

05

Экспериментальное изучение токового разрушения металлизированных полимерных пленок

© П.Н. Бондаренко, О.А. Емельянов

С.-Петербургский государственный политехнический университет

E-mail: oae2@mail.wplus.net

Поступило в Редакцию 11 марта 2005 г.

Экспериментально изучалось токовое разрушение тонких металлических пленок толщиной $\sim 20\text{--}30$ nm, напыленных на полимерные подложки из полиэтилентерефталата и полипропилена. Установлены два механизма разрушения, имеющие различные пороги по средней плотности тока $j_H \sim 1.5 \cdot 10^{10}$ A/m² и $j_L \sim 0.7 \cdot 10^{10}$ A/m² соответственно. Обсуждается возможная природа механизмов разрушения.

При оценке предельных возможностей современных емкостных накопителей энергии (ЕНЭ) необходимо учитывать физические ограничения на скорости процесса разряда высоковольтных конденсаторов, входящих в состав указанных устройств. Скорость энергии в нагрузку $\partial W_{eff}/\partial t$ определяется, с одной стороны, процессами поляризации и величиной напряженности электрического поля рабочего диэлектрика. Общие соотношения в рамках электродинамики сплошной среды для этого случая были получены в [1,2]. С другой стороны, максимальное значение разрядного тока $I_{max} \sim \partial W_{eff}/\partial t$ ограничено токовой устойчивостью обкладок применяемых конденсаторов. Считается, что деградация конденсаторов связана с джоулевым механизмом электротеплового разрушения обкладок, которое развивается в местах значительной неоднородности электрического поля на краях обкладок и в зонах контактных узлов конденсаторной конструкции. Для сравнительно толстых электродных систем с характерной толщиной обкладок в единицы-десятки микрон эта закономерность хорошо известна и учитывается при разработке импульсных конденсаторов [3]. Вместе с тем во многих типах современных металлопленочных конденсаторов (МПК) используются конструкции напыленных металлизированных об-

кладок (цинк, алюминий) с характерной толщиной слоя металлизации, составляющей несколько десятков нанометров, что позволяет добиться эффекта самовосстановления работоспособности конденсатора при локальных пробоях рабочего диэлектрика. Однако рабочие плотности тока обкладок МПК в этом случае резко возрастают до значений порядка $10^7 - 10^9$ А/м². Теоретически становится возможным влияние на процесс разрушения механизмов, связанных с электродинамическими и термоупругими явлениями в тонких металлизированных электродах. Некоторое упоминание по этому поводу содержится в [4,5]. Вполне возможен также механизм разрушения металлизации, аналогичный механизму, связанному с процессами электромиграции вакансий в тонких металлических пленках, используемых в интегральных схемах [6]. Воздействие высоких плотностей тока может привести к изменению структуры микрорельефа металлической пленки, связанному с формированием и ориентацией нанодфектов. Указанные нетривиальные эффекты были получены и изучены в [7,8]. На процесс разрушения металлической пленки, по-видимому, значительное влияние оказывает состояние межфазной границы полимер-металл. Адгезионные свойства металла к полимерной подложке будут определять в конечном счете термическую и механическую стабильность межфазной границы раздела и механическую прочность пленки при разрушении [9]. Следует также отметить, что при разрушении металлической пленки на полимерной подложке значительную роль могут играть пространственные эффекты, связанные с термодинамикой процесса нарушения сплошности, имеющие весьма специфический характер [10]. Вместе с тем применительно к тонким слоям металлизации полимерных пленок, используемых в конденсаторах, в литературе имеется весьма ограниченное количество информации. Отсутствие детальных данных о механизмах токового разрушения тонких металлизированных слоев полимерных пленок вызвало необходимость в проведении соответствующих экспериментальных и теоретических исследований.

В предлагаемой статье обсуждаются экспериментальные данные токового разрушения тонких металлических пленок алюминия и цинка $\sim 20 - 30$ нм, напыленных методом термического испарения в вакууме соответственно на пленки полиэтилентерефталата (ПЭТФ) и полипропилена (ПП) толщиной $10 \mu\text{m}$. Исследованные образцы представляли собой криволинейные полосы (рис. 1), вырезанные из исходных металлизированных пленок. На горизонтально лежащем образце в зонах 1, 2

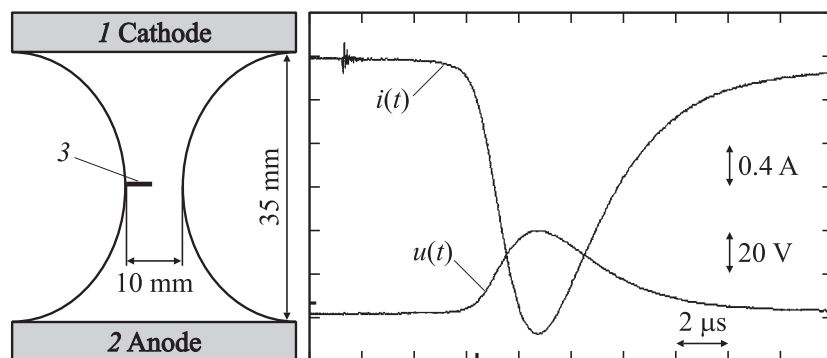


Рис. 1. Форма образцов и типичная осциллограмма напряжения и тока.

размещались прямоугольные полированные стальные электроды, к которым прикладывалось импульсное напряжение от формирователя импульсов. В центральной части образца формировался дефект 3 в виде поперечной полосы демееталлизации шириной $\sim 100 \mu\text{m}$. Это позволяло дополнительно повысить концентрацию тока у края полосы и проследить динамику роста зоны демееталлизации в зависимости от параметров воздействующего напряжения (тока). Типичная осциллограмма импульсов напряжения и тока представлена на рис. 1. При амплитуде испытательного напряжения $U_m \geq 30 \text{ V}$ поперек линий тока от сформированного дефекта наблюдался рост трещины. Оценка средней плотности тока в образце с алюминиевой металлизацией составила $j_H \sim 1.5 \cdot 10^{10} \text{ A/m}^2$. При этом каждый импульс разряда (например, при $U_m \approx 32 \text{ V}$) соответствовал поперечному прорастанию трещины демееталлизации на характерное расстояние $\sim 100 \mu\text{m}$. Поперечный рост трещины заканчивался полным перерезанием шейки образца (левая часть рис. 2). Указанный механизм разрушения, вероятно, обусловлен значительным джоулевым тепловыделением на кончике трещины. Не исключено также влияние электродинамических и термоупругих эффектов, влияющих на процесс разрушения металлической пленки.

При снижении амплитуды импульса напряжения ожидалось достичь порога U_H , при котором рост трещины должен был прекратиться. Однако при $U_m \approx 25 \text{ V}$ проявился неожиданный экспериментальный результат. Трещина не прекратила рост, но уменьшилась в поперечном

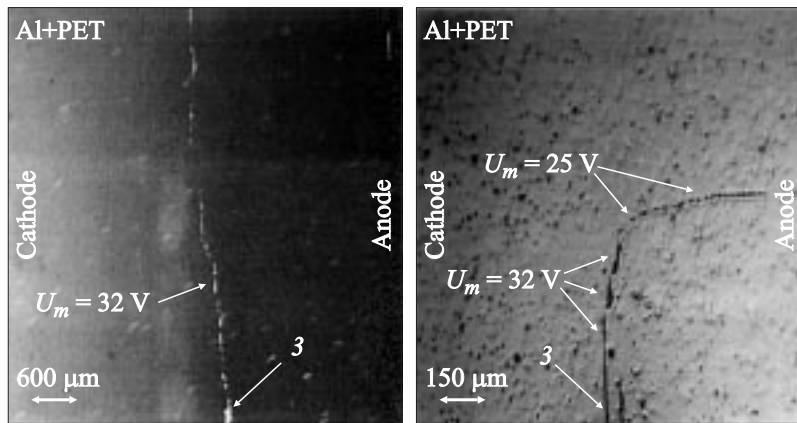


Рис. 2. Рост поперечной (слева) и возникновение продольной (справа) трещин в алюминиевой металлизации полиэтилентерефталатной пленки.

размере и развернулась продольно по направлению к положительному электроду. На рис. 2 (правая часть) отчетливо виден поперечный рост (3 импульса при $U_m \approx 32$ V) и указанный разворот трещины (20 импульсов при $U_m \approx 25$ V). При снижении амплитуды импульса напряжения до $U_L \approx 15$ V рост трещины прекращался, при этом средняя плотность тока в образце составляла $j_L \sim 0.7 \cdot 10^{10}$ A/m². Аналогичные экспериментальные результаты были получены для цинковой металлизации полипропиленовых пленок (левая часть рис. 3). Полярный механизм роста трещины по направлению к аноду имеет устойчивый характер, что иллюстрируется рис. 3 (правая часть), на котором представлена осциллирующая динамика роста трещины при периодической смене полярности электродов. Возможно, обсуждаемый механизм обусловлен процессами взаимодействия потока электронов проводимости с дефектами (вакансиями) кристаллической решетки алюминия. Именно этот механизм ответствен за процессы электромиграции в тонких металлических пленках, он же играет важную роль в объяснении эффекта электропластической деформации [6,11]. В любом случае анализ механизмов разрушения следует проводить с учетом влияния межфазной границы полимер–металл.

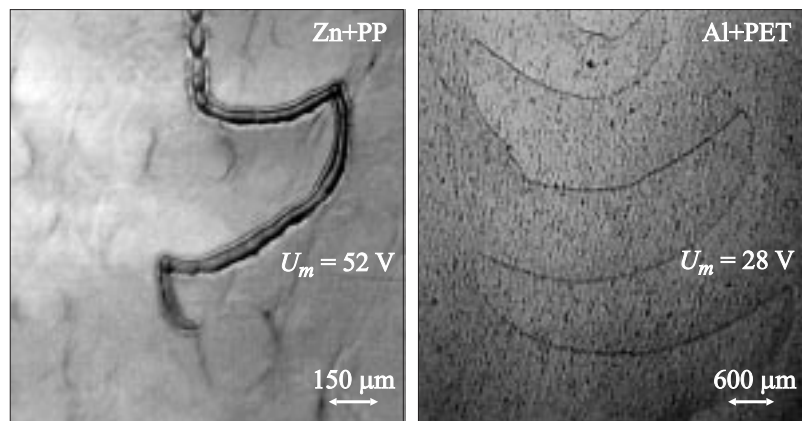


Рис. 3. Осцилляции роста трещин при периодической смене полярности электродов для цинковой (слева) и алюминиевой (справа) металлизаций.

Таким образом, экспериментально установлено, что разрушение тонких металлических пленок в условиях средних плотностей тока $\sim 10^{10} \text{ A/m}^2$ имеет по крайней мере два принципиально различных механизма деградации, соответствующие различным порогам и направлению роста трещины разрушения. Детальный анализ механизмов разрушения является предметом отдельного рассмотрения.

Список литературы

- [1] Емельянов О.А. // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. В. 19. С. 40–46.
- [2] Емельянов О.А. // ЖТФ. 2005. Т. 75. В. 5. С. 131–132.
- [3] Кучинский Г.С., Назаров Н.И. Силовые электрические конденсаторы. М., 1992. 319 с.
- [4] Lin F., Dai X., Yao Z. // IEEE Trans. On Magnetics. 2003. V. 39. N 1. P. 353–356.
- [5] Qi X., Boggs S. // J. Appl. Phys. 2003. V. 94. N 7. P. 4449–4456.
- [6] Lloyd J.R. // J. Phys. D: Appl. Phys. 1999. V. 32. R109–R118.
- [7] Веттегрень В.И., Гиляров В.Л., Рахимов С.Н. // ФТТ. 1997. Т. 40. В. 4. С. 668–671.

- [8] Щербаков И.П., Чураев Д.В., Светлов В.Н. // ЖТФ. 2004. Т. 74. В. 4. С. 139–142.
- [9] Поздняков О.Ф., Поздняков А.О., Регель В.Р. // ФТТ. 2005. Т. 47. В. 5. С. 924–930.
- [10] Веттегрень В.И., Бакулин Е.А., Коваленко Ю.В. // ФТТ. 2002. Т. 44. В. 4. С. 765–766.
- [11] Спицын В.И., Троицкий О.А. Электропластическая деформация металлов. М.: Наука, 1985. 160 с.