

*На правах рукописи*

**ЛЕБЕДЬ ВИТАЛИЙ НИКОЛАЕВИЧ**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ  
ГЕНЕРАЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ  
В ПЛАЗМЕННЫХ ПАНЕЛЯХ**

Специальность 05.27.02

«Вакуумная и плазменная электроника»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Рязань 2006

Работа выполнена на кафедре электронной техники и технологии ГОУВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет»

**Научный руководитель** доктор технических наук, профессор

**Чижиков Алексей Егорович**

**Официальные оппоненты** доктор технических наук, профессор

**Шестёркин Алексей Николаевич**

кандидат технических наук, доцент

**Шипалов Анатолий Семёнович**

**Ведущая организация**

**НПЦ «ЭКПО» ОАО «Плазма», г. Рязань**

Защита состоится «22» июня 2006 г. в 11 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.211.03 в ауд. 235 ГОУВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет» по адресу: 390005, Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1

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

Автореферат разослан «    » мая 2006 г.

Учёный секретарь

диссертационного совета Д 212.211.03

доктор технических наук, профессор

Колотилин Б.И.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

В настоящее время одним из наиболее распространённых и востребованных типов приборов для формирования видимого изображения и отображения информации являются плазменные панели (ПП). Достоинствами ПП по сравнению с кинескопами являются существенно меньшие массогабаритные характеристики, отсутствие высокого напряжения и вредного для человека излучения, нечувствительность к магнитным полям. ПП превосходят жидкокристаллические панели по пиковой яркости, контрастности, цветопередаче, углу обзора, быстродействию, максимальному размеру монодисплея.

Лучшие ПП переменного тока имеют физическое разрешение телевидения высокой чёткости HDTV (1920×1080 пикселей) при диагонали экрана от 50 до 103 дюймов (наибольшая монопанель), срок службы 70000 часов, собственную контрастность 10000:1, способны отображать 549 млрд цветowych оттенков. Общемировой объём их выпуска (с диагональю свыше 37 дюймов) неуклонно растёт: в 2004 г. он составил 3.56 млн ед., а в 2005 г. – 7.15 млн ед. (выручка производителей – 6 млрд долларов), из которых 5.9 млн ед. – для телевизоров. ПП постоянного тока имеют более низкую себестоимость и находят широкое применение в наборных экранах из небольших монопанелей и как малые экраны информационного назначения.

Недостатком ПП является относительно невысокая эффективность, которая в серийно выпускаемых панелях переменного тока не превышает 2 лм/Вт (это вдвое ниже, чем в кинескопах), а в панелях постоянного тока – 0.5 лм/Вт. Потенциально возможная эффективность для источников света равна 683 лм/Вт. Это побуждает проводить дальнейшие, более детальные исследования процессов генерации излучения, происходящих при преобразовании энергии в газовом разряде и фотолюминофорах (ФЛФ).

**Цель работы:** исследование процессов генерации излучения фотолюминофоров и разряда и поиск способов повышения яркости и эффективности плазменных панелей.

Достижение поставленной цели потребовало решить следующие **задачи:**

- исследование яркости и эффективности ПП в непрерывном, импульсном и короткоимпульсном режимах и выявление наиболее существенных причин их ограничения;
- исследование кинетики разгорания и затухания излучения ФЛФ трёх основных цветов свечения для определения оптимальных режимов возбуждения;

- исследование связи между интенсивностями излучения ФЛФ в видимой области спектра и газового разряда (ксенона) в ближней инфракрасной (БИК) области спектра для разработки косвенного метода определения интенсивности вакуумного ультрафиолетового (ВУФ) излучения для контроля качества ПП;
- обоснование и разработка рекомендаций по совершенствованию конструкции, технологии изготовления и режимов эксплуатации ПП.

**Достоверность** полученных результатов подтверждается большим объёмом и статистической обработкой экспериментальных данных, соответствием результатов экспериментов теории и аналитическим расчётам, использованием дублирующих приборов и устройств для измерения электрических величин и регистрации световых потоков в видимой и ближней инфракрасной областях спектра.

### **Научная новизна**

1. Показано, что повышение яркости плазменных панелей с ростом тока аномального тлеющего разряда ограничивается вследствие увеличения напряжённости поля в области катодного падения потенциала и соответствующего снижения эффективности генерации вакуумного ультрафиолетового излучения ксенона в газовой смеси.

2. Найдено, что эффективность плазменных панелей возрастает с уменьшением длительности импульса тока из-за понижения средней по времени напряжённости электрического поля в области развития электронных лавин.

3. Установлено, что в применяемых в плазменных панелях фотолуминофорах рекомбинационного типа свечения существует зависимость величины скачкообразного уменьшения яркости (по отношению к амплитуде) в момент окончания возбуждения и времени послесвечения от длительности импульса возбуждения, не превышающей время разгорания.

4. Выявлено, что в плазменных панелях интенсивность вакуумного ультрафиолетового излучения ксенона в газовой смеси пропорциональна интенсивности ближнего инфракрасного излучения в области спектра 800÷1100 нм.

### **Практическая ценность**

1. Рекомендовано при конструировании и изготовлении плазменных панелей с высокой яркостью и эффективностью при наибольшем токе нормального тлеющего разряда обеспечивать высокое давление газовой смеси и большую активную площадь катода при высоком коэффициенте вторичной эмиссии.

2. Показано, что наиболее выгодные условия для преобразования энергии в разряде существуют при работе плазменных панелей с длительностью импульса тока не более  $50\div 70$  нс, при которой к его окончанию катодное падение потенциала не успевает сформироваться.

3. Установлено, что для обеспечения высокой эффективности преобразования энергии в плазменных панелях необходимо выбирать интенсивность, длительность и частоту следования импульсов возбуждения (тока разряда) такими, чтобы истинное время затухания фотолуминофоров не превышало длительность паузы между импульсами.

4. Предложен способ определения интенсивности вакуумного ультрафиолетового излучения ксенона по интенсивности ближнего инфракрасного излучения для диагностики качества готовых плазменных панелей и на этапе их производства.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. В режиме аномального тлеющего разряда увеличение яркости плазменных панелей с ростом тока существенно ограничивается (в  $4\div 6$  раз при изменении тока на порядок) вследствие значительного (в 2.5 раза) повышения напряжённости поля в области катодного падения потенциала и соответствующего (в  $3\div 4$  раза) снижения эффективности генерации вакуумного ультрафиолетового излучения ксенона.

2. Эффективность плазменных панелей значительно возрастает (в 25 раз, до 15 лм/Вт в условиях незавершённости процесса формирования катодного падения потенциала) с уменьшением длительности импульса тока (на три порядка, до  $50\div 70$  нс) из-за понижения средней по времени напряжённости электрического поля в области развития электронных лавин.

3. Время послесвечения фотолуминофоров рекомбинационного типа свечения существенно сокращается (по уровню 0.05 у ФГИ-627/593-1 / $\text{YVO}_3\text{:Eu}$ / – более чем на 3 порядка, у ФГИ-528-1 / $\text{Zn}_2\text{SiO}_4\text{:Mn}$ / и ФГИ-455-2 / $\text{BaMg}_2\text{Al}_{16}\text{O}_{27}\text{:Eu}$ / – вдвое) при уменьшении длительности импульса возбуждения (в диапазоне от времени разгорания до субмикросекундной длительности) в результате перераспределения локализованных носителей заряда от глубоких ловушек к мелким.

4. В плазменных панелях интенсивность вакуумного ультрафиолетового излучения разряда (резонансная линия ксенона 147 нм и континуум с максимумом на 173 нм) пропорциональна интенсивности ближнего инфракрасного излучения ( $800\div 1100$  нм), образующегося при распаде состояния  $\text{Xe}^{**}$  в резонансное  $\text{Xe}^*(^3\text{P}_1)$  или метастабильное  $\text{Xe}^*(^3\text{P}_2)$  состояния.

### **Реализация результатов**

Результаты работы и основные рекомендации по повышению яркости и эффективности плазменных панелей используются на предприятиях НПЦ «ЭКПО» ОАО «Плазма» и ТОО «ИНКО Лтд» г. Рязани, а также в учебном процессе на факультете электроники РГРТУ при подготовке инженеров по специальности «Электронные приборы и устройства».

### **Апробация работы**

Результаты исследований представлены в 9 публикациях и докладывались на 48-й и 49-й студенческих научно-технических конференциях РГРТА (Рязань, 2001 и 2002), 11-й конференции по физике газового разряда (Рязань, 2002), 38-й и 39-й научно-технических конференциях РГРТА (Рязань, 2004 и 2006), 12-й международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (Москва, МЭИ (ТУ), 2006).

**Личный вклад автора** Все результаты и выводы, представленные в диссертации, получены лично автором.

### **Структура и объём работы**

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и библиографического списка, включающего 117 источников. Работа изложена на 194 страницах машинописного текста, в ней содержится 49 рисунков, 14 таблиц и 34 формулы.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** рассмотрены характеристики современных плазменных панелей, их достоинства и недостатки в сравнении с присутствующими на рынке и разрабатываемыми дисплеями на основе других технологий. Обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи, решаемые в диссертации. Приведены научная новизна, практическая ценность и положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** представлен обзор известных данных по процессам генерации излучения в ПП, происходящим при преобразовании энергии в газовом разряде и ФЛФ. Кратко описаны два базовых типа ПП: постоянного и переменного тока. Выделены основные этапы преобразования энергии. Рассмотрена эффективность передачи энергии разряда электронам, возбуждения ксенона электронами и генерации ВУФ излучения ксенона. Изложены механизмы образования ВУФ и БИК излучения ксенона, сделан вывод об их тесной взаимосвязи, в том числе по исследованиям

пространственно-временных характеристик в ячейках серийных и экспериментальных ПП переменного тока. Приведены данные о перспективных видах разряда в ПП.

Рассмотрены механизм, эффективность и кинетика (динамика изменения интенсивности ФЛФ при разгорании во время возбуждения и при затухании после окончания возбуждения) рекомбинационной фотолюминесценции по классическим представлениям. Представлены и критически оценены имеющиеся данные о современных ФЛФ для ПП (кинетика изучена крайне мало, систематических данных нет).

Завершается глава постановкой конкретных задач, решаемых в работе, и обоснованием выбора в качестве объектов исследования ПП постоянного тока промышленной конструкции с ортогональной системой проволочных электродов с типичными для всех типов ПП наполнением и ФЛФ рекомбинационного типа красного (состав  $YVO_3:Eu$ , марка ФГИ-627/593-1), зелёного ( $Zn_2SiO_4:Mn$ , ФГИ-528-1 и ФГИ-520-1) и синего ( $BaMg_2Al_{16}O_{27}:Eu$ , ФГИ-455-2) цвета свечения.

**Вторая глава** посвящена исследованию яркости и эффективности ПП при стационарном разряде в непрерывном режиме, в котором на них влияют только два параметра – ток и напряжение поддержания разряда.

В разделе 2.1 описаны все исследованные в работе ПП, методика эксперимента и приборы. Основные ПП наполнены смесью Xe(25%)-Ne(15%)-He до 100, 150 и 350 Торр попарно. В одну из панелей в каждой паре добавлена ртуть (в одинаковом количестве). Панель с давлением наполнения ~100 Торр с добавкой ртути выпускается серийно отечественными производителями. Кратчайшее межэлектродное расстояние составляет 0.35 мм. ФЛФ (ФГИ-627/593-1, ФГИ-528-1, ФГИ-455-2) нанесён и на дно, и на потолок ячеек. Каждая ячейка имеет площадь лицевой поверхности 10 мм<sup>2</sup> и содержит 5 катодов, отстоящих друг от друга на равное расстояние (в плоскости, параллельной стеклопластинам), общей длиной 10 мм и один анод длиной 6 мм, материал электродов – сплав 47НД (Fe-Ni-Cr), диаметр – 0.12 мм.

Дополнительно исследовались две ПП аналогичной конструкции. Первая панель одноцветная (ФГИ-520-1) и наполнена только ксеноном до 30 Торр, площадь ячейки – 50 мм<sup>2</sup>. Ячейка содержит 7 катодов и 6 анодов общей длиной 50 и 42 мм соответственно. Вторая панель трёхцветная (ФГИ-627/593-1, ФГИ-520-1, ФГИ-455-2) и наполнена до 30 Торр смесью Xe-Ne-He (с Hg) с почти тем же процентным соотношением между газами, что и в основных панелях. Ячейка площадью 125 мм<sup>2</sup> содержит 31 катод и 4 анода общей длиной 185 и 85 мм соответственно.

Напряжение от источника питания подавалось через ограничительный резистор (7.95 кОм) на отдельную ячейку панели (в каждой панели исследовалось не менее пяти ячеек в центре и по направлению к углам). Яркость измерялась цифровым

люксметром-яркомером ТКА-ПК, характеристика спектральной чувствительности датчика (диаметр 6 мм) которого близка к кривой видности глаза человека, поэтому при одинаковых условиях яркость и эффективность ячеек зелёного цвета свечения наибольшие, а синего – наименьшие.

Эффективность ячеек (светоотдача) рассчитывалась делением излучаемого светового потока на электрическую мощность:

$$\chi = \frac{\pi B s}{U I}, \quad (1)$$

где  $B$  – яркость,  $s$  – площадь ячейки,  $U$  – напряжение на ячейке и  $I$  – ток разряда.

В разделе 2.2 исследовано влияние вида тлеющего разряда на яркость и эффективность ПП. Независимо от типа ФЛФ, давления и состава газового наполнения и наличия ртути яркость ячеек увеличивается с ростом тока (рис. 1) даже при величинах, в несколько раз превышающих амплитуду импульсного тока в рабочем режиме (1.6 мА для основных панелей). При нормальном тлеющем разряде (НТР) яркость увеличивается почти пропорционально току, с небольшим отклонением от линейности в сторону меньших значений, что свидетельствует почти о постоянстве эффективности. При аномальном тлеющем разряде (АТР) яркость растёт значительно медленнее, чем при НТР (ограничивается тем сильнее, чем больше ток), а эффективность ячеек снижается (в диапазоне от 2.5 до 5 мА – вдвое).

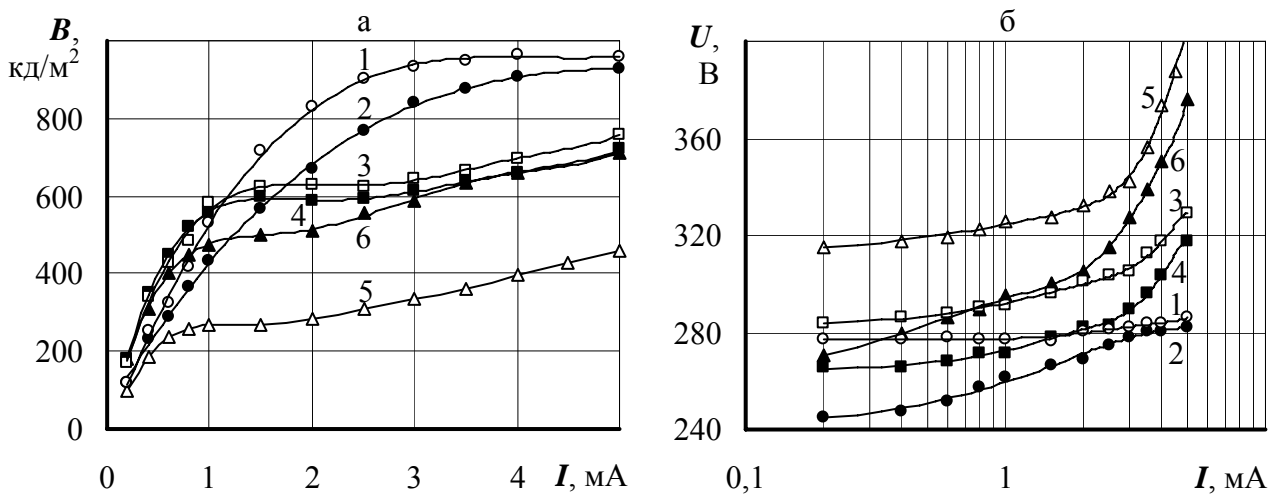


Рис. 1. Зависимости яркости ячеек с ФГИ-528-1 (а) и напряжения поддержания разряда (б) от тока в панелях с давлением наполнения Хе(25%)-Не(15%)-Не 350 Торр (1), 350 Торр с Hg (2), 150 Торр (3), 150 Торр с Hg (4), 100 Торр (5), 100 Торр с Hg (6)

Известно, что с увеличением давления (и/или площади катода) максимальный ток НТР возрастает. Благодаря этому яркость и эффективность ПП с давлением наполнения 350 Торр в среднем (в зависимости от типа ФЛФ) вдвое больше, чем у ПП с давлением 100 (с Hg) и 150 Торр, в которых при том же токе существует АТР.



Яркость ячеек с ФГИ-455-2 при увеличении тока АТР в диапазоне  $2.5 \div 5$  мА растёт быстрее на  $10 \div 20$  %, чем ячеек с гораздо (на порядки) более инерционными ФГИ-627/593-1 и ФГИ-528-1, в которых существенно больше проявляется высвечивающее действие возбуждающего света (когда его кванты тратятся бесполезно – на освобождение носителей заряда из ловушек), снижающее квантовый выход фотолюминесценции.

В разделе 2.3 детально рассмотрены следующие причины, которые потенциально могут приводить к ограничению яркости и снижению эффективности ячеек ПП с ростом тока разряда:

- 1) трансформация спектра ВУФ излучения ксенона, приводящая к уменьшению квантового выхода ФЛФ;
- 2) насыщение яркости ФЛФ при интенсивном возбуждении ВУФ излучением;
- 3) уменьшение концентрации газа (ксенона) вследствие вытеснения газа в соседние ячейки;
- 4) разогрев газа и ФЛФ за счёт выделяющейся в разряде мощности, вызывающий контракцию разряда и тепловое тушение фотолюминесценции;
- 5) снижение эффективности возбуждения ксенона с ростом энергии электронов при увеличении напряжённости электрического поля в области катодного падения потенциала (ОКПП) газоразрядного промежутка.

Выявлено, что основной причиной является последняя. Расчёт, проведённый с использованием программы BOLSIG (Boltzmann Equation Solver) фирмы Kinema Software, предназначенной для численного решения уравнения Больцмана в двухчленном приближении, показал, что эффективность возбуждения ксенона (в том числе в смеси Хе(25%)-Не(15%)-Не) в однородном электрическом поле максимальна при отношении напряжённости поля  $E$  к давлению газа  $p$   $9 \div 15$  В/(см·Торр), а при более высоких значениях  $E/p$  уменьшается.

При линейном распределении потенциала в газовом промежутке в момент возникновения разряда в ячейке даже при 350 Торр  $E/p = 250$  В / ( $0.035$  см · 350 Торр) =  $22.5$  В/(см·Торр). При НТР с учётом известного значения  $pd_{кн} = 0.26$  см·Торр для пары Хе-Ni  $E/p$  в ОКПП составляет порядка  $1000$  В/(см·Торр) и не меняется с ростом тока, поэтому эффективность возбуждения ксенона постоянна. При АТР по сравнению с НТР  $E/p$  в ОКПП увеличивается пропорционально  $(U \cdot I)^{1/3}$ , поэтому эффективность возбуждения ксенона с ростом тока снижается.

На этой основе рассчитаны теоретические зависимости яркости ячеек исследованных ПП от тока разряда (раздел 2.4). По экспериментальным данным выявля-

лись ток  $I_0$ , при котором НТР переходит в АТР, и соответствующее ему напряжение поддержания разряда  $U_0$ . При токе  $I > I_0$  значение  $E/p$  определялось по формуле

$$\frac{E}{p} = \frac{E_0}{p} \left( \frac{U}{U_0} \frac{I}{I_0} \right)^{1/3} = \frac{U_0}{pd_{кн}} \left( \frac{U}{U_0} \frac{I}{I_0} \right)^{1/3}. \quad (2)$$

Значения напряжения поддержания разряда  $U$  при токе  $I$  брались из эксперимента.

Для каждого значения  $E/p$  в программе BOLSIG вычислялась эффективность возбуждения ксенона во все состояния  $\eta_{возб}$ ; полагалось, что эффективность генерации вакуумного ультрафиолетового излучения прямо пропорциональна  $\eta_{возб}$ .

Яркость ячейки находилась по формуле

$$B = B_0 \frac{I}{I_0} \frac{\eta_{возб}}{\eta_{возб0}}, \quad (3)$$

где  $\eta_{возб0}$  – эффективность возбуждения ксенона при  $E_0/p$ .

Теоретическая зависимость яркости ячейки панели с ксеноном от тока разряда, рассчитанная при  $pd_{кн} = 0.26$  см·Торр, существенно отклоняется от линейной в сторону меньших значений: при 2 мА в 1.52, при 4 мА – в 2.22 и при 8 мА – в 3.53 раза (для экспериментальной зависимости эти значения составляют 1.74, 3.24 и 5.69 соответственно). При увеличении тока от 1 до 8 мА отношение  $E/p$  в ОКПП возрастает в 2.25 раза, а  $\eta_{возб}$  снижается при этом в 3.17 раза. Расхождение между теоретической и экспериментальной зависимостями относительно невелико и во многом обусловлено тем, что в ФГИ-520-1, самом инерционном из четырёх ФЛФ, потери на высвечивающее действие возбуждающего света наибольшие.

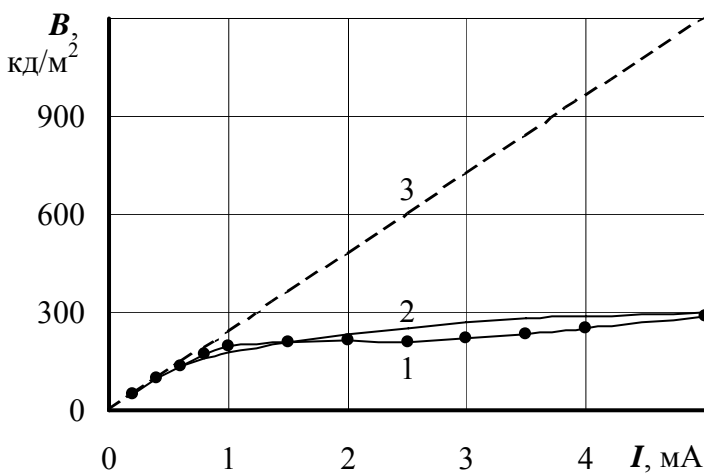


Рис. 2. Зависимости яркости ячейки с ФГИ-455-2 от тока стационарного разряда в панели, наполненной Хе(25%)-Не(15%)-Не до 150 Торр: 1 – эксперимент, 2 – расчёт при  $pd_{кн} = 0.5$  см·Торр, 3 – при линейном росте

Для основных панелей было рассчитано семейство кривых при разных  $pd_{кн}$ , диапазон значений  $pd_{кн}$  выбирался по экспериментальному (0.26 см·Торр) и теоретическому (0.86 см·Торр) значениям для пары Хе-Ni. Отклонение яркости от линейного роста при 5 мА составляет в среднем 3.5 раза, при этом по сравнению с 0.6 мА отношение  $E/p$  в ОКПП возрастает в 2.2 раза, а  $\eta_{возб}$  снижается в 2.7÷4 раза в зависимости от принятого  $pd_{кн}$ . Ход теорети-

ческих и экспериментальных (для ячеек с наименее инерционным ФЛФ) зависимостей качественно совпадает (рис. 2).

Таким образом, исследования в непрерывном режиме позволили установить основную причину ограничения яркости и снижения эффективности ПП с ростом тока разряда.

**Третья глава** посвящена исследованию яркости и эффективности ПП в импульсном режиме. В **разделе 3.1** описаны методика эксперимента и установка для исследований, приведена разработанная схема усиления прямоугольных импульсов, задаваемых генератором, собранная на основе полевого транзистора IRF 840 (820).

Зависимости средней яркости от среднего тока и вольт-амперные характеристики, представленные в **разделе 3.2**, снимались для разной длительности импульса. В соответствии с физическим разрешением панелей скважность по напряжению устанавливалась равной 32. В импульсном режиме, как и в непрерывном, зависимость яркости от тока при НТР идёт линейно. При переходе к АТР кривая перегибается, и яркость растёт в несколько раз медленнее. Также было установлено, что максимальный ток, при котором напряжение поддержания разряда почти не растёт (как при НТР), при сокращении длительности импульса увеличивается, что позволяет сохранить линейность зависимости яркости от тока и получить более высокую яркость (при 0.22 мкс по сравнению с 3.1 и 310 мкс в ячейках с ФГИ-528-1 – в 1.7 и 3, с ФГИ-627/593-1 – в 2.4 и 3.8 и с ФГИ-455-2 – в 2.5 и 3.9 раза соответственно).

Проведённые исследования позволяют объяснить известный факт увеличения яркости при сокращении длительности импульса тем, что отношение длительности

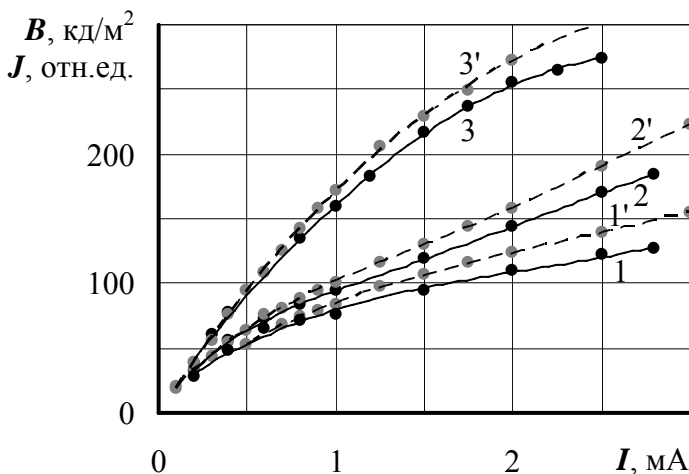


Рис. 3. Зависимости средней яркости ФГИ-455-2 (1–3) и интенсивности ближнего инфракрасного излучения разряда (1'–3') от среднего тока в ячейках панели, наполненной Хе-Не-Не до 30 Торр, при длительности импульса (скважность 32) 31 (1, 1'), 3.1 (2, 2') и 0.22 мкс (3, 3')

неустановившейся стадии разряда, когда область развития электронных лавин широкая ( $E/p$  относительно мало) и эффективность возбуждения ксенона высока, к длительности установившейся стадии ( $E/p$  велико) увеличивается.

В эксперименте по сопоставлению средней яркости ячеек с ФЛФ со средней интенсивностью БИК излучения разряда в ячейках без ФЛФ было получено подтверждение того, что с ростом тока снижается, главным образом, эффективность преобразования

энергии в разряде, а не в ФЛФ (рис. 3): отклонение обеих зависимостей от линейной почти одинаково. Так, при длительности импульса 0.22 мкс увеличение среднего тока от 0.2 до 2 мА сопровождается отклонением яркости от линейного роста в сторону меньших значений на 57 %, из них из-за снижения эффективности преобразования энергии в разряде – на 50 % и в ФГИ-455-2 – только на 7 %. В двух других ФЛФ потери больше, чем в ФГИ-455-2, что отмечалось для непрерывного режима.

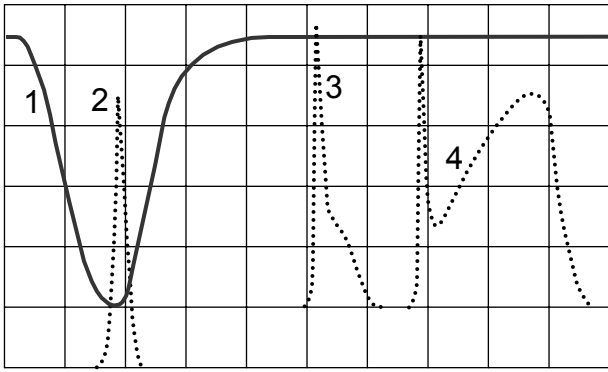


Рис. 4. Типичные осциллограммы импульсов напряжения на ячейке (1) и тока (2–4) при короткоимпульсном разряде в панели, наполненной ксеноном до 30 Торр: 1 дел. – 100 нс; 100 В (1), 8 мА (2), 16 мА (3, 4)

В разделе 3.3 изложены результаты исследования яркости и эффективности ПП в короткоимпульсном режиме. Было получено, что при длительности импульса тока 50÷70 нс (по уровню 0.1) средняя яркость растёт почти линейно вплоть до величины тока, при которой ионы успевают в течение импульса достичь катода (импульс 2 трансформируется в 3, рис. 4), приводя к установлению ширины области развития электронных лавин. При условии, когда выход электронов из катода обеспечивается за счёт только фотоэлектронной эмиссии, в панели с ксеноном была получена эффективность ячейки до 15 лм/Вт, что в 25 раз больше (в основных панелях во столько же), чем при НТР. При большем токе яркость ограничивается; степень отклонения от линейной зависимости в панелях с повышенным давлением наполнения меньше (при 150 Торр – на 25÷35 % в зависимости от ФЛФ, чем при 100 Торр), поэтому достижимая яркость выше.

С ростом тока яркость быстрее всего увеличивается в ячейках с малоинерционным ФГИ-455-2, медленнее всего – в ячейках с самым инерционным ФГИ-528-1 (рис. 5). Как следствие, относительный спад эффективности в ячейках с ФГИ-455-2 наименьший, с ФГИ-528-1 – наибольший.

Во всех экспериментах средний ток увеличивался за счёт амплитуды в импульсе. В короткоимпульсном режиме были также выполнены эксперименты, когда это делалось за счёт увеличения длительности импульса тока при неизменной амплитуде. После прохождения короткого импульса ток стремится стабилизироваться на определённом уровне. Судя по его форме, ионы примерно через 50÷70 нс достигают катода (импульс 4, рис. 4). При этом происходит существенное (как минимум в несколько раз) ограничение яркости (рис. 6). Зависимость яркости от тока в панелях с более высоким давлением наполнения ближе к линейной.

В разделе 3.3 изложены результаты исследования яркости и эффективности ПП в короткоимпульсном режиме. Было получено, что при длительности импульса тока 50÷70 нс (по уровню 0.1) средняя яркость растёт почти линейно вплоть до величины тока, при которой ионы успевают в течение импульса достичь катода (импульс 2 трансформируется в 3, рис. 4), приводя к установлению ширины области развития электронных лавин. При условии, когда выход электронов из катода обеспечивается за счёт только фотоэлектронной эмиссии, в панели с ксеноном была получена эффективность ячейки до 15 лм/Вт, что в 25 раз больше (в основных панелях во столько же), чем при НТР. При большем токе яркость ограничивается; степень отклонения от линейной зависимости в панелях с повышенным давлением наполнения меньше (при 150 Торр – на 25÷35 % в зависимости от ФЛФ, чем при 100 Торр), поэтому достижимая яркость выше.

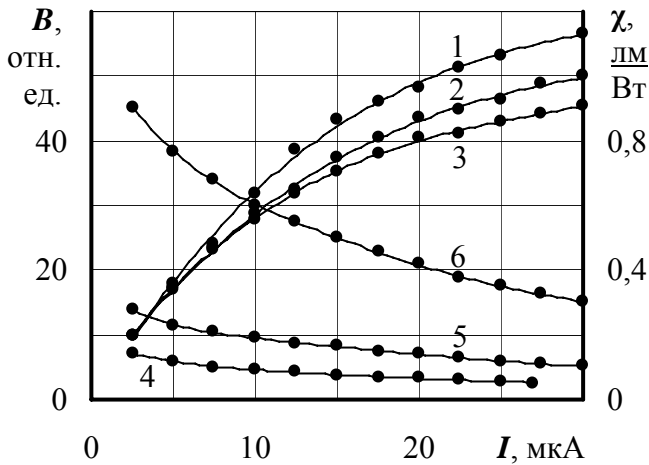


Рис. 5. Зависимости относительной средней яркости (1, 2, 3) и эффективности (4, 5, 6) соответственно ячеек с ФГИ-455-2, ФГИ-627/593-1 и ФГИ-528-1 от среднего тока короткоимпульсного разряда в панели с давлением наполнения Хе(25%)-Не(15%)-Не 100 Торр с Hg при периоде следования импульсов 25 мкс

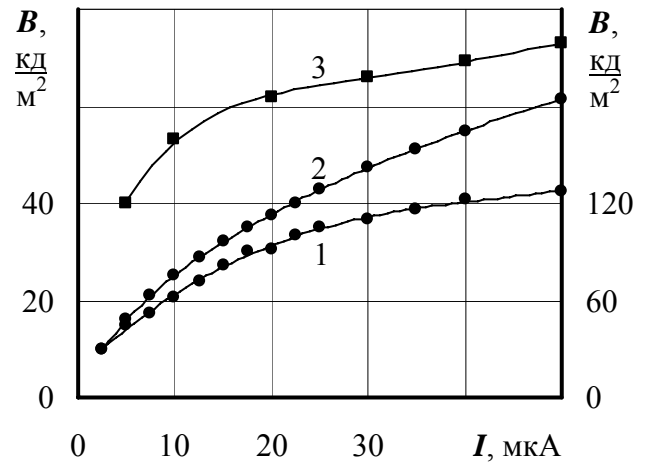


Рис. 6. Зависимости средней яркости от среднего тока в ячейках панелей с давлением наполнения Хе(25%)-Не(15%)-Не 100 Торр с Hg (1) и 150 Торр (2) /ФГИ-455-2/ (яркость по левой оси ординат) и Хе 30 Торр (3) /ФГИ-520-1/ (яркость по правой оси ординат)

В **четвёртой главе** изложены результаты исследования кинетики разгорания и затухания излучения ФЛФ (динамики изменения мгновенной яркости в импульсе и в паузе) и особенности излучения разряда в видимой и БИК областях спектра.

В **разделе 4.1** приведены полученные спектры излучения ячеек разного цвета свечения. Показано, что в видимой области они полностью соответствуют спектрам излучения ФЛФ (ФГИ-627/593-1 излучает в диапазоне 550÷710 нм, ФГИ-528-1 – 470÷640 нм, ФГИ-455-2 – 400÷640 нм).

В **разделе 4.2** описаны общая методика и приборы для исследования кинетики излучения ячеек ПП, в качестве которых использовались ФЭУ-19М (видимая область) и полупроводниковый преобразователь светового потока в электрический сигнал Burr-Brown ОРТ209Р (видимая и БИК области), на основе которого была собрана установка для измерений. В соответствии со спектрами излучения ячеек ПП выбраны оптические светофильтры для выделения излучения ФЛФ и разряда.

В **разделе 4.3** рассмотрено быстрое действие ФЭУ-19М и ОРТ209Р при разной чувствительности, которое измерялось с использованием светодиодов.

В **разделе 4.4** показано, что между импульсом БИК излучения разряда (ксенона) и импульсом тока существует корреляция.

Исследование особенностей излучения разряда в синей области спектра (**раздел 4.5**), позволило оценить длительность послесвечения ВУФ излучения (зависит от длительности и амплитуды импульса тока и не превышает 10 мкс по уровню 0.05), дополнительно возбуждающего ФЛФ в начале паузы между импульсами.

В разделе 4.6 изложены результаты исследования кинетики ФЛФ в основных панелях. В начале раздела обоснована необходимость исследования в широком диапазоне длительности импульса и интенсивности возбуждения.

В подразделах 4.6.1 и 4.6.2 приведены данные о кинетике ФГИ-627/593-1 и ФГИ-528-1. Показано, что они не переходят к стационарному состоянию свечения даже через 3 мс от начала возбуждения при экстремально большом для ячеек ПП импульсном токе 65 мА ( $18 \text{ мА/мм}^2$ ) (рис. 7). При большей интенсивности возбуждения (токе разряда), судя по изменению угла наклона кривой, разгорание происходит быстрее. Оба ФЛФ запасают большую светосумму (количество носителей заряда в ловушках). В конце импульса возбуждения мгновенная яркость достигает амплитуды, после чего скачкообразно уменьшается на тем большую величину относительно неё, чем короче импульс (рис. 7). Закон затухания после скачка описывается рболой второго порядка. Время послесвечения ФГИ-627/593-1 при уменьшении длительности импульса от миллисекунд до микросекунд сокращается на три порядка, а ФГИ-528-1 – примерно вдвое (см. табл.). При частоте следования импульсов свыше 100 Гц (при скважности 32) в излучении обоих ФЛФ появляется постоянная составляющая, которая при 140 кГц у ФГИ-627/593-1 достигает трети от амплитуды импульса, а у ФГИ-528-1 превышает её на порядок. Это усиливает высвечивающее

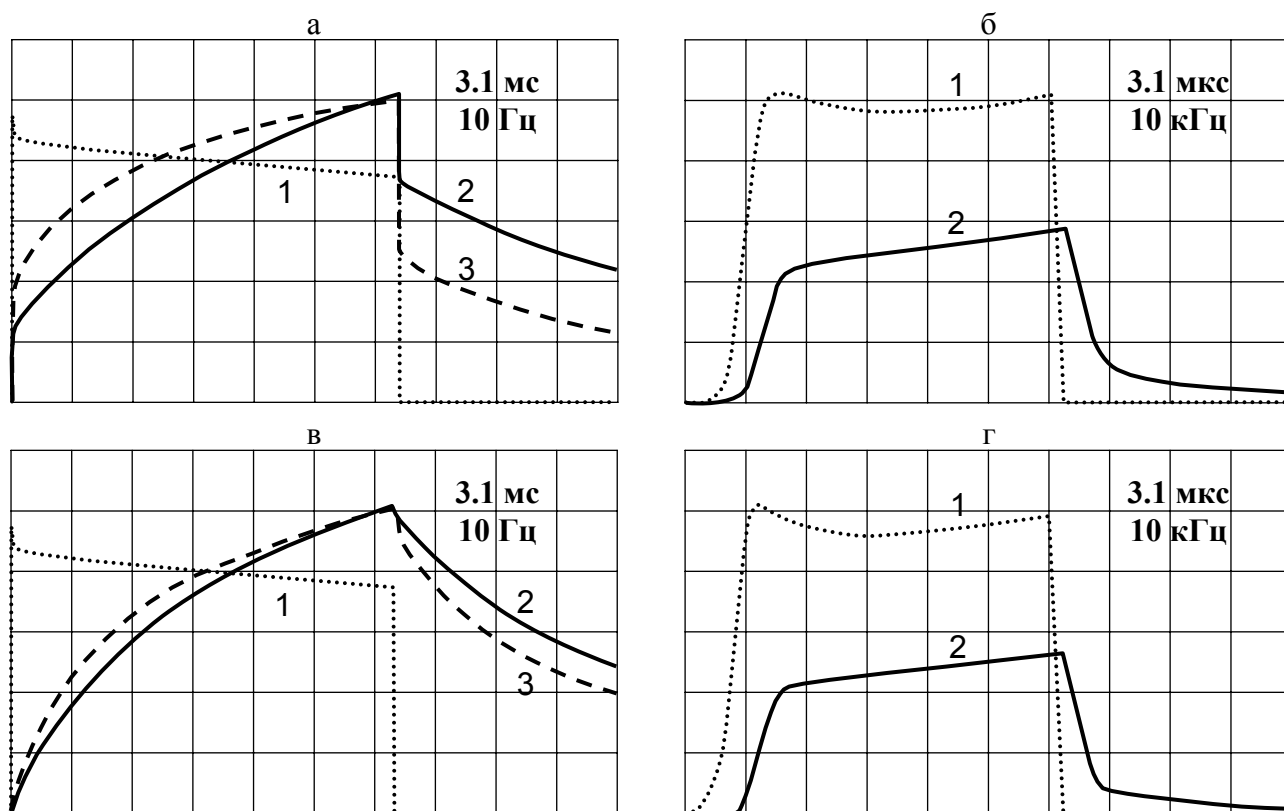


Рис. 7. Осциллограммы импульсов тока разряда (1) и излучения фотолуминофоров ФГИ-627/593-1 (а, б; 2, 3) и ФГИ-528-1 (в, г; 2, 3) в ячейке плазменной панели:

а, в: средний ток 0.2 (2) и 2 (3) мА; 0.5 мс/дел.

б, г: средний ток 0.2 мА; 0.5 мкс/дел.

действие возбуждающего света, поскольку разгорание в импульсе начинается при некоторой запасённой (а не нулевой) светосумме.

Истинное время послесвечения фотолуминофоров (по уровню 0.05) в плазменных панелях в зависимости от длительности импульса тока разряда  $T_u$  при разной его величине

| Марка         | $I_u$ , мА | $T_u$ , мкс       | 3100  | 1000  | 310   | 100  | 31   | 10  | 3.1  | 1   | 0.5 | 0.22 |
|---------------|------------|-------------------|-------|-------|-------|------|------|-----|------|-----|-----|------|
| ФГИ-627/593-1 | 6.5        | $\tau_{nc}$ , мкс | 11000 | 9600  | 6000  | 3000 | 50   | 12  | 9    | –   | –   | –    |
|               | 16         | мкс               | 10500 | 9500  | 7200  | 3600 | 400  | 10  | 4.5  | –   | –   | –    |
| ФГИ-528-1     | 6.5        | $\tau_{nc}$ , мкс | 12500 | 11300 | 10500 | 9500 | 7300 | –   | –    | –   | –   | –    |
|               | 16         | мкс               | 11800 | 10600 | 9400  | 8700 | –    | –   | –    | –   | –   | –    |
| ФГИ-455-2     | 6.5        | $\tau_{nc}$ , мкс | 30    | 30    | 30    | 28   | 23   | 17  | 14.5 | 15  | 17  | 17.5 |
|               | 32         | мкс               | 12    | 12    | 12    | 11   | 10   | 8.8 | 8.3  | 8.1 | 8   | –    |

В подразделе 4.6.3 по кинетике ФГИ-627/593-1 и ФГИ-528-1 сделан общий вывод о том, что между степенью разгорания ФЛФ к концу импульса, величиной скачкообразного уменьшения яркости после его окончания по отношению к амплитуде импульса и временем послесвечения при изменении длительности импульса существует устойчивая взаимосвязь. Предложена методика расчёта времени разгорания ФЛФ по параметрам импульса излучения при нестационарном свечении. Согласно вычислениям в условиях эксперимента время разгорания ФГИ-627/593-1 – 4÷8 мс, ФГИ-528-1 – 5÷10 мс и уменьшается при более интенсивном возбуждении.

В подразделе 4.6.4 рассмотрена кинетика ФГИ-455-2. В стационарном состоянии импульс излучения ФГИ-455-2 после короткого (10÷30 мкс) разгорания повторяет по форме импульс возбуждения (рис. 8, а), от длительности которого время послесвечения не зависит (см. табл.). При затухании из нестационарного состояния

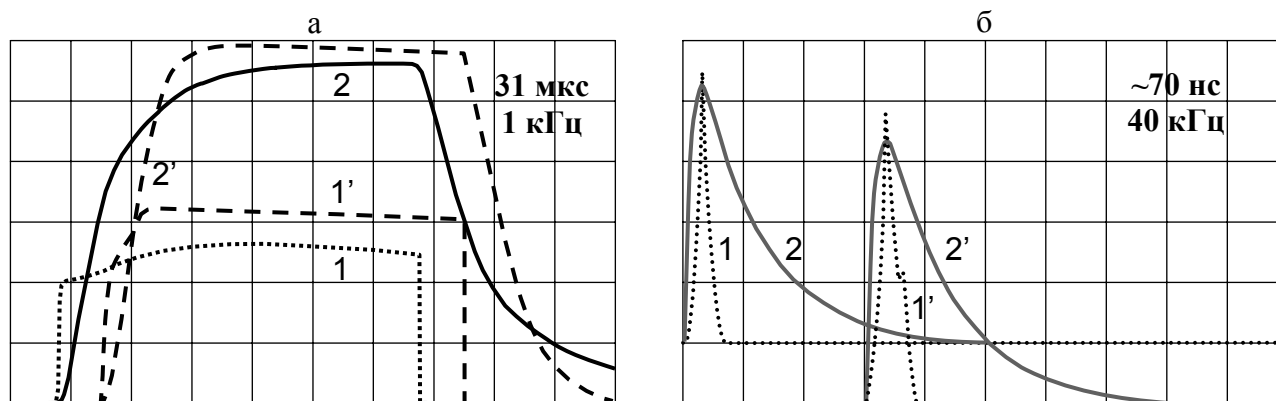


Рис. 8. Осциллограммы импульсов тока разряда (1, 1') и излучения фотолуминофора ФГИ-455-2 (2, 2') в ячейке плазменной панели:

а: средний ток 0.2 (1, 2) и 1 (1', 2') мА; 5 мкс/дел.

б: средний ток 5 (1, 2) и 25 (1', 2') мкА; 1, 1' – 100 нс/дел., 2, 2' – 5 мкс/дел.

с уменьшением длительности импульса время послесвечения сокращается, стремясь к некоторому постоянному для данной интенсивности возбуждения значению. ФГИ-455-2 запасает на много порядков меньшую светосумму, чем ФГИ-627/593-1 и ФГИ-528-1. При большей интенсивности возбуждения время разгорания и затухания уменьшается. При субмикросекундных импульсах ФГИ-455-2 начинает разгораться только в паузе, и всё его излучение представляет собой послесвечение (рис. 8, б). Предлагается объяснение этого явления. При скважности не менее 32 постоянная составляющая в излучении появляется лишь при частоте свыше 50 кГц.

В разделе 4.7 излагаются вопросы о причине ускорения высвечивания ФЛФ при затухании с уменьшением длительности импульса возбуждения. Рассчитаны вероятность освобождения носителей заряда из ловушек теплом и глубина ловушек, при которой освобождение теплом и светом равновероятно.

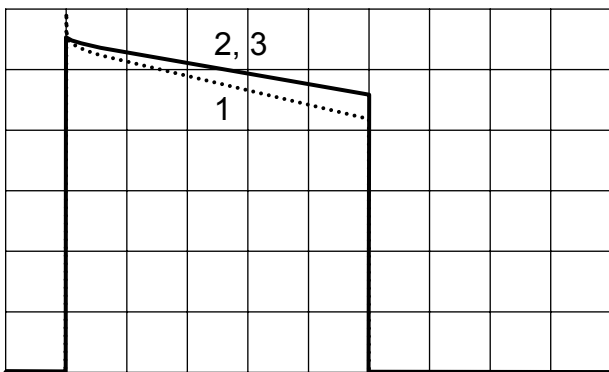


Рис. 9. Осциллограммы импульсов тока разряда (1), излучения ФГИ-455-2 в стационарном состоянии (2) и ближнего инфракрасного излучения разряда (3) в плазменной панели при среднем токе 0.2 мА: 1–3 – 1 мс/дел.

В разделе 4.8 показано, что интенсивность ВУФ излучения ксенона, оцениваемая по интенсивности ФГИ-455-2 в стационарном состоянии, пропорциональна интенсивности БИК (исследовался диапазон 800÷1100 нм) излучения (рис. 9, 10). Недостаток известного косвенного метода определения интенсивности ВУФ заключается в том, что в ПП с ростом тока выделяемая в разряде мощность увеличивается, ФЛФ нагревается, и его яркость падает (кривые 1 и 2 на рис. 10 после 20 мА начинают расходиться). Также показано, что при увеличении импульсного тока от 0.2 до 7.7 мА эффективность генерации ВУФ излучения снижается на порядок.

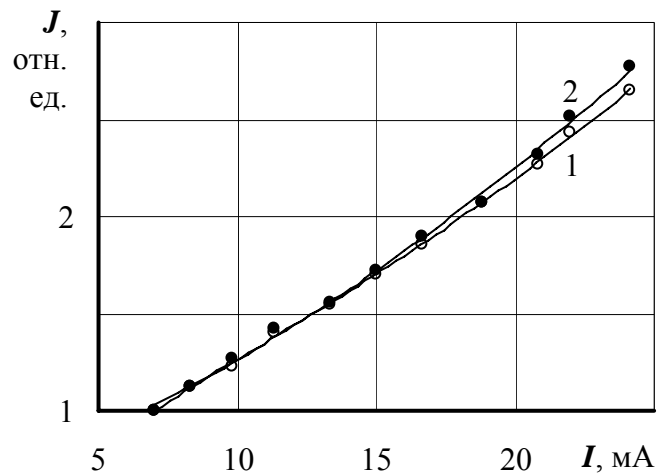


Рис. 10. Зависимости мгновенной интенсивности излучения ФГИ-455-2 в стационарном состоянии (1) и ближнего инфракрасного излучения разряда (2) от импульсного тока в ячейках панели с давлением наполнения Xe(25%)-Ne(15%)-He 150 Торр

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы состоят в следующем.



1. Исследована зависимость яркости ПП от тока тлеющего разряда. Теоретически и экспериментально показано, что с ростом тока увеличение яркости ячеек ограничивается, а эффективность снижается. Установлена основная причина этого – снижение эффективности генерации ВУФ излучения ксенона из-за повышения напряжённости электрического поля в области катодного падения потенциала.

2. Выявлена связь вольт-амперной характеристики (ВАХ) с яркостью и эффективностью ячеек ПП в непрерывном, импульсном и короткоимпульсном режимах. При токах, соответствующих на ВАХ пологому участку (при стационарном разряде – НТР), снижение эффективности минимально, и яркость увеличивается почти линейно. При токах, соответствующих на ВАХ нарастающему участку (АТР), эффективность снижается в несколько раз, что приводит к пропорциональному ограничению увеличения яркости.

3. Показано, что наиболее выгодные условия для преобразования энергии в ПП существуют при длительности импульса тока не более  $50 \div 70$  нс, при которой к его окончанию катодное падение потенциала не успевает сформироваться, и средняя по времени напряжённость поля в области развития электронных лавин меньше, чем при установившемся разряде. В панели, наполненной ксеноном до 30 Торр, при условии выхода электронов из катода за счёт только фотоэлектронной эмиссии получена эффективность ячейки (с ФГИ-520-1)  $10 \div 15$  лм/Вт при средней яркости  $70 \div 100$  кд/м<sup>2</sup>.

4. Найдено, что в непрерывном, импульсном и короткоимпульсном режимах наименьшее снижение эффективности с ростом тока (и наибольшее увеличение яркости при сокращении паузы между импульсами) имеют ячейки с малоинерционным ФГИ-455-2, а наибольшее – ячейки с самыми инерционными ФГИ-528-1 и ФГИ-520-1, что связано с влиянием высвечивающего действия возбуждающего света.

5. Установлено, что определяющее влияние на кинетику разгорания ФЛФ в ПП оказывают длительность и интенсивность импульса возбуждения. В рабочих режимах (и далеко за их пределами), характерных для панелей постоянного и переменного тока, ФГИ-627/593-1 и ФГИ-528-1 крайне далеки от стационарного состояния в импульсе, а ФГИ-455-2, напротив, близок к нему. Предложена методика расчёта времени разгорания. Показано, что оно сокращается при увеличении интенсивности возбуждения.

6. Обнаружена зависимость величины скачкообразного уменьшения яркости ФЛФ (по отношению к амплитуде) в момент окончания возбуждения и времени послесвечения от длительности импульса возбуждения. При затухании ФЛФ после возбуждения до стационарного состояния, при котором распределение носителей заряда по ловушкам является установившимся, при данной интенсивности возбуж-

дения время послесвечения наибольшее и не зависит от длительности импульса. При затухании после возбуждения до нестационарного состояния время послесвечения сокращается тем существеннее, чем короче импульс.

7. В ячейках ПП выявлена корреляция между импульсами тока установившегося разряда и БИК излучения ксенона. Установлено, что интенсивность ВУФ излучения ксенона пропорциональна интенсивности БИК излучения (800÷1100 нм). Предложен способ определения интенсивности ВУФ излучения по интенсивности БИК излучения для диагностики качества готовых ПП и на этапе их производства.

### Список публикаций по теме диссертации

1. *Коротченко В.А., Чижиков А.Е., Иванов А.В., Лебедь В.Н.* Моделирование короткоимпульсного разряда // *Электроника: Межвузовский сборник научных трудов / РГРТА. Рязань, 2001. С. 10–13.*
2. *Чижиков А.Е., Лебедь В.Н.* О некоторых особенностях работы фотолуминофоров при возбуждении короткими импульсами // *Электроника: Межвузовский сборник научных трудов / РГРТА. Рязань, 2002. С. 3–5.*
3. *Чижиков А.Е., Лебедь В.Н.* Особенности возбуждения фотолуминофоров в газовом разряде // *Тезисы докладов XI конференции по физике газового разряда. Ч. 2. Рязань, 2002. С. 90–91.*
4. *Чижиков А.Е., Лебедь В.Н.* Исследование температуры фотолуминофора в плазменных индикаторах // *Информационные технологии в электронике: Межвузовский сборник научных трудов / РГРТА. Рязань, 2004. С. 48–52.*
5. *Чижиков А.Е., Лебедь В.Н.* Исследование причин ограничения яркости фотолуминофоров в плазменных индикаторах // *Вестник РГРТА. 2004. Вып. 14. С. 90–93.*
6. *Чижиков А.Е., Лебедь В.Н.* Свечение плазменных индикаторов в импульсном режиме // *Вестник РГРТА. 2004. Вып. 15. С. 85–90.*
7. *Чижиков А.Е., Лебедь В.Н.* Исследование излучения плазменных панелей в видимой и ближней инфракрасной областях спектра // *Электроника: Межвузовский сборник научных трудов / РГРТА. Рязань, 2005. С. 51–56.*
8. *Лебедь В.Н.* О путях увеличения эффективности и максимальной яркости плазменных панелей // *Электроника: Межвузовский сборник научных трудов / РГРТА. Рязань, 2005. С. 47–50.*
9. *Лебедь В.Н.* Яркость и эффективность плазменных панелей при тлеющем разряде // *Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Тезисы докладов XII международной научно-технической конференции студентов и аспирантов (2–3 марта 2006 г.) / М.: МЭИ, 2006. Т. 1. С. 217–218.*

**ЛЕБЕДЬ ВИТАЛИЙ НИКОЛАЕВИЧ**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ  
ГЕНЕРАЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ  
В ПЛАЗМЕННЫХ ПАНЕЛЯХ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Подписано в печать 16.05.2006. Формат бумаги 60×84 1/16.

Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1.0.

Уч.-изд. л. 1.0. Тираж 100 экз.

ГОУВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет».

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

Редакционно-издательский центр РГРТУ.