

# Аппаратное обеспечение вычислительных, телекоммуникационных и управляющих систем

DOI: 10.5862/JCSTCS.241.4

УДК 621.315.6

*Н.Т. Сударь, Н.Л. Егорычев, В.А. Закревский, В.А. Пахотин*

## **О НАДЕЖНОСТИ КОМПОНЕНТОВ ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ ПРИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПРОБОЕ СТРУКТУР МЕТАЛЛ-ПОЛИМЕР-МЕТАЛЛ**

*N.T. Sudar, N.L. Egorichev, V.A. Zakrevskii, V.A. Pakhotin*

## **ABOUT THE RELIABILITY OF COMPONENTS OF ELECTRONIC DEVICES BY ELECTRICAL BREAKDOWN OF THE STRUCTURES OF METAL-POLYMER-METAL**

---

Изучен электрический пробой структур типа металл-полимер-металл, различающихся природой и толщиной полимерных пленок. Исследованы структуры с пленками полиметилметакрилата, полистирола и поликарбоната. Установлено, что длительность токовых импульсов при пробое полимерной пленки не превышает 500 нс. Природа полимерного диэлектрика не влияет на форму и параметры регистрируемых при пробое импульсов тока. Определяющее значение имеет толщина пленки. В пленках толщиной более 0,5 мкм при пробое возникают кратковременные электрические перенапряжения в несколько раз превосходящие величину напряжения пробоя.

**ПОЛИМЕРЫ; ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРОБОЙ; ПЛЕНКИ; КОНДЕНСАТОРЫ.**

Electrical breakdown structures of metal-polymer-metal differing nature and thickness of the polymer films was studied in this paper. Structures with films of polymethylmethacrylate, polycarbonate and polystyrene have been investigated. It has been found that the duration of current pulses detected in the breakdown of the polymer film does not exceed 500 ns. Nature polymeric dielectric does not affect the shape and parameters recorded in the breakdown of the current pulses. Importance has a film thickness. In the breakdown of the polymer films thicker than 0.5 microns having electrical overvoltage of short duration. Their value is several times greater than the magnitude of the breakdown voltage.

**POLYMERS; ELECTRICAL BREAKDOWN; FILMS; CAPACITORS.**

---

Структуры металл-полимер-металл (МПМ) находят применение в различных устройствах электронной техники, в частности, на их основе создаются пленочные полимерные конденсаторы, область применения которых в настоящее время чрезвычайно широка. Такие конденсаторы используются в устройствах бесперебойного питания, где они выполняют функции защиты питаемого устройства от любых сбоев в линии питания, в импульсных источни-

ках питания, преобразующих входное напряжение в постоянное напряжение нужной величины на выходе. Структуры МПМ являются неотъемлемой составляющей силовых металлопленочных конденсаторов, характеризующихся высокой энергоемкостью и предельно низкой собственной индуктивностью. При разряде такие конденсаторы способны генерировать короткие импульсы тока величиной более  $10^5$  А [1]. Время саморазряда конденсаторов с полимерным

диэлектриком велико и определяется только их конструктивными особенностями. Они длительное время способны сохранять заряженное состояние, поддерживая требуемое напряжение на устройстве.

Стремление к миниатюризации и увеличению энергоемкости приводит к необходимости использовать в качестве диэлектрических слоев тонкие полимерные пленки и эксплуатировать конденсаторы при высокой напряженности электрического поля 250–300 кВ/мм [1]. Поскольку электрическая долговечность (время до пробоя) полимерных диэлектриков экспоненциально снижается с ростом напряженности электрического поля [2], то вероятность пробоя полимерных пленок в сильных электрических полях резко возрастает, поэтому вопросы сохранения работоспособности электронных устройств при электрическом пробое МПМ структур приобретают первоочередное значение.

Электрический пробой развивается в локальной области полимерного диэлектрика, размеры которой в тонких полимерных пленках не превышают  $\sim 10$  мкм [3]. Особенностью пробивного тока является его очень быстрое (за время  $10^{-8}$ – $10^{-6}$  с) [4, 5] увеличение на несколько порядков величины. Причем, по оценкам, плотность тока в канале пробоя может достигнуть значительной  $\sim 10^6$  А/см<sup>2</sup> [3]. При протекании токов столь высокой плотности полимерный диэлектрик в канале пробоя подвергается термодеструкции, а стенки канала могут карбонизироваться, что приводит к короткому замыканию электродов.

Способность самовосстанавливаться после пробоя – одно из наиболее важных свойств пленочных конденсаторов. Реализовать ее удастся, когда в качестве электродов используются тонкие металлические пленки, нанесенные на поверхность полимерного диэлектрика в процессе вакуумного напыления металла. В таких МПМ структурах при пробое полимерной пленки тонкий слой металлизации вокруг канала пробоя испаряется, изолируя при этом место пробоя. В низковольтных конденсаторах для самовосстановления применяется разбивка поверхности металлизации на

небольшие сегменты, соединенные между собой тонкими перемычками. При пробое ток течет всего по нескольким перемычкам, соединяющим поврежденный сегмент с окружающими его целыми сегментами, что приводит к их разрушению и изоляции области пробоя. В результате самовосстановления конденсатор продолжает работать с незначительной потерей емкости [6, 7]. Очевидно, что реализация функции самовосстановления пленочных конденсаторов после пробоя позволяет значительно повысить надежность электронного устройства в целом, поскольку в процессе эксплуатации конденсатор может неоднократно пробиваться и восстанавливать свои функции.

Уменьшение емкости конденсатора после пробоя нельзя, по-видимому, считать единственным фактором, влияющим на работоспособность компонент радиоэлектронной аппаратуры. Выявление таких факторов следует рассматривать как первоочередную задачу. Однако решение ее осложнено тем, что особенности электрического разрушения МПМ структур на стадии электрического пробоя до сих пор изучены недостаточно хорошо.

В настоящей работе исследовалось развитие электрического пробоя в тонкопленочных полимерных диэлектриках. Объектами исследования служили МПМ структуры с пленками полиметилметакрилата (ПММА), поликарбоната (ПК) и полистирола (ПС). Полимерные пленки наносились на подложку из алюминиевой фольги методом центрифугирования из раствора указанных полимеров в дихлорэтане. При варьировании скорости вращения центрифуги и концентрации полимеров в растворе были получены пленки различной толщины: «тонкие» – толщиной 0,2–0,4 мкм и «толстые» – толщиной 0,8–1,5 мкм. Алюминиевая подложка использовалась в качестве одного из электродов (анода). Вторым электродом (катодом) служил вольфрамовый шарик диаметром около 2 мм. Использование шарообразного электрода позволяло точно локализовать место пробоя пленки.

Блок-схема экспериментальной установки, использованной для регистрации

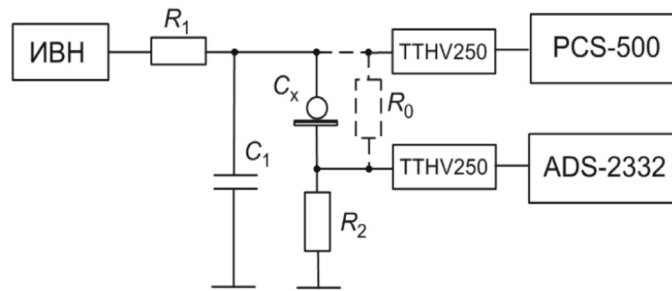


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки

пробоя полимерных пленок, представлена на рис. 1. От источника высокого напряжения (ИВН) медленно возрастающее напряжение подавалось на исследуемую МПМ структуру через ограничивающий резистор с большим сопротивлением  $R_1$ . Емкость  $C_x$  определялась «паразитной» емкостью монтажа и емкостью собственно МПМ структуры. Последовательно с исследуемой МПМ структурой был включен измерительный резистор с сопротивлением  $R_2$ . Параллельно цепочке  $R_2 C_x$  подключался дополнительный конденсатор емкостью  $C_1$ . Введение в измерительную схему этого конденсатора приводило к тому, что напряжение на резисторе  $R_2$ , возникающее при пробое полимерной пленки, определялось током разряда конденсатора  $C_1$ , протекающего через канал пробоя и сопротивление  $R_2$ .

Следует отметить, что сопротивление канала пробоя  $R_0$  (оно изображено на рисунке пунктирной линией) за очень короткий промежуток времени (соответствующий времени развития пробоя) уменьшалась на несколько порядков величины, вследствие чего на резисторе  $R_2$  формировался сложный импульсный сигнал. Он подавался на делитель напряжения ТТНВ250 (с граничной частотой 300 МГц) и затем поступал на вход цифрового осциллографа ADS-2332 (интервал дискретизации 1 нс). Напряжение на образце в момент пробоя измерялось с помощью цифрового регистратора PCS-500 и запоминалось.

В работе [8] показано, что используя характеристики зарегистрированного при пробое сигнала, можно расчетным путем определить величину и длительность тока пробоя.

В ходе электрических испытаний на пробой МПМ структур с различными полимерными диэлектрическими пленками было установлено, что их природа не оказывает заметного влияния ни на форму регистрируемых импульсов, ни на их параметры, однако толщина полимерной пленки имеет определяющее значение.

На рис. 2 представлены осциллограммы регистрируемых при пробое МПМ структур с «тонкими» (а) и «толстыми» (б) пленками ПММА. Они являются типичными для всех исследованных полимерных диэлектрических пленок.

Видно, что при пробое «тонких» пленок на измерительном резисторе  $R_2$  наблюдается резкий скачек напряжения до величины, примерно соответствующей величине пробивного напряжения  $U_{br}$  полимерной пленки, равному  $\sim 250$  В. Затем напряжение начинает уменьшаться по экспоненциальному закону с постоянной времени  $\sim 100$  нс. Длительность регистрируемого импульса составляет  $\sim 400$  нс. На спадающей ветви рассматриваемой осциллограммы наблюдаются затухающие со временем осцилляции, начальная амплитуда которых равна нескольким десяткам вольт.

При пробое «толстых» пленок осциллограммы имеют иной вид. Регистрируемый сигнал представляет собой осциллирующие затухающие колебания, удвоенная амплитуда которых в начальный момент времени равна  $\sim 3500$  В, т. е. в несколько раз превосходит величину  $U_{br} \approx 770$  В. Длительность регистрируемого импульса составляет  $\sim 400$  нс. Основная гармоника колебаний соответствует частоте  $\sim 140$  МГц.

Для сопоставления результатов экспе-

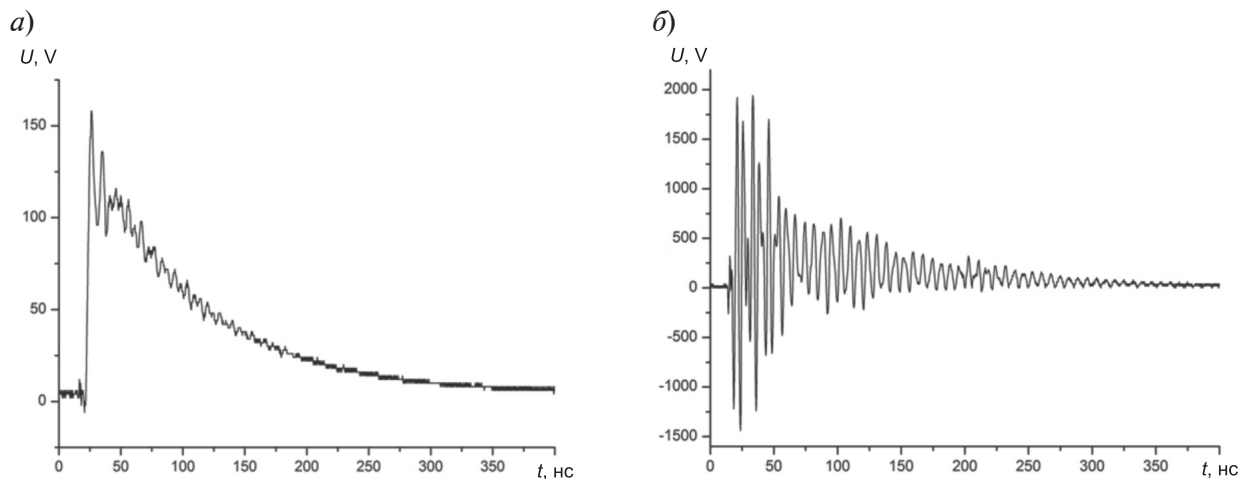


Рис. 2. Осциллограммы, регистрируемые при электрическом пробое «тонких» (а) и «толстых» (б) пленок ПММА

риментов, выполненных на МПМ структурах с полимерными диэлектриками, различающимися толщиной пленок и природой материала, удобно использовать коэффициент электрических перенапряжений  $k$ , определив его следующим образом:

$$k = \frac{U_{\max}}{U_{br}},$$

где  $U_{\max}$  соответствует величине удвоенной амплитуды сигнала, регистрируемого на измерительном сопротивлении  $R_2$  в момент пробоя полимерной пленки. На рис. 3 представлены значения этого коэффициента для полимерных пленок различной толщины.

Представленные на этом рисунке результаты подтверждают вывод о возникно-

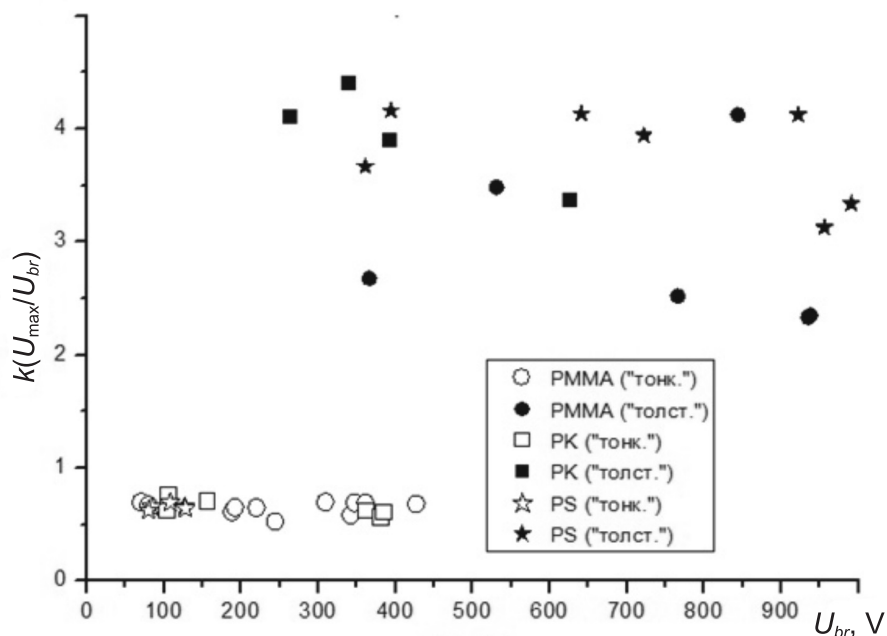


Рис. 3. Значения коэффициента электрических перенапряжений для полимерных пленок различной толщины и природы полимера

вении значительных электрических перенапряжений при пробое полимерных пленок толщиной более 0,5 мкм. В большинстве случаев при пробое таких пленок значение  $k$  составляло 2–5.

Авторами [8] выполнен анализ эквивалентной схемы, соответствующей измерительной схеме, используемой в данной работе. Он показал, что наблюдаемое различие в характере пробоя пленок неодинаковой толщины может быть обусловлено только различием в величинах сопротивления канала пробоя  $R_0$  этих пленок. Выяснение его физической причины является предметом дальнейших исследований.

Таким образом, изложенное выше позволяет сделать весьма важный для практики вывод о том, что каждый электрический пробой пленочных полимерных конденсаторов, толщина полимерных пленок в которых превышает 0,5 мкм, может приводить к возникновению кратковременных (длительностью ~100 нс) электрических перенапряжений на других элементах электронной схемы. Их величина в несколько раз превышает рабочее напряжение данного устройства. Подобные перенапряжения способны инициировать выход из строя других компонент электронной схемы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ермилов И.В. Современные импульсные высоковольтные конденсаторы с пленочным диэлектриком // Электронные компоненты. 2005. № 4. С. 37–44.
2. Закревский В.А., Сударь Н.Т. Влияние объемного заряда на закономерности электрического разрушения полимеров // Журнал технической физики. 1996. Т. 66. Вып. 4. С. 105–113.
3. Веттегрень В.И., Закревский В.А., Смирнов А.Н., Сударь Н.Т. Образование проводящего канала в полимерной диэлектрической пленке под влиянием электрического поля // Физика твердого тела. 2010. Т. 52. № 8. С. 1650–1655
4. Hikita M., Kanno I., Sawa G., Ieda M. Consideration on Filamentary Thermal Breakdown by Measuring Pre-Breakdown Current in Solid

Dielectrics // Jpn. J. Appl. Phys. 1985. Vol. 24. No. 8. Pp. 984–987.

5. Dissado L.A., Fothergill J.C. Electrical Degradation and Breakdown in Polymers. London: Peter Peregrinus, 1992.

6. Шишкин С.А. Обеспечение функции самовосстановления силовых металлопленочных конденсаторов // Силовая электроника. 2005. № 4. С. 8–10.

7. Самойлова М. Пленочные конденсаторы AVX/TPC // Компоненты и технологии. 2007. № 5. С. 30–34.

8. Пахотин В.А., Закревский В.А., Сударь Н.Т. Об измерении тока электрического пробоя диэлектриков // Журнал технической физики. 2015. Т. 85. Вып. 8. С. 40–45.

#### REFERENCES

1. Yermilov I.V. Sovremennyye impulsnyye vysokovoltnyye kondensatory s plenochnym dielektrikom [Modern pulsed high-voltage capacitors with a dielectric film]. *Elektronnyye komponenty* [Electronic Components], 2005, No. 4, Pp. 37–44. (rus)
2. Zakrevskiy V.A., Sudar N.T. Vliyaniye obyemnogo zaryada na zakonomernosti elektricheskogo razrusheniya polimerov [Effect of space charge on the patterns of electrical destruction of polymers]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki* [Technical Physics], 1996, Vol. 66, No. 4, Pp. 105–113. (rus)
3. Vettegren V.I., Zakrevskiy V.A., Smirnov A.N., Sudar N.T. Obrazovaniye provodyashchego kanala v polimernoy dielektricheskoy plenke pod vliyaniem elektricheskogo polya [Electric-field-induced formation of a conducting channel in a dielectric polymer film]. *Fizika tverdogo tela*

[Physics of the Solid State], 2010, Vol. 52, No. 8, Pp. 1650–1655. (rus)

4. Hikita M., Kanno I., Sawa G., Ieda M. Consideration on Filamentary Thermal Breakdown by Measuring Pre-Breakdown Current in Solid Dielectrics. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1985, Vol. 24, No 8, Pp. 984–987.

5. Dissado L.A., Fothergill J.C. *Electrical Degradation and Breakdown in Polymers*. London: Peter Peregrinus, 1992.

6. Shishkin S.A. Obespecheniye funktsii samovosstanovleniya silovyykh metalloplenochnykh kondensatorov [Providing self-healing function of power metal-film capacitors]. *Silovaya elektronika* [Power electronics], 2005, No. 4, Pp. 8–10. (rus)

7. Samoylova M. Plenochnyye kondensatory AVX/TPC [Film capacitors AVX/TPC]. *Komponenty i tekhnologii* [Components & Technologies], 2007,



No. 5, Pp. 30–34. (rus)

8. **Pakhotin V.A., Zakrevskiy V.A., Sudar N.T.** Ob izmerenii toka elektricheskogo proboya dielektrikov

[Measurement of breakdown current in dielectric materials]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki [Technical Physics]*, 2015, Vol. 85, No. 8, Pp. 40–45. (rus)

---

**СУДАРЬ Николай Тобисович** – профессор кафедры интегральной электроники Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, доктор физико-математических наук.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

E-mail: sudar53@mail.ru

**SUDAR Nikolay T.** *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.

E-mail: sudar53@mail.ru

**ЕГОРЫЧЕВ Николай Леонидович** – студент кафедры интегральной электроники Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

E-mail: nscoor@gmail.com

**EGORICHEV Nikolay L.** *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.

E-mail: nscoor@gmail.com

**ЗАКРЕВСКИЙ Владимир Александрович** – главный научный сотрудник Физико-технического института имени А.Ф. Иоффе РАН, доктор физико-математических наук.

194021, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26.

E-mail: V.Zakrevsky@mail.ioffe.ru

**ZAKREVSKII Vladimir A.** *Ioffe Physical Technical Institute of the Russian Academy of Sciences.*

194021, Polytekhnikeskaya Str. 26, St. Petersburg, Russia.

E-mail: V.Zakrevsky@mail.ioffe.ru

**ПАХОТИН Владимир Александрович** – старший научный сотрудник Физико-технического института имени А.Ф. Иоффе РАН, доктор технических наук.

194021, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26.

E-mail: v.pakhotin@mail.ioffe.ru

**PAKHOTIN Vladimir A.** *Ioffe Physical Technical Institute of the Russian Academy of Sciences.*

194021, Polytekhnikeskaya Str. 26, St. Petersburg, Russia.

E-mail: v.pakhotin@mail.ioffe.ru