП на 8 % с сохранением качества изображения, когда амплитуда импульсов питания находится в пределах 20 - 25 кВ;

**Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:**

1. Цицура В. Н. Силантьев О. И. Кулешов В. К. Алхимов Ю. В. Газоразрядный преобразователь радиационного изображения в видимое с дискретной организацией газового пространства. Решение о выдаче патента на полезную модель по заявке № 2006136868/(04138) от 17.10.2006 г.
2. Алхимов Ю.В., Алхимов В.Ю., Кулешов В.К., Силантьев О.И., Цицура В.Н. Газоразрядный преобразователь с матричной структурой //Известия Томского политехнического университета. - Томск : Изд. ТПУ, 2006- т. 309, - № 5. - с. 56-60
3. Цицура В.Н., Силантьев О.И., Алхимов В.Ю. Разрешающая способность ГРП в режиме организации газового пространства //Качество - стратегия XXI века: Материалы XI международной научно-практической конференции - Томск, - Томск : Изд.ТПУ, 2006. - с. 157-161
4. Кулешов В.К., Алхимов Ю.В., Цицура В.Н. Влияние ассоциативной ионизации на развитие разряда газоразрядного преобразователя // Успехи современного естествознания. - г.Москва, 2003 г. №8. – с 129

5. Alkhimov Y.V., Tsitsura V.N., Silantiev O.N. Ways of gas discharge converters image enhancement //Modern technique and technologies MTT2005: Proceedings of the 11th International Conference- Tomsk: TPU, 2005. – 212p

6. Кулешов В.К., Алхимов Ю.В., Цицура В.Н. Временные параметры газоразрядного преобразователя рентгеновского изображения //Актуальные проблемы современной науки :4-я международная конференция - Самара, сентябрь 2003. - Самара: , 2003. - с. 12-16

7. Цицура В.Н. Микродозовая портативная переносная рентгенотелевизионная система для неразрушающего экспресс контроля //Современные техника и технологии :Труды Девятой международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых - Томск, апрель 2003. - Томск: Изд.ТПУ, 2003. - с. 165-166

8. Алхимов Ю.В., Цицура В.Н. , Силантьев О.И., Кулешов В.К. Применение ПЗС - структур для повышения качества изображения, получаемого с экрана газоразрядного преобразователя //Качество - стратегия XXI века Материалы VIII международной научно - практической конференции - Томск, ноябрь 2003. - Томск: НТЛ, 2003. - с. 134 - 136

9. Кулешов В.К., Алхимов Ю.В., Цицура В.Н. Автоматизированный комплекс рентгенопневмополиграфии на основе газоразрядного преобразователя // Четвертая международная научно-техническая конференция «Измерение, контроль, информатизация» г. Барнаул 2003. – с 143-146