

# КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 537.521+593.5:539.213+539.216.2:537

М.Б. Хаскельберг\*, С.С. Крамор\*\*

## ОСОБЕННОСТИ ПЕРВОЙ СТАДИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ФОРМОВКИ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ СИСТЕМ МЕТАЛЛ-ДИЭЛЕКТРИК-МЕТАЛЛ

\*Томский государственный педагогический университет

\*\*Mayer and Schweitzer Inc., Jersey City, NJ, USA

В работе [1] показано, что процесс формовки МДМ-системы может быть разделен на две стадии. Причем наибольший интерес представляет первая стадия, являющаяся, по мнению авторов, основной. В [2] нами была представлена качественная модель электрической формовки тонкопленочной системы металл-диэлектрик-металл (МДМ). Были исследованы основные закономерности первой стадии формовки. В соответствии с предложенной моделью образованию макродефектов со структурой, подобной структуре каналов пробоя (аналогично модели пробоя тонкопленочных МОП-систем [3]), предшествует рост проводимости МДМ-системы со временем при подаче на нее напряжения, обусловленный генерацией нейтральных электронных ловушек в объеме диэлектрика. Генерация этих ловушек, в свою очередь, обусловлена процессами высвобождения водорода из областей, расположенных вблизи анода и движения его через диэлектрик к границе раздела «катод-диэлектрик». В момент, когда достигается некоторая критическая концентрация дефектов в локальной области вблизи границы раздела «катод-диэлектрик», происходит тепловой пробой, завершающийся отрывом тонкого верхнего электрода над образовавшимся в диэлектрике относительно высокопроводящим макродефектом.

Некоторые детали вышеизложенного механизма остаются невыясненными. В частности, нет ясности в вопросе о природе водородосодержащего вещества, прекурсорных центров, а также типах происходящих между ними реакций.

В данной работе приведены результаты моделирования ток-временной зависимости и показано, что процесс роста тока через МДМ-систему при прохождении в ней первой стадии формовки может быть ограничен диффузией некоторого вещества, в качестве которого может выступать атомарный или молекулярный водород.

### Экспериментальные результаты

Для экспериментов использовались МДМ-системы Al-SiO-Ni. Базовый электрод толщиной 0.5–1.0 мкм наносился на стеклянную подложку. В качестве рабо-

чего диэлектрика использовались пленки SiO толщиной 35 нм. Верхний металлический электрод имел толщину 20 нм. Все пленки наносились методом термического испарения в вакууме при давлении остаточной атмосферы  $2 \times 10^{-5}$  Торр. Формовка образцов осуществлялась путем приложения постоянного напряжения к МДМ-системе при отрицательной полярности верхнего металлического электрода.

При приложении к свежеприготовленной МДМ-системе напряжения, превышающего 0.5–2.0 В, начинается необратимый рост тока во времени через систему, характеризующий первую стадию формовки. Кривая 1 (рис. 1) иллюстрирует зависимость сквозного тока ( $I_c$ ) через свежеприготовленную МДМ-систему от времени, снятую при напряжении 3 В и отрицательной полярности на верхнем электроде. Эту зависимость можно разбить на 3 участка, на первом из которых ток не изменяется со временем, на втором — начинает быстро возрастать и на третьем — возрастает с относительно небольшой скоростью. Необходимо отметить, что на третьем участке, несмотря на уменьшение скорости роста тока, не наблюдается полного насыщения (рис. 1, кривая 2). Из зависимо-

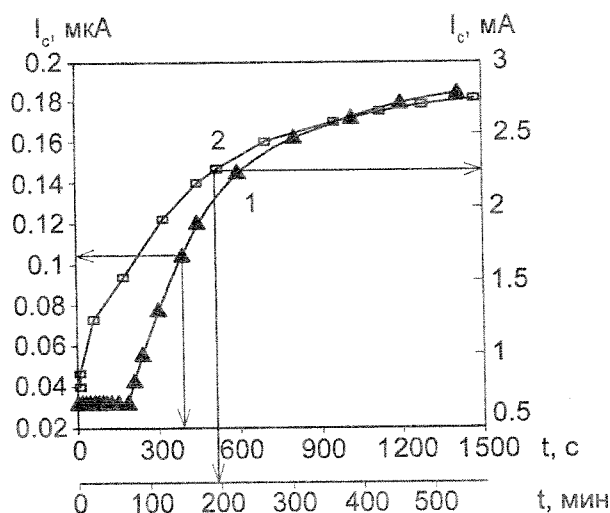


Рис. 1. Зависимости сквозного тока через МДМ-систему от времени, снятые при напряжении 3 В (кривая 1) и 11 В (кривая 2) и отрицательной полярности верхнего электрода

сти видно, что насыщение тока отсутствует даже после 9-часовой выдержки системы под напряжением. Увеличение напряжения, приложенного к системе, приводит к уменьшению протяженности первого участка и увеличению скорости роста тока на втором и третьем участках. Отсутствие насыщения на графиках (рис. 1) объясняется следующим образом. Известно [4], что за проводимость в формованной МДМ-системе отвечают каналы повышенной проводимости (КПП). Известно также, что новые КПП могут появляться в МДМ-системе спустя значительное время после прекращения формовки, хотя вероятность их появления достаточно низка (это явление известно как «доформовка»).

### Модель диффузии

Рассмотрим временную зависимость сквозного тока через МДМ-систему (рис. 2), построенную по данным участков 2 и 3 (рис. 1, кривая 1) в координатах  $I - t^{1/2}$  и нормализованную по величине тока насыщения. В качестве последнего выбрана величина тока в тот момент, когда скорость его роста уменьшается и становится приблизительно постоянной. Из рисунка видно, что на начальном участке роста тока его временная зависимость подчиняется закону  $I \sim t^{1/2}$ . Такое начальное поведение, сменяющееся насыщением, является характерным для процессов, ограниченных диффузией.

С целью подтверждения этого предположения было проведено сравнение экспериментальных токовременных характеристик с результатами расчета простой модели одномерной диффузии.

Сформулируем граничные условия. Примем, что границы раздела «анод-диэлектрик» и «катод-диэлектрик» расположены соответственно в точках  $x = 0$  и  $x = d$ . Первоначально на границе раздела «анод-диэ-

лектрик» создаются дефектные состояния до тех пор, пока их концентрация не достигнет некоторой критической концентрации  $C_c$ . Затем эти состояния начинают мигрировать в направлении к катоду, что соответствует началу роста тока. Если допустить, что на месте «ушедших» дефектов быстро создаются новые, тогда можно принять, что их концентрация на границе раздела «анод-диэлектрик» остается постоянной  $C(0, t) = C_s$ . Если далее предположить, что созданные дефекты не разрушаются на дальнейших стадиях процесса, то этому будет соответствовать условие равенства нулю потока на границе раздела «катод-диэлектрик»  $dC(d, t)/dx = 0$ . Большой рост тока, наблюдаемый в процессе прохождения начальной стадии формовки (в десять и более раз), позволяет допустить, что начальная концентрация дефектов в диэлектрике пренебрежимо мала по сравнению с их конечной концентрацией. Таким образом, можно принять, что  $C(x, 0) = C_0 \ll C_s$ . Полное решение одномерного уравнения диффузии с указанными граничными и начальными условиями может быть записано в следующем виде:

$$C(x, t) = C_s + (C_0 - C_s) \frac{4}{\pi} \times \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} (2n-1)^{-1} \sin(\lambda_n x) \exp(-\lambda_n^2 D t), \quad (1)$$

где  $D$  – коэффициент диффузии дефектов и  $\lambda_n = \pi \times (2n-1)/(2d)$ ,  $n = 1, 2, 3, \dots$

Уравнение (1) описывает временную эволюцию концентрации дефектов для любой точки  $x$  внутри диэлектрика. Если допустить, что ток через диэлектрик зависит только от средней концентрации дефектов, то, проинтегрировав (1) по  $x$  в области  $(0, d)$ , получим

$$C_m(t) = C_s + (C_0 - C_s) \frac{8}{\pi^2} \times \sum_{n=1, 3, 5, \dots}^{\infty} n^{-2} \exp(-n^2 k t). \quad (2)$$

Это решение может быть переписано в несколько ином виде, если ввести функцию  $\alpha(t)$ , характеризующую степень завершенности процесса диффузии:

$$\alpha(t) = (C_s - C_m(t))/(C_s - C_0) - 1 - \frac{8}{\pi^2} \times \sum_{n=1, 3, 5, \dots}^{\infty} n^{-2} \exp(-n^2 k t), \quad (3)$$

где  $k = \pi^2 D / 4d^2$ .

Рассмотрим результат аппроксимации значений зависимости  $I_{\text{снорм}} - t^{1/2}$  через МДМ-систему (рис. 2) функцией  $\alpha(t)$  методом наименьших квадратов (рис. 3). Видно, что зависимость (3) удовлетворительно описывает экспериментальные данные для всех значений  $t$ , включая область перехода от роста тока по закону  $t^{1/2}$  к насыщению. Очевидно, что полученное решение имеет только один свободный параметр  $D$ . Значение  $D$ ,

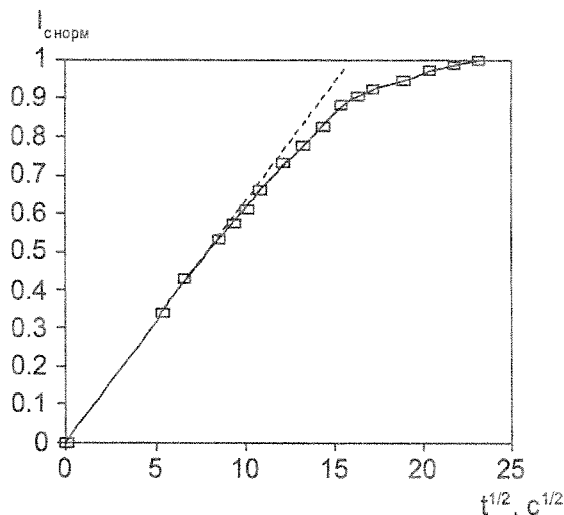


Рис. 2. Временная зависимость сквозного тока через МДМ-систему, нормализованная по величине «тока насыщения»

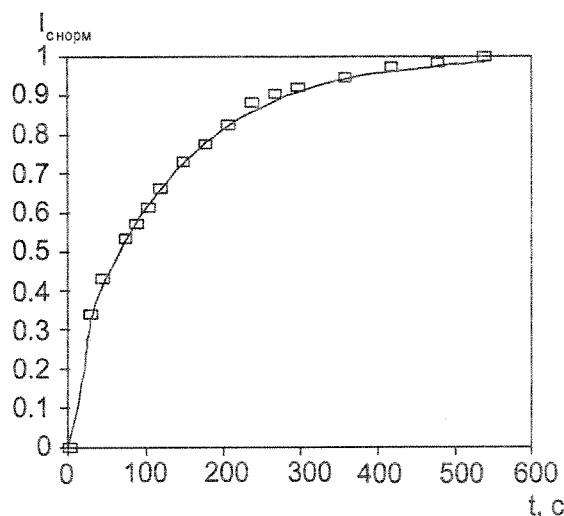


Рис. 3. Аппроксимация данных (из рис. 2) функцией  $\alpha(t)$  по методу наименьших квадратов (точки соответствуют экспериментальным данным, линия – результатам расчета)

при котором достигается наилучшее соответствие между экспериментальным и теоретическим графиками, оказалось равным  $2.7 \times 10^{-18} \text{ м}^2/\text{с}$ .

Таким образом, результаты расчета подтверждают предположение о том, что рост тока через МДМ-систему ограничен некоторым диффузионным процессом. В терминах описанной модели «ловушкооб-

Диффузия атомов и молекул в аморфный  $\text{SiO}_x$  [5].

$$D = D_0 \exp(-E/kT)$$

Вещество	$D_0(\text{м}^2/\text{с})$	$E(\text{эВ})$	$D(300 \text{ К})$
$\text{H}_0$	$1e-8$	0.18	$9.47e-12$
$\text{H}_2$	$5.65e-8$	0.45	$1.56e-15$
$\text{H}_2\text{O}$	$1e-10$	0.79	$5.35e-24$

разования» это означает, что водородосодержащее вещество, высвобожденное из областей вблизи границы раздела «анод-диэлектрик», электрически нейтрально и перемещается в объем диэлектрика посредством диффузии. В таблице приведены коэффициенты диффузии в аморфном  $\text{SiO}_x$ , а также энергии активации для трех нейтральных водородосодержащих веществ, являющихся наиболее вероятными кандидатами на роль вещества, диффузия которого может ограничивать рост сквозного тока через МДМ-систему во время первой стадии формовки.

Сопоставление приведенных в таблице данных с результатами расчета позволяет исключить воду из числа водородосодержащих веществ, могущих отвечать за процесс роста тока через МДМ-систему, наблюдаемый во время первой стадии формовки. Таким образом, наиболее вероятными кандидатами на роль водородосодержащего вещества являются молекулярный водород и атомарный кислород.

### Литература

1. Pagnia H., Sotnik N. Bistable switching in electroformed metal-insulator-metal devices // Phys. Stat. Sol. 1988. V. 108. № 11.
2. Крамор С.С., Хаскельберг М.Б. Исследование процессов формовки и деградации эмиссионных параметров тонкопленочных систем металл-диэлектрик-металл // Изв. вузов. Физика. 2000. № 7.
3. Arnold D. et al. Theory of high-field electron transport and impact ionization in silicon dioxide // Phys. Rev. B. 1994. V. 49. № 15.
4. Yankelevitch Yu.B. The thin film metal-insulator-metal system used as a non-heated source of electrons // Vacuum. 1980. V. 30. № 3.
5. Griscom D.L. Diffusion of radiolytic molecular hydrogen as a mechanism for the post-irradiation buildup of interface states in  $\text{SiO}_2$ -on-Si structures // J. of Appl. Phys. 1985. V. 58. № 7.

УДК 577.4

В.А. Дырин

## ИНТЕНСИВНОСТЬ МИНЕРАЛИЗАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ОСТАТОЧНОМ ТОРФЕ НИЗИННОЙ БОЛОТНОЙ ЭКОСИСТЕМЫ «ТАГАН» В НАЧАЛЕ ЕЕ РЕКУЛЬТИВАЦИИ

Томский государственный педагогический университет

Выработанные торфяно-болотные почвы содержат в себе еще огромные запасы органического вещества, которое, как известно, является аккумулятором разнообразнейших полезных для растений веществ, что и определяет ценность этих почв при их использовании под сельскохозяйственные угодья. В то же время выращивание растений на торфяно-болотных почвах в странах с более теплым, чем в

Сибири, климатом сопровождается сокращением толщины торфяного слоя и даже полным его исчезновением. Это исчезновение торфа, известное под названием «срабатывание», вызывается процессами выветривания, вымывания частиц почвы и т.п., но в первую очередь – чрезмерной биологической минерализацией органического вещества, осуществляемой микроорганизмами торфа [1].