

04;05

Исследование наносекундного электрического взрыва тонких алюминиевых пленок

© В.О. Белько, О.А. Емельянов

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
E-mail: oae2@mail.wplus.net

Поступило в Редакцию 18 марта 2009 г.

Проведены экспериментальные исследования импульсного электродинамического разрушения тонких (20 nm) алюминиевых пленок, напыленных на полимерные подложки. Характер разрушения пленок зависит от уровня вводимой энергии. При уровнях ввода $3.5 < W < 4.3$ kJ/g наблюдаются нарушения сплошности пленок (страты) поперек приложенного электрического поля. В условиях высоких плотностей тока $\sim (1-3) \cdot 10^{12}$ A/m² и времени взрыва 50–300 ns значение интеграла действия до взрыва $(0.79-1.08) \cdot 10^{17}$ A · s/m² зависит от темпа ввода энергии и отличается от известных литературных данных для относительно массивных проводников.

PACS: 41.20.Gz, 46.50.+a, 52.80.Qj

Существенное повышение эффективности современных импульсных конденсаторов возможно благодаря использованию специального типа алюминиевых металлизированных обкладок, обеспечивающих так называемый процесс самовосстановления СВ (SH — self healing) электрической прочности конденсатора. В случае возникновения пробоя в местах с пониженной электрической прочностью высокая плотность тока пробоя вызывает нагрев и последующее разрушение локальной зоны обкладки вокруг места пробоя, тем самым изолируя канал пробоя от остальной части электрода. Следует отметить, что существующие теоретические и экспериментальные исследования не позволяют выделить общепринятую модель развития СВ [1–3], что связано со сложностью разрушения тонкой металлической пленки в условиях интенсивного джоулева нагрева и дальнейшего развития микродугового процесса в ходе демультипликации. Разрушению тонких металлических пленок нанометровых размеров в условиях высоких

плотностей тока посвящено весьма ограниченное количество работ. В [4–7] рассматриваются процессы разрушения в диапазоне времен десятки–сотни микросекунд, отмечено частичное пространственное разрушение металлизации в виде трещин и блуждающих следов — „поляризованных структур“. Последнее, по-видимому, связано с миграцией катодных пятен, оставляющих за собой разрушенные каналы. Следует отметить, что картина разрушения сохраняет свой характер независимо от материала подложек (стекло, полимеры). Особенностью развития процесса СВ является начальная стадия пробоя диэлектрика, которая развивается за времена единиц–десятков пс, при этом плотность тока в зоне пробоя может достигать 10^{12} А/м² и более. Электрический взрыв проводников (ЭВП) с характерным пространственным размером по толщине 5–50 мкм достаточно хорошо изучен [8–10], однако в случае разрушения нанометровых пленок мы имеем дело с материалом, отличающимся по свойствам от упомянутых „массивных образцов“. Толщина пленки сопоставима с длиной свободного пробега электронов в металлах (100–300 Å), а удельная электропроводность пленок в несколько раз ниже обычных, общепринятых значений. Следует также ожидать снижения коэффициента теплопроводности и изменения ряда других физических характеристик. Поэтому использовать закономерности ЭВП (зависимость времени взрыва от введенной энергии, величина интеграла действия и т.д.), полученные для относительно толстых образцов, представляется не вполне корректным. Целью предлагаемой работы являлось экспериментальное изучение электрического взрыва нанометровых алюминиевых пленок, развивающегося в наносекундном диапазоне времен, соответствующих масштабу времени пробоя твердого диэлектрика.

Экспериментальные образцы были изготовлены из металлизированной полимерной пленки. Материал подложки — полипропилен 10 мкм, на поверхность которого вакуум-термическим способом нанесен слой алюминия толщиной 20 нм. Размеры рабочей области образцов составляли (5–10) × 20 мм, электрическое сопротивление \approx 6–10 Ω. Для создания условий взрыва металла использовался разряд конденсатора через искровой разрядник. Были предприняты специальные меры для снижения индуктивности цепей разряда. Емкость малоиндуктивного конденсатора, используемого в качестве накопителя энергии, $C_0 = 0.023$ мкФ. Зарядное напряжение $U_0 < 10$ кВ, максимальная амплитуда тока $I < 1$ кА. В результате опыта короткого замыкания

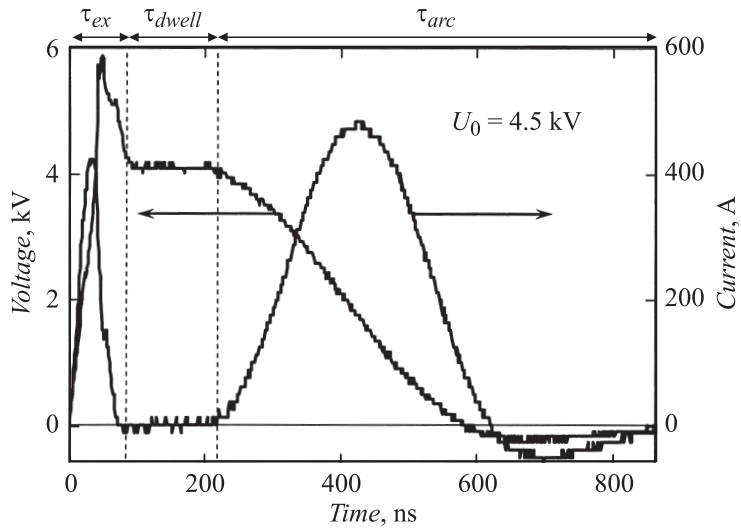


Рис. 1. Типичные осциллограммы тока и напряжения на образце (3 стадии: τ_{ex} — взрыв проводника, τ_{dwell} — пауза тока, τ_{arc} — дуговой разряд).

были определены характеристики разрядного контура: $L_c = 200$ нН, $R_c = 15 \Omega$. Ввиду малой длительности процесса взрыва исследуемых образцов (десятки ns), регистрация тока и напряжения в образце производилась с помощью двухканального цифрового осциллографа производства LeCroy, с частотой выборки 2 GS/s. Емкостной делитель напряжений, а также токовый шунт собственного изготовления имели время отклика не выше 2 ns, что позволило измерять напряжение и ток в цепи с достаточной точностью. При оценке вводимой энергии учитывался индуктивный выброс напряжения на образце [8].

Типичные экспериментальные осциллограммы тока и напряжения на образце (3 стадии: взрыв, пауза тока и последующее развитие дугового разряда) представлены на рис. 1. Расчет введенной энергии, а также интеграла действия тока проводился для первой стадии процесса, а именно для электрического взрыва металла. На рис. 2, а представлены осциллограммы напряжения на образце и тока, приведенного к напряжению через коэффициент R_0 — начальное сопротивление образца. Как τ_{melt} отмечен момент расхождения этих зависимостей,

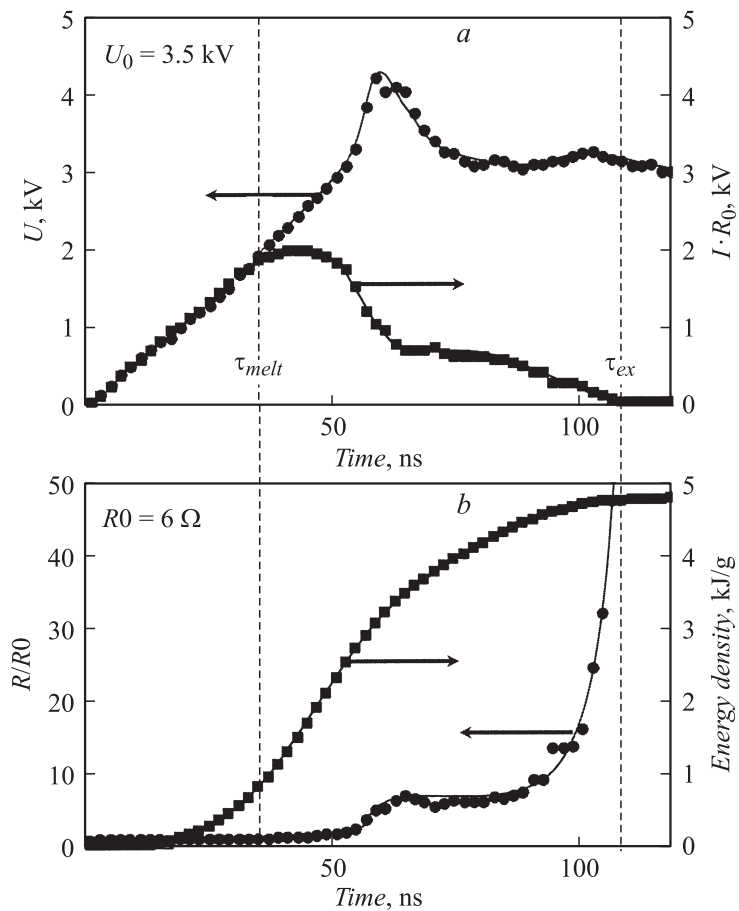


Рис. 2. *a* — осциллограммы экспериментальных напряжений на образце и тока, приведенного к напряжению через коэффициент R_0 ; *b* — временные зависимости нормированного сопротивления образца и удельной энергии, выделившейся в процессе взрыва.

что свидетельствует о неомичности и начале плавления образца под действием электрического тока. На рис. 2, *b* показаны временные зависимости удельной энергии, выделившейся в процессе взрыва, а

также нормированного на $R0$ сопротивления образца. Скачок и „полку“ зависимости $R(t)/R0$ на 60–90 ns можно связать с фазовым переходом металла из жидкого в парообразное состояние. В ходе экспериментов уровень вводимой энергии достигал величины 6.7 kJ/g, что соответствует максимальному значению скоростей тока $dI/dt \sim 7.5$ A/ns и температуры $dT/dt \sim 5 \cdot 10^{10}$ K/s.

На основе полученных данных вычислялись значения интегралов действия до плавления h_{melt} и до взрыва h_{ex} . Установлено, что по мере возрастания плотности тока $(1.13-3.12) \cdot 10^{12}$ A/m² величины интегралов монотонно увеличиваются: $h_{melt} = (0.18-0.32) \cdot 10^{17}$ A · s/m² и $h_{ex} = (0.79-1.08) \cdot 10^{17}$ A · s/m². Полученные результаты отличаются от литературных данных $h_{melt} = (0.38-0.46) \cdot 10^{17}$ A · s/m² и $h_{ex} = (1.29-1.40) \cdot 10^{17}$ A · s/m² [8–11]. Одна из причин отличия может быть связана с повышенным значением удельного сопротивления пленок $\rho/\rho_0 = 2.24$, где $\rho_0 = 0.027 \cdot 10^{-6}$ Ω · m — табличное значение для алюминия. На рис. 3, а показана зависимость времени взрыва проводника от величины введенной энергии. В результате микроскопического исследования образцов после эксперимента и в соответствии с характером разрушения металла представилось возможным разделить данную зависимость на 3 зоны: CLEAR, STRATA и ARCING. На рис. 3, б показаны фотографии образцов для каждого из типов разрушения. Для введенной энергии $W > 4.3$ kJ/g, т.е. зоны CLEAR, характерно полное испарение металла с поверхности подложки. При этом стоит отметить, что при увеличении вводимой энергии время взрыва τ_{ex} выходит на некоторый постоянный уровень. При энергии $W < 3.5$ kJ/g (зона ARCING) потеря проводимости в образце происходит по иному, не взрывному механизму. При этом количество импульсов тока через металл может составлять несколько единиц–десятков; при ближайшем рассмотрении зон деметаллизации видно, что границы зоны разрушения имеют разную морфологию — ближняя к катоду сторона имеет более изрезанную структуру, чем противоположная, прилегающая к аноду. Такой тип разрушения обусловлен движением катодных пятен при дуговом воздействии на металл. Зоне STRATA соответствует промежуточное значение введенной энергии $3.5 < W < 4.3$ kJ/g, при этом разрушение металла сопровождается стратообразованием, т.е. разбиением сплошности металлического слоя на чередующиеся полосы с металлом и без него. Детальное изучение показало отсутствие различия структуры границ деметаллизированной зоны.

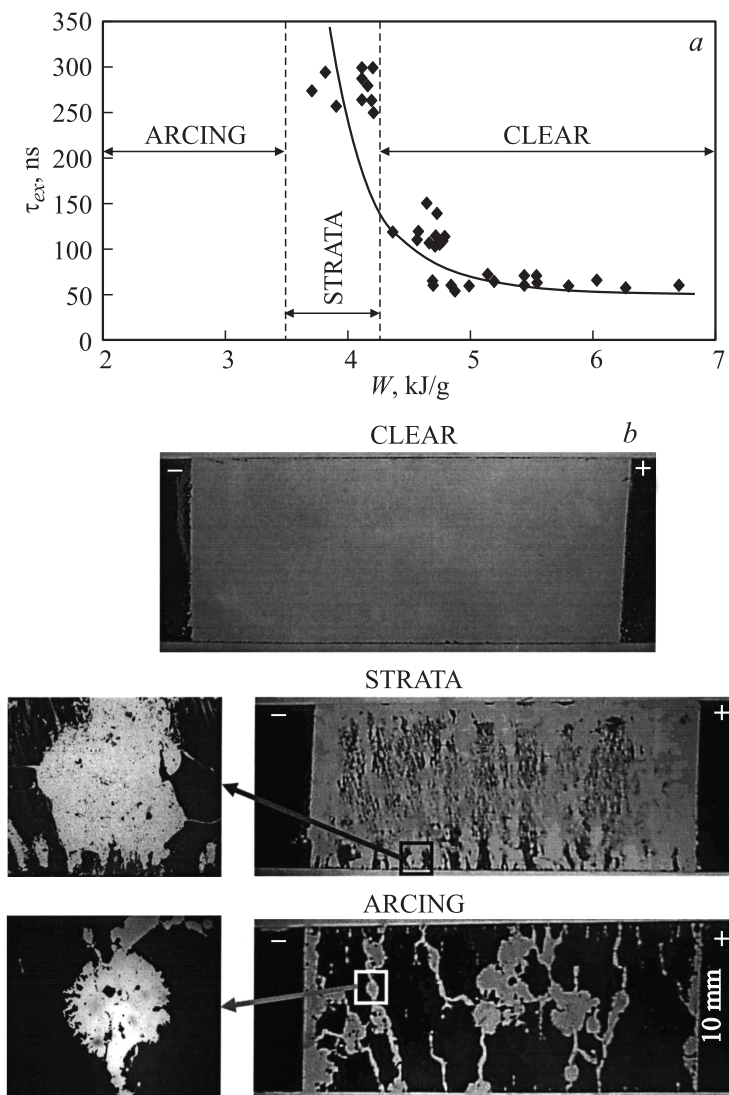


Рис. 3. *a* — зависимость времени взрыва от величины введенной энергии; *b* — фотографии экспериментальных образцов после взрыва.

Оценка характерного времени развития магнитогидродинамической неустойчивости дает значение 20–46 ns в исследованном диапазоне нагрузок. Вместе с тем стратообразование может быть обусловлено развитием перегретой неустойчивости, порог развития которой составляет $j > 8.3 \cdot 10^{11}$ A/m² [11]. Однако оценка характерных мод неустойчивости и размеров страт в обоих случаях не соответствует экспериментальным данным. Детальный анализ причин стратообразования и последующей дуговой стадии развития разряда является предметом отдельного рассмотрения.

Список литературы

- [1] *Kammermaier J., Rittmayer G., Birkle S.* // J. Appl. Phys. 1989. V. 66. N 4. P. 1595–1609.
- [2] *Tortai J.-H., Bonifaci N., Denat A.* // J. Appl. Phys. 2005. V. 97. N 5. P. 053304.
- [3] *Christen T., Carlen M.* // Recent Res. Dev. Appl. Phys. 2003. V. 6. P. 517.
- [4] *Zernow L., Wright F., Woffinden G.* // Exploding Wires. V. 2. Plenum. New York, 1962. P. 245–262.
- [5] *Marakhtanov M.K., Marakhtanov A.M.* // Thin solid films. 2000. V. 359. P. 127.
- [6] *Sarjeant W., Berkow J., Olabisi J.* // Conference Record of the 2006. 27 International Power Modulator Symposium. May 2006. P. 537–540.
- [7] *Емельянов О.А.* // ЖТФ. 2008. Т. 78. В. 7. С. 48–56.
- [8] *Бурцев В.А., Калинин Н.В., Лучинский А.В.* Электрический взрыв проводников и его применение в электрофизических установках. М.: Энергоатомиздат, 1990. 289 с.
- [9] *Иваненков Г.В., Пикуз С.А., Шелковенко Т.А.* и др. Препринт ФИАН. 2004. № 9. Ч. 1. 26 с.
- [10] *Месяц Г.А.* Эктонь в вакуумном разряде: пробой, искра, дуга. М.: Наука, 2000. 424 с.
- [11] *Орешкин В.И.* // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. В. 1. С. 76–82.