

Self-healing metalized film capacitors: quo vadis?

Nadezhda A Andreeva¹ and Vitaly V. Chaban²

(1) Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia.

(2) Yerevan State University, Yerevan, 0025, Armenia. E-mail: vvchaban@gmail.com

Abstract. Metal film capacitors are ubiquitous components in modern electronics, playing an important role in energy storage, filtering, and voltage regulation. However, their performance and reliability can be reduced by partial electrical breakdowns caused by defects in the dielectric material. An attempt to partially mitigate this problem is the use of self-healing capacitors. The self-healing phenomenon significantly increases the service life of the device. This review presents a comprehensive analysis of the currently known aspects and mechanisms of self-healing in metal film capacitors. The role of the self-healing phenomenon in increasing the number of operating cycles of a dielectric capacitor is discussed. The molecular processes underlying significantly different self-healing potentials of dielectric polymers are verified. The review is addressed to specialists in electrical engineering.



САМОВОССТАНАВЛИВАЮЩИЕСЯ МЕТАЛЛОПЛЕНОЧНЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ: QUO VADIS?

Надежда Анатольевна Андреева¹ и Виталий Витальевич Чабан²

(1) Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia.

(2) Yerevan State University, Yerevan, 0025, Armenia. E-mail: vvchaban@gmail.com

Аннотация. Металлопленочные конденсаторы являются повсеместными компонентами в современной электронике, играя важную роль в хранении энергии,

фильтрации и регулировании напряжения. Однако их производительность и надежность могут быть снижены частичными электрическими пробоями, форсируемыми дефектами диэлектрического материала. Попыткой частичного нивелирования этой проблемы является использование самовосстанавливающихся конденсаторов. Феномен самовосстановления значительно увеличивает срок службы устройства. В настоящем обзоре представлен всесторонний анализ известных на сегодняшний день аспектов и механизмов самовосстановления в металлопленочных конденсаторах. Обсуждена роль феномена самовосстановления в увеличении количества рабочих циклов диэлектрического конденсатора. Верифицированы молекулярные процессы, стоящие за существенно различными потенциалами диэлектрических полимеров к самовосстановлению. Обзор адресован специалистам в электротехнике.

Ключевые слова: диэлектрический конденсатор; электрический пробой; самовосстановление; полимер; молекулярное моделирование.

Введение

Конденсаторы – это пассивные электронные компоненты, которые сохраняют электрическую энергию в электрическом поле. Диэлектрические конденсаторы состоят из двух проводящих пластин (электродов, обкладок), разделенных изолирующим материалом, называемым диэлектриком (рис. 1). Ёмкость конденсатора, которая численно определяет его способность хранить энергию, прямо пропорциональна диэлектрической проницаемости материала и площади пластин и обратно пропорциональна расстоянию между ними [1].

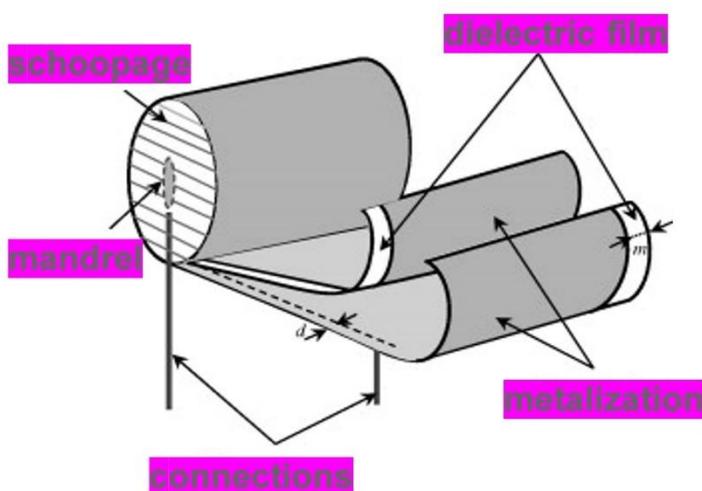


Рис. 1. Конструкция металлизированного пленочного конденсатора. Схема доработана на базе [2].

На сегодняшний день существуют два основных типа диэлектрических конденсаторов – фольговые и металлизированные. Они отличаются по конструкции и некоторым характеристикам. В дальнейшем мы кратко укажем на разницу в конструкциях данных устройств и особенности функционирования, обусловленные данной разницей.

В фольговых конденсаторах обкладками служат тонкие металлические фольги (чаще всего алюминиевые или цинковые), разделенные диэлектриком. Такие конденсаторы обладают стабильной высокой ёмкостью. Однако при пробое диэлектрика в фольговом

конденсаторе происходит короткое замыкание, вследствие чего конденсатор выходит из строя. Свойствами самовосстановления такие конденсаторы не обладают. Еще одним недостатком таких конденсаторов являются их относительно большой вес и габариты.

В металлизированных или металлопленочных конденсаторах (МПК) обкладки наносятся тонким металлическим слоем непосредственно на диэлектрик. В качестве электродов, толщина которых варьируется от 5 нм до 30 нм, используют алюминий или цинк, а чаще – их комбинацию. При пробое диэлектрика в металлизированном конденсаторе происходит локальное испарение металла и пленки в месте пробоя. Из-за испарения образуется разрыв в проводящем слое, который предотвращает короткое замыкание. Это позволяет конденсатору практически полностью восстанавливать свои эксплуатационные свойства после небольших перегрузок. Данное явление носит название самовосстановления (СВ) конденсатора или самолечения – self-healing – в англоязычной литературе.

Благодаря тонкому металлическому слою металлизированные конденсаторы могут иметь меньшие размеры, чем фольговые, при той же ёмкости устройства. Однако тонкие металлические слои могут быть менее стабильными по сравнению с фольгой, что может приводить к некоторым изменениям емкости с течением времени или при изменении температуры. Кроме того, из-за тонкости металлических слоев металлизированные конденсаторы могут иметь более высокий ток утечки.

Диэлектрические материалы играют решающую роль в работе конденсатора, определяя его ёмкость, рабочее напряжение и стабильность. Однако диэлектрические материалы подвержены электрическому пробое – явлению, при котором изоляционные свойства материала ухудшаются. В конечном итоге накопление электрических пробоев приводит к короткому замыканию электродов. Это может произойти из-за различных

факторов, включая структурное несовершенство диэлектрического материала, непредвиденно сильные электрические поля и частичное термическое напряжение [2].

Самовосстанавливающиеся конденсаторы предлагают решение этой проблемы. Механизмы, которые позволяют им восстанавливаться после электрического пробоя, сейчас подлежат активному изучению. Способность к СВ значительно повышает надежность и срок службы конденсаторов, делая их привлекательными для ранее не рассматривавшихся применений. Металлизированные пленочные конденсаторы хорошо подходят для высокочастотных и высоковольтных электрических полей, имеющих место в электромобилях, приложениях аэрокосмической промышленности и импульсных системах питания благодаря именно своим свойствам СВ [3-7].

В настоящей работе мы приводим детальный обзор последней научной литературы, касающейся МПК и процессов СВ в них. Впервые в обзорных публикациях на данную тему мы рассматриваем СВ как с макроскопической, так и с микроскопической точек зрения. Обсужден феномен образования сажи из испарившихся электродов и полимерного изоляционного материала. Рассмотрен химический состав сажи, летучие побочные продукты и электрическая проводимость твердого остатка.

Анализ и обсуждение

Механизмы самовосстановления МПК. Феномен СВ в диэлектрических конденсаторах обычно включает испарение электрода вблизи места пробоя. Этот процесс эффективно изолирует место пробоя, предотвращая дальнейшее структурное повреждение и восстанавливая функциональность конденсатора. Несколько механизмов способствуют СВ (рис. 2) в зависимости от материалов и конструкции конденсатора [8-9].

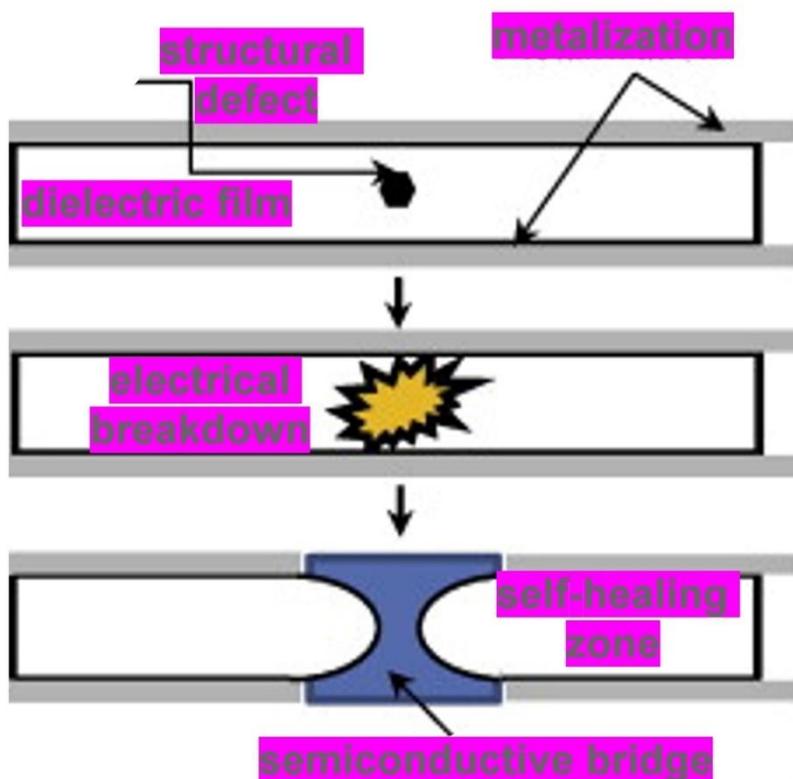


Рис. 2. Феномен самовосстановления в металлизированных пленочных конденсаторах. Схема доработана на базе [2].

В конденсаторах с тонкими металлизированными электродами электрический пробой генерирует большое количество теплоты, заставляя металлизированный слой вблизи дефекта испаряться. Это испарение создаёт зазор в электроде, изолируя дефект и предотвращая дальнейшее протекание тока [10]. В процессе СВ часть выделяющейся тепловой энергии затрачивается на нагрев диэлектрического слоя. При воздействии очень высокой температуры диэлектрик обугливается и испаряется. При этом площадь деструкции металлического слоя, как правило, превышает площадь испаренного диэлектрика. Данное наблюдение позволяет заключить, что тепло электрического пробоя намного проще распространяется по металлу, чем по диэлектрику.

После пробоя диэлектрика и гашения электрической дуги испарившийся материал остывает и оседает в области СВ в виде сажевого («карбонизированного») слоя. Образующаяся сажа может сформировать полупроводниковый канал между электродами и вывести конденсатор из строя. Эффективность СВ зависит от (1) диэлектрических свойств

сажи, (2) её количества, а также (3) доли газовых продуктов, образующихся в процессе СВ [11]. Газовые продукты не проводят электрический ток, т.е. дополнительно изолируют электроды конденсатора друг от друга, в отличие от твердой сажи.

Эксперименты показывают, что толщина диэлектрического слоя отрицательно влияет на качество СВ. Сила натяжения обмотки при производстве, напротив, влияет положительно. Результат теоретического моделирования, построенного на теории плазмы, показывает глубину в 0,28 мкм в карбонизированной области. Это составляет 5% от толщины диэлектрического слоя в 5,8 мкм. Кроме того, размер «карбонизированной» области в диэлектрике превышает размер испаренной области в металлизированном слое в полтора раза [12].

Критерии и причины отказа МПК. Существуют два типа отказа МПК: параметрический и катастрофический. При параметрическом отказе в результате эксплуатации происходит снижение ключевых параметров конденсатора. Обычно это снижение ёмкости конденсатора на 5% (реже до 10%) или увеличение фактора диэлектрических потерь в два раза [13]. В свою очередь, при катастрофическом отказе происходит короткое замыкание МПК или обрыв цепи [14-15].

Конденсаторы на основе полипропиленовой (ПП) пленки не выходят из строя при коротком замыкании, а имеют тенденцию терять ёмкость. В результате каждого акта СВ часть металлизированной пленки выгорает, а, значит, площадь зоны металлизации уменьшается. Этот эффект имеет накопительный характер. В результате эксплуатации ёмкость МПК монотонно снижается [16-17].

Некоторые диэлектрические материалы проявляют низкий потенциал к СВ в составе МПК. В этом случае конденсатор может выйти из строя даже в случае единичного акта пробоя диэлектрика. Обкладки конденсатора закорачиваются, и происходит катастрофический отказ. Наименьшее сродство к СВ проявляют полифениленсульфид

(ПФС) и полиимид (ПИ) [13,18]. Данные изоляционные материалы укорачивают срок службы МПК, хотя и придают конденсатору отличные значения сопротивления.

При пробое в месте дефекта происходит образование электрической дуги с температурой больше 3000 К, в результате чего выгорает часть полимера и металла. Высокая плотность образовавшейся газовой фазы приводит к повышению давления в области пробоя. В результате повышенного давления может происходить потеря механической прочности элементов МПК – расслоение или разрыв металлизированной пленки. Давление выше критического может привести к разрушению корпуса конденсатора и бесповоротному выходу его из строя.

После СВ в месте пробоя образуется слой сажи. Если сажевый канал случайно замыкает обкладки конденсатора, то происходит утечка заряда. Конденсатор теряет ёмкость и выходит из строя. Считается, что качество СВ зависит от проводимости сажевого канала и его толщины. Приблизительно оценить объём образующейся в результате пробоя сажи позволяет несложная формула, показывающая отношение количества элементов, входящих в состав нелетучих соединений, к количеству элементов, входящих в состав летучих соединений [19]:

$$f = \frac{C + N + S}{O + H} \text{ или } f = \frac{C}{O + H} .$$

Согласно приведенной формуле, сопряженные высокотемпературные полимеры с высокой степенью ненасыщенности углерода демонстрируют высокий индекс, например $f = 1,47$ для каптона полиимида по сравнению с $f = 0,5$ для ПП. Чем выше индекс f , тем слабее способность к СВ [20-21]. Отдельно следует обратить внимание читателя на условность определения «летучих элементов» и «нелетучих элементов». Например, «нелетучие элементы» – углерод, азот и сера – также в общем случае могут образовывать

летучие соединения. Однако в конденсаторном контексте они в силу термодинамических и стехиометрических факторов предпочитают оставаться в составе нелетучей сажи.

Причинами, приводящими к отказу МПК, могут являться: (1) химическая коррозия конденсатора из-за влажности, (2) электрохимическая коррозия, (3) перегрев и расплавление диэлектрической пленки [22]. Атмосферная коррозия существенно сокращает срок службы МПК. Влага и кислород, проникая вовнутрь устройства, вызывают окисление электродов, увеличивая их сопротивление и приводя к потере ёмкости. Исследования показали, что структура оксидной пленки на электродах, зависящая от содержания алюминия, определяет антикоррозионные свойства МПК. Повышение содержания алюминия до 50% и более позволяет эффективно защитить торцевые контакты от коррозии. Ускоренные испытания в условиях высокой температуры и влажности подтвердили, что полимерная пленка конденсатора деградирует, а электроды окисляются. Моделирование процесса старения позволило определить, что температура оказывает более сильное влияние на коррозию, чем влажность [23-25].

Характеристика самовосстановления. Для характеристики свойств СВ конденсаторов применяются следующие методы. Для оценки СВ конденсатора часто исследуют его пробивное напряжение, оценивая полученный результат с использованием распределения Вейбулла. Распределение Вейбулла – это статистический метод, широко применяемый в различных областях, включая физику, инжиниринг и материаловедение, для описания распределения экстремальных значений, таких как пробивные напряжения. По полученным параметрам распределения можно сделать выводы о среднем значении пробивного напряжения, разбросе значений пробивного напряжения, вероятности пробоя при заданном напряжении [26].

Энергия СВ в МПК – это количество энергии, необходимой для восстановления изоляционного слоя после локального пробоя диэлектрика. Другими словами, это энергия,

которая выделяется при коротком замыкании в месте дефекта и расходуется на испарение металла электрода, что приводит к изоляции поврежденной области и восстановлению работоспособности конденсатора. Энергия СВ определяет размеры испаряемой области в металлизированных электродах МПК. Меньшая энергия СВ подразумевает меньшую испаряемую область, меньшие потери ёмкости и более длительный срок службы устройства [27-28].

Пэн и соавторы исследовали корреляцию между энергией СВ и критическими факторами, такими как напряжение отслаивания (адгезия между пленками), повреждение внутренних компонентов и количество поврежденных слоев для металлопленочного конденсатора с полипропиленовым диэлектриком. При безопасных уровнях энергии, < 100 мДж, напряжение отслаивания на металлизированных пленках остается ниже 8 Н/м, в то время как опасные энергии, > 250 мДж, приводят к увеличению напряжению отслаивания до 14 Н/м [29].

Электрические измерения – продолжительность СВ, напряженность поля пробоя, ток СВ и энергия СВ – могут использоваться для контроля производительности конденсатора после электрического пробоя. Технология тепловидения может помочь понять связь между точками короткого замыкания и температурным градиентом. Изменения этих параметров могут указывать на возникновение и качество СВ [30].

Методы микроскопии, такие как сканирующая электронная микроскопия и просвечивающая электронная микроскопия, могут использоваться для визуализации места пробоя и характеристики СВ [12]. Эти методы позволяют выявить морфологию электродных и диэлектрических материалов, что дает представление о механизмах СВ [31]. Для оценки эффективности СВ часто используют методы ускоренного старения. При снижении ёмкости конденсатора на 5% его разматывают и оценивают площадь точек СВ

наряду с их пространственным распределением. В этом случае используется технология распознавания образов [32].

СВ в металлизированных пленках заключается в неполном, но интенсивном сгорании, производящем газообразные продукты, такие как C_2H_2 , C_2H_6 , CO , H_2 и некоторые другие в меньших количествах. Благодаря своей значительной термодинамической стабильности, мольная доля H_2 чаще всего самая значительная. С другой стороны, процесс СВ не приводит к образованию полярных фрагментов в диэлектрическом слое, как показывает инфракрасная спектроскопия с преобразованием Фурье (FTIR). Сканирующая электронная микроскопия показывает сильную корреляцию между феноменом СВ и обугливанием на поверхности диэлектрического слоя. Было обнаружено, что небольшое количество атомов металлов остаётся в области СВ без частиц оксида металла. Однако большое количество углерода находится в области очистки вместе с определенным количеством химически связанного кислорода [12].

Энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия и рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия могут использоваться для анализа элементного состава и химического состояния материалов в месте пробоя. Это может предоставить информацию об испарении или миграции материалов электрода во время СВ [33]. Методы термического анализа – дифференциальная сканирующая калориметрия и термогравиметрический анализ – могут использоваться для изучения термических свойств материалов и их поведения во время электрического пробоя. Это может дать представление о термической стабильности МПК и о тепле, выделяемом во время СВ [34].

Расчет методом конечных элементов помогает получить характеристики распределения электрического поля в металлическом электроде [35]. Моделирование демонстрирует, что отверстие на электроде вызывает изменение направления тока. Концентрация тока происходит на верхнем или нижнем крае отверстия, что приводит к

более высокой плотности тока и плотности мощности в этой области, чем в других областях [36]. Также с помощью метода конечных элементов моделировали обрыв тока нитевидного пробоя, когда термически индуцированное увеличение последовательного сопротивления в металлизации электродов дестабилизирует плазменную дугу пробоя [37].

Один из параметров, характеризующих СВ, – величина кумулятивной энергии. Энергию СВ в конденсаторе можно выразить следующим образом [38]:

$$W = \frac{k \cdot V^{4.7} \cdot C}{R_s^{1.8} \cdot \alpha(P)}$$

Здесь k – коэффициент, V – рабочее напряжение, C – ёмкость испытуемого конденсатора, R_s – поверхностное сопротивление металлизированной пленки, $\alpha(P)$ – функция, связывающая межслоевое давление с энергией просветления.

В статье Иванова и соавторов [13] были изучены параметрические и катастрофические отказы конденсаторов на основе плёнок ПП, ПЭТ и ППС. Определены значения кумулятивной энергии СВ до параметрических и катастрофических отказов. Установлено, что значение кумулятивной энергии параметрического отказа составляет 60-90% от значения кумулятивной энергии катастрофического отказа. Катастрофический отказ не наблюдается в конденсаторах с сегментированной металлизацией [13].

Систематически изучить макроскопические свойства материала, исходя из их молекулярного строения, помогают методы молекулярного моделирования. Используя метод классической молекулярной динамики, было исследовано взаимодействие новых диэлектрических жидкостей на основе диалкилкарбонатов с наиболее часто используемыми в МПК полимерными пленками – ПП, ПЭТ и целлюлозой. В результате было обнаружено, что диэтилкарбонат лучше подходит для заполнения пор («пропитывания») в целлюлозе, тогда как дидодецилкарбонат – в ПП и ПЭТ [39]. Совместимость различных пропитывающих жидкостей с различными полимерами

основана на межмолекулярных силах взаимодействия диэлектрика с жидкостью, от размеров пор в диэлектрическом материале, а также гибкости молекул пропитывающей жидкости (рис. 3). Исследованные органические карбонаты были рекомендованы для использования в конденсаторных технологиях нового поколения вместо минеральных масел.

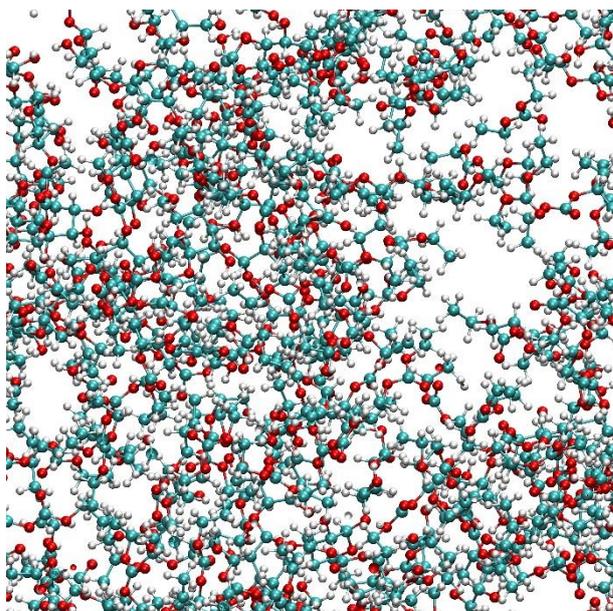


Рис. 3. Пространственное распределение молекул жидкого диэтилкарбоната по объёму твердого диэлектрика (целлюлозы) в процессе равновесного моделирования методом классической молекулярной динамики. Изображена мгновенная молекулярная конфигурация материала при 298 К.

Используя метод инъекции кинетической энергии [40-43], адаптированный к исследованию высокотемпературных химических реакций, возможно проводить исследование поверхности потенциальной энергии для предсказания химического состава образцов сажи, образующейся в процессе СВ. Для полученных химических составов в низкоэнергетических стационарных точках возможно рассчитать значения электропроводности, ширины запрещённых зон, инфракрасные колебательные спектры (рис. 4) с применением методов теории функционала плотности. Обращаем внимание, что в указанных выше расчетах должны использоваться конфигурации глобального минимума энергии и прочие наиболее низкоэнергетические конфигурации в пределах нескольких

единиц кТ от глобального минимума. Данные теоретические расчеты незаменимы в проектировании новых, более надежных МПК.

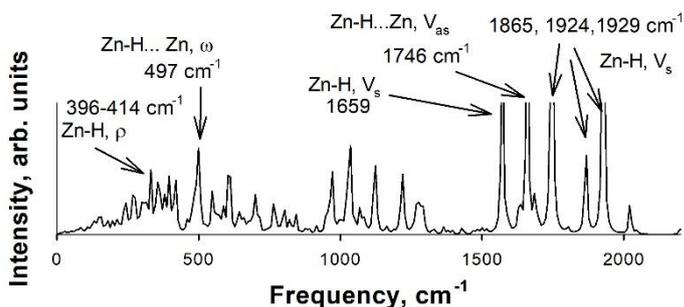


Рис. 4. Колебательные спектры образца сажи в средней и дальней инфракрасной области в системе химического состава Zn(электрод) + PP (диэлектрик). Расчеты проведены с использованием метода теории функционала плотности – M11/6-31G* для углерода и водорода и базисного набора LANL2DZ для атомов цинка – для образца глобального минимума энергии.

Химический состав и количество образовавшихся газовых продуктов после электрического пробоя принципиально влияет на СВ. Газовые продукты обладают нулевой электрической проводимостью, поэтому их мольная фракция прямо пропорционально связана с качеством СВ. Более того, газообразование очевидным образом уменьшает объем негазифицировавшейся сажи. Малые объемы сажи имеют соразмерно малые вероятности стать полупроводящими мостиками между электродами самовосстанавливающегося МПК. Таким образом, фактически исключается возможность короткого замыкания. Варьирование элементного состава МПК позволяет получать более и менее склонные к СВ устройства. Методом реактивной молекулярной динамики нами были исследованы образцы сажи, образующейся в результате электрического пробоя ПП, ПЭТ, ПФС и ПИ диэлектриков. Исследования показали, что по массовой доле газовых фракций наиболее широко используемые на сегодняшний день полимеры ранжируются в следующем порядке: ПП > ПЭТ > ПФС > ПИ. Наибольшее влияние на образование газообразных продуктов оказывает доля водорода в исходном полимере. Кроме того, в образцах сажи, полученных в результате моделирования были выявлены графеноподобные структуры малого размера

с конъюгированными π - π связями, повышающими электрическую проводимость изученных структур [11].

В случаях полимерных изоляторов, когда количество образуемой сажи значительно, требуется проводить анализ электропроводности полученных образцов. В рамках компьютерного моделирования это может быть реализовано с использованием плоских волн как базисного набора, чтобы адекватно представить электронную структуру образца сажи макроскопического размера, и функционала плотности второго поколения, например, PBE [44]. При этом принципиально важно, чтобы периодическая химическая структура для расчета электропроводности (рис. 5) была основана на микроскопической конфигурации рассчитанного глобального минимума или иной доступной достаточно низкоэнергетической структуре, убедительно представляющей образец сажи разрушенного диэлектрика.

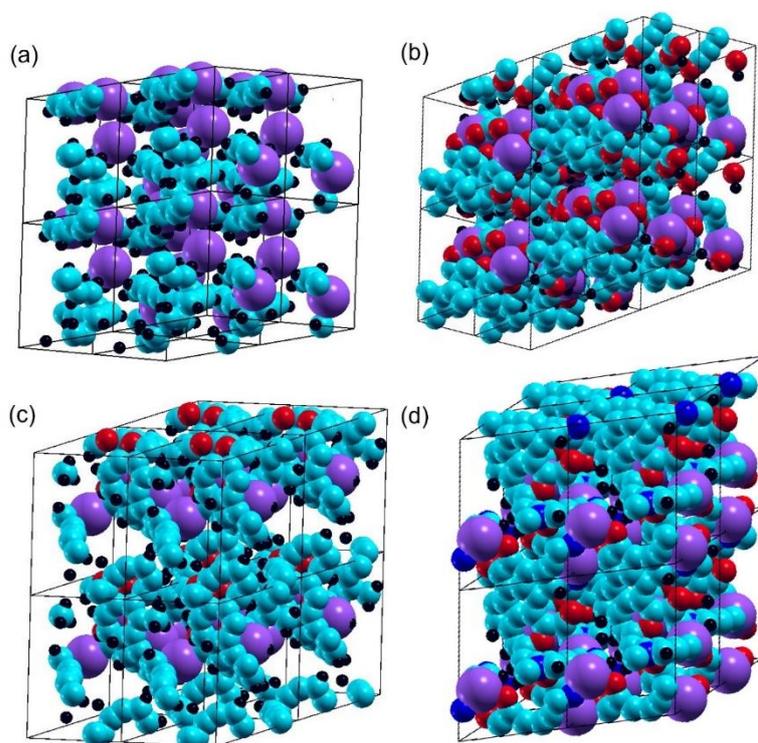


Рис. 5. Периодические структуры в образцах сажи, полученных для следующих систем: (a) 4 Zn + PP, (b) 4 Zn + PET, (c) 4 Zn + PC и (d) 4 Zn + каптон. Изображённые структуры соответствуют геометриям систем в своих глобальных минимумах. Летучие продукты из молекулярного представления удалены для простоты. Атомы углерода изображены голубым цветом, атомы кислорода – красным, атомы азота – синим, атомы цинка – фиолетовым, атомы водорода – черным.

Модели машинного обучения становятся инструментом в проектировании, в том числе конденсаторов. Некоторые научные направления требуют колоссальных затрат вычислительных ресурсов для сэмпинга пространства вариантов. Например, для исследования только наиболее часто используемых элементов периодической таблицы необходимо изучить 10^{80} потенциальных ландшафтов различного химического состава, в то время как разработано всего лишь около 10^4 различных типов синтетических материалов. В конечном итоге, именно эта многогранность приводит к разнообразию наблюдаемых природных явлений и форм жизни. Алгоритмы «искусственного интеллекта» могут быть использованы для продвинутого предсказания свойств, распознавания микроструктуры, оптимизации эксперимента и отслеживания производительности [45-47].

Материалы для металлопленочных конденсаторов. От правильного выбора материалов напрямую зависит эффективность, надежность и срок службы конденсаторов. Диэлектрические конденсаторы обладают следующими преимуществами: высокой плотностью энергии, быстрым откликом на изменение напряжения и длительным сроком эксплуатации. Эти свойства делают их незаменимыми в энергетике и электронике, где требуется высокая производительность и надежность компонентов [48]. Некоторые диэлектрические и электродные материалы уже были исследованы на предмет их свойств СВ, однако большая часть по-прежнему изучена слишком ограниченно. Исследователям и инженерам необходимо понимать пределы возможностей СВ и пути модификации известных диэлектрических материалов с целью минимизации вероятности образования полупроводящих мостиков, соединяющих электроды МПК после электрического пробоя.

Традиционно алюминий и цинк используются как универсальные материалы для электродов в МПК. Современные технологии позволили заменить их сплавом цинка и алюминия, тем самым улучшив средние характеристики конденсаторов. Процесс

изготовления электрода заключается в вакуумном напылении металлического материала на диэлектрическую пленку, формируя тончайший проводящий слой (от 10 до 50 нм). Феноменальная тонкость, необходимая для вывода электрода, приводит к повышенному поверхностному сопротивлению [49].

Атмосферная коррозия сокращает срок службы МПК из-за окисления электродов и потери ёмкости. Ли с соавторами разработали модель для прогнозирования этого процесса и провели тесты на ускоренное старение. Результаты показали, что коррозия значимо зависит от шероховатости диэлектрической пленки и состава электрода. Оптимальное массовое содержание алюминия в электроде составляет около 10% [49]. Таким образом, уместнее говорить о малой добавке алюминия к цинковому электроду для улучшения эксплуатационных характеристик МПК.

Структура электрода и межслойный воздух влияют на срок службы МПК на основе полипропиленовой пленки (МППК). При приложении сильного электрического поля воздух ионизируется и увеличивает область и длительность процесса СВ в МППК. Также в сегментированном МППК области СВ концентрируются, в основном, на границе сегментов. Таким образом, выбор схемы электрода с наименьшим количеством сегментов является способом увеличения срока службы. Кроме того, методами усиления обмотки, герметизации концов после вакуума, оптимизации термообработки в вакууме и пропитки в вакууме срок службы конденсаторов при импульсном применении может быть увеличен максимум в пять раз [28]. Ёмкость МППК быстрее теряется при переменном приложенном напряжении, чем при постоянном [50-51].

Полимеры, такие как полипропилен, полиэтилентерефталат, полиэтиленнафталат, поликарбонат и полифениленсульфид, широко используются в самовосстанавливающихся конденсаторах [7,52-53], однако расширение данного списка видится уместным и благоприятным. Например, Цзяфэн Чжу и соавторы [54] оценили способность к СВ

металлизированных высокотемпературных диэлектрических пленок из полиэтилен-2,6-нафталата, полиэфиркетона и полиимида. Установлено, что высокое содержание углерода в ПИ приводит к отказу СВ при низком сопротивлении слоя, хотя он демонстрирует небольшую энергию СВ при высоком сопротивлении слоя. Вероятность качественного СВ металлизированной пленки полиэфиркетона значительно снижается при высоком межслоевом давлении. Кроме того, в полиэфиркетоне достигается высокая энергия СВ, которая привела бы к быстрому старению МПК [54]. Напротив, полиэтилен-2,6-нафталат с относительно низким содержанием углерода и алифатически-ароматической чередующейся структурой демонстрирует блестящую способность к СВ при различных сопротивлениях слоя и межслоевых давлениях с разумной энергией СВ. Следовательно, полиэтилен-2,6-нафталат является перспективным кандидатом для высокотемпературного МПК в контексте СВ [54].

В работе Као и соавторов [18] разработана и изготовлена серия диэлектрических пленок из полиэфиримида (ПЭИ). Введение полярных групп способствует увеличению диэлектрической проницаемости, а подвижные эфирные группы способствуют снижению диэлектрических потерь. Более того, атомы кислорода способствуют СВ металлизированных пленочных конденсаторов. Для ПЭИ получены диэлектрическая проницаемость 3,53-4,00, коэффициент рассеяния 0,281-0,517 % и прочность пробоя по Вейбуллу 347-674 МВ м⁻¹ [18].

Существующие высокотемпературные полимеры для МПК обычно имеют в своей основе прочные ароматические молекулярные структуры для обеспечения стабильности при повышенных температурах. Тем не менее введение ароматических единиц ставит под угрозу диэлектрические свойства полимера из-за сопряженных π - π связей, которые облегчают перенос электронов и понижают эффективность СВ после пробоя из-за высокого содержания в них углерода. Чен и соавторы [55] исследовали сополимер полинорборна без

ароматики, демонстрирующий электропроводность на два порядка ниже, чем у современного полиэфиримида при повышенных температурах и сильных электрических полях из-за его большой ширины запрещенной зоны, $\approx 4,64$ эВ, и малого расстояния прыжковой проводимости, $\approx 0,63$ нм. Расчеты методом теории функционала плотности показывают, что сополимер подавляет возбуждение валентных электронов в сильном поле. Включение следовых количеств полупроводников приводит к высокой плотности разряда, $3,73$ Дж/см, и эффективности заряда-разряда (95% при 150 °С), превосходя ныне существующие высокотемпературные диэлектрические полимеры. Отличная способность данной сополимерной пленки к СВ при повышенных температурах подчеркивает ее потенциал для использования в МПК. Такие устройства способны работать непрерывно в экстремальных условиях [55].

Установлено, что конденсаторы с диэлектриком из ПФС обладают крайне низкой способностью к СВ. Для каждого испытанного конденсатора наблюдалось не более пяти актов СВ, после чего происходил катастрофический отказ. Малое количество актов СВ соответствует низкому значению кумулятивной энергии, которая не превышает 100 мДж. Низкую способность к СВ можно объяснить химической спецификой сажи, формирующейся вследствие электрического пробоя данной полимерной пленки на молекулярном уровне [13,43,56].

В настоящий момент стала очевидна необходимость исследовательских работ по созданию полимерных композитов с улучшенными диэлектрическими свойствами, включая способность к качественному СВ. Впрочем, количество извещений о таких проектах в открытой международной литературе продолжает оставаться весьма ограниченным. Например, квантовые точки перовскита были созданы с помощью термической инъекции [57] и добавлены к полиэфиримиду (ПЭИ). Синтезированный композитный материал показал снижение потерь проводимости при высоких температурах.

Полученный композит ПЭИ демонстрирует улучшенные энергоёмкость и диэлектрическую надёжность. Например, плотность энергии $7,2 \text{ Дж/см}^3$ с эффективностью 90% при 350 МВ/м, достигнутую в композите, содержащем 0,3% ПЭИ при 100 °С [57]. Снижение стоимости производства этого и подобных материалов могло бы позволить внедрять их в массовое производство.

Влияние внешних факторов. Эффективность процесса СВ может существенно зависеть от термодинамических условий. В данном разделе изучены влияния таких факторов, как температура, напряжение, давление, частота и характеристики диэлектрика на скорость и качество СВ. Понимание этих механизмов позволит оптимизировать условия эксплуатации конденсаторов и разработать новые материалы с улучшенными электротехническими характеристиками. В работе Печникова и Ходжамова [58] представлены экспериментальные исследования СВ в МПК: длительность процесса и зависящее от времени сопротивление микродугового разряда при реальных, характерных для МПК межслойных давлениях. Было обнаружено, что сопротивление изоляции пакетированных металлизированных полипропиленовых пленок после СВ под высоким давлением уменьшается, что приводит к утечкам тока. Возникновение утечек тока связано с возможным отложением углерода вблизи канала пробоя из-за разложения полимера в высокотемпературном дуговом разряде [58].

По мере увеличения межслоевого давления больше пробоев происходит при низкой напряженности электрического поля. Например, при 2,5 кПа большинство пробоев происходит в диапазоне напряженности электрического поля 300-350 В/мкм. В это же время как при 900 кПа большинство пробоев происходит при напряженности электрического поля менее 200 В/мкм [54]. Кроме того, высокое межслоевое давление в МПК способствует снижению потерь емкости в процессе СВ. Исследования показали, что при повышении давления может снизиться прочность изоляционного слоя и уменьшиться

область, способная к СВ. Эти два эффекта в пределах МПК являются антагонистичными. Были изучены характеристики пробоя металлизированной полипропиленовой пленки при давлениях 20 кПа-1000 кПа. Поле пробоя металлизированной пленки значительно уменьшается с увеличением давления в системе. Большие потери энергии при сильном электрическом поле можно предотвратить путем увеличения давления. Поэтому увеличение давления между слоями до определенной степени способствует надежности конденсатора [59].

Энергия СВ МПК была изучена на экспериментальных макетах. Исследователи описали влияние напряжения, температуры, шунтирующей емкости, толщины пленки и межслоевого давления [60]. Результаты показали, что энергия СВ увеличивается на 58,59% с ростом напряжения в диапазоне 950-1150 В. В диапазоне 30-90 °С энергия СВ уменьшается на 36,08% с ростом температуры. В диапазоне 10-160 мкФ параллельная ёмкость мало влияет на энергию СВ. В диапазоне 6-10 мкм энергия СВ увеличивается на 246% с увеличением толщины пленки. В диапазоне 20-800 кПа энергия СВ уменьшается на 47,11% с увеличением межслоевого давления [60].

На экспериментальном макете было обнаружено, что гармонические составляющие оказывают существенное влияние на характеристики СВ МПК. По мере увеличения гармонической составляющей приложенного напряжения напряжение пробоя СВ уменьшается. Формы и размеры областей СВ различны в разных областях двухслойных пленок, что тесно связано с локальными поверхностными сопротивлениями плёнки и металлического напыления мест пробоя. Кроме того, СВ пробоя происходит в широком диапазоне приложенного напряжения, а напряжённость поля пробоя уменьшается с увеличением второй гармонической составляющей [61].

Эксперименты с МППК показали, что характеристики СВ зависят от температуры, напряжения и давления. Оптимальная температура для СВ варьируется в диапазоне

20-70°C. При увеличении напряжения растет и пиковый ток СВ. Высокое давление между слоями МПК стабилизирует эти характеристики. Модель СВ успешно предсказывает форму волны процесса. Для повышения надёжности конденсаторов необходимо контролировать сопротивление диэлектрика и учитывать ёмкость системы [31].

Основные характеристики СВ коммерческих конденсаторов с ПЭТ и ПП были исследованы при температурах от -40 до +100 °С. Было обнаружено, что электрическая прочность обратно пропорциональна температуре для обоих типов конденсаторов. Средняя энергия СВ составляет от 50 мДж (100 °С) до 100 мДж (-40 °С) для конденсаторов ПЭТ и от 100 мДж (100 °С) до 500 мДж (-40 °С) для конденсаторов ПП. Было обнаружено, что значения кумулятивной энергии отказа для конденсаторов с ПЭТ плёнками превышают таковые для конденсаторов с ПП пленками до 100 °С. Зависимости относительной ёмкости, C/C_0 , и относительных диэлектрических потерь, δ/δ_0 , на частоте 1 кГц были также получены в широком диапазоне температур [62].

Повышение температуры значительно ускоряет деградацию изоляции в ПП плёнках, используемых в конденсаторах [63]. При увеличении температуры снижается напряжение пробоя, уменьшается время до возникновения первого разряда, а количество и интенсивность частичных разрядов возрастают. Наиболее выраженное влияние температура оказывает на амплитуду разрядов на восходящей части импульса, где наблюдаются немонотонные изменения с максимумами при 55 °С и 85 °С. Эти эффекты легко объясняются усилением процессов тепловой полевой эмиссии электронов при нагреве диэлектрика [63].

Выводы

Настоящий обзор представляет собой первое полноценное руководство для электротехников, характеризующее специфику феномена СВ в МПК. Объединены в единую картину макроскопические и микроскопические дескрипторы СВ, такие как температура, давление, энергия СВ, запрещенная зона и электропроводность. Обсуждены все известные на 2024 год факторы, значимо влияющие на возможность и качество СВ. Чётко сформулирована роль изначального элементного состава диэлектрика при разработке максимально склонного к СВ материала.

Анализ последних литературных источников совместно с авторскими исследованиями в области СВ МПК позволяет выделить два основополагающих молекулярных явления – образование летучих продуктов из атомов полимера и электропроводность твердого остатка полимера (сажи) – стоящих за качественным самовосстановлением [43]. Химический состав полимера, поддерживающий обильное образование газов, играет первостепенную роль. Газы не только не способны проводить электричество, но и пропорционально уменьшают объем остающейся после пробоя МПК твердой сажи. Малые объёмы сажи также не могут проводить электричество, поскольку вероятность образования из них мостиков между металлическими электродами маргинальна. Если же объём образованной сажи в случае некоторых химических составов МПК всё-таки оказывается достаточно значим, то качество СВ будет зависеть от электропроводности полученных образцов сажи. Плохо проводящие образцы в данном контексте превосходят образцы с более высокими значениями электропроводности. Таким образом, мы сформулировали конкретную процедуру для разработки поддерживающих СВ диэлектриков. Разработанная процедура полностью осуществима на практике с помощью авторского метода молекулярного моделирования [43].

Область самовосстанавливающихся конденсаторов планомерно развивается. Текущие исследования направлены на улучшение их производительности, расширение их областей

применения и рассмотрение возможности новых механизмов СВ. Исследователи изучают новые диэлектрические и электродные материалы, демонстрирующие улучшенные свойства СВ, такие как полимеры с более высокой скоростью восстановления, металлы с улучшенными характеристиками миграции и керамику с более высокой прочностью на пробой. Усилия сосредоточены на повышении эффективности механизмов СВ, снижении энергии, необходимой для изоляции неисправностей, и минимизации воздействия на ёмкость.

Интеграция датчиков и систем управления в конденсаторы может обеспечить интеллектуальное СВ, при котором конденсатор может обнаруживать и реагировать на события пробоя автономно, что ещё больше повышает их надёжность и срок службы. Самовосстанавливающиеся МПК представляют собой значительный шаг вперед в технологии конденсаторов. Они выделяются повышенной надёжностью, долговечностью и производительностью по сравнению с фольговыми конденсаторами. Способность к СВ после электрического пробоя значительно расширяет их применение в силовой электронике, автомобильной электронике, системах возобновляемой энергии. Текущие R&D инициативы направлены на разработку новых материалов, повышение эффективности СВ и интеграцию интеллектуальных функций.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Tahalyani, J.; Akhtar, M. J.; Cherusseri, J.; Kar, K. K., Characteristics of capacitor: fundamental aspects. In *Springer Series in Materials Science*, Springer: 2020; Vol. 300, pp 1-51.
2. Lin, Z.; Bao, Z.; Li, Z.; Wang, B.; Hou, Y.; Li, X. Progress on Material Design and Performance Regulation of PVDF-Based Energy Storage Dielectrics. *J Funct Polym*, **2024**, 37 (3), 262-276, 10.14133/j.cnki.1008-9357.20231205001.
3. Li, H.; Li, H.; Li, Z.; Lin, F.; Wang, W.; Wang, B.; Huang, X.; Guo, X. Temperature dependence of self-healing characteristics of metallized polypropylene film. *Microelectronics Reliability*, **2015**, 55 (12), 2721-2726, 10.1016/j.microrel.2015.09.007.
4. He, Y.; Wang, F.; Du, G.; Pan, L.; Wang, K.; Kong, D.; Zhang, X. From Independent to Related: Voltage Ramp Rate Effects on Self-Healing Scaling in Metallized Polypropylene Film Capacitors.

- IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, **2023**, 30 (5), 2189-2198, 10.1109/TDEI.2023.3281291.
5. Yang, X. H.; Ennis, J.; MacDougall, F.; Schneider, M.; Jow, R.; Ho, J.; Scozzie, S.; Yen, S. P. In *Development of self-healing high temperature film capacitors for power electronics applications*, SAE Technical Papers, SAE International: 2010.
6. Ennis, J. B.; MacDougall, F. W.; Cooper, R. A.; Bates, J. In *Repetitive pulse application of self-healing high voltage capacitors*, IEEE Conference Record of Power Modulator Symposium, 2002; pp 634-638.
7. Venkat, N.; Dang, T. D.; Bai, Z.; McNier, V. K.; DeCerbo, J. N.; Tsao, B. H.; Stricker, J. T. High temperature polymer film dielectrics for aerospace power conditioning capacitor applications. *Materials Science and Engineering: B*, **2010**, 168 (1), 16-21, 10.1016/j.mseb.2009.12.038.
8. Wu, K.; Xu, Z.; Zhang, C.; Lü, Z. Research Status of Self-healing Performance of Devices Based on Dielectric Films. *Gaodianya Jishu*, **2024**, 50 (6), 2283-2296, 10.13336/j.1003-6520.hve.20231622.
9. Zhang, L.; Xiao, M.; Du, B.; Xing, Z. In *Partial Discharge Characteristics of Metallized Film for Metallized Film Capacitors*, 2023 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices, ASEMD 2023, 2023.
10. Du, G.; Zhang, J. Capacitance Evaluation of Metallized Polypropylene Film Capacitors Considering Cumulative Self-Healing Damage. *Electronics (Switzerland)*, **2024**, 13 (14), 2886, 10.3390/electronics13142886.
11. Chaban, V. V.; Andreeva, N. A. Higher hydrogen fractions in dielectric polymers boost self-healing in electrical capacitors. *Phys Chem Chem Phys*, **2024**, 26 (4), 3184-3196, 10.1039/D3CP05355E.
12. Wu, Z.; Liu, J.; Qi, H.; Liu, S.; Zhong, S. L.; Wang, J.; Dang, Z. M.; Wang, W. Dynamic Process of Self-Healing in Metallized Film: From Experiment to Theoretical Model. *IEEE Trans Plasma Sci*, **2024**, 52 (3), 780-789, 10.1109/TPS.2024.3366246.
13. Ivanov, I. O.; Glivenko, D. Y.; Hojamov, A. A.; Pechnikov, A. V. Parametric and Catastrophic Failures of Metallized Film Capacitors Under High Voltage Stress. *IEEE Trans Ind Appl*, **2024**, 60 (1), 1902-1908, 10.1109/TIA.2023.3327994.
14. Gupta, A.; DeVoto, D.; Yadav, O. P.; Major, J. In *A review of degradation behavior and modeling of capacitors*, ASME 2018 International Technical Conference and Exhibition on Packaging and Integration of Electronic and Photonic Microsystems, InterPACK 2018, 2018.
15. 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*, **2023**, 70 (2), 1993-2002, 10.1109/TIE.2022.3161823.
16. Xiao, M.; Zhang, L.; Zhang, Z.; Cheng, Y.; Lu, Z.; Du, B. In *Research on Partial Discharge and Self-Healing Characteristics for Metallized Film of Capacitors*, Proceedings of the 2024 IEEE 5th International Conference on Dielectrics, ICD 2024, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.: 2024.

17. Xiao, M.; Zhang, L.; Du, X.; Dong, X.; Du, B. In *Study on Partial Discharge Characteristics of Dielectric Films for Metallized Film Capacitors*, Proceedings of the 2024 IEEE 5th International Conference on Dielectrics, ICD 2024, 2024.
18. Cao, S.; Tong, H.; Wang, S.; Liu, J. Novel Polyetherimide Dielectrics: Molecular Design, Energy Storage Property, and Self-Healing Performance. *Macromol Rapid Commun*, **2023**, 44 (22), 2300372, 10.1002/marc.202300372.
19. Ho, J. S.; Greenbaum, S. G. Polymer Capacitor Dielectrics for High Temperature Applications. *ACS Appl Mater Interfaces*, **2018**, 10 (35), 29189-29218, 10.1021/acsami.8b07705.
20. Walgenwitz, B.; Tortai, J. H.; Bonifaci, N.; Denat, A. In *Self-healing of metallized polymer films of different nature*, Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Solid Dielectrics ICSD 2004, 2004; pp 29-32.
21. Ren, W.; Yang, M.; Guo, M.; Zhou, L.; Pan, J.; Xiao, Y.; Xu, E.; Nan, C. W.; Shen, Y. Metallized stacked polymer film capacitors for high-temperature capacitive energy storage. *Energy Storage Materials*, **2024**, 65, 103095, 10.1016/j.ensm.2023.103095.
22. Yao, B.; Wei, X.; Zhang, Y.; Correia, P.; Wu, R.; Song, S.; Trintis, I.; Wang, H.; Wang, H. Accelerated Degradation Testing and Failure Mechanism Analysis of Metallized Film Capacitors for AC Filtering. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **2024**, 39 (5), 6256-6270, 10.1109/TPEL.2024.3360373.
23. Li, H.; Qiu, T.; Li, Z.; Lin, F.; Wang, Y. ESR Modeling for Atmospheric Corrosion Behavior of Metallized Film Capacitors. *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, **2023**, 23 (4), 486-493, 10.1109/TDMR.2023.3309914.
24. 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*, **2022**, 137, 114755, 10.1016/j.microrel.2022.114755.
25. Qiu, T.; Li, H.; Li, Z.; Lin, F.; Zhang, Q.; Li, L.; Wang, Y. In *Capacitance loss characteristics of metallized film capacitors under atmospheric corrosion*, 2022 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Applications, ICHVE 2022, 2022.
26. Yan, X.; Zheng, L.; Sun, Q.; Xiong, Q.; Zhu, L.; Ji, S.; Xu, J.; Xu, Y. In *Research on Discharge Characteristic of Metallized Film Capacitors Based on Electrical and Acoustic Signals*, 2024 IEEE 10th International Power Electronics and Motion Control Conference, IPEMC 2024 ECCE Asia, 2024; pp 3974-3979.
27. Li, Z.; Li, H.; Lin, F.; Chen, Y.; Liu, D.; Wang, B.; Li, H.; Zhang, Q. Lifetime investigation and prediction of metallized polypropylene film capacitors. *Microelectronics Reliability*, **2013**, 53 (12), 1962-1967, 10.1016/j.microrel.2013.06.005.
28. Chen, Y.; Lin, F.; Li, H.; Lv, F.; Zhang, M.; Li, Z. In *Study on self-healing and lifetime characteristics of metallized film capacitor under high electric field*, 2011 IEEE Pulsed Power Conference, 19-23 June 2011; 2011; pp 711-716.
29. Pan, L.; Wang, F.; He, Y.; Sun, X.; Du, G.; Zhou, Q.; Zhang, J.; Zhang, Z.; Li, J. Reassessing Self-Healing in Metallized Film Capacitors: A Focus on Safety and Damage Analysis. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, **2024**, 31 (4), 1666-1675, 10.1109/TDEI.2024.3357441.

30. Zhou, S.; Chen, D.; Du, B.; Wang, P.; Wang, X.; Zhu, W.; Liu, S.; Xiao, P.; Chen, J. Study of the in situ test setup and analysis methods for self-healing properties of metallized film capacitors. *Review of Scientific Instruments*, **2024**, 95 (4), 045105, 10.1063/5.0194057.
31. Wu, Z.; Liu, S.; Tong, T.; Zhong, S.; Wang, J.; Qi, H.; Dang, Z.; Wang, W. Theoretical and experimental studies on the self-healing properties of metallised capacitor films under multiple stresses. *High Volt*, **2024**, 10.1049/hve2.12459.
32. Yao, C.; Jia, L.; Li, Z.; Cheng, L.; Liu, W. In *Lifetime Estimation of Metalized Film Capacitor Based on Self-healing Properties*, Springer Proceedings in Physics, 2024; pp 531-540.
33. Pourpasha, H.; Zeinali Heris, S.; Javadpour, R.; Mohammadpourfard, M.; Li, Y. Experimental investigation of zinc ferrite/insulation oil nanofluid natural convection heat transfer, AC dielectric breakdown voltage, and thermophysical properties. *Sci Rep*, **2024**, 14 (1), 20721, 10.1038/s41598-024-71452-w.
34. Ritamäki, M.; Rytöluoto, I.; Lahti, K.; Vestberg, T.; Pasanen, S.; Flyktman, T. Large-area approach to evaluate DC electro-thermal ageing behavior of BOPP thin films for capacitor insulation systems. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, **2017**, 24 (2), 826-836 7909190, 10.1109/TDEI.2017.006405.
35. Yi, C.; Zhang, B.; Li, C.; Li, Q.; Hu, J.; He, J. Calculation of Current Distribution Inside the Metallized Film Capacitor Element at High Frequency. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, **2024**, 1-1, 10.1109/TDEI.2024.3403539.
36. Wang, K.; Kong, D.; Yang, X.; Fu, Y.; Wang, S.; Tan, Y. In *Study on Electrode Damage Behavior of Metallized Film Capacitors Based on Finite Element Method*, Proceedings of 2024 IEEE 7th International Electrical and Energy Conference, CIEEC 2024, 2024; pp 4344-4347.
37. Christen, T.; Laihonen, S.; Hillborg, H. Self-Healing in Metallized Film Capacitors: Theory of Breakdown Interruption. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, **2024**, 31 (4), 1676-1684, 10.1109/TDEI.2024.3356423.
38. Tortai, J. H.; Bonifaci, N.; Denat, A.; Trassy, C. Diagnostic of the self-healing of metallized polypropylene film by modeling of the broadening emission lines of aluminum emitted by plasma discharge. *J Appl Phys*, **2005**, 97 (5), 053304, 10.1063/1.1858872.
39. Chaban, V. V.; Andreeva, N. A. Dialkyl carbonates enforce energy storage as new dielectric liquids. *J Mol Liq*, **2022**, 367, 120454, 10.1016/j.molliq.2022.120454.
40. Chaban, V. V.; Andreeva, N. A. Magnesium-based electrolytes with ionic liquids chloride additives: Quantum chemical stationary point analysis. *J Mol Liq*, **2024**, 402, 124804, <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2024.124804>.
41. Chaban, V. V.; Andreeva, N. A. Mixtures of Diethyl Sulfoxide and Methanol: Structure and Thermodynamics. *J Solut Chem*, **2022**, 51 (7), 788-801, 10.1007/s10953-022-01167-x.
42. Chaban, V. V.; Andreeva, N. A. Mutual miscibility of diethyl sulfoxide and acetonitrile: Fundamental origin. *J Mol Liq*, **2022**, 349, 118110, 10.1016/j.molliq.2021.118110.
43. Andreeva, N. A.; Chaban, V. V. Self-healing in dielectric capacitors: a universal method to computationally rate newly introduced energy storage designs. *Phys Chem Chem Phys*, **2024**, 26 (47), 29393-29405, 10.1039/D4CP03988B.
44. Perdew, J. P.; Burke, K.; Ernzerhof, M. Generalized gradient approximation made simple. *Phys Rev Lett*, **1996**, 77 (18), 3865-3868, DOI 10.1103/PhysRevLett.77.3865.

45. Liu, R. L.; Wang, J.; Shen, Z. H.; Shen, Y. AI for dielectric capacitors. *Energy Storage Materials*, **2024**, 71, 103612, 10.1016/j.ensm.2024.103612.
46. Yue, D.; Feng, Y.; Liu, X. X.; Yin, J. H.; Zhang, W. C.; Guo, H.; Su, B.; Lei, Q. Q. Prediction of Energy Storage Performance in Polymer Composites Using High-Throughput Stochastic Breakdown Simulation and Machine Learning. *Advanced Science*, **2022**, 9 (17), 2105773, 10.1002/advs.202105773.
47. Zhang, C.; Zhang, C.; Ren, C.; Huang, B.; Xing, Z.; Shao, T. Research Progress on Influence Mechanisms and Optimization Strategies for Energy Storage in Polypropylene-Based Films. *Diangong Jishu Xuebao*, **2024**, 39 (7), 2193-2213, 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.230391.
48. Su, J.; Yang, W.; Ma, Y.; Wang, X.; Mao, X. In *Study on High Energy Storage Dielectric Capacitor*, 2023 9th International Conference on Electrical Engineering, Control and Robotics, EECR 2023, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.: 2023; pp 91-94.
49. Li, H.; Qiu, T.; Li, Z.; Lin, F.; Wang, Y. Capacitance Loss Evolution of Zn–Al Metallized Film Capacitors Under Atmospheric Corrosion. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, **2022**, 29 (6), 2363-2369, 10.1109/TDEI.2022.3204510.
50. Yi, B.; Li, H.; Jiang, H.; Li, L.; Chen, Q.; Li, Z.; Lin, F.; Zhang, C. In *Breakdown Behavior of Metallized BOPP Film under the DC Superimposed Harmonic Condition*, Annual Report - Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, CEIDP, 2019; pp 797-800.
51. Li, Z.; Zhou, Y.; Wang, X.; Liu, H.; Cheng, L.; Liu, W.; Li, S.; Guo, J.; Xu, Y. Failure mechanism of metallized film capacitors under DC field superimposed AC harmonic: From equipment to material. *High Voltage*, **2024**, 10.1049/hve2.12453.
52. He, Q.; Sun, K.; Shi, Z.; Liu, Y.; Fan, R. Polymer dielectrics for capacitive energy storage: From theories, materials to industrial capacitors. *Mater Today*, **2023**, 68, 298-333, 10.1016/j.mattod.2023.07.023.
53. Wehe, H. G.; McMahan, W. In *Developments in metallized polycarbonate lacquer film capacitors*, 5th EI Electrical Insulation Conference Materials and Application, EIC 1963, 2016; pp 7-9.
54. Zhu, J.; Tong, H.; Cao, S.; Luo, J.; Liu, X.; Xu, J.; Oleksandr, M.; Peng, W. Self-healing behaviors of metallized high-temperature dielectric films for capacitor applications. *Microelectronics Reliability*, **2023**, 144, 114972, 10.1016/j.microrel.2023.114972.
55. Chen, J.; Pei, Z.; Liu, Y.; Shi, K.; Zhu, Y.; Zhang, Z.; Jiang, P.; Huang, X. Aromatic-Free Polymers Based All-Organic Dielectrics with Breakdown Self-Healing for High-Temperature Capacitive Energy Storage. *Adv Mater*, **2023**, 35 (48), 2306562, 10.1002/adma.202306562.
56. Pechnikov, A. V.; Hojamov, A. A.; Ermilov, V. In *Efficiency Evaluation of the Self-Healing Process of Metallized Film Capacitors for Polymer Films with Various Chemical Composition*, 2024 Conference of Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElCon), 29-31 Jan. 2024; 2024; pp 620-624.
57. Ye, H.; Gao, W.; Xu, L. High-temperature energy storage capability of polyetherimide composite incorporated with perovskite quantum dots. *Colloids Surf A Physicochem Eng Asp*, **2024**, 687, 133479, 10.1016/j.colsurfa.2024.133479.
58. Pechnikov, A. V.; Hojamov, A. A. In *Experimental Study of Self-Healing Characteristics and Insulation Resistance of Metallized Polypropylene Film under Various Inter-Layer Pressure*, 2023

Seminar on Microelectronics, Dielectrics and Plasmas (MDP), 20-20 Nov. 2023; 2023; pp 103-108.

59. Zhang, G.; Li, H.; Lan, J.; Jiang, Y.; Lin, F.; Zhang, Q. In *Study on the Effect of Pressure on Breakdown and Electrode Loss Behavior of Metallized Polypropylene Films*, Proceedings of the 2024 IEEE 5th International Conference on Dielectrics, ICD 2024, 2024.

60. Yan, F.; Huang, X. In *Study on Factors Influencing Self-healing Energy of Metallized Film Capacitors*, Lecture Notes in Electrical Engineering, Dong, X.; Cai, L. C., Eds. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH: 2024; pp 111-123.

61. Zheng, L.; Zhu, L.; Liu, J.; Di, Z.; Ji, S. In *Self-healing Characteristics of Metallized Film Capacitor under DC and AC Superimposed Voltage with Harmonics*, Annual Report - Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, CEIDP, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.: 2022; pp 175-178.

62. Hojamov, A. A.; Ivanov, I. O.; Pechnikov, A. V. In *Temperature Influence on Self-Healing Characteristics of Metallized Film Capacitors*, Proceedings of the 2024 Conference of Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElCon 2024, Shaposhnikov, S.; Saint Petersburg Electrotechnical University \blacklozenge Leti \blacklozenge , P. P. S. S. P., Eds. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.: 2024; pp 599-602.

63. Fan, X.; Cheng, J.; Qiu, M.; Zhang, Y.; Chen, S.; Zhang, Z.; Peng, Y.; Zhang, J.; Zhang, L. Biomimetic Cu₄ Cluster Encapsulated within Hollow Titanium-Oxo Nanoring for Electrochemical CO₂ Reduction to Ethylene. *ACS Mat Let*, **2023**, 5 (6), 1527-1531, 10.1021/acsmaterialslett.3c00101.