

## СВОЙСТВА ФОРМОВАННЫХ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ НАНОСТРУКТУР

В. И. Зеленский, П. Е. Троян

### Введение

Тонкопленочная структура металл – диэлектрик – металл (МДМ-структура) приобретает новые физические свойства (вольтамперная характеристика тока с участком отрицательного дифференциального сопротивления, эмиссия электронов в вакуум) после того, как подвергается электрической формовке в вакууме [1].

В связи с тем, что с течением времени сила тока через МДМ-структуру необратимо возрастает, целесообразно применение импульсного режима [2].

Измерения быстродействия эмиссии электронов из МДМ-структуры показывают, что временная задержка импульса тока эмиссии относительно импульса напряжения между электродами не превышает 10 нс.

### Цель исследования

Важной особенностью импульсного режима является увеличение максимального напряжения между электродами МДМ-структуры, в результате чего существенно расширяется диапазон изменения эмиссионного тока.

Исследования импульсных токов показывают, что импульс тока эмиссии повторяет форму импульса напряжения, приложенного между электродами МДМ-структуры, независимо от исходного состояния образца, в то время как параметры импульса тока, протекающего между электродами МДМ-структуры, существенно зависят как от предыдущего воздействия на образец, так и от параметров импульса напряжения.

### Методы исследования

Методом задерживающего потенциала установлено, что функция распределения по энергии электронов, эмитированных в вакуум из МДМ-структуры, соответствует функции распределения Максвелла с температурой  $(12 - 14) \cdot 10^3$  К в зависимости от напряжения между электродами.

Многочисленные измерения показывают, что справедливым является следующее соотношение между  $I_C$  – силой тока, протекающего через МДМ-структуру, и  $I_{\text{э}}$  – силой тока эмиссии в вакуум:  $I_{\text{э}} = \alpha I_C$ , где  $\alpha$  – коэффициент токопереноса, имеющий значение  $10^{-4} - 10^{-3}$ . В этой связи целесообразным является изучение причин возникновения и закономерностей протекания тока через МДМ-структуру.

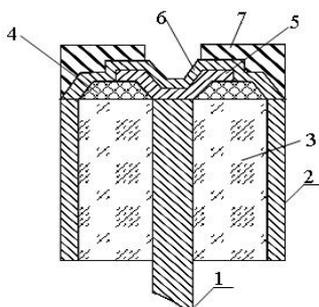


Рисунок 1 – Конструкция образца с МДМ-структурой:

- 1 – центральный металлический ввод (нижний электрод);
- 2 – внешний металлический цилиндр;
- 3 – изолятор;
- 4 – защитный диэлектрик;
- 5 – диэлектрический слой;
- 6 – тонкий металлический слой (верхний электрод);
- 7 – контакт к верхнему электроду

На рис. 1 приведена схема образца, используемого в эксперименте. Тонкопленочные элементы МДМ-структуры наносятся на торцевую гладкую поверхность металлического стержня (ввода) 1. Электрические контакты к электродам МДМ-структуры осуществляются посредством ввода 1 – к нижнему электроду и поверхности внешнего металлического цилиндра 2 – к верхнему тонкому электроду 6.

Надежность контакта к тонкой металлической пленке верхнего электрода 6 обеспечивается напылением проводящего слоя металла 7 толщиной 0,5–0,6 мкм. С помощью защитного диэлектрика 4 возможно изготовление МДМ-структур с различной площадью.

При необходимости возможно изготовление нижнего электрода МДМ-структуры путем напыления металлического слоя на торец ввода 1.

Электрическая формовка, в результате которой МДМ-структура приобретает новые свойства, протекает в локальных участках диэлектрика, примыкающих к микроостриям электрода [3, 4]. При этом для увеличения электрической прочности диэлектрика требуется использование электродов с минимальными микронеровностями, а для осуществления электрической формовки необходима развитая система микроострий на поверхности электрода.

### Обсуждение экспериментальных результатов

Эксперименты по электрической формовке МДМ-структур с различными материалами верхнего электрода показали, что наибольшей скоростью и степенью формовки, определяемой как отношение силы тока в максимуме вольтамперной характеристики  $I_{\text{СМАХ}}$  к силе тока в минимуме  $I_{\text{СМИН}}$  (рис. 2), обладают структуры с электродами из Au, Ag, Cu. Существенно медленнее процесс электрической формовки протекает в системах с электродами из Al, Mg, Ba.

Данные ОЖЕ – спектроскопии указывают, что при напылении металлического электрода атомы металла могут в различной степени проникать в пленку диэлектрика. В системах Mo-SiO<sub>2</sub>-Mo в пленке диэлектрика присутствует до 10 % атомов молибдена, тогда как в системе Mo-SiO<sub>2</sub>-In доля количество атомов индия не превышает 2–3 % в объеме диэлектрика и достигает 30 % вблизи границы верхний электрод-диэлектрик.

Для оптимального осуществления электрической формовки следует использовать в качестве верхнего электрода МДМ-структуры тонкую пленку из алюминия, полученную методом термического испарения в вакууме при температуре подложки 550–600 К и диэлектрическую пленку на основе оксинитрида кремния толщиной 50–80 нм, полученную методом ионно-реактивного распыления.

Общие закономерности электрической формовки проявляются в том, что при приложении напряжения  $U \geq U_{\text{Ф}} \approx 4\text{В}$  между электродами МДМ-структуры, находящейся в вакууме при давлении  $p \leq 10^{-2}$  мм рт. ст., через некоторое время (1–3 минуты) возникает и интенсивно возрастает с течением времени ток, протекающий через образец. Окончанием электрической формовки можно считать момент, когда ток через МДМ-структуру приобретает тенденцию к медленному возрастанию с течением времени.

Изменения вольтамперной характеристики тока  $I_{\text{С}}$  через МДМ-структуру в процессе электрической формовки приведены на рис. 2.

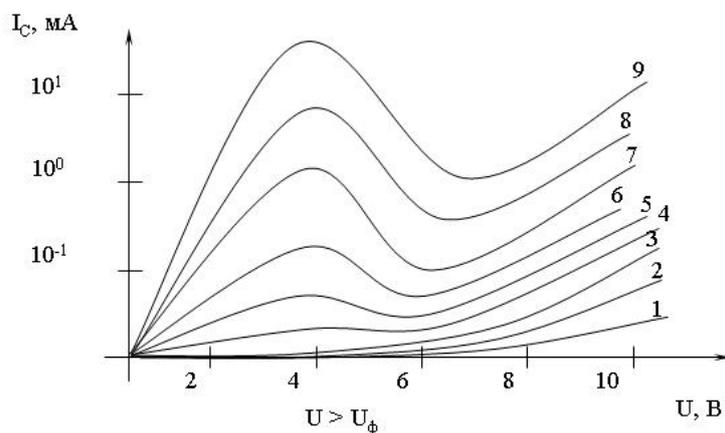


Рисунок 2 – Вольт-амперная характеристика МДМ-структуры  $\text{Mo} - \text{Si}_x\text{N}_y\text{O}_z - \text{Al}$  с участком отрицательного дифференциального сопротивления, при последовательных циклах измерения 1–9

В результате электрической формовки на поверхности верхнего электрода МДМ-структуры возникают светящиеся точки, количество и параметры которых изменяются с течением времени. Экспериментально доказано, что области свечения совпадают с центрами эмиссии в вакуум, что дает возможность по картине свечения оценивать распределение эмиссионных центров МДМ-структуры.

Электронно-микроскопические исследования показали наличие на поверхности МДМ-структуры образований двух типов, которые существенно отличаются друг от друга [5]: каналов пробоя и формованных каналов. Каналы пробоя на поверхности электрода имеют диаметр 1–20 мкм, в то время как диаметр формованных каналов составляет 0,01–0,05 мкм. Поверхностная плотность составляет  $10^2 \div 10^3 \text{ см}^{-2}$  для каналов пробоя и  $10^2 \div 10^7 \text{ см}^{-2}$  для формованных каналов соответственно.

Исследования МДМ-структур, выполненные методом электронно-зондового рентгеновского микроанализа (рис. 3), показывают на существенное (с 35 % до 13 %) уменьшение концентрации материала верхнего электрода в области формованного канала и увеличение концентрации несвязанного кремния (с 42 % до 84 %).

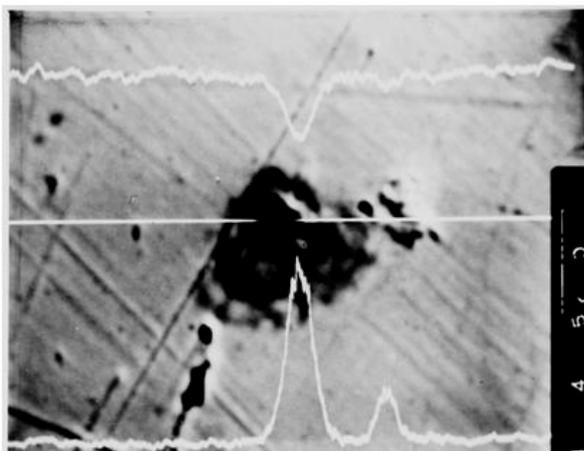


Рисунок 3 – Фотография МДМ-структуры  $\text{Mo-Si}_x\text{O}_y\text{N}_z\text{-Al}$  и линии анализа содержания алюминия (вверху) и кремния (внизу) в области формованного канала

На основании экспериментальных данных и оценок предлагается следующая модель изменения структуры элементов МДМ-структуры в процессе электрической формовки.

На первом этапе электрической формовки происходит эмиссия электронов из микроострий отрицательного электрода по механизму Фаулера-Нордгейма. В результате взаимодействия электронов, ускоренных в сильном электрическом поле [6, 7], с атомами диэлектрика

происходит образование дефектов вследствие разрыва ослабленных или деформированных связей Si – O, Si – H, Si – OH. Несвязанные атомы кремния приобретают положительный заряд и усиливают локальную напряженность электрического поля, что приводит к увеличению силы тока через диэлектрический слой. Длительность данного этапа достигает нескольких минут.

С ростом концентрации дефектов в диэлектрике начинается второй этап электрической формовки [8]. При этом на локальных участках за время  $10^{-8} - 10^{-6}$  с происходит резкое возрастание плотности тока и осуществляется плавление и испарение фрагментов металлической пленки электрода с образованием микроотверстий над формованными каналами.

Третий этап электрической формовки заключается в процессе адсорбции газов остаточной атмосферы в область формованных каналов [9, 10]. Адсорбция молекул воды и углеводородов способствует росту проводимости и качественному изменению вольтамперной характеристики тока через МДМ-структуру.

Процесс электрической формовки сопровождается самоорганизацией пространственной наноструктуры материала [11]. В результате электрической формовки в МДМ-структуре происходит образование наноструктуры, схематично представленной на рис. 4.

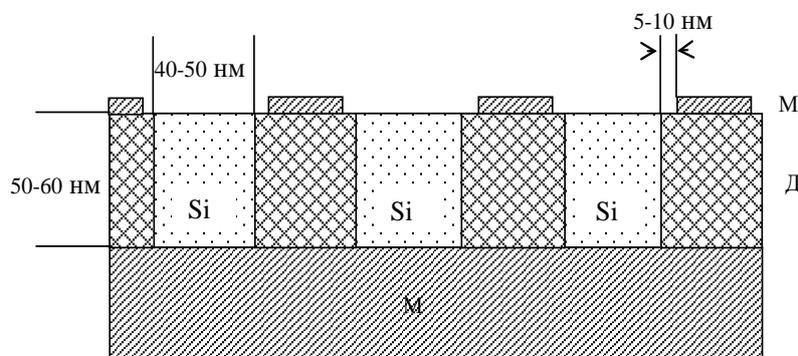


Рисунок 4 – МДМ-структура в результате электрической формовки

При этом можно предположить, что в области формованных каналов образуются квантовые точки на основе кремния, атомов материала верхнего электрода и адсорбированных газов остаточной атмосферы.

### Выводы

Такие свойства МДМ-структуры, как эмиссия электронов в вакуум, электролюминесценция с длиной волны излучения 480 нм определяются в первую очередь свойствами квантовых точек и нанозазора между квантовыми точками (Si) и участком верхнего электрода (М) в условиях сильного электрического поля, напряженность которого составляет  $10^8 - 10^9 \frac{В}{м}$  при напряжении 10–15 В между электродами МДМ-структуры.

### Литература

1. Галанский, В. Л. О природе электрической формовки тонкопленочного холодного катода [Текст] / В. Л. Галанский, П. Е. Троян, Ю. Б. Янкелевич // Радиотехника и электроника. – 1977. – Т. 22, № 6. – С. 1302–1304.
2. Особенности работы матрицы ненакаливаемых тонкопленочных эмиттеров в импульсном режиме [Текст] / Г. А. Воробьев, П. И. Антоненко, В. И. Зеленский, В. В. Ефимов // Электрон. техн. ; Сер. 4. Электровакуумн. и газоразряд. приборы. – 1988. – № 3(122). – С. 25–26.
3. Воробьев, Г. А. Формовка системы металл-диэлектрик-металл и ее пробой [Текст] / Г. А. Воробьев, В. И. Зеленский // Радиотехника и электроника. – 1989. – Т. 34, № 6. – С. 1312–1315.

4. Biederman, H. Emission patterns at various conditions of imaging the electron emission of Al-LiF-Au structures // *Phys. Stat. Sol. (a)*. – 1976. – V. 36. – № 2. – P. 783–789.
5. Troyan P. E., Sakharov Yu. V., Zhigal'skii A. A., Makrushin A. S. An electron-microscopic study of SiO<sub>2</sub> films with a carbon impurity // *Russian Physics Journal*. – 2006. – Т. 49, № 2. – С. 219–220.
6. Троян, П. Е. Эмиссионные структуры на основе формованных тонкопленочных систем [Текст] / П. Е. Троян, В. И. Зеленский // *Нано- и микросистемная техника*. – 2013. – № 4. – С. 9–11.
7. Гуляев, П. Ю. Контроль формовки МДМ-структур наноэлектроники в сильных электрических полях [Текст] / П. Ю. Гуляев, В. И. Зеленский, Ю. В. Сахаров, П. Е. Троян // *Ползуновский вестник*. – 2010. – № 2. – С. 68–71.
8. Баранов, А. В. Механизм электропроводности в структурах Al-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-Al [Текст] / А. В. Баранов, Л. А. Троян // *Изв. вузов. Физика*. – 1973. – № 10. – С. 20–24.
9. Гуляев, П. Ю. Исследование плотности тока в наноструктурах металл-диэлектрик-металл [Текст] / П. Ю. Гуляев [и др.] // *Ползуновский альманах*. – 2011. – № 1. – С. 21–24.
10. Баранов, А. В. Влияние пространственного заряда на электропроводность структур Al-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-Al [Текст] / А. В. Баранов, Л. А. Троян // *Изв. вузов. Физика*. – 1973. – № 5. – С. 151–153.
11. Валиев, К. А. Электроформовка как процесс самоорганизации нанометрового зазора в углеродистой среде [Текст] / К. А. Валиев, В. М. Мордвинцев, В. Л. Левин // *ЖТФ*. – 1997. – Т. 67, № 11. – С. 39–44.
12. Моделирование технологических процессов плазменного напыления покрытий наноразмерной толщины [Текст] / П. Ю. Гуляев, И. П. Гуляев // *Системы управления и информационные технологии*. – 2009. – № 1.1(35). – С. 144–148.