

На правах рукописи

Белько Виктор Олегович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ  
ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ ЭЛЕКТРОДОВ  
МЕТАЛЛОПЛЕНОЧНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ**

Специальность 05.09.02 – Электротехнические материалы и изделия

**Автореферат**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2010

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Научный руководитель: кандидат технических наук,  
Емельянов Олег Анатольевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор, Слуцкер Александр Ильич  
доктор технических наук,  
ст.н.с., Кривошеев Сергей Иванович

Ведущая организация: ОАО «НИИ «Гириконд»  
(г. Санкт-Петербург)

Защита состоится « 26 » ноября 2010 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.16 при ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, Главное здание, ауд. 284.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Отзывы на автореферат в одном экземпляре, заверенный печатью, просим направлять по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29. Санкт-Петербургский государственный политехнический университет. Электромеханический факультет. Диссертационный совет Д 212.229.16.

Автореферат разослан «        » \_\_\_\_\_ 2010 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.229.16  
кандидат технических наук, доцент

Журавлева Н.М.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы.

Существенное увеличение удельных характеристик электрических конденсаторов возможно при замене электродов с фольговых на металлизированные, что позволяет

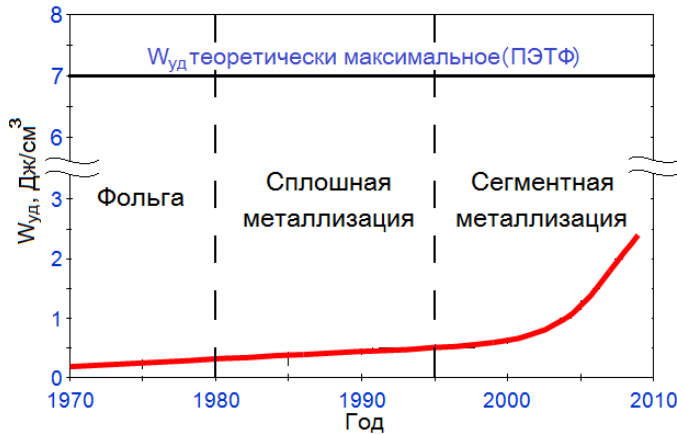


Рис. 1. Рост  $W_{уд}$  за последние 40 лет

использовать эффект самовосстановления (СВ). Электроды конденсатора при этом представляют собой тонкие (5-20 нм) пленки металла, напыленные на полимерный диэлектрик. Такие конденсаторы называются металлопленочными (МПК). При пробое диэлектрика через образовавшийся канал течет ток высокой плотности и метал-

лизированный электрод ввиду малой толщины испаряется, при этом длительность процесса составляет десятые доли – десятки мкс. Образовавшаяся область диэлектрика, свободная от металла, препятствует вторичному замыканию электродов в данном месте. Электрическая прочность конденсатора восстанавливается. К сожалению, сплошная металлизация не позволяет эффективно использовать конденсаторы при больших значениях напряжения и емкости, вследствие выделения значительной энергии при СВ. Опасность возникновения электротеплового пробоя конденсатора ограничивает дальнейший рост его удельных характеристик. На современном этапе развития конструкций МПК «центр тяжести» научно-технических проблем сместился от традиционных задач оптимизации диэлектрика с целью исключения или снижения вероятности его пробоя к задачам оптимизации конструкции электродов с целью реализации «управляемого» пробоя. Поэтому следующим шагом в развитии конденсаторостроения стало применение сегментированных металлизированных электродов. Сегментация позволила ограничить энергию СВ и сделать ее управляемым параметром и как следствие этого - повысить удельные характеристики конденсаторов (см. рис. 1). Дальнейшая оптимизация конденсаторных конструкций связана с правильным выбором параметров сегментации, что невозможно без знания особенностей электродинамического разрушения металлизированных электродов на субмикросекундных и микросекундных масштабах времени. Поэтому детальное теоретическое и экспериментальное изучение физических процессов, происходящих при СВ в металлизированных электродах конденсатора, является ключом к созданию более

эффективных конденсаторных конструкций. Актуальность работы подтверждается тем, что аналогичные исследования в течение последних 5 лет проводятся учеными ряда зарубежных стран – Германии, Швейцарии, Франции, США. В последнее время количество публикаций в открытой печати, посвященных сегментированной металлизации, сведено к минимуму, что, по понятным причинам, является результатом политики компаний-производителей конденсаторов. Исследованию процесса СВ посвящены работы ряда ученых (Kammermaier, Tortai, Christen, Picci, Fuchang, Lee, П.А.Торошин, Б.П.Беленький, С.В.Биньков, Э.В.Кургиян и др.). Несмотря на давний интерес к проблеме, на данный момент не существует общепринятой модели процесса самовосстановления в электрических конденсаторах, как со сплошными, так и с сегментированными электродами. Расчет зоны деметаллизации, а также энергии, выделившейся при самовосстановлении, производится различными авторами на основании не всегда корректных допущений о природе процесса разрушения металлических электродов. Закономерности электродинамического разрушения металлов изучаются в области исследования электрического взрыва проводников (ЭВП), однако результатов, применимых к рассматриваемым конструктивным особенностям конденсаторов в литературе найти не удалось. На основе выполненного литературного обзора и анализа существующих конструкций выпускаемых конденсаторов была определена

**цель работы:**

Изучить закономерности электродинамического разрушения металлизированных электродов МПК и предложить соответствующую инженерную методику расчета параметров электродов с целью создания конденсаторов с повышенными удельными характеристиками.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие **задачи:**

1. Разработать экспериментальные методики изучения процессов электродинамического разрушения нанометровых металлических электродов МПК.
2. Экспериментально изучить и выявить основные закономерности разрушения металлизированных электродов в диапазоне 10 нс – 100 мкс.
3. Разработать адекватную математическую модель разрушения металлизации.
4. Предложить инженерную методику расчета параметров металлизированных электродов с целью совершенствования выпуска новых типов МПК.

**Научная новизна.**

1. Впервые исследована электродинамическая устойчивость тонких цинковых электродов, напыленных на полимерные пленки.
2. Экспериментально установлено, что при быстрых временах взрыва (10-20 нс) в алюминиевых и цинковых пленках на первой стадии наблюдается механизм

пространственно-неоднородного разрушения металлизации, представляющего собой появление чередующихся слоев (страт) с металлом и без него, ориентированных поперечно линиям напряженности поля. Указанный механизм не соответствует классическим моделям, связанным с МГД или электротепловой неустойчивостью. После завершения первой стадии возникает вторая стадия разрушения, обусловленная развитием дугового разряда.

3. Получен комплекс экспериментальных данных о величине напряжения перекрытия межэлектродных промежутков в планарной системе при расстояниях 10-2000 мкм, который позволяет оптимизировать конденсаторную конструкцию с точки зрения повторных явлений разрушения металлизации после самовосстановления.

4. На основе проведенных исследований создана математическая модель, учитывающая теплофизические и электрофизические свойства полимерных подложек и металлизации, адекватно описывающая процессы деградации металлического слоя в условиях больших электродинамических нагрузок.

#### **Практическая значимость.**

1. Разработаны экспериментальные методики и аппаратура для исследования электродинамической устойчивости тонких металлизированных электродов.

2. Получен комплекс экспериментальных данных по электродинамическому разрушению металлизированных электродов, который следует учитывать при разработке новых конденсаторных конструкций.

3. Результаты по электрической прочности межэлектродных зазоров субмиллиметровой величины могут также использоваться при проектировании микроэлектронных изделий, что представляет интерес в области создания микроэлектромеханических систем (MEMS).

4. Разработана инженерная методика расчета оптимальных параметров металлизированных электродов с целью совершенствования выпуска новых типов МПК.

#### **На защиту выносятся следующие положения.**

1. Результаты экспериментальных исследований электродинамического разрушения металлизированных электродов в условиях больших электродинамических нагрузок.

2. При скоростях ввода энергии (0,01-0,1 кДж/г\*нс) имеет место пространственно-неоднородный механизм разрушения металлических пленок.

3. Процесс самовосстановления происходит в два этапа и представляет собой электрический взрыв, с последующим развитием дугового разряда, который может быть ограничен применением ряда технических мер.

4. Математическая модель, адекватно описывающая процессы электродинамического разрушения металлических пленок, напыленных на полимерные пленки.

## 5. Инженерная методика расчета параметров сегментированных электродов МПК.

### **Реализация результатов работы.**

Экспериментальные установки использовались при проведении учебных лабораторий на кафедре ЭИКК СПбГПУ. Ряд экспериментальных результатов, аппаратура для исследования токовой устойчивости сегментированной металлизации, а также инженерная методика расчета параметров сегментированной металлизации использованы на предприятии ОАО «НИИ «Гириконд», о чем прилагается соответствующий акт о внедрении.

**Достоверность полученных результатов** подтверждается хорошим соответствием данных эксперимента, численных и аналитических расчетов, большим количеством испытанных образцов и корректной статистической обработкой опытных данных.

**Личный вклад автора** определяется участием в постановке задач исследований, самостоятельной разработке и создании экспериментальных установок, проведении экспериментальных и теоретических исследований; их обработке и анализе полученных результатов. Основные результаты работы получены автором лично. В процессе работы автор пользовался консультациями к.т.н. Бондаренко П.Н.

### **Апробация работы**

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: XXXIII - XXXVIII Всероссийских межвузовских научно-технических конференциях студентов и аспирантов (Санкт-Петербург, СПбГПУ, 2005 - 2009 г.), XI Международной конференции «Физика диэлектриков» (Диэлектрики-2008) (Санкт-Петербург, 2008 г.), 12 Международной конференции «Электромеханика, электротехнологии, электрические материалы и компоненты» (Алушта, 2008 г.), XIII Всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы «Фундаментальные исследования и инновации в технических университетах» (Санкт-Петербург, 2009 г.), V Международной конференции «Электрическая изоляция – 2010» (г. Санкт-Петербург, 2010 г.), 18<sup>th</sup> International Conference DISEE 2010 ( Bratislava, 2010 г.).

### **Публикации.**

По теме диссертации опубликовано 16 печатных работ, в том числе 2 учебно-методических пособия для выполнения лабораторных работ.

### **Структура и объем диссертационной работы.**

Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, включающего 105 наименований, и 1 приложения. Диссертация изложена на 167 страницах, содержит 86 рисунков и 10 страниц приложения.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы, определена цель диссертационной работы, приведены основные научные и практические результаты исследований, а также сформулированы положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** анализируются основные тенденции развития конструкций современных металлопленочных конденсаторов. Разрушению металлизированных электродов в результате процесса СВ уделяется внимание при изучении вопросов работоспособности металлопленочных конденсаторов, однако количество работ, посвященных изучению данного вопроса (особенно применительно к сегментированным электродам) ограничено. Существующие теории СВ часто показывают несоответствие экспериментальных данных и результатов модельных расчетов. При расчете зоны деметаллизации (ДМ), а также энергии СВ различными авторами не всегда учитываются теплофизические и электрофизические параметры тонких металлических пленок, которые для массивных образцов металлов имеют другие значения, отвод тепла из металлизированных электродов в полимерную пленку и др. Закономерности электрического разрушения металлов исследуются в теории электрического взрыва проводников (ЭВП), однако результатов, применимых к рассматриваемым конструктивным особенностям в литературе найти не удалось.

**Во второй главе** приведены описания методик, применявшихся для исследования электродинамического разрушения электродов МПК. Объектами исследования являлись

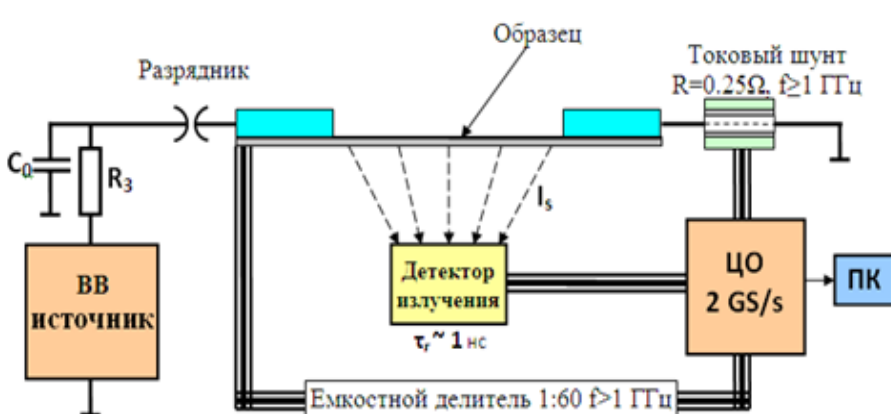


Рис. 2. Схема установки для исследования субмикросекундных процессов разрушения металлизации

промышленные образцы современных полимерных металлизированных пленок (со сплошными и сегментированными электродами) как отечественного, так и зарубежного производства. Материал металлизации – Al, Zn. Толщина слоя металлизации варьировалась

в пределах 10 – 30 нм; толщина полимерных пленок (полиэтилентерефталат, полипропилен) 5 – 12 мкм. Для исследования субмикросекундных процессов электродинамического разрушения металлизированных электродов была разработана специальная установка, схема которой представлена на рис. 2. Установка позволяет

регистрировать измерительные сигналы напряжения и тока через образец, а также возникновение оптического излучения, возникающего в ходе разряда, при наносекундном диапазоне изменения параметров. Максимальное испытательное напряжение установки составляет 10 кВ, максимальная амплитуда тока – до 1 кА. Длительность регистрируемых процессов составляет 5-500 нс. Диапазон чувствительности оптического детектора находится в пределах длин волн  $\lambda=320-1000$  нм, время отклика  $\sim 1$  нс.

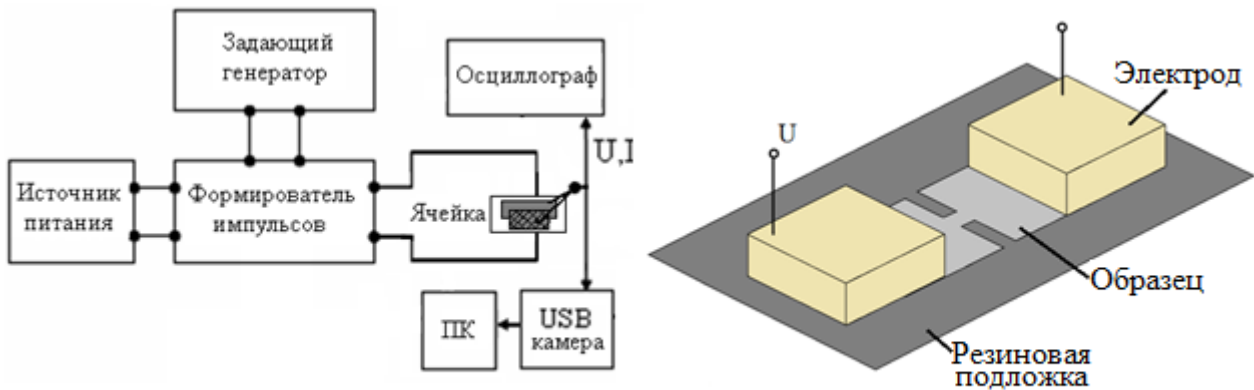


Рис. 3. Схема установки и вид экспериментальной ячейки для исследования микросекундного процесса разрушения металлизации.

Для исследования разрушения металлизации в микросекундном масштабе времени была сконструирована испытательная установка и экспериментальные ячейки, вид которых представлен на рис.3. Испытательное напряжение установки составляет 50-700 В, ток – до 30 А. Длительность регистрируемых процессов 0,5-500 мкс. Применение ячеек двух типов позволило исследовать особенности токового разрушения как в единичной межсегментной перемычке, так и в сегментированной металлизации в целом. Разработаны и использовались методики исследования пробивного напряжения межсегментных промежутков, расчета площади и оценки фрактальной размерности зон деметаллизации, автоматизированной обработки экспериментальных данных, численного расчета распределения тока в сегментированном электроде методом конечных элементов. Результаты обрабатывались в соответствии с методикой статистической обработки экспериментальных данных.

**Третья глава содержит** результаты экспериментального изучения разрушения металлических слоев в субмикросекундном временном масштабе.

Типичные осциллограммы в ходе процесса разрушения Zn металлизированных пленок представлены на рис.4.



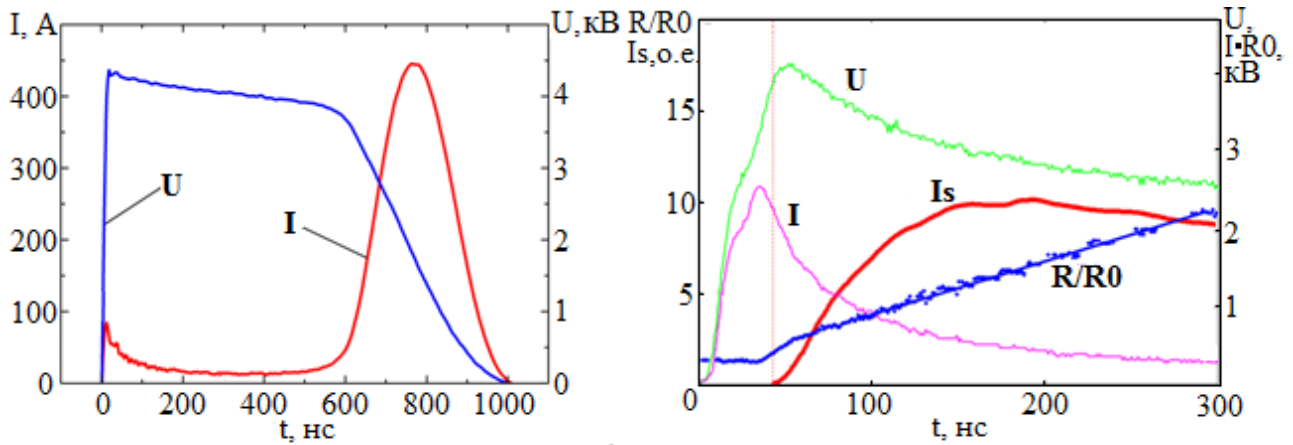


Рис.4. Типичные осциллограммы субмикросекундного процесса разрушения.

На левой осциллограмме тока отчетливо видны 3 характерные стадии ЭВП: взрыв, пауза тока и последующее развитие дугового разряда. Первый импульс соответствует электрическому взрыву металла и определяет дальнейшее развитие процесса в целом. В зависимости от уровня вводимой энергии дуговая стадия может отсутствовать. При низком уровне вводимой энергии взрыв металла может отсутствовать, тогда образец не теряет проводимость даже в результате многократной подачи на него импульсов напряжения. При превышении некоторого уровня энергии может происходить взрыв металла, сопровождающийся полным испарением металла с поверхности полимерной пленки. Существует также некоторая промежуточная стадия, для которой характерно неполное разрушение металлизации: рисунок оставшегося на подложке металла имеет упорядоченный характер и представляет собой чередующиеся слои (страты) с металлом и без него, ориентированные поперечно линиям плотности тока. При повышении разрядного напряжения частота следования страт увеличивается (Рис. 5):

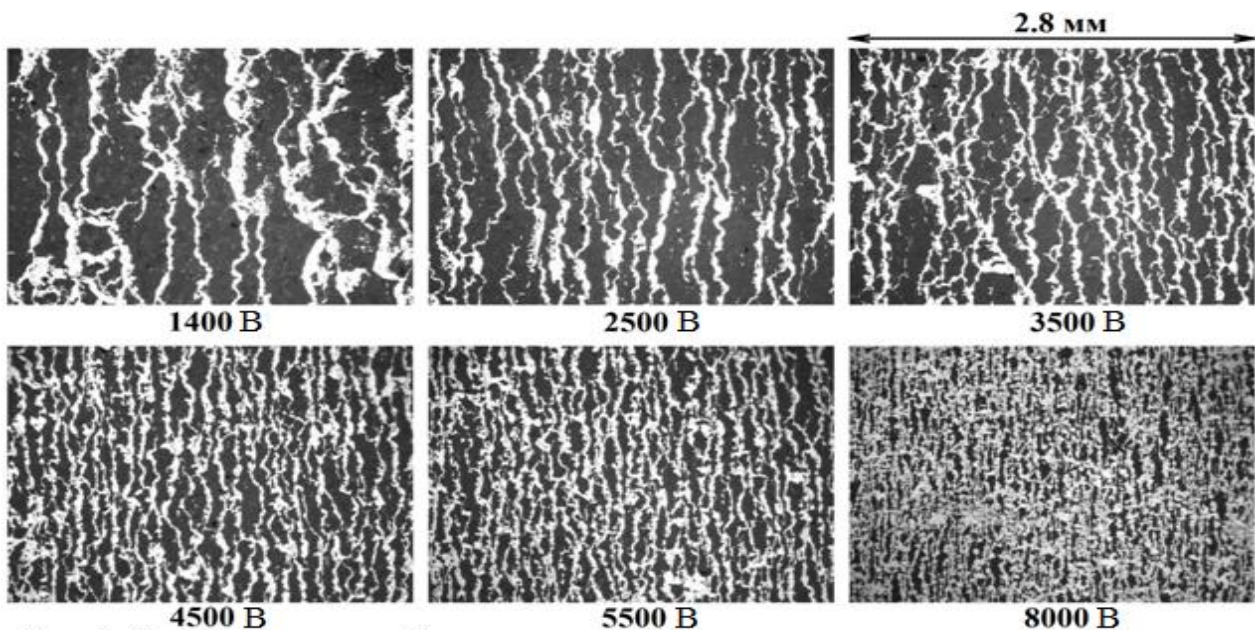


Рис.5. Вид разрушения Zn электродов при разных разрядных напряжениях.

При рассмотрении представленных фотографий можно заметить взаимное подобие рисунков

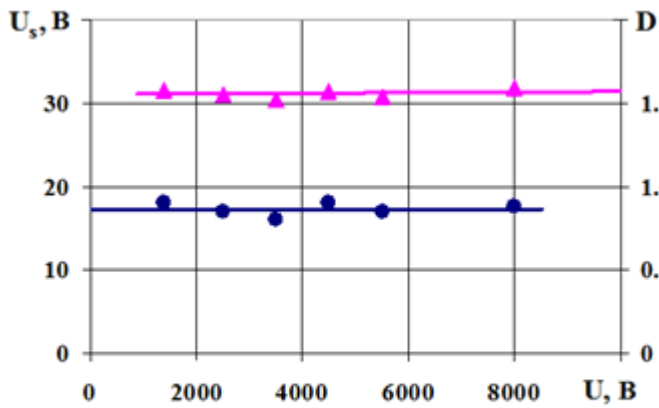


Рис. 6. Фрактальная размерность зон разрушения D; напряжение на страту  $U_3$ .

разрушения металлизации, так как каждый кадр является как бы увеличенной копией следующего. Принцип самоподобия характерен для фрактальных объектов. В результате определения фрактальной размерности картин разрушения было установлено, что фрактальная размерность D зон с выгоревшим металлом (белых областей фотографии) одинакова для всех режимов и составляет  $1,55 \pm 0,04$  (Рис. 6).

Равенство фрактальных размерностей может означать, что стратификация происходит по универсальному для всех режимов механизму. Из теории электрического взрыва проводников известно, что причиной стратообразования является развитие разного вида неустойчивостей: магнитогидродинамической (МГД), перегривной и др. Развитие неустойчивостей по МГД механизму требует полного расплава металла. Однако в результате обработки экспериментальных данных установлено, что разрушение металлизации (о чем свидетельствует и начало оптического излучения) начинается при уровне вводимой энергии меньшем, чем энергия плавления металла. При этом практически постоянный уровень сопротивления, сохраняющийся вплоть до момента разрушения (см. рис. 4, правая часть), может свидетельствовать о том, что металл не только не расплавляется, но даже слабо нагревается по всему объему. Для установления причин пространственно-неоднородного разрушения металлизации были проделаны дополнительные эксперименты, в результате которых установлено, что возникновение и развитие страт происходит на дефектах металлизированных пленок (микротрещины, царапины, локальные уменьшения толщины, границы кристаллитов, особенности рельефа подложки) по электротепловому механизму, что и обуславливает рост страт поперечно направлению тока. В результате изучения скорости разрастания страт были получены значения  $V \approx 10-15$  км/с, при этом обнаружено, что разрастающиеся дефекты имеют тенденцию к объединению, тем самым увеличивая эффективную скорость роста в несколько раз. Рост поперечных страт в образце должен происходить до тех пор, пока какая-либо одна из них не перекроет путь току, после чего ток через образец должен прекратиться, а остальные разрастающиеся дефекты должны остаться в недоразвитом состоянии. Однако большинство страт в металле являются сквозными, следовательно, первая не ограничивает развитие процесса стратообразования. Установлено,

что ширина прорастающей страты достаточно мала, поэтому при прерывании тока между сторонами страты возникает разность потенциалов достаточная для пробоя этого промежутка по поверхности диэлектрика либо по парам испаренного металла. Далее пробой переходит в микродуговой разряд. Он шунтирует страту, и проводимость образца остается достаточно высокой. Это создает условия для дальнейшего развития остальных дефектов и трещин, которые в свою очередь тоже могут быть зашунтированы микродугой по аналогичному механизму. Рассчитанное падение напряжения, приходящееся на каждую страту образца, оказалось близким для всех режимов и равным  $U_{str} \approx 16-20V$  (Рис. 6). Такие значения падения напряжения характерны для микродугового разряда, что подтверждается литературными данными. Процесс стратообразования останавливается, когда плотности тока в образце недостаточно, чтобы поддерживать ансамбль дуг, развивающихся внутри выгорающих областей металлизации. Таким образом, разрастание дефектов и стратификация образца является самосогласованным механизмом, зависящим от напряженности прикладываемого поля, удельного сопротивления и степени дефектности металлического слоя. Были проведены дополнительные эксперименты по изучению влияния внешних факторов на процесс разрушения металлизации. В результате было установлено, что тип подложки (для сравнения использовалось стекло с напыленным слоем металлизации) не оказывает влияния на механизм разрушения; приложение внешнего давления к образцу исключает стадию дугового разряда, при этом первый импульс и характер разрушения металла остаются прежними.

В четвертой главе представлены результаты исследования разрушения

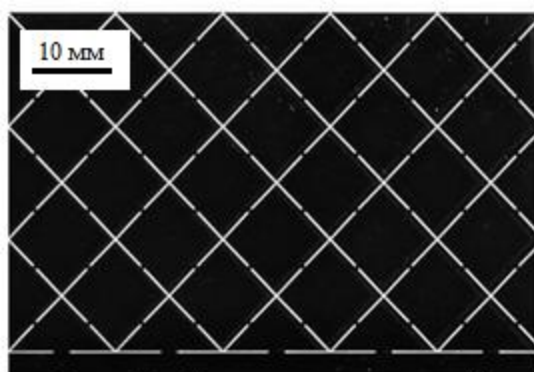


Рис. 7. Сегментированный электрод конденсатора.

металлизированных электродов в микросекундном масштабе времени. Изучение процесса проводилось как на электродах со сплошной, так и с сегментированной металлизацией (типичный вид мозаичной сегментации показан на рис. 7). Механизм разрушения электродов также связан с электрическим взрывом, вклад которого в микросекундных временах несущественен, так как при таких режимах дуговая стадия является

доминирующей (на нее приходится основная рассеиваемая энергия). Характерный импульс процесса разрушения представлен на рис. 8. До максимума тока происходит локальный разогрев слоя металлизации, после чего в момент максимума  $\tau_{разр.}$  происходит разрушение

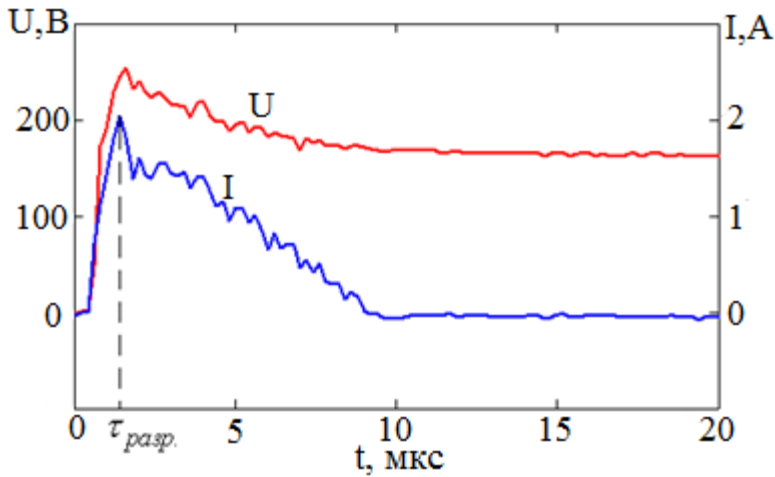


Рис. 8. Осциллограмма микросекундного процесса разрушения электрода.

энергетические характеристики процесса разрушения металлизации. Характерные зоны разрушения электрода в радиальном направлении показаны на рис. 9. При микроскопическом анализе зон ДМ было отмечено, что рисунки разрушения имеют дендритоподобную форму, являющуюся следствием блуждания катодных пятен. На основе полученной серии фотографий областей ДМ была рассчитана скорость распространения фронта зоны разрушения, которая составляет 50-100 м/с, что согласуется с литературными данными для средней скорости перемещения катодных пятен при электродуговой эрозии металла. Оценка скорости разрастания зон ДМ в продольном направлении привела к аналогичным результатам.

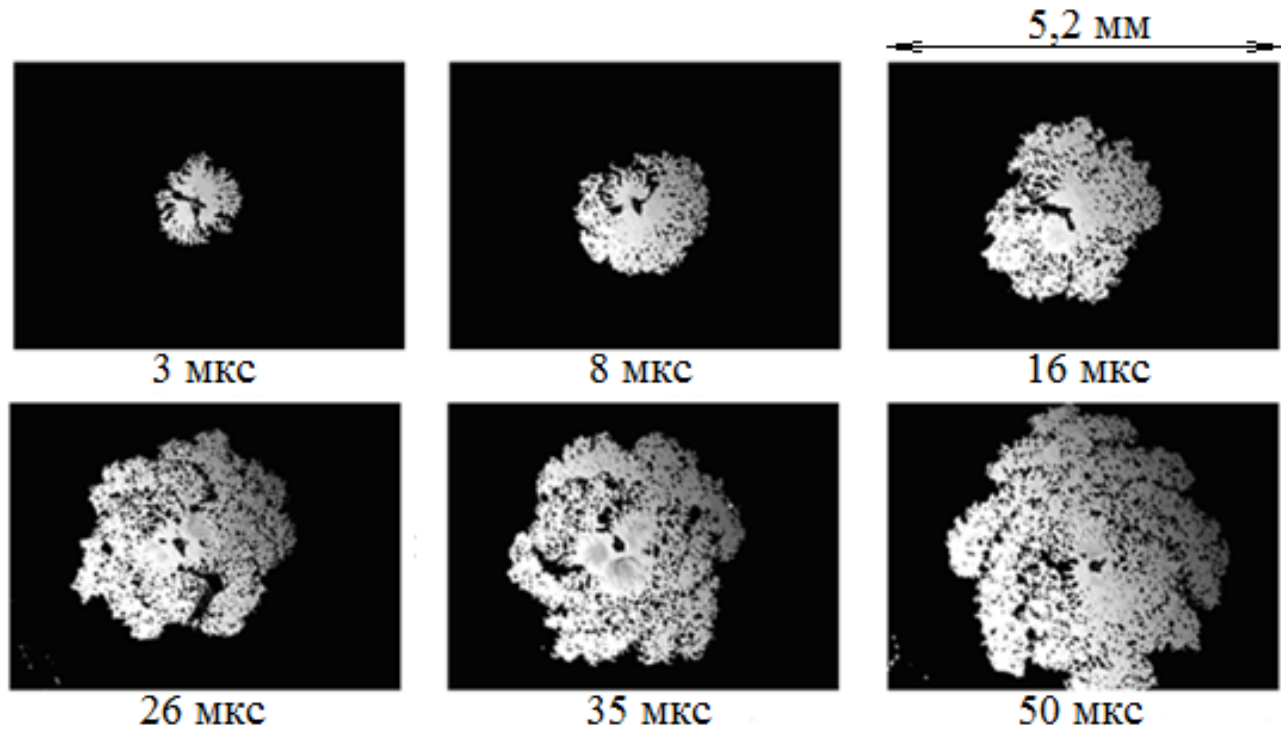


Рис. 9. Радиальное разрушение электрода во времени.

части металлизированного электрода. Дальнейший спад тока обусловлен развитием дугового разряда между сегментами. Дуга выжигает еще некоторую площадь электродов, удлиняется, увеличивая свое сопротивление, и при достижении критической длины гаснет. В ходе исследования были получены динамические и

В ходе исследования было отмечено, что экспериментальные данные лежат значительно выше теоретической зависимости плотности тока разрушения от времени разрушения  $j_{\text{теор.}}(\tau_{\text{разр.}})$ , рассчитанной на основании традиционных представлений. С целью установления причин несоответствия теоретических и экспериментальных данных было произведено математическое моделирование процесса электродинамического разрушения слоя металлизации с учетом теплофизических и электрофизических свойства полимерных пленок и металлических слоев, а также отвода тепла в полимерную подложку. Для модели исходной является связанная система двух уравнений:

$$\begin{cases} \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = q_v + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \text{ (в металле)} \\ \rho_{\text{pol}} C_{p \text{ pol}} \frac{\partial T_{\text{pol}}}{\partial t} = \lambda_{\text{pol}} \frac{\partial^2 T_{\text{pol}}}{\partial x^2} \text{ (в полимере)} \end{cases}$$

где  $q_v = j^2 / \sigma_{\text{Me}}$ ,  $\rho$ ,  $C_p$ ,  $\lambda$ ,  $\rho_{\text{pol}}$ ,  $C_{p \text{ pol}}$ ,  $\lambda_{\text{pol}}$  – плотность, теплоемкость, коэффициент теплопроводности металла электрода и полимерной пленки соответственно,  $\sigma_{\text{Me}}$  – удельная проводимость металла электрода.

В результате решения данной системы для степенного закона нарастания удельного тепловыделения  $Q_V = bt^k$ , удобно описывающего экспериментальную зависимость, получено выражение для температуры на границе металл-диэлектрик:

$$T(t)|_{Q_V=bt^k} = b \cdot k! \left[ \sum_{n=0}^k \left[ \frac{-t^n}{n! \cdot a^{2(k-n+1)}} + \frac{t^{n+1/2} \cdot 2^{n+1}}{\sqrt{\pi} \cdot (2n+1)!! \cdot a^{2(k-n+1/2)}} \right] + \frac{1}{a^{2(k+1)}} \cdot e^{a^2 t} \cdot \text{erfc}(a\sqrt{t}) \right]$$

где  $Q_V = q_v / \rho C_p$ ,  $a = \lambda_{\text{pol}} / (\rho C_p \delta \sqrt{\chi_{\text{pol}}})$ ,  $\chi_{\text{pol}}$  – температуропроводность полимера,  $\delta$  – толщина металлизации.

Приведенное выражение  $T(t)$  позволяет рассчитать плотность тепловой энергии, уходящей на нагрев полимера  $Q_S$ , зная которую можно оценить количества тепла, сообщаемое металлическому электроду для его разрушения с учетом влияния подложки. Расчет показывает, что при джоулевом нагреве металлизированной пленки уже при временах 10 - 15 нс до половины выделяемого тепла уходит в полимерную пленку. Таким образом, используя термодинамический расчет последовательных фазовых превращений с учетом теплоотвода в полимерную пленку, можно рассчитать все основные энергетические



характеристики процесса разрушения металлизированной пленки. На рис. 10 представлены

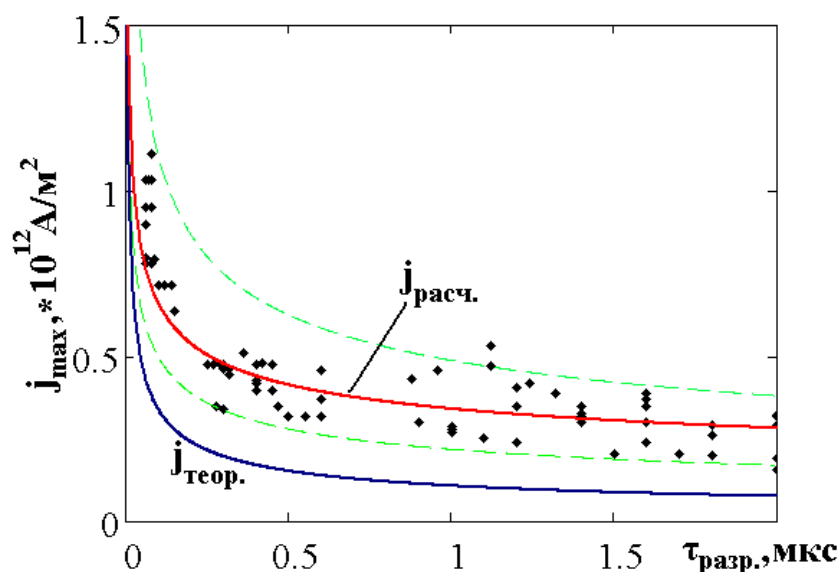


Рис. 10. Экспериментальная и расчетная зависимости максимальной плотности тока от времени разрушения.

построения нанесены экспериментальные точки, соответствующие разрушению металлизированных перемычек с толщиной металла 20 нм. Расчетная зависимость находится в зоне 95% доверительного интервала экспериментальных данных, что свидетельствует о справедливости предложенного подхода к оценке теплоотвода в подложку и его влияния на механизм разрушения перемычки. Преимуществом правильной оценки электродинамической устойчивости металлизированных перемычек является возможность создания

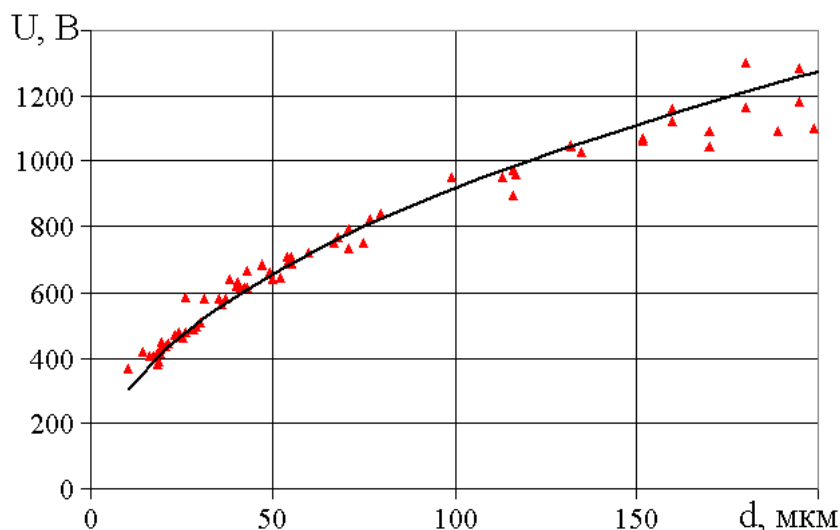


Рис. 11. Зависимость напряжения перекрытия от межсегментного промежутка.

разрушения перемычек. При выгорании перемычек дефектный сегмент оказывается отсеченным от основных электродов, однако при недостаточном расстоянии между

результаты расчета плотности тока разрушения от времени разрушения  $j_{расч.}(\tau_{разр})$  для цинковой металлизации толщиной 20 нм с учетом теплоотвода в полимерную пленку. Через  $j_{теор.}(\tau)$  на графике обозначена теоретическая зависимость, рассчитанная из интеграла действия  $J$  для цинка с учетом пониженной проводимости тонкой пленки металла. Также на область соответствующие разрушению металлизированных перемычек с толщиной металла 20 нм. Расчетная зависимость находится в зоне 95% доверительного интервала экспериментальных данных, что свидетельствует о справедливости предложенного подхода к оценке теплоотвода в подложку и его влияния на механизм разрушения перемычки. Преимуществом правильной оценки электродинамической устойчивости металлизированных перемычек является возможность создания такой геометрии сегментации, при которой с требуемой вероятностью будет гарантировано максимально эффективное СВ конденсатора при пробое. Указанная эффективность определяется отключением именно одного сегмента (или 4 мостиков для исследуемого типа сегментации) в результате электродинамического

сегментами существует опасность повторного перекрытия. Длина межсегментной перемычки должна выбираться из следующих соображений. Во-первых, энергии СВ должно быть достаточно, чтобы испарить перемычку, а во-вторых ее длина должна быть не меньше критического значения, при котором максимального рабочего напряжения конденсатора уже недостаточно, чтобы произошло повторное перекрытие между сегментами. Была проведена экспериментальная оценка напряжения перекрытия в зависимости от межсегментного промежутка на промышленных образцах металлизированных пленок. Результаты представлены на рис. 11. Следует отметить, что полученные экспериментальные зависимости для Zn и Al электродов не различались.

**В пятой главе** описывается инженерная методика расчета оптимальных параметров сегментированных электродов мозаичного типа, разработанная на основе проведенных исследований. Методика реализована в виде автоматизированной расчетной программы. В качестве исходных данных для программы задаются: номинальное напряжение конденсатора  $U_0$ , для которого производится расчет параметров сегментации; электрофизические и теплофизические характеристики металла электрода и полимерной пленки. Выходными данными программы являются геометрические параметры межсегментного токового мостика: ширина, толщина и длина – при которых будет гарантировано максимально эффективное самовосстановление конденсатора при пробое. Необходимо отметить, что полученные при помощи предложенной методики данные объясняют геометрические параметры, используемые в сегментированных металлизированных пленках зарубежными производителями.

### **Основные выводы и результаты работы:**

1. Экспериментально установлено, что при субмикросекундных (5-500 нс) временах разрушения нанометровых (10-30 нм) металлизированных электродов на основе Al и Zn, напыленных на полимерные пленки, при плотностях тока  $(0,5-3) \cdot 10^{12}$  А/м<sup>2</sup> имеет место пространственно-неоднородный характер разрушения металлизации, представляющий собой появление чередующихся слоев (страт) с металлом и без него, ориентированных поперечно линиям напряженности поля. При этом частота следования страт зависит от плотности тока.

2. Пространственно-неоднородное разрушение металлизированных электродов, по-видимому, имеет кинетическую природу и обусловлено развитием перегретой неустойчивости, возникающей на различных дефектах металлизации и подложки, и является самосогласованным механизмом, зависящим от напряженности прикладываемого поля, удельного сопротивления и степени дефектности металлического слоя. Установлено, что скорость разрастания страт составляет 10 км/с и более.
3. Энергия, введенная в образец до разрушения меньше не только энергии испарения металла, но и меньше энергии его плавления. Так для Al металлизации, при энергии необходимой для испарения  $\sim 13$  кДж/г, разрушение происходит на уровне введенной энергии 0,8-1,7 кДж/г. Для Zn металлизации вышеуказанные уровни энергии составляют 2,5 кДж/г и 0,1-0,2 кДж/г соответственно.
4. Экспериментально изучен процесс разрушения металлизированных электродов при более длительных временах (0,5-100 мкс) и плотностях тока  $10^{10}$ - $5 \cdot 10^{11}$  А/м<sup>2</sup>. Получены значения для скорости распространения зон разрушения, которые составляют 50-100 м/с. Отмечено, что существенное влияние на кинетику процесса разрушения металлизированных электродов оказывает отвод тепла в полимерную пленку.
5. На основе проведенных исследований создана математическая модель, учитывающая теплофизические и электрофизические свойства полимерных подложек и металлических слоев, адекватно описывающая процессы разрушения металлизированных электродов в условиях больших токовых нагрузок.
6. Получен комплекс экспериментальных данных величин напряжения перекрытия межэлектродных промежутков в планарной системе при расстояниях 10-2000 мкм, который позволяет оптимизировать конденсаторную конструкцию с точки зрения повторных явлений разрушения металлизации после самовосстановления..
7. На основе экспериментальных и теоретических исследований разработана инженерная методика расчета оптимальных геометрических параметров металлизированных электродов с целью совершенствования выпуска новых типов МПК. Методика выполнена в виде автоматизированной расчетной программы.



Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Белько, В.О. Динамические характеристики процесса самовосстановления в металлопленочных конденсаторах / В.О. Белько, П.Н. Бондаренко, О.А. Емельянов // *Электротехника.-2007.- №3.- С.33-38.*
2. Белько, В.О. Исследование наносекундного электрического взрыва тонких алюминиевых пленок / В.О. Белько, О.А. Емельянов // *Письма в Журнал технической физики. – 2009. – Т.35, №18.- С.58-64.*
3. Белько, В.О. Работоспособность сегментированных электродов современных металлопленочных конденсаторов / В.О. Белько, О.А. Емельянов // *Научно-технические ведомости СПбГПУ – 2010. – №3(106): Наука и образование.- С.32-40.*
4. Емельянов, О.А. Основы электроизоляционной, кабельной и конденсаторной техники : лаб. практикум / О.А. Емельянов, В.О. Белько, П.Н. Бондаренко, М.В. Шемет. - Санкт-Петербургский государственный политехнический университет.— СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2010. Ч.1: Изучение основных характеристик электрических конденсаторов .— 2010 .— 72 с.
5. Емельянов, О.А. Основы электроизоляционной, кабельной и конденсаторной техники : лаб. практикум / О.А. Емельянов, В.О. Белько, П.Н. Бондаренко, М.В. Шемет. - Санкт-Петербургский государственный политехнический университет .— СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2010. Ч.2: Исследование электрофизических процессов в системах конденсаторной изоляции.— 2010.—58 с.
6. Белько, В.О. Особенности процесса самовосстановления в металлопленочных конденсаторах / В.О. Белько, О.А. Емельянов // *Электрическая изоляция-2010: сборник научных трудов пятой Международной научно-технической конференции. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010.- С.145-147.*
7. Belko, V.O. Surface flashover between segments in power capacitors' metalized electrodes / V.O. Belko, A.M. Andreev // *Proceedings of 18<sup>th</sup> International Conference DISEE 2010.- Demänovská Dolina, Slovak Republic.- 2010.- P.211-214.*
8. Белько, В.О. Особенности наносекундного электрического взрыва тонких металлических пленок / В.О. Белько // *Материалы XIII Всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы «Фундаментальные исследования и инновации в технических университетах». 18.05.2009, Санкт-Петербург. – СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2009. –Т. 1. – С.38.*

9. Артюховский, К.Н. Исследование микродуговых процессов в металлизированных конденсаторных пленках / К.Н. Артюховский, В.О. Белько // XXXVIII неделя науки СПбГПУ: материалы Всероссийской межвуз. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов, 30 ноября - 4 декабря 2009 г. Санкт-Петербург.— СПб., 2009.- С.58-59.
10. Белько, В.О. Влияние жидких диэлектриков на процесс самовосстановления диэлектрической прочности в металлопленочных конденсаторах / В.О. Белько, О.А. Емельянов // Физика диэлектриков – 2008. Материалы XI Международной конференции. Т.2., СПб, 2008.- С.133-136.
11. Белько, В.О. Исследование процесса деметаллизации при самовосстановлении в металлопленочных конденсаторах / В.О. Белько // 12-я Международная конференция «Электромеханика, электротехнологии, электрические материалы и компоненты». 29 сентября-4 октября 2008. Труды.- Крым, Алушта. МКЭЭЭ-2008.: С.20.
12. Белько, В.О. Исследование разрушения металлизации под воздействием тока высокой плотности / В.О. Белько, А.С. Резник // XXXVII неделя науки СПбГПУ: материалы Всероссийской межвуз. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов, 24-29 ноября 2008 г. Санкт-Петербург.— СПб., 2008.- С.27.
13. Белько, В.О. Токовая устойчивость металлических обкладок электрических конденсаторов / В.О. Белько, А.А. Якимчук, О.А. Емельянов // XXXVI неделя науки СПбГПУ: материалы Всероссийской межвуз. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов, 26 ноября - 1 декабря 2007 г. Санкт-Петербург.— СПб., 2008.- С.47-49.
14. Белько, В.О. Фрактальная размерность зоны самовосстановления в металлизированных пленках различных структур / В.О. Белько, О.А. Емельянов // XXXV неделя науки СПбГПУ: материалы Всероссийской межвуз. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов, 27 ноября - 2 декабря 2006 г. Санкт-Петербург.— СПб., 2007.-С.30-32.
15. Белько, В.О. Разработка методики оценки работоспособности металлизированного полимера / В.О. Белько, С.П. Журавлев // XXXIV неделя науки СПбГПУ: материалы Всероссийской межвуз. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов, 28 ноября - 3 декабря 2005 г. Санкт-Петербург.— СПб., 2006.- С.21-22.
16. Белько, В.О. Оценка совместимости компонентов диэлектрической системы высоковольтных силовых конденсаторов / В.О. Белько, С.П. Журавлев // XXXIII неделя науки СПбГПУ: материалы Всероссийской межвуз. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов, 29 ноября - 4 декабря 2004 г. Санкт-Петербург.— СПб., 2005.- С.36-37.