

УДК 437.226

© 1992

О МЕХАНИЗМЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРОБОЯ В АНОДНОМ ОКСИДЕ ТАНТАЛА

В. А. Лалэко, Н. Ю. Ершова, И. И. Драган

Представлены результаты исследования электрического пробоя анодного оксида тантала в постоянном и импульсном полях. Определены статистические параметры пробоя и их зависимость от длительности импульсов приложенного напряжения. Получены зависимости времени запаздывания пробоя τ от длительности импульсов в диапазоне $t_n = 2 \cdot 10^{-3} + 10^2$ с и от скважности импульсов в диапазоне $S = 2 + 50$, а также кинетические кривые предпробивных токов при импульсной подаче напряжения. Показано, что время запаздывания пробоя в диапазоне длительностей импульсов $t_n = 10^{-3} + 10^2$ с не изменяется и соответствует τ в постоянном поле (при заданном значении напряжения). Результаты интерпретируются с точки зрения электронных механизмов пробоя.

Значительный научный интерес к исследованию электрической прочности анодных окисных пленок связан со все расширяющимся применением их в изделиях электронной техники: оксидно-металлических и оксидно-полупроводниковых конденсаторах, в качестве диэлектрика в МДП структурах, в элементах памяти. Полученные экспериментальные результаты трактуются как с позиций тепловых механизмов пробоя [¹⁻³], так и в рамках электронных моделей [⁴⁻⁶]. Очевидно, необходима постановка критических экспериментов, позволяющих отдать предпочтение тем или иным механизмам пробоя, что и явилось целью нашего исследования.

В данной работе приведены результаты исследования электрического пробоя анодного оксида тантала Ta_2O_5 в сильных постоянном и импульсном полях. Представлены кинетические кривые предпробивных токов. Для объяснения экспериментальных результатов применяются электронные модели пробоя.

1. Методика исследования

Пленки Ta_2O_5 были получены электрохимическим окислением электрополированной танталовой жести в 0.01 N водном растворе ортофосфорной кислоты при комнатной температуре. Анодирование проводилось в смешанном режиме — сначала при постоянной плотности тока $j = \text{мА/см}^2$, затем при постоянном напряжении $U = 30$ В до остаточных токов $j_{\text{ост}} \sim 1$ мкА/см². Толщина слоя оксида определялась из эллипсометрических измерений и составляла 64 нм.

В качестве контакта использовался прижимной электрод из тонкой золотой проволоки диаметром ~ 0.15 мм.

Исследования проводились на автоматизированной экспериментальной установке, позволяющей реализовать основные методы изучения электрического пробоя диэлектриков.

В ходе экспериментов фиксировалось время запаздывания пробоя $\tau = t_{\text{ст}} + t_{\text{ф}}$, где $t_{\text{ст}}$ — статистическое время запаздывания пробоя, $t_{\text{ф}}$ — время формирования пробоя. Поскольку в нашем случае $t_{\text{ст}} \gg t_{\text{ф}}$, то $\tau \approx t_{\text{ст}}$.

Время запаздывания пробы τ (промежуток времени от начала приложения к образцу прямоугольного импульса напряжения до момента спада напряжения на образце при пробе) определялось с помощью 48-разрядного счетчика как произведение числа импульсов, прошедших до пробы, на длительность импульсов приложенного напряжения. Минимальная длительность импульса $t_n = 2 \cdot 10^{-5}$ с ограничивалась техническими параметрами установки. Импульсы напряжения формировались с помощью генератора и высоковольтного усилителя с амплитудой выходного напряжения $0 \div 250$ В и крутизной переднего фронта импульса $\sim 3 \times 10^7$ В \cdot с $^{-1}$. Значение напряжения при испытаниях в постоянном поле и амплитуда напряжения в импульсном режиме были одинаковыми. Предпробивной ток регистрировался с помощью быстродействующего широкодиапазонного логарифмического преобразователя тока, разработанного в лаборатории [7]. На программно-заданном уровне тока эксперимент прерывался, выдерживалась некоторая пауза, затем на образец вновь подавалось постоянное напряжение, предварительно уровень тока увеличивался. Процесс продолжался «поэтапно» до полного разрушения образца. Измерения проводились при положительной полярности тантала в атмосфере лаборатории при комнатной температуре.

Было исследовано 20 образцов, на которых выполнено порядка десяти тысяч проб.

2. Результаты и их обсуждение

Для статистической обработки экспериментальных результатов применялось распределение Вейбулла [8]. При анализе полученных данных использовалось среднее значение логарифма времени запаздывания пробы, определяемое из выборки объемом $N = 30 \div 50$ значений.

На графике функциональной зависимости суммарного времени запаздывания пробы τ от длительности импульсов приложенного напряжения (рис. 1) можно выделить две области. Первая область в диапазоне $t_n = 2 \cdot 10^{-5} \div 10^{-3}$ с, где τ уменьшается с увеличением t_n , характеризуется вейбулловским параметром $a = 0.83 \pm 0.04$ (рис. 2, кривая 1). Вторая область — с $t_n = 10^{-3} \div 10^2$ с, где суммарное время запаздывания пробы не зависит от t_n и совпадает с τ в постоянном поле; для этой области $a = 0.5 \pm 0.02$ (рис. 2, кривая 2). Последнее значение хорошо согласуется с ранее полученными результатами исследования электрической прочности Ta_2O_5 в постоянном поле [5]. Наличие двух областей в зависимости от t_n , характеризующихся разными значениями параметра a , свидетельствует о двух разных механизмах пробы.

Известно [9], что тепловой пробой развивается в течение $10^{-2} - 10^{-3}$ с; следовательно, логично предположить, что во второй области ($\tau > 10^{-3}$ с) реализуются тепловые механизмы пробы. Значит, при определенных условиях эксперимента можно усилить или ослабить основные процессы, приводящие к потере электрической прочности вследствие нарушения теплового баланса диэлектрика. Так, время развития теплового пробы должно зависеть от скважности S приложенных импульсов. Поскольку $S = T/t_n$,¹ то при увеличении T для заданного значения t_n увеличивается время теплоотвода в подложку и противозлектрод (в случае тонких диэлектрических пленок в МДМ системе обеспечивается хороший теплоотвод) и нужно ожидать возрастания τ .

На рис. 3 приведены зависимости суммарного времени запаздывания пробы от скважности для двух значений длительности импульсов приложенного напряжения. При $t_n = 10^{-2}$ с τ не зависит от скважности, следовательно, интерпретация этого факта в рамках тепловых моделей пробы крайне затруднительна. Очевидно, в диапазоне $t_n = 10^{-3} \div 10^2$ с в образце происходят необратимые процессы, при

¹ T — период импульсов.

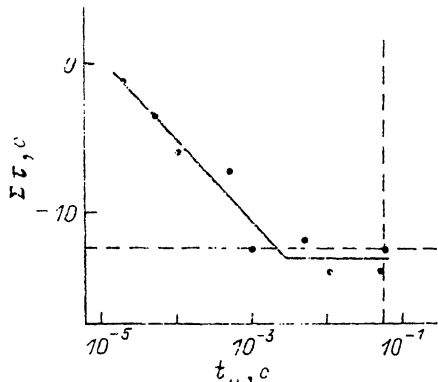


Рис. 1. Зависимость суммарного времени запаздывания пробоя от длительности импульсов приложенного напряжения в логарифмических координатах.

Толщина окисла 64 нм. Температура комнатная. Полярность напряжения Ta^+ . $U_{пр} = 36.7$ В. Сквозность импульсов $S = 5$. Штрихи $-\tau$ в постоянном поле.

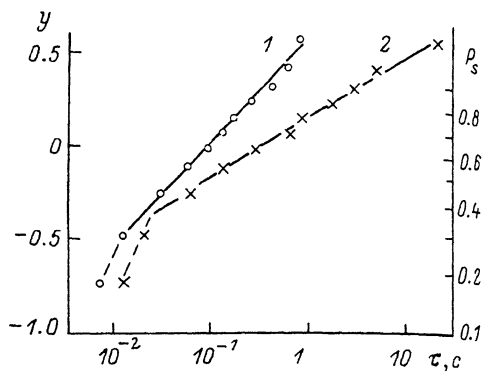


Рис. 2. Зависимости $y = \lg \{-\ln [1 - P_s(\tau)]\} + \lg \tau$, полученные при комнатной температуре для положительной полярности напряжения на тантале. $U_{пр} = 36.7$ В.

Длительность импульсов напряжения: 1 — 10^{-4} , 2 — 10^{-2} с. Наклоны прямых: 1 — $a = 0.83 \pm 0.04$, 2 — $a = 0.5 \pm 0.02$.

которых запоминается предыдущее состояние, наблюдается эффект «памяти предпробивного состояния».

При $t_n = 10^{-4}$ с (первая область) τ с увеличением сквозности импульсов возрастает. Следовательно, в этой области основными являются процессы, приводящие систему за время паузы в исходное состояние. Но тепловые процессы достаточно медленные ($\tau > 10^{-3}$ с), поэтому вероятнее всего в диапазоне $t_n = 2 \cdot 10^{-5} \div 10^{-3}$ с ответственными за потерю электрической прочности диэлектрика могут быть электронные процессы, такие как образование и релаксация объемного заряда в прикатодной области диэлектрика [10]. Для уточнения этого вопроса необходимо провести исследование в микро- и наносекундном диапазоне длительностей импульсов.

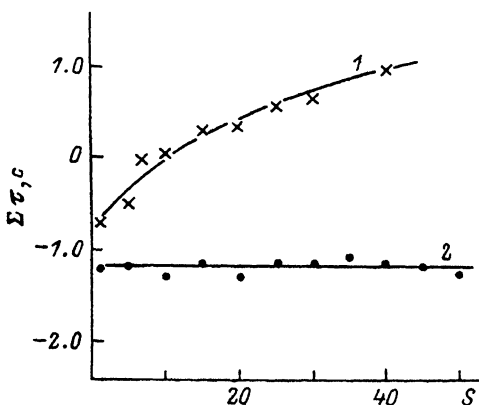


Рис. 3. Зависимости суммарного времени запаздывания пробоя от сквозности импульсов напряжения.

Толщина окисла 64 нм. Температура комнатная. Полярность напряжения Ta^+ . Длительность импульсов: 1 — 10^{-2} , 2 — 10^{-4} с.

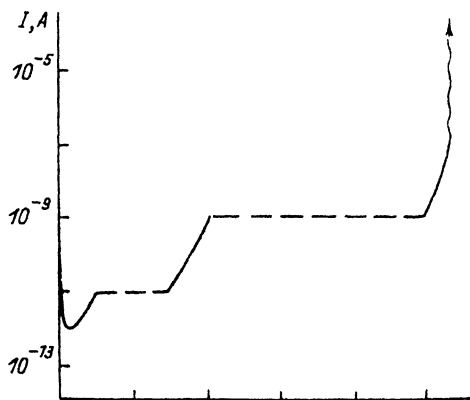


Рис. 4. Зависимость предпробивного тока от времени при положительной полярности напряжения на тантале.

Толщина окисла 190 нм. $U_{пр} = 100$ В. Температура комнатная.

На рис. 4 представлена кинетическая кривая предпробивного тока при «поэтапном» пробое диэлектрика в постоянном поле. Использование вычислительной техники позволило осуществлять непрерывный контроль за током в ходе исследования. На программно-заданном уровне тока эксперимент прерывался, выдерживалась пауза $t = 200, 600$ с (рис. 4) до 24 ч. Затем на систему вновь подавалось напряжение и предпробивной ток начинал расти именно с того значения, на котором процесс развития пробоя был прерван. Суммарное время запаздывания пробоя при этом в пределах статистического разброса не изменялось и равнялось τ в постоянном поле.

Интерпретация этого эксперимента с позиций чисто теплового пробоя также вряд ли возможна, в то время как в рамках электронных моделей пробоя полученные результаты могут быть объяснены, например, в терминах двух физических концепций: диэлектрическая локализация и «след памяти» [11].

Таким образом, на основании вышеизложенного можно заключить, что в некристаллическом оксиде Ta_2O_5 в системах металл—окисел—металл реализуется электронный механизм пробоя. Это не исключает возможности теплового пробоя в реальных изделиях электронной техники на основе Ta_2O_5 в зависимости от их конструкции, условий эксплуатации и т. д.

Список литературы

- [1] Klein N. // J. Electrochem. Soc. 1969. V. 116. N 7. P. 963—972.
- [2] Костров Д. В., Мирзоев Р. А. // Электрохимия. 1987. Т. 23. № 5. С. 595—600.
- [3] Мирзоев Р. А. // Электрохимия. 1987. Т. 23. № 5. С. 676—679.
- [4] Jonscher A. K. // Open. Switches. New York; London, 1987. P. 143—148.
- [5] Лалэко В. А., Шмидт Т. В. // ФТТ. 1989. Т. 31. № 2. С. 187—192.
- [6] Лалэко В. А., Ершова Н. Ю. // Изв. вузов. Физика. 1990. № 4. С. 25—29.
- [7] Кожевников С. В., Лалэко В. А., Драган И. И. // Тез. докл. науч.-тех. конф. М., 1988. С. 76—77.
- [8] Hill R. M., Dissado L. A. // J. Phys. C: Solid State Phys. 1983. V. 16. P. 4447—4468.
- [9] Поплавко Ю. М. Физика диэлектриков. Киев, 1980. С. 312—350.
- [10] Зудов А. И., Зудова Л. А. // Электрохимия. 1973. Т. 9. № 3. С. 331—335.
- [11] Jonscher A. K. // J. Phys. D: Appl. Phys. 1980. V. 13. P. 143—148.

Петрозаводский государственный университет
им. О. В. Куусинена

Поступило в Редакцию
3 февраля 1992 г.