

Научная статья

УДК 621.319.42

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29208>



В.О. Белько ✉, *А.В. Печников*,
А.П. Плотников, *Е.Г. Феклистов*, *А.А. Ходжамов*

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

✉ vobelko@spbstu.ru

РАЗВИТИЕ ПОДХОДА К ВЫБОРУ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОДОВ МЕТАЛЛОПЛЕНОЧНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ ДЛЯ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Аннотация. Статья посвящена изучению влияния конфигурации электродов металлопленочных конденсаторов на их технические характеристики с целью дальнейшей выработки подходов к оптимальному выбору параметров электродов. Показано влияние электродов конденсатора на его работоспособность в условиях, характерных для силовой электроники. Экспериментально изучено влияние толщины напыляемого электрода на электрическую прочность. Продемонстрированы эффекты, возникающие при разрушении напыленных электродов от воздействия электрических разрядов, имеющих место при самовосстановлении металлопленочных конденсаторов. Предложен новый тип электрода для металлопленочных конденсаторов, названный гибридным. Сравнительные расчеты поверхностного сопротивления и активной площади сегментированных и гибридных электродов показали преимущество последних. Экспериментально установлено, что затраты энергии на разрушение гибридных электродов меньше, чем сегментированных, при схожих длительностях процесса.

Ключевые слова: металлопленочный конденсатор, самовосстановление, металлизация, численное моделирование.

Благодарности: Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда № 19-79-10075

Для цитирования:

Белько В.О., Печников А.В., Плотников А.П. и др. Развитие подхода к выбору оптимальных параметров электродов металлопленочных конденсаторов для силовой электроники // Глобальная энергия. 2023. Т. 29, № 2. С. 129–149. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29208>



V.O. Belko ✉, A.V. Pechnikov,
A.P. Plotnikov, E.G. Feklistov, A.A. Hojamov

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russia

✉ vobelko@spbstu.ru

OPTIMUM PARAMETERS OF METAL-FILM CAPACITORS ELECTRODES FOR POWER ELECTRONICS

Abstract. The aim of the study is to reveal the influence of the electrode configuration of metal-film capacitors on their characteristics in order to further develop approaches to the optimal choice of electrode parameters. We showed the influence of the capacitor electrodes on its performance under the conditions typical for power electronics conditions and experimentally studied the effect of the sprayed electrode thickness on the breakdown strength. The effects from the fracture of sprayed electrodes caused by electrical discharges occurring during self-healing of metal-film capacitors are demonstrated. Authors propose a new type of electrode for metal-film capacitors called hybrid. Comparative calculations of the surface resistance and active area of segmented and hybrid electrodes showed the advantage of the latter. We experimentally established that at comparable process durations the deposited energy for the fracture of hybrid electrodes was less than for segmented ones.

Keywords: film capacitor, self-healing, metallization, numerical simulation.

Acknowledgements: The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 19-79-10075

Citation:

V.O. Belko, A.V. Pechnikov, A.P. Plotnikov and etc., Optimum parameters of metal-film capacitors electrodes for power electronics, *Global Energy*, 29 (02) (2023) 129–149, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29208>

Введение. Электрические конденсаторы являются одним из ключевых компонентов в силовых электронных системах с точки зрения надежности, массогабаритных характеристик и стоимости [1]. Они широко используются в силовых преобразователях напряжения и частоты. С применением таких преобразователей связан широкий спектр приложений силовой электроники [2], таких как ветряные генераторы, фотогальванические системы, электромобили и частотное регулирование электропривода [3], высоковольтные системы постоянного тока (HVDC) [4].

В настоящий момент в указанных системах наблюдается тенденция к расширению области применения металлопленочных конденсаторов (МПК), обладающих известным свойством самовосстановления (СВ), заключающимся в восстановлении работоспособности конденсатора после локального пробоя диэлектрика [5]. МПК, являющиеся одним из типов конденсаторов с органическим диэлектриком, применяются в силовой электронике начиная с 90-х годов прошлого века [6, 7]. Тем не менее, лишь в последнее десятилетие они смогли прочно занять лидирующее место среди прочих типов конденсаторов. Они превосходят керамические и электролитические конденсаторы в высоковольтных системах и преобразователях с высокими пульсирующими токами по таким характеристикам, как тангенс угла потерь, эквивалентное последовательное сопротивление, стабильность емкости, стоимость и надежность [2, 8]. Немаловажным преимуществом МПК является непревзойденная гибкость технологии производства, позволяющая изготавли-

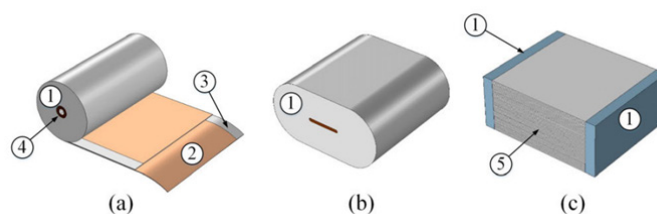


Рис. 1. Типичные конструкции МПК: (а) цилиндрическая намотанная секция, (б) прессованная секция, (с) чип-конденсатор. 1 – контактный узел (шоопировка), 2 – металлизация, 3 – неметаллизируемая закраина, 4 – оправка, 5 – слои металлизированной пленки [10]

Fig. 1. Typical metal-film capacitors designs: (a) cylindrical capacitance element, (b) flat-pressed capacitance element, (c) film chip-capacitor. 1 – shoopage, 2 – metallization, 3 – non-metallized edge, 4 – mandrel, 5 – layers of metallized polymer film

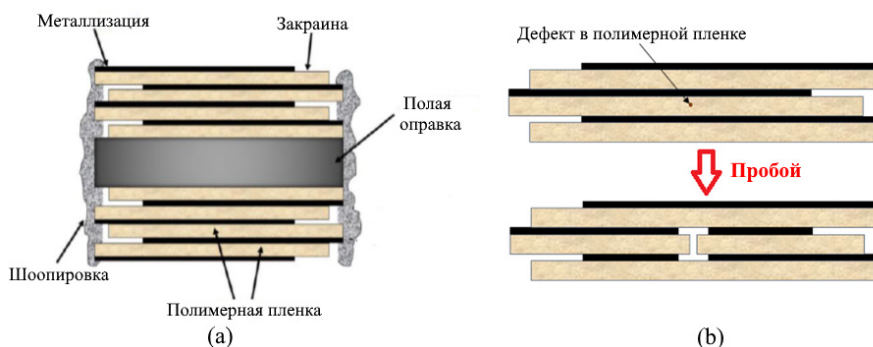


Рис. 2. Конденсаторная секция в разрезе (а) и пояснение принципа самовосстановления (б)
Fig. 2. Cross-section of cylindrical capacitance element (a) and explanation of self-healing principle (b) [11]

вать изделия не только типовых конструкций, показанных на рис. 1, но и в широких пределах модифицировать их для заказчика, создавая нестандартные конструкции в виде тороидов, коаксиально вложенных цилиндров и пр. [9]. На рис. 2 проиллюстрирован принцип СВ конденсатора: после пробоя и замыкания электродов разрядом внутри конденсатора возникает значительный ток, а в силу малой толщины электрода – высокая плотность тока в области канала пробоя, ведущая к испарению части электрода и изолированию места пробоя от неповрежденного электрода.

В связи с более строгими требованиями по надежности, предъявляемыми автомобильной, аэрокосмической и энергетической промышленностью, проектирование звеньев постоянного тока сопряжено со следующими проблемами:

- а) конденсаторы являются одной из основных причин отказа силовых электронных систем, работающих в полевых условиях [12];
- б) конденсаторы подвергаются воздействию более суровых условий (например, высокая температура окружающей среды, высокая влажность и т.д.) в новых приложениях [13, 14];
- в) тенденции развития силовых электронных систем с высокой удельной мощностью накладывают ограничения на объем и тепловыделение в конденсаторах.

В связи с вышесказанным можно заключить, что МПК в силовых электронных системах работают практически на пределе своих возможностей по температуре и напряжению. При этом их надежность хотя и обеспечивается за счет способности к СВ, тем не менее это приводит к ускоренной деградации емкости. Последнее вызывает снижение эффективности и надежности уже самих преобразователей. В качестве некоторой альтернативы МПК могли бы выступить керамические

конденсаторы на основе различных сегнето- и антисегнетоэлектриков [15], обладающие более высокими удельной объемной энергией и емкостью. Вместе с тем присущая им зависимость емкости от напряжения, сниженная за счет отсутствия свойства СВ надежность, а также высокая цена, связанная с общемировым дефицитом редкоземельных металлов [16], необходимых для керамических составов, делают их преимущества по меньшей мере спорными. В связи с бурным развитием электротранспорта в мире проблема повышения надежности МПК, как компонентов силовых систем преобразователей напряжения и частоты, становится чрезвычайно актуальной.

На данный момент существует 2 основных направления работы для решения обозначенных проблем.

Во-первых, улучшение характеристик применяемых и внедрение новых полимерных конденсаторных пленок. Известно, что в настоящее время полипропилен занимает доминирующее положение среди используемых полимерных конденсаторных пленок [17]. Это обусловлено его технологичностью, термостабильностью и высокими электрическими характеристиками. Чрезвычайно низкие толщина (~ 1 мкм) и диэлектрические потери ($\sim 10^{-4}$), а также высокая электрическая прочность (700–800 кВ/мм) позволили МПК превзойти электролитические конденсаторы, ранее повсеместно применяемые в силовой электронике, по таким характеристиками как удельная емкость, эквивалентное последовательное сопротивление, устойчивость к пульсирующим нагрузкам. Также добавились такие свойства как нечувствительность к полярности напряжения, а также возможность надежно функционировать при высоких напряжениях. Недостатками полипропилена являются низкая диэлектрическая проницаемость, а также ограниченный диапазон рабочей температуры до 105 °С. В связи с этим ведутся исследования по разработке и внедрению высокотемпературных полимерных диэлектриков с повышенным значением проницаемости [18–20]. Однако, высокие диэлектрические потери таких материалов, возможное снижение способности к СВ, ограниченный объем выпуска даже лабораторных образцов, вкупе с высокой ценой делают перспективу внедрения новых пленок весьма отдаленной не только в РФ, но и в остальном мире.

Вторым подходом к улучшению характеристик МПК является изучение и совершенствование электродных систем, включающих в себя электроды конденсатора, контактные узлы, шлоопировку и внешние выводы. Как показывают литературный анализ и собственный опыт авторов, конфигурация электродов влияет (и порой весьма существенно) на следующие характеристики как полимерных пленок, так и конденсаторов в целом:

- электрическая прочность полимерной пленки [21, 22];
- удельная емкость [23];
- эквивалентное последовательное сопротивление [24, 25];
- эффективность процесса СВ [26–28];
- стабильность емкости вследствие коррозионных процессов [29, 30] и др.

Представленная статья посвящена изучению влияния конфигурации электродов на технические характеристики конденсаторов с целью дальнейшей выработки подходов к оптимальному выбору параметров электродов МПК и увеличению эффективности их работы в различных областях применения.

Конфигурации электродов МПК

В рамках данной статьи рассматривается часть электродной системы, непосредственно примыкающая к диэлектрику – электроды конденсатора в виде тонких слоев вакуумно-нанесенного на полимерную пленку металла. В качестве напыляемого металла выступают в основном относительно легкоплавкие металлы, такие как цинк и алюминий. Также известно, что сопротивление проводников субмикронной толщины слоев выше, нежели у массивных, и обратно пропорционально их толщине (размерный эффект) [31].

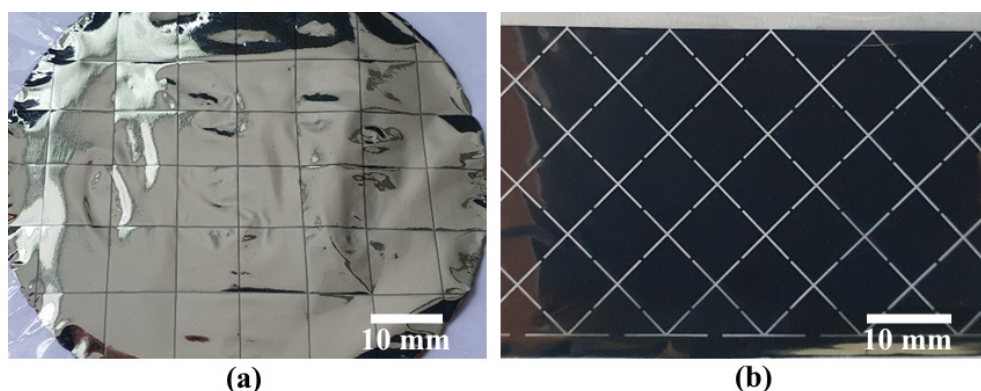


Рис. 3. Фотографии образцов полимерных пленок со структурированной металлизацией: (a) разработанный авторами гибридный тип металлизации; (b) промышленный образец полимерной пленки с сегментированной металлизацией

Fig. 3. Photographs of metallized polymer films with patterned metallization: (a) a hybrid type of metallization developed by the authors; (b) an industrial grade polymer film with segmented metallization

По характеру распределения металлического слоя по диэлектрику электроды конденсатора делятся на сплошные, покрывающие всю поверхность с одной или обеих сторон диэлектрика за исключением закраины, и сегментированные, состоящие из множества элементов, соединенных небольшими перемычками, и называемые сегментами (см. рис. 3b). Площадь сегментов может быть различна, а сами сегменты чаще всего имеют форму правильных многоугольников: квадратов (ромбов), треугольников, параллелограммов, шестиугольников и т.п. Технологически возможно воспроизвести и более сложные формы, например, веретенообразные сегменты. Внедрение плавких перемычек совершенствует технику СВ, позволяя ограничить время протекания тока через канал пробоя и быстро изолировать сегмент электрода, в зоне которого произошел пробой (см. рис. 4), от остального электрода конденсатора за счет разрушения узких плавких перемычек. Преимущество применения сегментированной металлизации заключается в повышении надежности металлизированных пленочных конденсаторов за счет ограничения выделяющейся в ходе СВ энергии.

По характеру изменения толщины металлического слоя выделяют электроды переменного профиля, с меняющейся по ширине полимерной пленки толщиной, и на электроды равномерной толщины. В свою очередь, профильные электроды могут быть с плавно меняющейся по линейному или степенному закону толщиной, или с толщиной, меняющейся резко, «ступенькой». Внедрение электродов переменного профиля позволяет заметно увеличить сопротивление электрода, и тем самым ограничить ток и энергию СВ, в то же время обеспечив надежный контакт электрода с шопировкой за счет увеличенной толщины одного из краев электрода. В случае сплошных электродов возможно применение ультратонкой металлизации полимера слоем алюминия или цинка толщиной 2–5 нм. Преимуществом данного электрода эффективное СВ ввиду быстрого погасания микродугового разряда за счет весьма высокого сопротивления электрода.

Главным недостатком всех вышеописанных конфигураций электродов является высокое сопротивление электродов, что критически важно для МПК на основе полипропилена, поскольку потери в электродах в режиме пульсирующих токов, характерном для конденсаторов в силовой электронике, становятся существенными и сопоставимы с потерями в диэлектрике. Оригинальной разработкой авторов является электрод [32], сочетающий в себе черты сплошного электрода с переменным профилем и сегментированного электрода: сегментированная металлизация, включающая элементы с низким поверхностным сопротивлением, обеспечивает сниженное со-

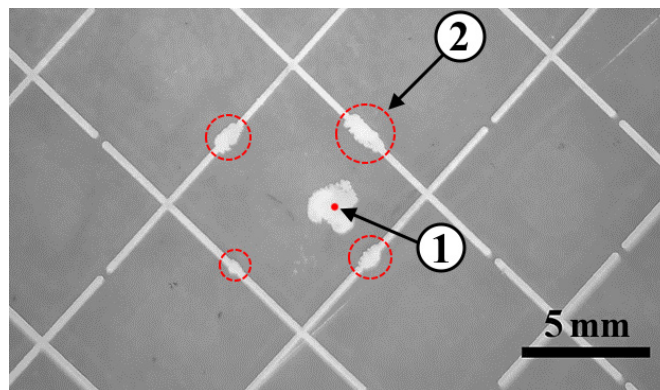


Рис. 4. Фотография места пробоя в пленке с сегментированной металлизацией с изолированием одного сегмента. 1 – след пробоя с зоной деметаллизации вокруг, 2 – перегоревшие перемычки

Fig. 4. Photograph of breakdown puncture in segmented metallized film with one segment cut-off. 1 – breakdown puncture with a demetallization zone around, 2 – burnt out fuses

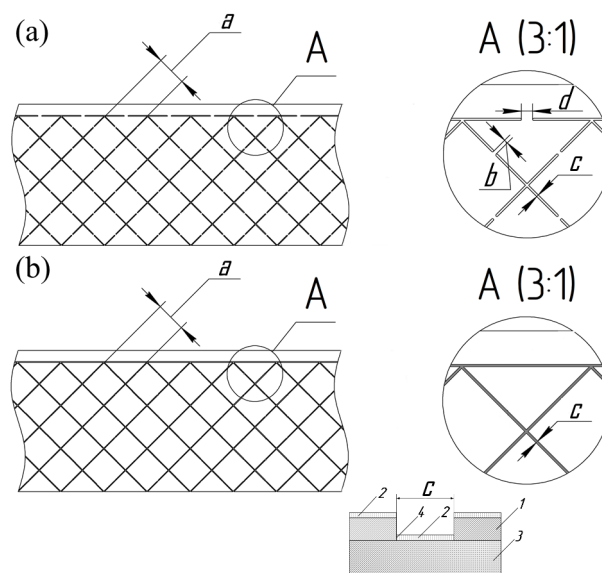


Рис. 5. Чертежи сегментированного (а) и гибридного (б) электродов: а, b, c, d – ширины сегмента, плавкой перемычки между сегментами, межсегментного зазора, перемычки усиленного края, соответственно; 1 – толстая металлизация, 2 – тонкая металлизация, 3 – полимерная пленка, 4 – контактная зона между элементами

Fig. 5. Drawings of segmented (a) and hybrid (b) electrodes: a, b, c, d are widths of segment, fuse between the segments, inter-segment gap, heavy edge fuse, respectively; 1 – thick metal layer, 2 – thin metal layer, 3 – polymer film, 4 – contact between elements

противление электрода за счет малого поверхностного сопротивления, а сплошная металлизация, нанесенная поверх нее и являющаяся элементом с более высоким поверхностным сопротивлением, выполняет функцию плавких перемычек в традиционной технологии металлизации. Изолирование сегмента, в зоне которого произошел пробой диэлектрика, обеспечивается за счет разрушения контакта двух слоев металлизации разной толщины в силу повышенной плотности тока в зоне контакта. Подобную конфигурацию авторы предлагают называть гибридным типом электрода, или гибридной металлизацией.

Влияние электродов на электрическую прочность полимерной пленки Эффект толщины напыляемого металлического слоя

Производство металлизированного полимерного диэлектрика для МПК осуществляется по двум технологиям: вакуум-термическим или магнетронным методами. Существенно важным является то, что электро- и теплофизические свойства тонкопленочного металлического электрода сильно зависят от его толщины. Кроме того, технологическая операция по нанесению такого электрода на конденсаторный диэлектрик влияет также и на свойства самой полимерной пленки. Чем толще наносимый металлический слой, тем длительнее и интенсивнее осаждаемый металл оказывает тепловое воздействие на пленку и в особенности на ее приповерхностные слои. Ясно, что большая толщина обеспечивает низкое значение поверхностного сопротивления электродов, что положительно сказывается на эквивалентном последовательном сопротивлении конденсатора, а значит и его потерях. С другой стороны, известно, что чем меньше сопротивление электродов, тем больше энергия, рассеиваемая вблизи места пробоя в ходе последующего процесса СВ, что, в свою очередь, повышает вероятность катастрофического отказа конденсатора. Еще одним негативным последствием больших толщин электродов может стать снижение электрической прочности самой полимерной пленки. В литературных источниках [21, 22] содержатся ограниченные сведения о влиянии толщины металлизации на электрическую прочность полипропиленовой пленки. Согласно некоторым данным, снижение электрической прочности может достигать почти 50% при нанесении слоя металла толщиной 20–50 нм. Тем не менее, представляется сомнительным столь значительное снижение электрической прочности, поскольку в указанных источниках не приводятся данные непосредственного эксперимента. Для изучения этого вопроса авторами были проведены следующие эксперименты. На 8 мкм полипропиленовую конденсаторную пленку вакуум-термическим методом были нанесены алюминиевые слои разных толщин (10, 20, 50 нм), после чего было проведено сравнение электрической прочности исходной пленки и пленок с нанесенными металлическими слоями. Дополнительно из полученной металлизированной пленки с 50 нм толщиной металлического слоя был изготовлен образец, химически деметаллизированный водным раствором гидроксида калия. Целью данного эксперимента была оценка влияния толщины металлического слоя на электрическую прочность диэлектрика. Статистические распределения электрической прочности полипропиленовых пленок с различной толщиной металлизации представлены на рис. 6. Линии отмечены в соответствии с толщиной слоя Al. Поскольку результаты для 10 нм и 20 нм толщины отличались незначительно, на график были добавлены только данные для 20 нм металлизации. Результаты представлены на едином графике для сравнения. Все представленные данные были нормализованы на 63% значение электрической прочности исходной неметаллизированной полипропиленовой пленки (490 В/мкм) для удобства сравнения. Как мы можем видеть из рис. 6, нанесение слоя металла на поверхность полимерной пленки оказывает некоторое влияние на электрическую прочность диэлектрика. Падение электрической прочности металлизированной пленки лежит в пределах от 7% для 10 и 20 нм толщин и до 10% для 50 нм толщины электродов. Дополнительным подтверждением полученных результатов может служить тот факт, что электрическая прочность диэлектрика с металлизацией, имеющей переменный профиль, зависит от толщины электрода. Области под слоем электрода большей толщины обладают более низкой прочностью по сравнению с областями диэлектрика под более тонким слоем металла. Отсюда можно сделать вывод о том, что электроды меньших толщин положительно сказываются как на рассеиваемой энергии СВ, так и на электрической прочности конденсаторной пленки.

Эффект от воздействия разрядных явлений на полимерную пленку

Помимо влияния на электрическую прочность исходной полимерной пленки за счет своей толщины, электроды могут оказывать негативный эффект на пленку и при протекании процесса

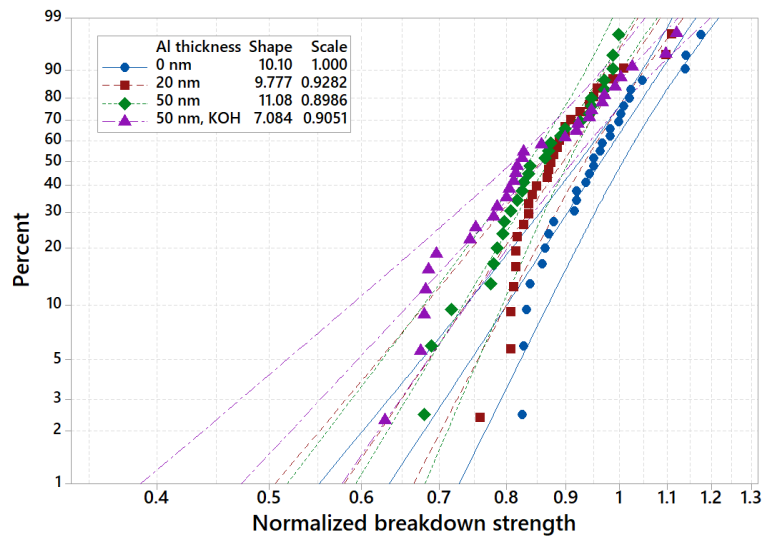


Рис. 6. Влияние толщины напыляемого металлического слоя на электрическую прочность полимерной пленки

Fig. 6. Influence of metallization thickness on breakdown strength of polymer film

СВ. Известно, что процесс СВ состоит из нескольких стадий, включающих электрический взрыв некоторой области металлизированного электрода вблизи канала пробоя и микродуговой разряд, обеспечивающий выгорание еще большей площади электродов вокруг места пробоя.

Было проведено сравнительное исследование влияния способа деме­таллизации поверхности полимерной пленки на ее электрическую прочность [33, 34]. Для этой цели была исследована электрическая прочность конденсаторной полипропиленовой пленки: исходной металлизированной, химически деме­таллизированной (водный раствор гидроксида калия), деме­таллизированной микродуговым разрядом, деме­таллизированной электрическим взрывом электродного слоя.

Результаты исследования представлены на рис. 7. Значения были нормированы на 63% от исходного значения электрической прочности металлизированной полипропиленовой пленки для удобства сравнения данных. Для пленки, металлизированной Al, это значение составляет 620 В/мкм, для пленки, металлизированной Zn, – 530 В/мкм. Как можно видеть, электрическая прочность пленок остается практически на том же уровне после удаления металлизации химическим способом. Электрический взрыв и микродуговая деме­таллизация приводят к заметному снижению прочности. В случае образцов Al поверхностный микродуговой разряд снижает электрическую прочность полимерной пленки на $\approx 20\%$. В то же время воздействие электрического взрыва снижает ее на $\approx 30\%$. Для образцов Zn эти значения составляют 14 и 21% соответственно. Экспериментально показано, что электрическая прочность более чувствительна к электрической мощности процесса, приводящего к деме­таллизации, но не к его продолжительности, по крайней мере, для таких быстрых событий (длительностью от $\sim 0,1$ – 10 мкс). Как известно, электрический взрыв сопровождается ударными волнами, импульсами излучения и т.д. Эти эффекты могут дополнять тепловое воздействие на поверхность полимера, приводящее к более существенному спаду электрической прочности. Разница между Al и Zn может быть объяснена различными значениями энергий разрушения этих металлов (включая энтальпии нагрева, плавления и испарения). Для Al эта энергия равна 13,1 кДж/г, для Zn – 2,2 кДж/г. Пересчет на единицу объема металла дает 35,4 кДж/см³ и 15,8 кДж/см³ соответственно. Это означает, что энергия, сообщаемая полимеру до испарения металлического слоя, выше в случае с Al металлизацией.

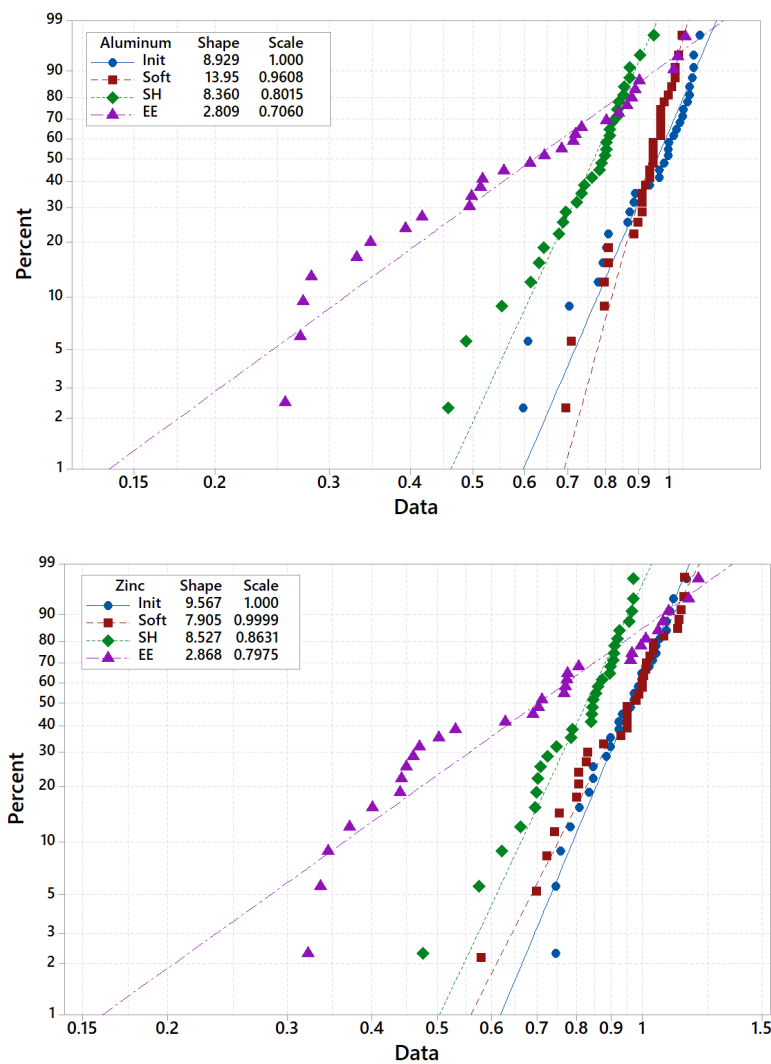


Рис. 7. Статистические распределения электрической прочности деметаллизованных пленок: Init – исходная металлизированная пленка, Soft – мягкая (химическая) деметаллизация, SH – деметаллизация микродуговым разрядом, EE – деметаллизация электрическим взрывом. Левый – алюминий, правый – цинк

Fig. 7. Statistical distributions of breakdown strength of demetallized polymer films: Init – initial metallized film, Soft – chemical demetallization, SH – demetallization by microarc discharge, EE – demetallized by electric explosion. Left – aluminum, right – zinc

Таким образом, было показано, что влияние электродов на электрическую прочность конденсаторной полимерной пленки может быть весьма существенным. Это нужно учитывать для значений прочности диэлектрика как в исходном состоянии – перед намоткой конденсатора, так и в ходе эксплуатации – в случаях, когда процесс СВ восстанавливает электрическую прочность конденсатора после пробоя, однако при этом может приводить к локальным и весьма значительным снижениям электрической прочности полимера, повышающей вероятность новых пробоев даже при более низких значениях приложенного напряжения.

Влияние конфигурации электродов на характеристики МПК

В предыдущей части статьи было рассмотрено влияние электродов МПК на такую характеристику, как электрическая прочность полимерных пленок – то есть базовая электрофизическая характеристика основного компонента МПК. При этом важно рассмотреть еще один аспект вли-

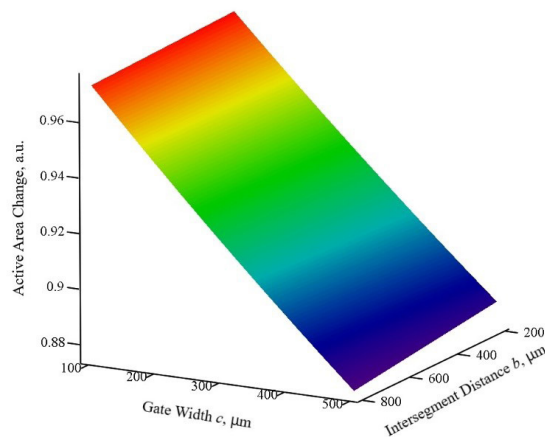


Рис. 8. Относительное уменьшение активной площади сегментированных электродов с разными геометрическими параметрами

Fig. 8. Relative reduction of active area of segmented electrodes by varying geometric parameters

яния электродов, теперь уже на характеристики конденсатора, как электротехнического изделия — элемента электрической цепи со своими емкостью и эквивалентным последовательным сопротивлением.

Влияние на геометрическую емкость МПК

Как уже было сказано ранее, электроды МПК могут быть сплошными, сегментированными и гибридными. Для МПК со сплошными электродами геометрическая емкость будет определяться площадью перекрытия электродов. То есть в формировании емкости участвует вся площадь электродов за исключением областей закраин, свободных от металлического слоя. В сегментированных электродах присутствуют области, свободные от металлических слоев — именно за счет них образуется сегментная структура (см. рис. 3–5), но при этом они не вносят вклад в общую геометрическую емкость конденсатора. В зависимости от номинала напряжения конденсатора производителями предлагаются сегментированные пленки с различными геометрическими параметрами рисунка сегментации. Так, для сегментированных металлизированных пленок производства Steinerfilm, ширина межсегментного мостика b может варьироваться от 200 до 800 мкм. Ширина межсегментного зазора c (или длина мостика) варьируется в пределах от 100 до 500 мкм. Произведем оценку максимального снижения геометрической емкости конденсатора в случае применения сегментированных электродов (см. рис. 8).

Как видим из графика, иллюстрирующего результаты расчета, максимальное снижение площади составляет 12%. Для наиболее типичных значений c и b , составляющих 200 мкм и 350 мкм соответственно, снижение активной площади достигает 5%. Указанное обстоятельство при производстве приводит к необходимости увеличения длины намотки конденсаторной секции и, как следствие, увеличению объема конденсатора для сохранения его емкости на уровне конструкции со сплошными или гибридными электродами. Для гибридных электродов при любых комбинациях геометрических параметров активная площадь будет оставаться максимально возможной, то есть повторять таковую для сплошных электродов.

Поверхностное сопротивление электродов

Изменение геометрических параметров металлизации, причём в данном случае — всех типов (сплошной, сегментированной, гибридной), ведет к изменению поверхностного сопротивления электродов R_s . Последняя величина, в свою очередь, может вносить существенный вклад в эк-

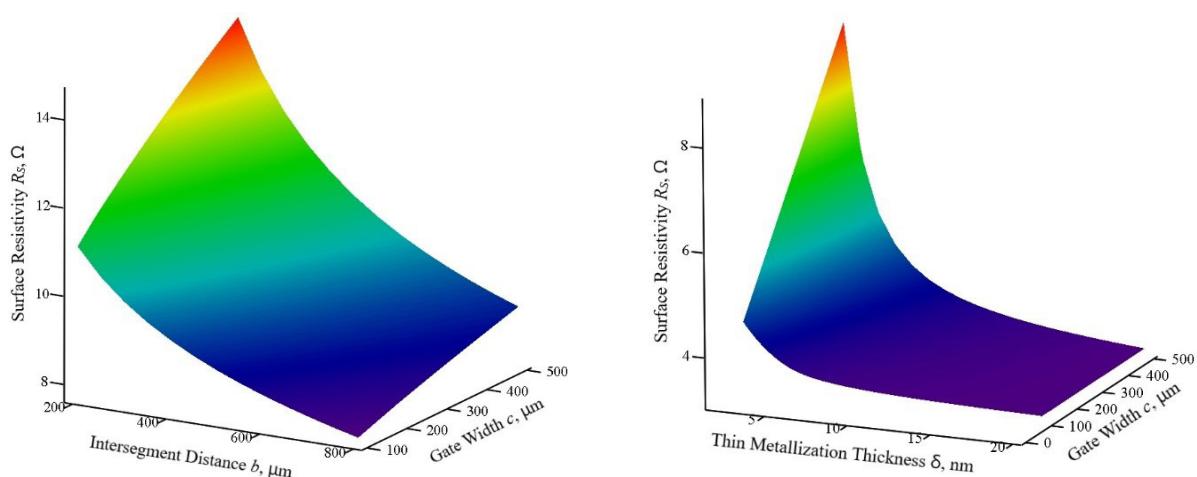


Рис. 9. Поверхностные сопротивления электродов на основе сегментированной (слева) и гибридной (справа) металлизации с разными геометрическими параметрами
 Fig. 9. Surface resistances of segmented (left) and hybrid (right) electrodes by varying geometric parameters

вивалентное последовательное сопротивление конденсатора. Для сплошной металлизации геометрическим параметром является толщина металлического слоя δ_{Me} ; для сегментированной – толщина металлического слоя δ_{Me} , ширина межсегментного мостика b , ширина межсегментного зазора c ; для гибридной – толщина металлического слоя сегмента δ_{Thick} , толщина металлического слоя между сегментами δ_{Thin} , ширина межсегментного зазора c .

Значение удельного поверхностного сопротивления металлического слоя ρ_s может быть получено из зависимости удельного электрического сопротивления металла ρ от толщины его слоя δ_{Me} :

$$\rho(\delta_{Me}) = \rho_s \cdot \delta_{Me}.$$

Для электродов на основе сплошной металлизации в связи с отсутствием областей искажения или усиления поля по всей площади удельное поверхностное сопротивление будет равно поверхностному сопротивлению:

$$R_s(\delta_{Me}) \equiv \rho_s(\delta_{Me}).$$

Так, например, для 20 нм толщины слоя удельное сопротивление алюминия составляет $\sim 6 \cdot 10^{-8}$ Ом·м, что в пересчете на поверхностное сопротивление дает 3 Ом. Для цинка 20 нм слой соответствует $\sim 6,5$ Ом поверхностного сопротивления.

Для сегментированных и гибридных электродов определение поверхностного сопротивления R_s перестает быть тривиальной задачей в связи с неравномерным распределением тока по электродам и влиянием на это иных геометрических параметров. Ниже на рис. 9 представлены зависимости поверхностных сопротивлений сегментированных и гибридных электродов при варьировании их геометрических параметров, рассчитанные с помощью COMSOL Multiphysics.

Как видно из графиков величина поверхностного сопротивления может изменяться в широких пределах. Это должно учитываться при выборе рисунка сегментации электродов.

Далее сравним поверхностные сопротивления сегментированных и гибридных электродов при фиксировании некоторых параметров (см. рис. 10). Для сегментированных электродов зафиксируем толщину металлизации на уровне 20 нм, ширину межсегментного мостика на уровне

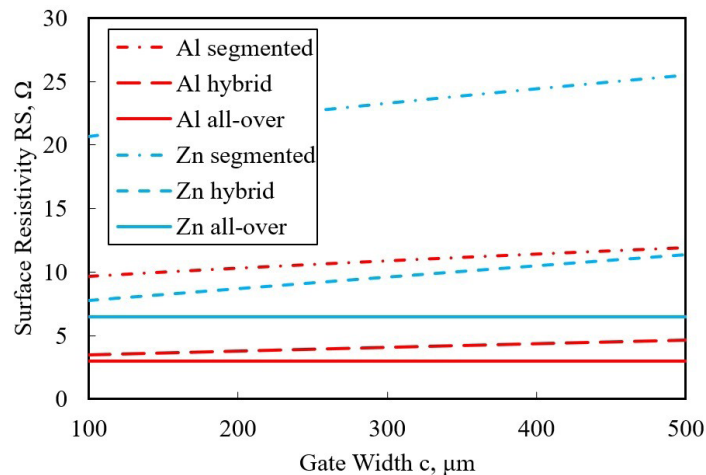


Рис. 10. Сравнение поверхностных сопротивлений алюминиевых и цинковых электродов толщиной 20 нм при разных межсегментных зазорах: сплошные, сегментированные (ширина мостика 350 мкм), гибридные (толщина тонкого слоя 5 нм)

Fig. 10. Comparison of surface resistances of 20 nm thick Al and Zn electrodes: All-over, Segmented (bridge width 350 microns), Hybrid (thin layer 5 nm)

350 мкм. Для гибридных электродов – толщина слоя в области сегмента 20 нм, в области межсегментного зазора 5 нм. Варьированию подвергнем ширину межсегментного зазора c .

Из графика можно увидеть еще одно преимущество гибридных электродов перед сегментированными. Их поверхностное сопротивление находится на уровне, близком к таковому для сплошных электродов. Это положительно скажется не только на ESR , но и на токовой нагрузочной способности конденсаторов.

Важным отличием сегментированных электродов от сплошных является существенно меньшая энергия, локально рассеиваемая в конденсаторе при пробое и СВ. Энергия является одной из основных характеристик процесса СВ, так как существенным образом влияет на темп деградации характеристик конденсатора и вероятность его катастрофического отказа. Далее сравним энергетические характеристики процесса СВ для электродов на основе сегментированной и гибридной металлизаций.

Энергетические характеристики СВ

При СВ в конденсаторе на основе сегментированных электродов происходит перегорание (электротепловое разрушение) межсегментных мостиков. Энергетические характеристики таких процессов были подробно изучены авторами в [10]: получены экспериментальные зависимости интегралов действия тока до разрушения, на основании которых были верифицированы разработанные численные модели процессов разрушения.

Сравним полученные ранее результаты с экспериментальными данными для гибридных электродов.

Для получения энергетических характеристик процесса разрушения гибридных электродов была использована аналогичная [10] экспериментальная установка, показанная на рис. 11. Испытаниям подвергался элемент гибридной металлизации, включающий два сегмента с металлизацией большей толщины $\delta_{Thick} = 30$ нм и межсегментный промежуток с металлизацией меньшей толщины $\delta_{Thin} = 6$ нм. На образец подавались импульсы напряжения различной амплитуды, осциллографом фиксировались напряжение и ток в образце в процессе его электротеплового разрушения. Пример полученных осциллограмм тока и напряжения приведен на рис. 12. Было изготовлено несколько серий экспериментальных образцов электродов с гибридной металлизацией.

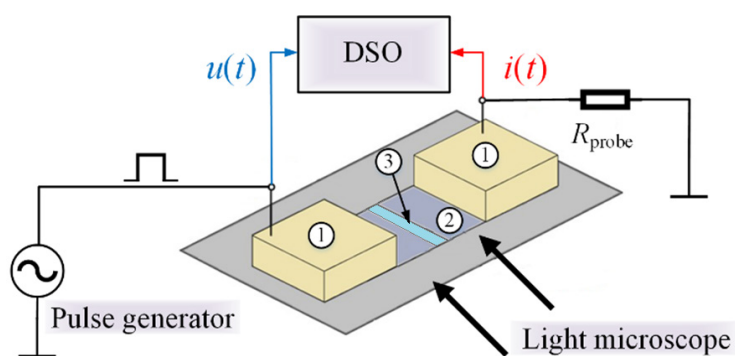


Рис. 11. Экспериментальная установка для исследования электротеплового разрушения гибридных электродов: 1 – прижимные электроды, 2 – сегменты с толстой металлизацией, 3 – межсегментный промежуток с тонкой металлизацией

Fig. 11. Experimental setup for dielectric breakdown testing of hybrid electrodes: 1 – electrodes, 2 – segments with thick metal layer, 3 – intersegment area with thin metal layer

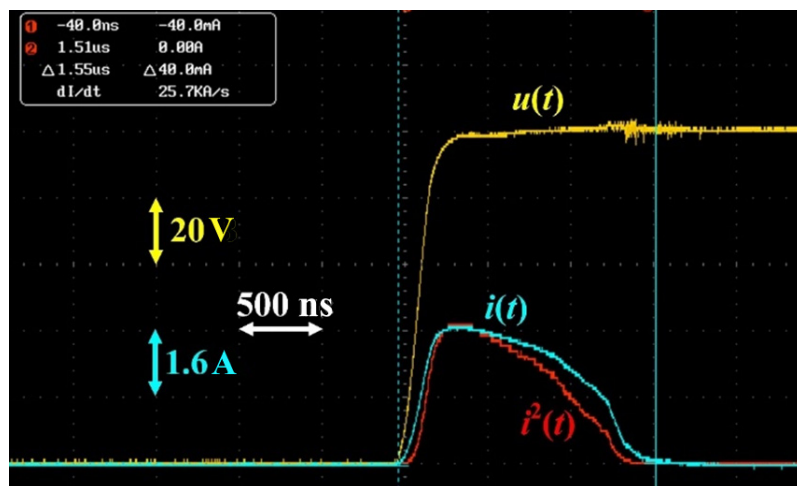


Рис. 12. Осциллограммы тока и напряжения при испытании образца гибридной металлизации

Fig. 12. Voltage and current waveforms of hybrid sample testing

Получено и исследовано более 10 различных комбинации толщин (поверхностных сопротивлений R_s) металлических (алюминиевых) слоев основного сегмента и межсегментных промежутков. Для изучения разрушения гибридной металлизации различных комбинаций сопротивления сегмент–межсегментный промежуток использовалось не менее 30–40 образцов каждого соотношения толщин. При этом было установлено, что большинство комбинаций приводят к ожидаемому разрушению межсегментной области.

Разрушение образцов заключалось в прорастании деметаллизационной «трещины» в поперечном протекающему току направлении в межсегментной области с пониженной толщиной металла по всей ширине образца. Примеры фотографий зон разрушения представлены на рис. 13.

Из фотографии видно, что ширина деметаллизационной трещины чрезвычайно мала. Для более подробного анализа зоны разрушения были сделаны снимки при помощи сканирующего электронного микроскопа Phenom ProX (см. рис. 14).

С помощью полученных SEM-снимков удалось установить характерные размеры деметаллизационных трещин в поперечнике. Они ставили ~ 10 мкм. При этом сохраняется взрывной характер разрушения металлизированного слоя, присущий и более толстым слоям металлизации.

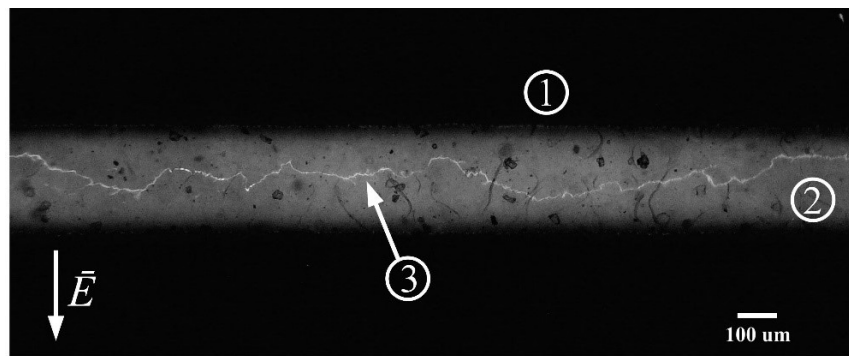


Рис. 13. Фотография фрагмента образца электродов с гибридной металлизацией с соотношением толщин 6/30 нм: 1 – толстая металлизация, 2 – тонкая металлизация, 3 – деметаллизированный поперечный канал. Стрелкой указано направление электрического поля

Fig. 13. Photograph of fractured hybrid electrodes sample with 6/30 nm thickness ratio: 1 – thick metal layer, 2 – thin metal layer, 3 – demetallized zone. Arrow indicates electric field direction

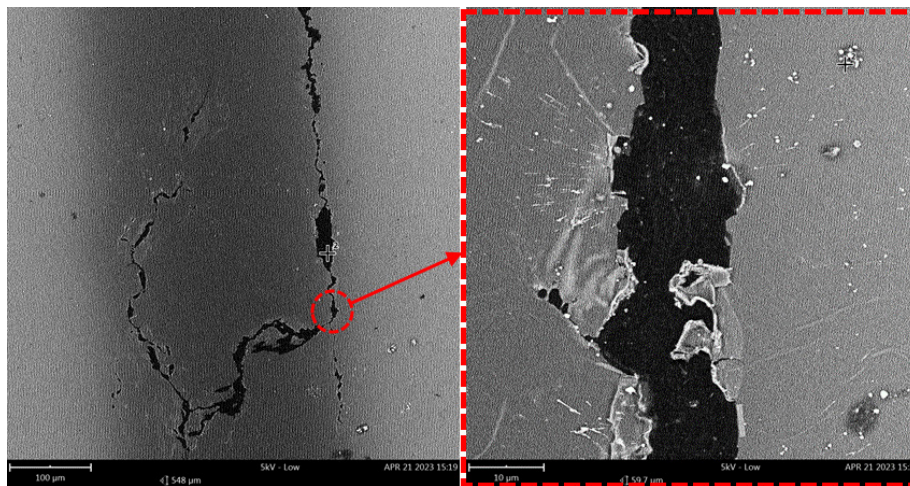


Рис. 14. SEM фотографии зон деметаллизации

Fig. 14. SEM photographs of demetallized zones

На рис. 15 представлены экспериментальные значения интеграла действия тока до разрушения образцов сегментированных электродов толщиной 10 нм и гибридных электродов с соотношением толщины металлических слоев 30/6 нм.

Как видно из сравнения энергетических характеристик процесса разрушения, затраты энергии на электротепловое разрушение гибридного электрода в среднем оказываются в несколько раз ниже, чем для сегментированных электродов. Разброс данных может быть объяснен сложностью изготовления лабораторных образцов гибридных электродов с идентичными геометрическими параметрами. Тем не менее, можно заключить, что рассеиваемая тепловая энергия в ходе процесса СВ также будет существенно ниже, что положительно скажется на снижении вероятности катастрофического отказа конденсатора.

Дополнительно на нескольких лабораторных образцах полимерных пленок с гибридной металлизацией были проведены пилотные эксперименты с реальными пробоем диэлектрика и СВ. На рис. 16 приведены примеры срабатывания гибридных электродов в случаях с единичным и множественными пробоями полимерной пленки. Как видно из фотографий изолирование дефектного сегмента или группы сегментов происходит по правильному сценарию, когда выгоранию

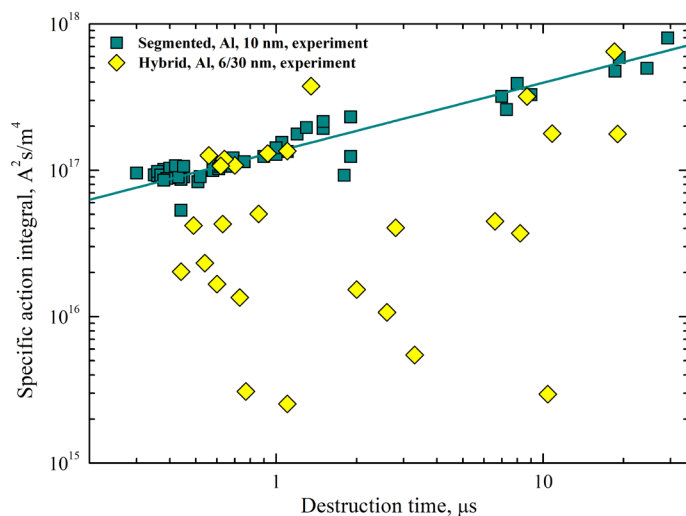


Рис. 15. Экспериментальные зависимости интеграла действия тока до разрушения от времени разрушения сегментированных и гибридных электродов

Fig. 15. Experimental dependences of specific action integral of current before fracture on time of fracture for segmented and hybrid electrodes

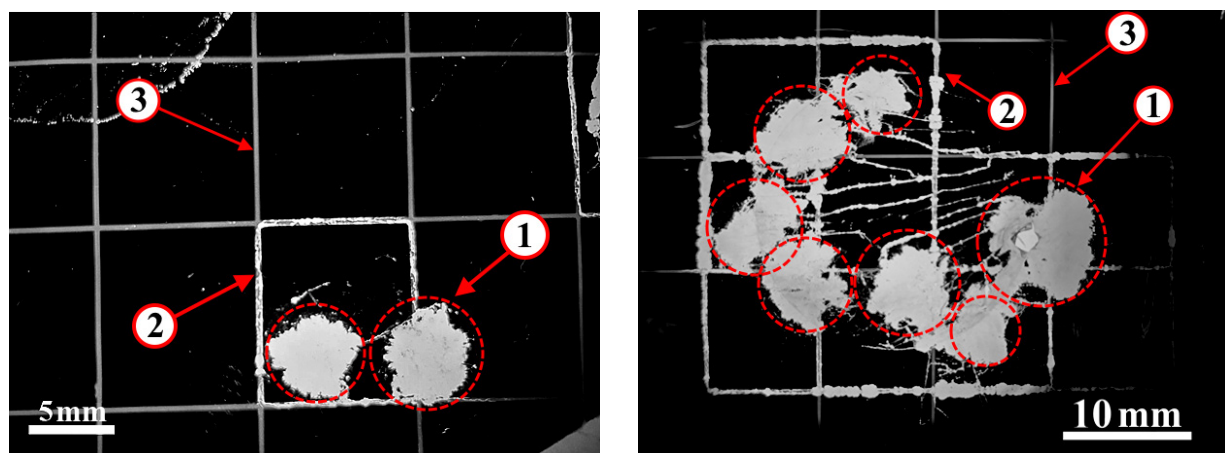


Рис. 16. Фотографии области пробоя в гибридной металлизации: левое – с изолированием одного сегмента, правое – с изолированием группы сегментов. 1 – зона деметаллизации вокруг канала пробоя, 2 – деметаллизированная межсегментная область, 3 – неразрушенная межсегментная область

Fig. 16. Photographs of breakdown site in hybrid electrodes: left – one segment isolation, right – group of segments isolation. 1 – demetallized zone around breakdown channel, 2 – demetallized intersegment area, 3 – intact intersegment area

подвергается межсегментная область электродов, что позволяет отсечь сегмент или несколько сегментов, в области которых произошел пробой, от «здоровой» части электродов.

На данный момент ведутся работы по отработке технологии получения образцов с высокой воспроизводимостью геометрических характеристик металлизации с целью дальнейшего распространения полученного опыта на производство металлизированных пленок в режиме roll-to-roll.

Заключение

В результате проведенных исследований изучено влияние конфигураций электродов (сплошных, сегментированных, гибридных) на характеристики МПК.

Оценены и исследованы:

– влияние толщины металлического слоя на снижение электрической прочности полимерной пленки в результате теплового воздействия при напылении – нанесение металлических слоев толщиной до 50 нм приводит к снижению электрической прочности конденсаторных полимерных пленок на величину до 10%;

– влияние процессов электротеплового разрушения металлизации (электрический взрыв, микродуговой разряд) на снижение электрической прочности полимерной пленки – до 25% в случае электрического взрыва алюминиевой металлизации на поверхности полимерной пленки;

– степень влияния геометрических параметров сегментированной металлизации на общую емкость конденсатора – максимально возможное снижение емкости достигает 12%, типичное снижение находится на уровне 5%;

– влияние геометрических параметров сегментированной и гибридной металлизации на поверхностное сопротивление электродов;

– энергетические характеристики процессов электротеплового разрушения гибридных электродов, требующих в несколько раз меньше энергии для разрушения по сравнению с сегментированными.

Авторами разработаны и запатентованы новые гибридные электроды для МПК, сочетающие в себе преимущества сплошных и сегментированных электродов. Дальнейшей целью ставится отработка технологии получения металлизированных полимерных пленок с гибридной металлизацией в промышленных масштабах для изготовления и исследования характеристик мелких серий МПК с новыми типами электродов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

[1] **Wang H., Blaabjerg F.** Power Electronics Reliability: State of the Art and Outlook, IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 9 (6) (2021) 6476–6493. DOI: 10.1109/JESTPE.2020.3037161

[2] **Ramos R.** Film Capacitors in Power Applications: Choices and Particular Characteristics Needed, IEEE Power Electronics Magazine, 5 (1) (2018) 45–50. DOI: 10.1109/MPEL.2017.2782401

[3] **Kim Y.J., Kim S.M., Lee K.B.** Improving DC-Link Capacitor Lifetime for Three-Level Photovoltaic Hybrid Active NPC Inverters in Full Modulation Index Range, IEEE Transactions on Power Electronics, 36 (5) (2021) 5250–5261. DOI: 10.1109/TPEL.2020.3027670

[4] **Cheng S., Li Q.** Polymer Dielectrics for Film Capacitors Applied in HVDC Transmission, Polymer Insulation Applied for HVDC Transmission, (2021) 607–626. DOI: 10.1007/978-981-15-9731-2_24/FIGURES/9

[5] **Zhang Y., Khanbareh H., Roscow J., Pan M., Bowen C., Wan C.** Self-Healing of Materials under High Electrical Stress, Matter, 3 (4) (2020) 989–1008. DOI: 10.1016/J.MATT.2020.07.020

[6] **Anderson R.** Select the right plastic film capacitor for your power electronic applications, IEEE Industry Applications Conference, 3 (1996) 1327–1330. DOI: 10.1109/IAS.1996.559237

[7] **Sarjeant W.J., MacDougall F.W.** Capacitors for high power electronics, IEEE International Pulsed Power Conference, 1 (1997) 603–609. DOI: 10.1109/PPC.1997.679406

[8] **Wang H., Blaabjerg F.** Reliability of capacitors for DC-link applications in power electronic converters – An overview, IEEE Transactions on Industry Applications, 50 (5) (2014) 3569–3578. DOI: 10.1109/TIA.2014.2308357

[9] **März M., Schletz A., Eckardt B., Egelkraut S., Rauh H.** Power electronics system integration for electric and hybrid vehicles, 6th International Conference on Integrated Power Electronics Systems, (2010) 1–10.

[10] **Belko V.O., Emelyanov O.A., Ivanov I.O., Plotnikov A.P., Feklistov E.G.** Application of Numerical Simulation for Metallized Film Capacitors Electrodes Design, IEEE Access, 9 (2021) 80945–80952. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3085695

- [11] **Valentine N., Azarian M.H., Pecht M.** Metallized film capacitors used for EMI filtering: A reliability review, *Microelectronics Reliability*, 92 (2019) 123–135. DOI: 10.1016/J.MICROREL.2018.11.003
- [12] **Lv C., Liu J., Zhang Y., Yin J., Cao R., Li Y., Liu X.** A Method to Characterize the Shrinking of Safe Operation Area of Metallized Film Capacitor Considering Electrothermal Coupling and Aging in Power Electronics Applications, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 70 (2) (2023) 1993–2002. DOI: 10.1109/TIE.2022.3161823
- [13] **He Y., Wang F., Du G., Pan L., Wang K., Gerhard R., Plath R., Rozga P., Trnka P.** Revisiting the thermal ageing on the metallised polypropylene film capacitor: from device to dielectric film, *High Voltage*, 8 (2) (2023) 305–314. DOI: 10.1049/HVE2.12278
- [14] **Tai Y., Chen P., Jian Y., Fang Q., Xu D., Cheng J.** Failure mechanism and life estimate of metallized film capacitor under high temperature and humidity, *Microelectronics Reliability*, 137 (2022) 114755. DOI: 10.1016/J.MICROREL.2022.114755
- [15] **Chowdhury S., Gurpinar E., Ozpineci B.** Capacitor Technologies: Characterization, Selection, and Packaging for Next-Generation Power Electronics Applications, *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 8 (2) (2022) 2710–2720. DOI: 10.1109/TTE.2021.3139806
- [16] **Marati N., Gupta R.G., Vaithilingam B.** Multilayer Ceramic Capacitors Crisis Management in Automotive Industry, 2020 IEEE International Conference on Power Electronics, Smart Grid and Renewable Energy, (2020) DOI: 10.1109/PESGRE45664.2020.9070770
- [17] **Gnonhoue O.G., Velazquez-Salazar A., David É., Preda I.** Review of Technologies and Materials Used in High-Voltage Film Capacitors, *Polymers*, 13 (5) (2021) 766. DOI: 10.3390/POLYM13050766
- [18] **Tan D.Q., Wu X.** A case study of high-temperature polyetherimide film capacitor fabrication, *Materials Today Energy*, 30 (2022) 101167. DOI: 10.1016/J.MTENER.2022.101167
- [19] **Li H., Zhou Y., Liu Y., Li L., Liu Y., Wang Q.** Dielectric polymers for high-temperature capacitive energy storage, *Chemical Society Reviews*, 50 (11) (2021) 6369–6400. DOI: 10.1039/D0CS00765J
- [20] **Ho J.S., Greenbaum S.G.** Polymer Capacitor Dielectrics for High Temperature Applications, *ACS Applied Materials and Interfaces*, 10 (35) (2018) 29189–29218. DOI: 10.1021/ACSAMI.8B07705/ASSET/IMAGES/MEDIUM/AM-2018-077056_0046.GIF
- [21] **Rabuffi M., Picci G.** Status quo and future prospects for metallized polypropylene energy storage capacitors, *IEEE Transactions on Plasma Science*, 30 (5) (2002) 1939–1942. DOI: 10.1109/TPS.2002.805318
- [22] **Kerrigan R.M.** Metallized Polypropylene Film Energy Storage Capacitors For Low Pulse Duty, 2007 CARTS Conference, 27 (2007) 97.
- [23] **Belko V.O., Emelyanov O.A., Ivanov I.O., Voloshin K.V.** Numerical Investigation of Electrodes Segmentation Patterns for Metal-Film Capacitors, 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), (2020) 1017–1020. DOI: 10.1109/EIConRus49466.2020.9038931
- [24] **Liu J., Zhu L., Zheng L., Ji S.** Research on Optimization Design Method of Square Resistance of Metallized Film Capacitors for MMC-HVDC, *Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, (2021) 518–521. DOI: 10.1109/CEIDP50766.2021.9705376
- [25] **Li Z., Li H., Huang X., Li H., Wang W., Wang B., Lin F., Zhang Q.** Temperature Rise of Metallized Film Capacitors in Repetitive Pulse Applications, *IEEE Transactions on Plasma Science*, 43 (6) (2015) 2038–2045. DOI: 10.1109/TPS.2015.2429144
- [26] **Shaw D.G., Cichanowski S.W., Newcomb G.R., Yializis A.** Electrical properties and aging mechanisms in metallized polypropylene film capacitors, *IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, (1982) 27–34. DOI: 10.1109/EIC.1982.7464429
- [27] **Reed C.W., Cichanowski S.W.** The fundamentals of aging in HV polymer-film capacitors, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 1(5) (1994) 904–922. DOI: 10.1109/94.326658
- [28] **Ivanov I., Glivenko D., Feklistov E., Belko V., Kulbako K.** Efficiency Evaluation of Electrodes Segmentation Patterns for Metallized Film Capacitors, *IEEE 61th International Scientific Conference on Pow-*

er and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), (2020) 1–5. DOI: 10.1109/RTUCON51174.2020.9316551

[29] **Zhao S., Chen S., Wang H.** Degradation modeling for reliability estimation of DC film capacitors subject to humidity acceleration, *Microelectronics Reliability*, 100–101 (2019) 113401. DOI: 10.1016/J.MICROREL.2019.113401

[30] **Li H., Li Z., Lin F., Chen Q., Qiu T., Liu Y., Zhang Q.** Capacitance Loss Mechanism and Prediction Based on Electrochemical Corrosion in Metallized Film Capacitors, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 28 (2) (2021) 654–662. DOI: 10.1109/TDEI.2020.009220

[31] **Li H., Li Z., Lin F., Jiang H., Fang T., Zhang Q.** Threshold Current Density of Metallized Film under Multiple Current Pulses, *IEEE Transactions on Plasma Science*, 48 (7) (2020) 2523–2530. DOI: 10.1109/TPS.2020.2998143

[32] **Белько В.О., Емельянов О.А., Иванов И.О., Плотников А.П., Феклистов Е.Г.** Гибридный сегментированный электрод для металлизированного пленочного конденсатора. Пат. 214127 Российская Федерация, МПК Н 01 G 4/005.; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВО СПбПУ. № 2022116417; заявл. 17.06.22; опубл. 12.10.22, Бюл. № 29. 10 с.: ил.

[33] **Belko V., Emelyanov O., Ivanov I., Fedotov N.** Influence of Demetallization Processes on Capacitor Grade Polymer Films Breakdown Strength, 2020 IEEE 3rd International Conference on Dielectrics (ICD), (2020) 166–168. DOI: 10.1109/ICD46958.2020.9341912

[34] **Belko V., Fedotov N., Karaseov P., Karasev N., Studzinskiy V.** Breakdown Strength of Polypropylene Films Demetallized by High-Power Surface Discharge, 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), (2021) 1189–1192. DOI: 10.1109/ElConRus51938.2021.9396548

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

БЕЛЬКО Виктор Олегович – директор Высшей Школы Высоковольтной энергетики, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.

E-mail: vobelko@spbstu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8287-5561>

ПЕЧНИКОВ Алексей Владимирович – инженер, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: pechnikov_av@spbstu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-7255-4123>

ПЛОТНИКОВ Андрей Павлович – доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.

E-mail: plotnikov_ap@spbstu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2769-7181>

ФЕКЛИСТОВ Ефрем Геннадьевич – ассистент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: efrem.feklistov@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7189-6567>

ХОДЖАМОВ Ахмет Аннаоразович – инженер, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: hodzhamov_aa@spbstu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5523-8281>

REFERENCES

- [1] **H. Wang, F. Blaabjerg**, Power Electronics Reliability: State of the Art and Outlook, *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 9 (6) (2021) 6476–6493. DOI: 10.1109/JESTPE.2020.3037161
- [2] **R. Ramos**, Film Capacitors in Power Applications: Choices and Particular Characteristics Needed, *IEEE Power Electronics Magazine*, 5 (1) (2018) 45–50. DOI: 10.1109/MPEL.2017.2782401
- [3] **Y.J. Kim, S.M. Kim, K.B. Lee**, Improving DC-Link Capacitor Lifetime for Three-Level Photovoltaic Hybrid Active NPC Inverters in Full Modulation Index Range, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 36 (5) (2021) 5250–5261. DOI: 10.1109/TPEL.2020.3027670
- [4] **S. Cheng, Q. Li**, Polymer Dielectrics for Film Capacitors Applied in HVDC Transmission, *Polymer Insulation Applied for HVDC Transmission*, (2021) 607–626. DOI: 10.1007/978-981-15-9731-2_24/FIGURES/9
- [5] **Y. Zhang, H. Khanbareh, J. Roscow, M. Pan, C. Bowen, C. Wan**, Self-Healing of Materials under High Electrical Stress, *Matter*, 3 (4) (2020) 989–1008. DOI: 10.1016/J.MATT.2020.07.020
- [6] **R. Anderson**, Select the right plastic film capacitor for your power electronic applications, *IEEE Industry Applications Conference*, 3 (1996) 1327–1330. DOI: 10.1109/IAS.1996.559237
- [7] **W.J. Sarjeant, F.W. MacDougall**, Capacitors for high power electronics, *IEEE International Pulsed Power Conference*, 1 (1997) 603–609. DOI: 10.1109/PPC.1997.679406
- [8] **H. Wang, F. Blaabjerg**, Reliability of capacitors for DC-link applications in power electronic converters – An overview, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 50 (5) (2014) 3569–3578. DOI: 10.1109/TIA.2014.2308357
- [9] **M. März, A. Schletz, B. Eckardt, S. Egelkraut, H. Rauh**, Power electronics system integration for electric and hybrid vehicles, *6th International Conference on Integrated Power Electronics Systems*, (2010) 1–10.
- [10] **V.O. Belko, O.A. Emelyanov, I.O. Ivanov, A.P. Plotnikov, E.G. Feklistov**, Application of Numerical Simulation for Metallized Film Capacitors Electrodes Design, *IEEE Access*, 9 (2021) 80945–80952. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3085695
- [11] **N. Valentine, M.H. Azarian, M. Pecht**, Metallized film capacitors used for EMI filtering: A reliability review, *Microelectronics Reliability*, 92 (2019) 123–135. DOI: 10.1016/J.MICROREL.2018.11.003
- [12] **C. Lv, J. Liu, Y. Zhang, J. Yin, R. Cao, Y. Li, X. Liu**, A Method to Characterize the Shrinking of Safe Operation Area of Metallized Film Capacitor Considering Electrothermal Coupling and Aging in Power Electronics Applications, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 70 (2) (2023) 1993–2002. DOI: 10.1109/TIE.2022.3161823
- [13] **Y. He, F. Wang, G. Du, L. Pan, K. Wang, R. Gerhard, R. Plath, P. Rozga, P. Trnka**, Revisiting the thermal ageing on the metallised polypropylene film capacitor: from device to dielectric film, *High Voltage*, 8 (2) (2023) 305–314. DOI: 10.1049/HVE2.12278
- [14] **Y. Tai, P. Chen, Y. Jian, Q. Fang, D. Xu, J. Cheng**, Failure mechanism and life estimate of metallized film capacitor under high temperature and humidity, *Microelectronics Reliability*, 137 (2022) 114755. DOI:10.1016/J.MICROREL.2022.114755.
- [15] **S. Chowdhury, E. Gurpınar, B. Ozpıneci**, Capacitor Technologies: Characterization, Selection, and Packaging for Next-Generation Power Electronics Applications, *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 8 (2) (2022) 2710–2720. DOI: 10.1109/TTE.2021.3139806
- [16] **N. Marati, R.G. Gupta, B. Vaithilingam**, Multilayer Ceramic Capacitors Crisis Management in Automotive Industry, *2020 IEEE International Conference on Power Electronics, Smart Grid and Renewable Energy*, (2020). DOI: 10.1109/PESGRE45664.2020.9070770
- [17] **O.G. Gnonhoue, A. Velazquez-Salazar, É. David, I. Preda**, Review of Technologies and Materials Used in High-Voltage Film Capacitors, *Polymers*, 13 (5) (2021) 766. DOI: 10.3390/POLYM13050766
- [18] **D.Q. Tan, X. Wu**, A case study of high-temperature polyetherimide film capacitor fabrication, *Materials Today Energy*, 30 (2022) 101167. DOI: 10.1016/J.MTENER.2022.101167

- [19] **H. Li, Y. Zhou, Y. Liu, L. Li, Y. Liu, Q. Wang**, Dielectric polymers for high-temperature capacitive energy storage, *Chemical Society Reviews*, 50 (11) (2021) 6369–6400. DOI: 10.1039/D0CS00765J
- [20] **J.S. Ho, S.G. Greenbaum**, Polymer Capacitor Dielectrics for High Temperature Applications, *ACS Applied Materials and Interfaces*, 10 (35) (2018) 29189–29218. DOI: 10.1021/ACSAMI.8B07705/ASSET/IMAGES/MEDIUM/AM-2018-077056_0046.GIF
- [21] **M. Rabuffi, G. Picci**, Status quo and future prospects for metallized polypropylene energy storage capacitors, *IEEE Transactions on Plasma Science*, 30 (5) (2002) 1939–1942. DOI: 10.1109/TPS.2002.805318
- [22] **R.M. Kerrigan**, Metallized Polypropylene Film Energy Storage Capacitors For Low Pulse Duty, 2007 CARTS Conference, 27 (2007) 97.
- [23] **V.O. Belko, O.A. Emelyanov, I.O. Ivanov, K. V. Voloshin**, Numerical Investigation of Electrodes Segmentation Patterns for Metal-Film Capacitors, 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), (2020) 1017–1020. DOI: 10.1109/EIConRus49466.2020.9038931
- [24] **J. Liu, L. Zhu, L. Zheng, S. Ji**, Research on Optimization Design Method of Square Resistance of Metallized Film Capacitors for MMC-HVDC, Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, (2021) 518–521. DOI: 10.1109/CEIDP50766.2021.9705376
- [25] **Z. Li, H. Li, X. Huang, H. Li, W. Wang, B. Wang, F. Lin, Q. Zhang**, Temperature Rise of Metallized Film Capacitors in Repetitive Pulse Applications, *IEEE Transactions on Plasma Science*, 43 (6) (2015) 2038–2045. DOI: 10.1109/TPS.2015.2429144
- [26] **D.G. Shaw, S.W. Cichanowski, G.R. Newcomb, A. Yializis**, Electrical properties and aging mechanisms in metallized polypropylene film capacitors, *IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, (1982) 27–34. DOI: 10.1109/EIC.1982.7464429
- [27] **C.W. Reed, S.W. Cichanowski**, The fundamentals of aging in HV polymer-film capacitors, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 1(5) (1994) 904–922. DOI: 10.1109/94.326658
- [28] **I. Ivanov, D. Glivenko, E. Feklistov, V. Belko, K. Kulbako**, Efficiency Evaluation of Electrodes Segmentation Patterns for Metallized Film Capacitors, *IEEE 61th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*, (2020) 1–5. DOI: 10.1109/RTUCON51174.2020.9316551
- [29] **S. Zhao, S. Chen, H. Wang**, Degradation modeling for reliability estimation of DC film capacitors subject to humidity acceleration, *Microelectronics Reliability*, 100–101 (2019) 113401. DOI: 10.1016/J.MICROREL.2019.113401
- [30] **H. Li, Z. Li, F. Lin, Q. Chen, T. Qiu, Y. Liu, Q. Zhang**, Capacitance Loss Mechanism and Prediction Based on Electrochemical Corrosion in Metallized Film Capacitors, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 28 (2) (2021) 654–662. DOI: 10.1109/TDEI.2020.009220
- [31] **H. Li, Z. Li, F. Lin, H. Jiang, T. Fang, Q. Zhang**, Threshold Current Density of Metallized Film under Multiple Current Pulses, *IEEE Transactions on Plasma Science*, 48 (7) (2020) 2523–2530. DOI: 10.1109/TPS.2020.2998143
- [32] **V.O. Belko, O.A. Yemelyanov, I.O. Ivanov, A.P. Plotnikov, Ye.G. Feklistov**, Gibriddnyy segmentirovanny elektrod dlya metallizirovannogo plenchnogo kondensatora. Pat. 214127 Rossiyskaya Federatsiya, MPK H 01 G 4/005.; zayavitel i patroobladatel FGAOU VO SPbPU. № 2022116417; zayavl.17.06.22; opubl. 12.10.22, Byul. № 29. 10 s.: il.
- [33] **V. Belko, O. Emelyanov, I. Ivanov, N. Fedotov**, Influence of Demetallization Processes on Capacitor Grade Polymer Films Breakdown Strength, 2020 IEEE 3rd International Conference on Dielectrics (ICD), (2020) 166–168. DOI: 10.1109/ICD46958.2020.9341912
- [34] **V. Belko, N. Fedotov, P. Karaseov, N. Karasev, V. Studzinskiy**, Breakdown Strength of Polypropylene Films Demetallized by High-Power Surface Discharge, 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), (2021) 1189–1192. DOI: 10.1109/EIConRus51938.2021.9396548

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Victor O. BELKO – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: vobelko@spbstu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8287-5561>

Alexey V. PECHNIKOV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: pechnikov_av@spbstu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-7255-4123>

Andrey P. PLOTNIKOV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: plotnikov_ap@spbstu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2769-7181>

Efrem G. FEKLISTOV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: efrem.feklistov@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7189-6567>

Ahmet A. HOJAMOV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: hodzhamov_aa@spbstu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5523-8281>

Поступила: 05.05.2023; Одобрена: 01.06.2023; Принята: 05.06.2023.

Submitted: 05.05.2023; Approved: 01.06.2023; Accepted: 05.06.2023.