

УДК 537.226

©1994

КИНЕТИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОБОЯ ОКИСНЫХ СЛОЕВ

В.А.Лалэко, И.И.Драган, Н.Ю.Ершова

Представлены результаты исследования кинетических закономерностей электрического пробоя анодного оксида тантала в постоянном поле с применением прижимного электрода при положительной полярности подложки. Определено критическое значение предпробивного тока I_s для Ta_2O_5 . Получены зависимости I_s от напряжения, подаваемого на образец, от толщины оксида, материала верхнего электрода. Показано, что критическое значение предпробивного тока не зависит от перечисленных выше параметров и может рассматриваться как критерий пробоя анодного оксида Ta_2O_5 .

Протекание тока через тонкопленочные структуры в сильных электрических полях сопровождается процессами деградации и пробоя. Вопрос о существовании критического параметра электрического пробоя, при превышении которого происходит разрушение образца, остается на сегодняшний день открытым. Поэтому исследование релаксации тока в предпробивных полях представляет несомненный интерес с точки зрения получения информации о физике электронных и ионных процессов, происходящих в тонких диэлектрических слоях при напряженности электрического поля $10^8 - 10^9$ В/м. Опубликовано крайне мало работ, посвященных исследованию релаксации тока в таких экстремальных условиях. Связано это, очевидно, с большими трудностями технического плана, стоящими на пути решения этой проблемы. В последние годы появилась серия работ [1-3] группы японских ученых по измерению предпробивных токов в полимерных изоляторах.

В настоящей работе приведены результаты исследования предпробивных токов в тонких пленках Ta_2O_5 при электрическом пробое в постоянном поле для положительной полярности тантала.

1. Методика эксперимента

Образцы Ta_2O_5 были получены электрохимическим окислением электрополированной танталовой жести в 0.01 N растворе ортофосфорной кислоты. Использовался смешанный режим окисления. Вначале поддерживалась постоянная плотность тока $j = 10$ А/м², а при достижении заданного напряжения U_0 образцы выдерживались в вольт-статическом режиме до остаточных токов, не превышающих 10^{-2} А/м². Толщина оксидов определялась эллипсометрическим методом.

Все исследования выполнены на полностью автоматизированном экспериментальном комплексе [4].

Время запаздывания пробоя τ (интервал времени от начала приложения к образцу прямоугольного импульса напряжения до момента спада напряжения на образце при пробое) определялось с помощью 24-разрядного счетчика и внутреннего таймера ЭВМ в диапазоне $10^{-5} - 10^3$ с. Крутизна переднего фронта импульса, формируемого высоковольтным усилителем, — 10^7 В/с.

Особенностью методики являлось применение непрерывного контроля за током с помощью микро-ЭВМ и быстродействующего логарифмического преобразователя тока. Алгоритм программы, управляющей экспериментом, обеспечивает регистрацию кратковременных изменений тока, не перегружая памяти ЭВМ. Диапазон измеряемых токов $10^{-12} - 10^{-3}$ А без переключения пределов. Быстродействие логарифмического преобразователя тока составляло 10^{-5} с при уровне тока 10^{-9} А.

Измерения проводились в атмосфере лаборатории при комнатной температуре.

2. Результаты и их обсуждение

Экспериментальные результаты, полученные при исследовании электрической прочности диэлектрических слоев, всегда требуют определенной статистической обработки. Особенно велик разброс значений времени запаздывания пробоя в статических испытаниях. Предварительно был проведен статистический эксперимент. На систему Ta-Ta₂O₅-Pt подавали постоянное напряжение $U_{br} = U_0$ и одновременно фиксировали значения τ и критического тока I_s . Для выборки объемом 100 значений $I_s = (0.26 \pm 0.02) \cdot 10^{-6}$ А, при этом разброс значений времени запаздывания пробоя составлял четыре порядка (рис. 1, а, б).

На рис. 2 приведены зависимости предпробивных токов от времени $I(t)$ в логарифмических координатах для системы Ta-Ta₂O₅-Pt от момента приложения постоянного напряжения U_{br} до пробоя образца при различных значениях U_{br} . На типичной зависимости $I(t)$ (рис. 2, кривая 1) можно выделить несколько стадий пробоя. На первой стадии наблюдается спад тока со временем по гиперболическому закону

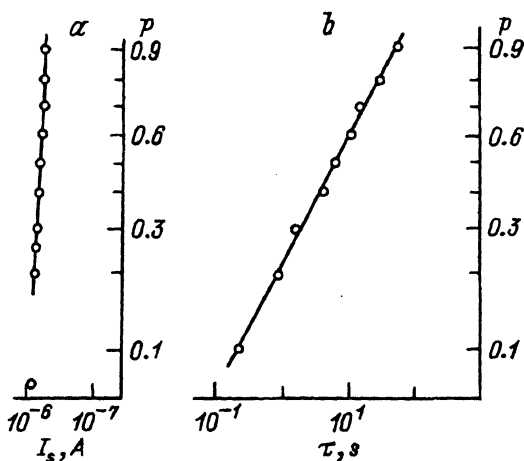


Рис. 1. Функции распределения критических значений предпробивных токов (а) и времени запаздывания пробоя (б) в координатах Вейбулла для оксида Ta₂O₅, полученные при комнатной температуре для положительной полярности подложки. Толщина оксида 186 нм ($U_0 = 100$ В), $U_{br} = 95$ В. Наклоны прямых: $\alpha = 0.55$ (а) и 3.68 (б).

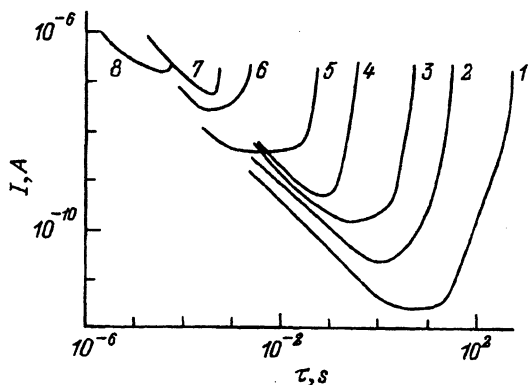


Рис. 2. Зависимости предпробивных токов от времени $I(t)$ для системы Ta-Ta₂O₅-Pt при различных значениях приложенного напряжения.

Толщина оксида 186 nm. Напряжения пробоя (V): 1 — 90, 2 — 95, 3 — 100, 4 — 105, 5 — 110, 6 — 115, 7 — 120, 8 — 125.

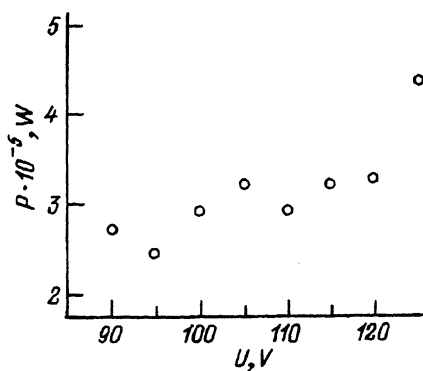


Рис. 3. Зависимость мощности, выделяемой в образце перед пробоем, от величины приложенного напряжения.

Толщина оксида 186 nm.

($I \sim t^{-n}$, где $n \approx 1$), что обусловлено поляризационным характером тока. Далее наблюдается небольшая область, где ток не зависит от времени. Затем следует участок контролируемого роста тока, во время которого предпробивной ток может увеличиваться на 2-4 порядка. На любой из перечисленных выше стадий процесс развития пробоя еще может быть остановлен. После достижения током некоторого критического значения I_s происходит «мгновенный» ($< 10^{-5}$ s) скачок тока с термическим разрушением диэлектрика. Длительность каждой стадии пробоя определяется условиями проведения экспериментов (рис. 2, кривые 2-6). В то же время корреляционный анализ показал, что значение критического тока не зависит от величины приложенного напряжения.

Значения мощности P , рассеиваемой в образце при разных напряжениях пробоя, показаны на рис. 3. Видно, что имеет место линейная зависимость P от U_{br} с коэффициентом корреляции $R = 0.87$. Это означает, что величина мощности, выделяемой в образце, не может рассматриваться как критерий электрического пробоя тонких диэлектрических слоев.

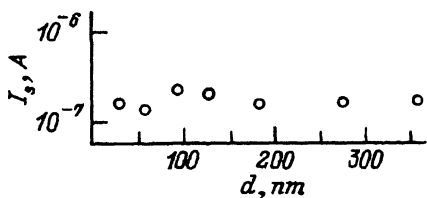


Рис. 4. Критические значения предпробивного тока I_s для образцов с разной толщиной оксида. $U_{br} = U_0$.

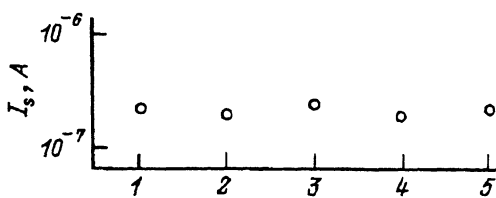


Рис. 5. Критические значения предпробивного тока I_s при пробое с прижимными электродами из разных материалов. 1 — Au, 2 — Pt, 3 — Ag, 4 — InGa, 5 — графит. Толщина оксида 134 nm ($U_0 = 70$ V), $U_{br} = 60$ V.

На рис. 4 представлены критические значения I_s для образцов с различной толщиной оксида. Исследования проводились при $U_{br} = U_0$, что обеспечивало примерно одинаковые поля в образцах. Найдено, что значение I_s не зависит от толщины образца. Этот результат не укладывается в рамки моделей ударной ионизации, для которых величина предпробивного тока должна увеличиваться с ростом толщины диэлектрика [5].

Значения I_s , полученные в системе Ta-Ta₂O₅-электрод с прижимными электродами из разных материалов, приведены на рис. 5. Использовались электроды из тонкой золотой, платиновой и серебряной проволоки приблизительно одного диаметра ($d \sim 0.2$ mm), из графита и индий-галлиевого сплава. Получено, что критическое значение I_s не зависит от материала электрода.

Таким образом, исследования кинетических закономерностей пробоя тонких диэлектрических слоев открывают новые возможности для понимания механизма деградации и электрического пробоя диэлектриков в сильных полях. Независимость критического значения предпробивного тока I_s от величины приложенного напряжения, толщины оксида и материала верхнего электрода для анодного оксида тантала при комнатной температуре позволяет рассматривать именно значение I_s как критерий пробоя Ta₂O₅. Этот вывод может иметь широкое практическое применение, например, при диагностике качества диэлектрических пленок.

Список литературы

- [1] Hikita M., Kanno I., Sawa G., Ieda M. // Jap. J. Appl. Phys. 1985. V. 24. N 8. P. 984-987.
- [2] Mizutani T., Kanno I., Hikita M., Ieda M., Sawa G. // IEEE Trans. Electrical Insul. 1987. V. EI-22. N 4. P. 473-477.
- [3] Hikita M., Hirose T., Ito Y., Mizutani T., Ieda M. // J. Phys. D. 1990. V. 23. N 12. P. 1515-1527.
- [4] Лалёко В.А., Кожевников С.В., Наумов В.Г., Драган И.И., Шавкера В.Л. // Деп. в ВНИИТИ. Петрозаводск, 1992. № 2284-В92.
- [5] Воробьев Г.А., Несмелов Н.С. // Изв. вузов. Физика. 1979. № 1. С. 90-104.

Петрозаводский государственный
университет им.О.В.Куусинена

Поступило в Редакцию
23 ноября 1992 г.
