

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛОТНОСТИ ТОКА В НАНОСТРУКТУРАХ МЕТАЛЛ-ДИЭЛЕКТРИК-МЕТАЛЛ

П. Ю. Гуляев, В. И. Зеленский, Ю. В. Сахаров,
П. Е. Троян, Л. А. Троян

Югорский государственный университет
г. Ханты-Мансийск

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
г. Томск

Одной из актуальных задач современной измерительной техники является переход на элементную базу наноэлектроники. Структуры «металл-диэлектрик-металл» (МДМ) представляют большой интерес для исследования широких возможностей их использования в качестве элементов функциональной электронных устройств наноразмерного масштаба. Однако до сих пор плохо изучены закономерности изменения электрофизических свойств пленок субмикронного диапазона. К таким интересным физическим явлениям относятся изменения вида вольтамперной характеристики МДМ-структур. Экспериментальные исследования показали, что параметры МДМ-структур могут существенно зависеть от площади образца

Таким образом, целью данной работы было выяснение новых функциональных возможностей элементов наноэлектроники в зависимости от масштаба низкоразмерных факторов и технологии получения необходимой структуры. Анализ данных позволяет обнаружить две закономерности: плотность тока остается практически неизменной при напряжении между электродами не превышающем 3-5 В и уменьшается с увеличении площади при большем напряжении.

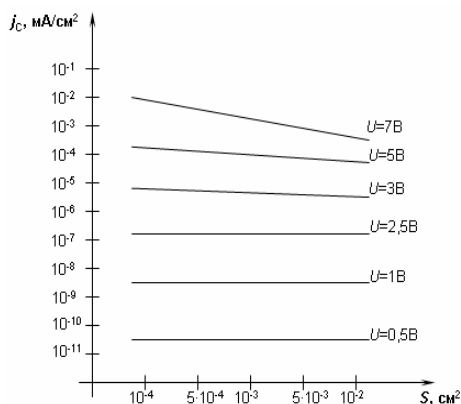


Рисунок 1 – Зависимость плотности тока от размера площади МДМ-структуры при различных напряжениях между электродами

На рисунке 1 представлены зависимости плотности тока j_c между электродами для МДМ-структур с различными значениями площади образцов S и при различных значениях напряжения между электродами [1].

Согласно работам [2, 3], в исследуемых нами структурах ток через образец определяется механизмом Шоттки при малых значениях напряженности электрического поля и туннельной инжекцией по закону Фаулера-Нордгейма в области сильных полей.

При малых значениях напряжения между электродами МДМ-структуры в процессе токопереноса участвует вся поверхность электродов. При этом практически не наблюдается отклонение от следующего соотношения: $I = S j$ ($j = \text{const}$).

При увеличении напряжения между электродами основной вклад в процесс токопереноса дают участки отрицательного электрода – микроострия, на которых происходит значительное усиление напряженности электрического поля. При этом, в зависимости от значения площади электрода МДМ-структуры, изменяется соотношение между общей площадью S электрода и эффективной площадью $S_{\text{э}}$, которую занимают микроострия электрода.

По-видимому, при уменьшении площади образца S отношение $S_{\text{э}}/S$ возрастает. Это приводит к тому, что зависимость $I = S j$ нарушается и в результате появляется характерная для МДМ-структур зависимость плотности тока от площади образца ($j \neq \text{const}$).

Доказательством того, что отклонение от зависимости $I = S j$ ($j \neq \text{const}$) связано с микрорельефом электрода, являются данные рис. 2, показывающие влияние микрорельефа отрицательного электрода на зависимость $j = f(S)$ и данные рисунка 3, где приведены фотографии поверхности электрода, полученного различными способами.

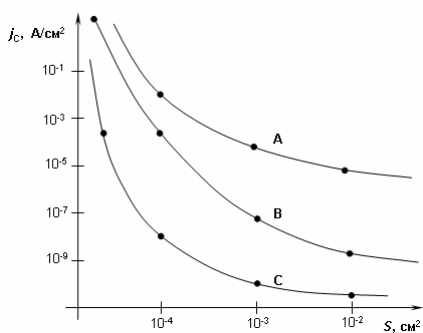


Рисунок 2 – Зависимость плотности тока от площади образца для электродов, изготовленных различными методами:

- А – травление ионным пучком;
- В- термическое испарение;
- С - катодное распыление

Видно, что для МДМ-структур с электродом, полученным катодным распылением (рисунок 3С) и термическим испарением (рисунок 3В), зависимость $j = f(S)$ более сильная, чем для структур с электродом, полученным путем травления поверхности металлической пленки ионным пучком (рисунок 3А), в результате чего количество микроострий на поверхности электрода и отношение S_3/S существенно возрастает.

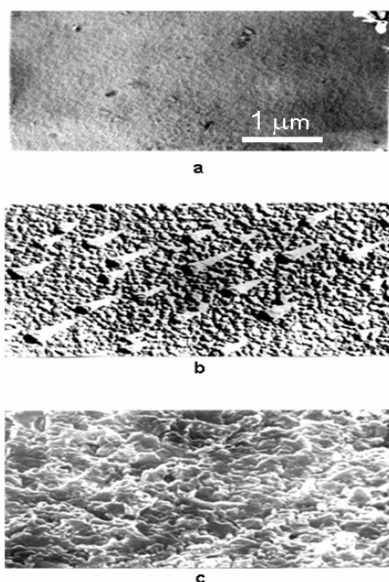


Рисунок 3 – Поверхность электрода из алюминия, изготовленного: катодным распылением (а), термическим испарением (б) и ионным травлением пленки катодного распыления (с)

Многочисленные измерения вольт-амперной характеристики (ВАХ) образцов показали, что в области низких напряжений ВАХ хоро-

шо воспроизводится. При диапазоне значений напряжения 5-10 В ВАХ становится невозможной. При этом наблюдается возрастание силы тока при одном и том же значении приложенного напряжения в зависимости от времени нахождения образца под напряжением и количества циклов измерений [1]. Мы полагаем, что при указанных напряжениях начинается процесс электрической формовки [4], в котором микроострия на поверхности играют существенную роль [5]. Следовательно, можно сделать заключение о том, что зависимость $j = f(S)$ обусловлена процессом электрической формовки, в результате которой изменяются свойства МДМ-структуры [6]. Значение напряженности электрического поля $1,2 \pm 0,1$ МВ/см, при котором обнаруживается зависимость $j = f(S)$, хорошо согласуется с результатами, изложенными в [7, 8].

После электрической формовки МДМ-структур рассматриваемый эффект сохраняется. На рис. 4 представлена зависимость плотности тока от площади образца для МДМ-структуры после электрической формовки. Приведенная зависимость указывает на то, что ток протекает в локальных участках, связанных с микроостриями и отношение S_3/S уменьшается при увеличении площади S образца.

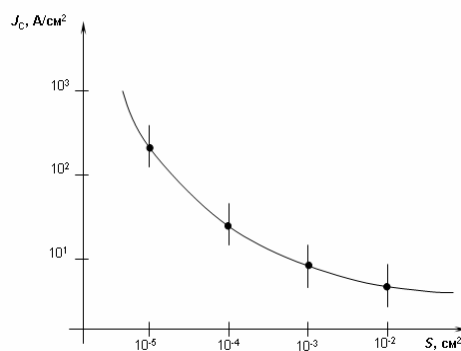


Рисунок 4 – Зависимость плотности тока через формованную структуру $\text{Mo-Si}_x\text{N}_y\text{O}_2\text{-Al}$ от площади образца для напряжения между электродами 10 В

Таким образом, можно утверждать, что обнаруженная зависимость плотности тока от площади образца обусловлена изменением соотношения S_3/S вследствие существования микроострий на электроде.

При этом, если образец имеет большую общую площадь S , значение площади S_3 , дающей основной вклад в протекания тока, мало по сравнению с общей площадью и плотность тока мала. При малых значениях

общей площади образца разницы между S_3 и S уменьшается и плотность тока возрастает.

В результате выдержки МДМ-структуры под напряжением в режиме электрической формовки по истечении определенного времени в образце происходят необратимые изменения, которые приводят к появлению новых электрофизических свойств.

Электрическая формовка сопровождается возникновением в диэлектрике наноразмерных образований, называемых формованными каналами (F - каналы), свечением в области F -каналов и изменением структуры тонкого электрода, примыкающего к формованному каналу.

Оптические наблюдения за свечением в процессе электрической формовки показали, что F -каналы возникают в течение интервала времени продолжительностью от единиц секунд до нескольких минут. Время возникновения одного канала составляет от долей до единиц секунд, что хорошо согласуется с расчетом характерного времени формовки, произведенным ранее. Количество формованных каналов на всей площади образца составляет несколько единиц в начале электрической формовки и возрастает в дальнейшем.

Наблюдения за возникновением и развитием формованных каналов позволяют установить, что первоначально каналы имеют сравнительно малый диаметр, который увеличивается с течением времени в процессе электрической формовки.

Сила тока, протекающего через один формованный канал, составляет 10^{-7} - 10^{-8} А. С учетом того, что начальный диаметр канала составляет ~ 40 нм, значение плотности тока в канале достигает 10^3 - 10^4 А/см².

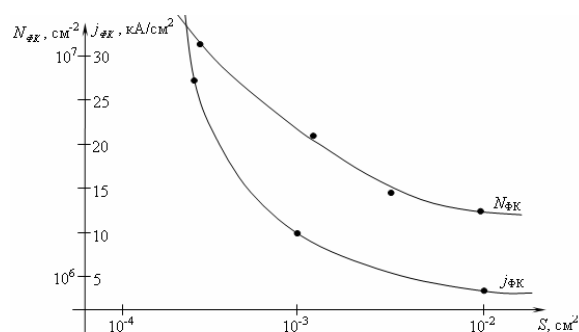


Рисунок 5 – Зависимость поверхностной плотности F -каналов N_{FK} и плотности тока через формованный канал j_{FK} от площади образца S

Анализ результатов показывает также, что поверхностная плотность числа формованных каналов N_{FK} и плотность тока через отдельный формованный канал j_{FK} в МДМ-структуре зависят от площади образцов.

Измерения проводились двумя методами: исследование поверхности с помощью эмиссионного микроскопа и наблюдение картины свечения.

Характерные зависимости представлены на рисунке 5.

На рисунке 6 приведены фотографии картины свечения для образцов с различной площадью.

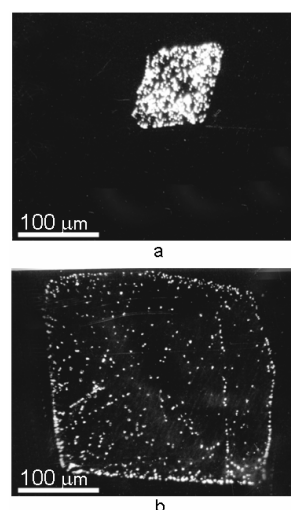


Рисунок 6 – Картина свечения МДМ-структур с различными площадями: $S = 10^{-4}$ см² (a); $S = 10^{-2}$ см² (b).

Исследования образцов с различными площадями показали [9], что от размера площади образца зависит не только количество и плотность формованных каналов, но и их диаметр.

В результате статистической обработки было получено распределение относительного числа каналов в зависимости от значений диаметра формованных каналов $N_{каналов} = f(d)$ для образцов с различными значениями площади.

Наиболее вероятные значения диаметра формованного канала (максимум распределения) составляют: $d=0,3$ мкм для площади образца 10^{-2} см²; $d=0,06$ мкм для площади образца $3 \cdot 10^{-4}$ см².

На основании экспериментальных данных нами была проведена оценка плотности тока j_{FK} , протекающего в формованном канале. Для расчета использовались наиболее вероятные значения d .

Как видно из таблицы 1, плотность тока в формованном канале существенно отличается для образцов с различной площадью.

Таблица 1 – Параметры формованных каналов для образцов $\text{Mo-Si}_x\text{N}_y\text{O}_z\text{-Al}$ для различных площадей МДМ-структуры

S , см^2	d , мкм	$S_{\text{ФК}}$, см^2	$J_{\text{ФК}}$, кА/см^2
$3 \cdot 10^{-4}$	0,06	$0,28 \cdot 10^{-10}$	27,8
$1 \cdot 10^{-2}$	0,30	$7,1 \cdot 10^{-10}$	5,6

Выводы:

1. Обнаруженный эффект, заключающийся в зависимости плотности тока, протекающего через МДМ-структуру, от площади образца, является характерным для МДМ-структур, которые подвергаются электрической формовке.

2. Зависимость плотности тока через образец от площади образца $j_c=f(S)$ определяется закономерностями: $j_{\text{ФК}}=f(S)$, $N_{\text{ФК}}=f(S)$.

3. Степень проявления эффекта может изменяться в зависимости от микрорельефа нижнего электрода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галанский В.Л., Троян П.Е., Янкелевич Ю.Б. О природе электрической формовки тонкопленочно-

го холодного катода // Радиотехника и электроника, 1977, Т.22, № 6. – С. 1302 – 1304.

2. Баранов А.В., Троян Л.А. Механизм электропроводности в структурах $\text{Al-Si}_3\text{N}_4\text{-Al}$ // Изв. вузов. Физика, 1973, № 10. – С. 20 – 24.

3. Баранов А.В., Троян Л.А. Влияние пространственного заряда на электропроводность структур $\text{Al-Si}_3\text{N}_4\text{-Al}$ // Изв. вузов. Физика, 1973, № 5. – С. 151 – 153.

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. Gulyaev I.P., Solonenko O.P., Gulyaev P.Y., Smirnov A.V. Hydrodynamic features of the impact of a hollow spherical drop on a flat surface // Technical Physics Letters. 2009. Т. 35. № 10. С. 885-888.

6. Гуляев П.Ю., Долматов А.В. Физические принципы диагностики в технологиях плазменного напыления // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2009, Т. 11, № 5-2, С. 382-385.

7. Гуляев П.Ю., Гуляев И.П. Моделирование технологических процессов плазменного напыления покрытий наноразмерной толщины // Системы управления и информационные технологии, 2009, № 1.1 (35), С. 144-148.

8. Гуляев П.Ю., Зеленский В.И., Сахаров Ю.В., Троян П.Е. Контроль формовки МДМ-структур наноэлектроники в сильных электрических полях // Ползуновский вестник, 2010, №2, С. 68-71.

9. Воробьев Г.А., Данилович В.С., Троян Л.А., Троян П.Е. Влияние площади на свойства формованных МДМ-систем // Радиотехника и электроника. – 1986. – Т. 31, № 8. – С. 1563 – 1565.