

УДК 53.097

П.Е. Троян, В.В. Каранский

## Электрическая формовка и пробой тонкопленочных структур металл–диэлектрик–металл

На основании анализа экспериментальных и расчетных данных по процессам пробоя и формовки тонкопленочных диэлектриков установлены общие закономерности физических процессов и различия возникновения пробоя и электрической формовки тонкопленочных диэлектриков в структуре металл–диэлектрик–металл.

**Ключевые слова:** электрическая формовка, пробой, МДМ-структура, аморфный диэлектрик, эмиссия.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2017-20-3-152-154

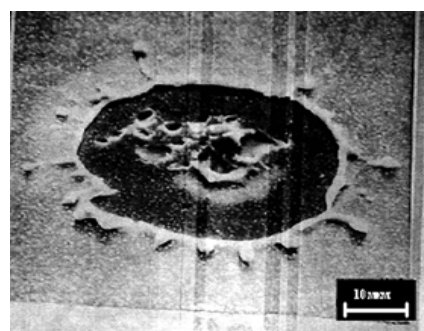
В 1974 г. появилась первая работа, в которой сообщалось, что в тонкопленочных структурах металл–диэлектрик–металл (МДМ) с оксидным диэлектриком наблюдается необычное явление в области сильных электрических полей (больше  $10^6$  В/см), которые называли формовкой [1]. Суть этого явления заключается в том, что при воздействии электрического поля МДМ-структура из «пассивного» конденсаторного состояния переходит в «активное» состояние, характеризующееся высокой проводимостью с вольт-амперной характеристикой  $N$ -типа. В формованных структурах наблюдается разогрев электронного газа, что сопровождается эмиссией электронов в вакуум и электролюминесценцией. Кроме того, такие структуры обладают памятью по напряжению, температуре и давлению [2]. В работе [1] указывалось, что обнаруженное явление не является пробоем. Однако механизм его до сих пор до конца не выяснен. Кроме того, в ряде работ [3, 4] дается необоснованное заключение о том, что процесс формовки фактически сводится к пробоем МДМ-структуры.

Интерес к исследованиям МДМ-структур в последние годы резко возрос, что обусловлено созданием мемристорных элементов памяти на основе МДМ-структур [5]. Для таких систем физика возникновения каналов пробоя и формовки имеет огромное значение. Таким образом, представленная работа актуальна и имеет большое научное и практическое значение.

Проведём сравнительный анализ каналов пробоя и формовки.

1. Электронно-микроскопические исследования поверхности МДМ-структур, подвергнутых пробоем и формовке, позволили установить, что геометрические размеры канала пробоя существенно отличаются от размеров каналов формовки. Для используемого диапазона толщины диэлектрика ( $\text{SiO}_2$ ) 40–60 нм усредненное значение диаметра канала пробоя составляет 4 мкм, тогда как формованный канал на этапе его образования равен 0,03 мкм. Структура канала пробоя такова, что при пробое происходит разрушение диэлектрика, и канал пробоя является пустотелым. Формованный канал таковым не является: в процессе формовки происходит изменение структуры диэлектрика, но разрушения его в канале

не происходит. При пробое верхний электрод отступает от разрядного канала в диэлектрике на 1,5–2 мкм, тогда как в формованных каналах это расстояние не превышает 0,02 мкм (рис. 1, а, б).



а



б

Рис. 1. Микрофотографии канала пробоя (а) и формованного канала (б)

Таким образом, уже эти сравнительные характеристики говорят о существенном различии характеристик каналов пробоя и формовки. Можно говорить о том, что в тонкопленочной МДМ-структуре канал пробоя – это разрушенная область, в которой при приложении напряжения не происходит никаких процессов. Формованные каналы обладают заметной проводимостью, в них наблюдается электролюминесценция, и из этих каналов происходит эмиссия электронов в вакуум, что связано с разогревом электронного газа в каналах (рис. 2, а, б).

2. Явления пробоя наблюдаются для МДМ-структур с любым диэлектриком. Процесс электрической формовки возможен только для диэлектрических слоев с аморфной структурой диэлектрика.

Причём возможность формовки и параметры этого процесса зависят от плотности плёнок. Так, формовка возможна, например, для плёнок диоксида кремния, полученных вакуумно-плазменными методами, и не происходит в термически выращенных слоях SiO<sub>2</sub>. Аналогичная закономерность наблюдается для плёнок Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, полученных вакуумно-плазменными методами и электролитическим анодированием. Плёнки сульфида цинка, имеющие аморфную структуру, формируются, а поликристаллические той же толщины не формируются.

Таким образом, можно сделать заключение, что пробой происходит в тонкопленочных структурах с любым диэлектриком, а процесс формовки возможен в диэлектрических аморфных слоях с пористой структурой.

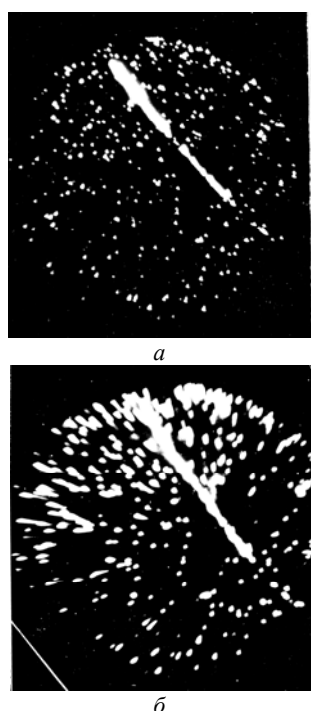


Рис. 2. Картины электролюминесценции (а) и электронной эмиссии (б) формованных МДМ-структур

3. Явление электрического пробоя наблюдается в МДМ-структурах при любых толщинах диэлектриков. Процесс электрической формовки происходит для аморфных диэлектриков в диапазоне толщин от 20 до 200 нм. В области толщин менее 20 нм напряженность электрического поля, необходимая для формовки, больше, чем электрическая прочность диэлектрика, и в МДМ-структуре развивается пробой, что делает невозможным формовку. Аналогичная ситуация наблюдается и в области толщин более 200 нм.

Таким образом, можно говорить о том, что явление формовки возможно в ограниченном диапазоне толщин диэлектрика, а пробой происходит при любой толщине диэлектрика.

4. Сравнение временных характеристик пробоя и формовки, проведенные в импульсном режиме,

позволили установить следующее. Время первого этапа развития пробоя МДМ-структур (стадии формирования разряда в диэлектрике), по нашим оценкам, составляет  $10^{-8}$ – $10^{-5}$  с. В то же время первый этап формовки достаточно длительный и при одинаковых параметрах импульсов и параметров МДМ-структуры составляет минуты.

Второй этап пробоя (стадия коммутации) по полученным нами данным длится 1,3–1,8 нс. Выделяемая на стадии коммутации энергия при пробое составляет  $10^{-9}$  Дж. Второй этап процесса формовки, связанный также с коммутацией, имеет длительность 20–50 нс, и выделяемая при этом энергия не превышает  $10^{-12}$  Дж.

Различие в выделяющейся мощности при пробое и формовке приводит к тому, что диэлектрик в области разрядного канала при пробое разрушается и выбрасывается из него, образуя пустотное образование. Кроме того, значительная мощность, выделяемая на стадии коммутации при пробое (разрядный канал простирается от одного электрода до другого), разрушает и испаряет пленку нижнего электрода, и верхний электрод разрушается до размеров несколько микрон в диаметре (см. рис. 1, а). Отступления пленки верхнего электрода от разрядного канала составляет единицы микрометров.

Полученные данные показывают существенное различие во временных и энергетических параметрах на различных этапах процесса формовки и пробоя. Нужно отметить, что наблюдаемые экспериментальные данные по временным параметрам процессов и геометрическим размерам каналов пробоя и формовки хорошо согласуются с расчетными значениями.

#### Заключение

В заключении на основе эксперимента попытаемся дать ответ на вопрос о том, когда в тонкопленочной МДМ-системе будет происходить пробой, а когда электрическая формовка и в чем их отличие.

Первые стадии процесса пробоя и электрической формовки аналогичны и связаны с протеканием токов автоэлектронной эмиссии с микроострий на катоде и возникновением дефектов стехиометрии в слое, например диоксида кремния под действием горячих электронов. Однако, несмотря на идентичность физических процессов пробоя и формовки, количественные характеристики процессов уже на этом этапе существенно различаются. В области возможного возникновения пробоя интенсивность дефектообразования значительно выше из-за повышенной напряженности электрического поля в области микроострия. В результате первая стадия при пробое протекает за время  $10^{-5}$ – $10^{-4}$  с, тогда как при формовке, которая развивается в области микроострий большим радиусом закругления и меньшей плотностью тока автоэмиссии с катода, протекает достаточно долго – секунды и даже минуты. Вторая стадия процессов – стадия коммутации – также различается количественно. Если при пробое на этапе коммутации за время 1,3–1,8 нс выделяется энергия

$10^{-9}$  Дж и протекают токи порядка ампер, то при формовке время коммутации составляет 20–50 нс и выделяемая при этом энергия не превосходит  $10^{-12}$  Дж, а протекающее на этом этапе токи – десятки микроампер.

В случае электрической формовки выделяемая мощность значительно меньше, в результате нижний электрод разрушению не подвергается, в диэлектрике происходят изменения (суть этих изменений в данной работе не обсуждается), но разрушения диэлектрика с выбросом из канала не происходит (см. рис. 1, б). Разрушения в верхнем электроде при формовке незначительны и отступления его от разрядного канала составляют 10–20 нм. В результате произошедших процессов образуется электрически активный формованный канал, в котором протекают процессы, обеспечивающие появление свойств формованных МДМ-структур [1]. При этом структура диэлектрика такова, что на третьей стадии процесса за счет адсорбции газов остаточной атмосферы повышается проводимость МДМ-структуры, и они становятся чувствительны к адсорбции газов.

Структура канала пробоя такова, что протекание каких-либо физических явлений (протекание тока, разогрев электронов и т.д.) в нем невозможно.

Таким образом, возникновение каналов пробоя и формовки в тонкопленочной МДМ-структуре определяется статистикой микронеровностей и геометрическими характеристиками микроострий на катоде [6]. Если на поверхности катода есть острия с малым радиусом кривизны, то вероятность появления каналов пробоя велика. Если система микронеровностей однородна и они имеют большой радиус кривизны, то наиболее вероятнее процесс формовки, а не пробоя. При этом надо иметь в виду, что существуют определенные соотношения, между микрощероховатостью нижнего электрода и толщиной диэлектрика, когда формовка становится наиболее вероятной.

На основании экспериментальных и расчётных данных представлено доказательство того, что процесс формовки и пробоя – это не одно и то же и что формовка – это новое физическое явление, наблюдаемое в тонкопленочных МДМ-структурах в области сильных электрических полей.

### Литература

1. Дирнлей Д. Электрические явления в аморфных плёнках окислов УФН / Д. Дирнлей, А. Стоунхем, Д. Морган. – 1974. – Т. 112, № 1. – С. 83–128.
2. Троян П.Е. Электрическая формовка тонкопленочных структур металл–диэлектрик–металл в сильных электрических полях / П.Е. Троян, Ю.В. Сахаров. – Томск: Изд. Том. гос. ун-та, 2013. – 248 с.
3. Валиев К.А. Электрическая формовка как процесс самоорганизации нанометрового зазора в углеродистой среде / К.А. Валиев, В.М. Мордвинцев, В.Л. Левин // Письма ЖТФ. – 1997. – Т. 67, № 11. – С. 39–44.
4. Ганоненко В.Н. О природе образования формованных каналов в тонкопленочных МДМ-системах // Изв. вузов. Физика. – 1992. – № 5. – С. 115–120.
5. Троян П.Е. Изучение электрофизических параметров пленок окислов титана, применяемых при формировании мемристорных структур / П.Е. Троян, С.Г. Нагайчук, Д.П. Аргунов, П.А. Змановский, И.В. Пилипец // Доклады ТУСУР. – 2015. – № 4(38). – С. 64–67.
6. Бенсон Ф.М. Влияние микрорельефа нижнего электрода на плотность эмиссионных центров МДМ-катода / Ф.М. Бенсон, П.Е. Троян // Радиотехника и электроника. – 1992. – Т. 37, № 7. – С. 1332–1336.

### Троян Павел Ефимович

Д-р техн. наук, профессор, проректор по УР ТУСУРа, зав. каф. физической электроники ТУСУРа  
Тел.: +7 (382-2) 51-43-10  
Эл. почта: tpe@tusur.ru

### Каранский Виталий Владиславович

Ассистент каф. физической электроники  
Тел.: +7 (382-2) 41-48-61  
Эл. почта: karanskii\_vitali@mail.ru

Troyan P.E., Karansky V.V.

### Electric formation and disruptive discharge of thin-film structures of a metal-insulator-metal type

In this particular work, based on the analysis of experimental and calculated data on processes of disruptive discharge and electric formation of thin-film dielectrics, are installed general regularities of physical processes and differences in the appearance of breakdown and electrical formation of thin-film dielectrics in a metal-insulator-metal structure.

**Keywords:** electric formation, disruptive discharge, MIM-structure, amorphous dielectric, emission.