

УДК 537.29

МИГРАЦИЯ ХРОМА ПО ПОВЕРХНОСТИ ОКСИДА КРЕМНИЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СИЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

© 2024 г. И. В. Уваров^{а,*}, Л. А. Мазалецкий^а

^аЯрославский филиал Физико-технологического института
им. К.А. Валиева РАН, НИЦ “Курчатовский институт”, Ярославль, 150067 Россия

*e-mail: i.v.uvarov@bk.ru

Поступила в редакцию 12.04.2024 г.

После доработки 16.06.2024 г.

Принята к публикации 16.06.2024 г.

Продemonстрирована миграция хрома, играющего роль адгезионного материала для планарных электродов МЭМС-переключателя, по поверхности термически окисленной кремниевой пластины. Подача импульсов напряжения приводит к образованию наноструктур из хрома и углерода на управляющем электроде и их росту в направлении коммутируемого электрода. С течением времени структуры достигают микронного размера и перекрывают межэлектродный зазор. Миграцию активирует электрическое поле напряженностью порядка 10^8 В/м. Первые структуры формируются после подачи 10^2 – 10^5 импульсов, но по мере их роста процесс ускоряется. В случае электродов из платины миграция проходит быстрее и требует меньшего напряжения по сравнению с электродами из золота. Перенос материала происходит не только в зазоре между электродами, но также на поверхности SiO_2 вокруг положительного электрода. Материал также перемещается под пленками Pt и Au, вызывая их отслоение от подложки. Описанные явления могут выводить из строя МЭМС-переключатели с электростатическим управлением и другие устройства, использующие сильные электрические поля.

Ключевые слова: МЭМС, переключатель, электроды, адгезионный слой, хром, миграция, дрейф, оксид кремния, углерод, электрическое поле.

DOI: 10.31857/S1028096024110012, **EDN:** REXKJQ

ВВЕДЕНИЕ

Последние десятилетия характеризуются интенсивным развитием радиоэлектроники. Миниатюризация, снижение энергопотребления и увеличение быстродействия радиоэлектронной аппаратуры требует использования передовых электронных компонентов, в том числе переключателей, осуществляющих коммутацию сигналов ВЧ- и СВЧ-диапазонов. Широким потенциалом применения обладают переключатели, изготовленные по технологии микроэлектромеханических систем (МЭМС) [1]. Для них характерны различные принципы управления [2, 3], среди которых наиболее перспективным является электростатический принцип. В электростатическом переключателе подвижная балка микронных

размеров располагается над управляющим и коммутируемым электродами планарной конфигурации. На управляющий электрод подается напряжение. Балка изгибается под действием электростатической силы и приходит в контакт с коммутируемым электродом, замыкая электрическую цепь. Ключ имеет латеральный размер порядка 100 мкм, энергопотребление на уровне 1 мкВт и время срабатывания около 10 мкс, а по частотным характеристикам не уступает электромеханическим реле [4]. Таким образом, МЭМС-переключатели сочетают в себе достоинства традиционно применяемых электромеханических и полупроводниковых изделий.

Электроды МЭМС-переключателя формируются на диэлектрической подложке и обычно

располагаются на расстоянии нескольких микрометров друг от друга. Потенциал управляющего электрода составляет несколько десятков вольт относительно балки, в то время как потенциал коммутируемого электрода близок к нулю [5]. Напряженность электрического поля между электродами достигает 10^8 В/м. Это значение не превышает электрической прочности традиционно используемых диэлектриков, таких как оксид [6] или нитрид кремния [7]. Однако сильное поле может вызвать другие эффекты, в том числе дрейф ионов металла [8]. В настоящей работе продемонстрирована миграция хрома, выступающего в качестве адгезионного материала для электродов из платины и золота. Миграция приводит к образованию структур микронного размера на поверхности SiO_2 вокруг управляющего электрода, способных вывести ключ из строя. Подробно исследован процесс роста структур, и рассмотрены его возможные причины.

МЕТОДИКА

Миграция адгезионного материала была обнаружена в ходе испытаний МЭМС-переключателя, оснащенного механизмом активного размыкания [9]. Образец содержит две пары управляющих и коммутируемых электродов, схематично изображенных на рис. 1 (подвижная балка, расположенная над электродами, на рисунке не показана). Электроды сформированы на кремниевой пластине толщиной 460 мкм с удельным сопротивлением 12 Ом·см, покрытой термически выращенным слоем SiO_2 толщиной 1 мкм. Они имеют двухслойную структуру: слой платины или золота толщиной 100 нм нанесен методом магнетронного распыления в среде аргона на адгезионный слой хрома толщиной 10 нм. Расстояние между управляющим и коммутируемым электродами составляет 2 мкм. Подробное описание образцов представлено в [10].

Испытание переключателя проводили в нормальных условиях без корпусирования. Балка и коммутируемые электроды были заземлены, а на управляющие электроды поочередно подавали прямоугольные импульсы напряжения от источников питания Keysight E36106A. Длительность каждого импульса составляла 0.15 с, амплитуда V — от 60 до 100 В. Ток, протекающий через образец, регистрировал встроенный амперметр с точностью 1 мкА. Работу переключателя контролировали визуально с помощью оптического микроскопа, оснащенного камерой Moticam 1SP. Образцы исследовали с помощью растровых электронных микроскопов (РЭМ) FEI Quanta 3D 200i и Zeiss Supra 40. Химический состав образцов

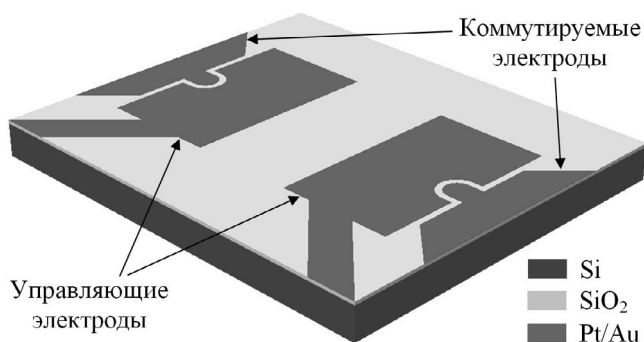


Рис. 1. Схематичное изображение электродов переключателя.

определяли с использованием рентгеновского энергодисперсионного спектрометра Oxford Instruments INCA x-ACT, установленного в РЭМ Supra 40, при ускоряющем напряжении 8 кВ.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Миграция в зазоре между электродами

В ходе испытаний переключатели выходили из строя вследствие залипания или короткого замыкания после нескольких сотен или тысяч циклов коммутации. С целью выяснения причин выхода из строя балка была удалена, а импульсы напряжения подавали на управляющие электроды согласно описанной выше процедуре. Через несколько сотен циклов на краю управляющего электрода появлялись структуры размером несколько сотен нанометров (рис. 2). На электродах из платины структуры формировались быстрее и при меньшей амплитуде импульсов, чем на электродах из золота. В случае платины первые образования были заметны уже после подачи 500 импульсов с $V_g = 60$ В (рис. 2а), в то время как в случае золота структуры появлялись после 10^5 импульсов с $V_g = 100$ В (рис. 2б). Вероятно, более быстрому росту структур на платиновых электродах способствовали каталитические свойства этого металла.

По мере подачи импульсов размер структур увеличивался. Некоторые из них перекрывали зазор между электродами (рис. 3). Структура имеет форму полосы шириной около 500 нм и высотой 100 нм. В табл. 1 представлены результаты определения химического состава полосы (область 1) и соседней поверхности SiO_2 (область 2). Оба участка содержат небольшое количество углерода, обусловленное контаминацией, но на структуре процент С примерно вдвое выше. В области 1 регистрируется хром, отсутствующий на свободной поверхности SiO_2 , а также пониженное содержание кислорода и кремния по сравне-

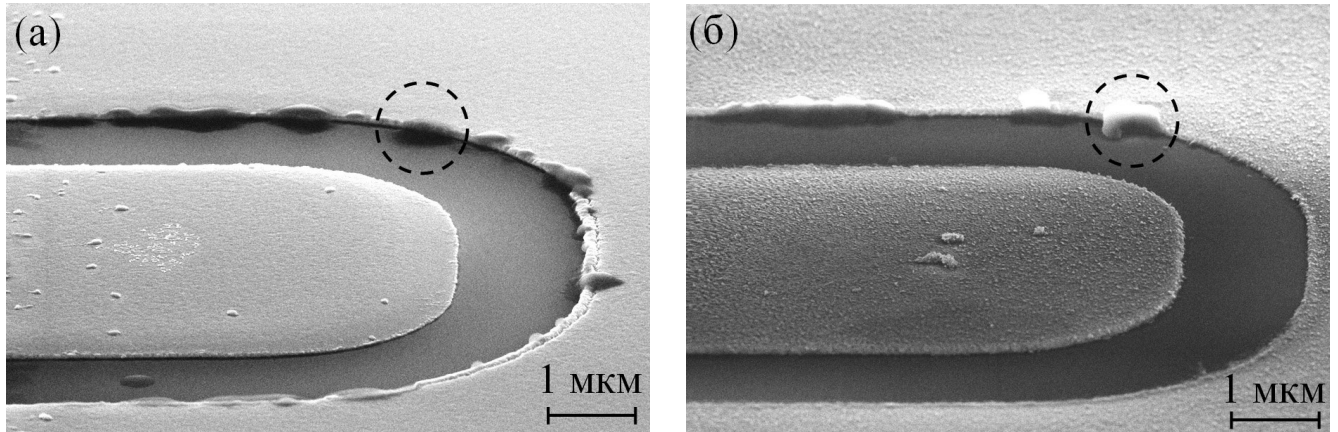


Рис. 2. РЭМ-изображения электродов из платины (а) и золота (б), полученные под углом 20° к плоскости подложки.

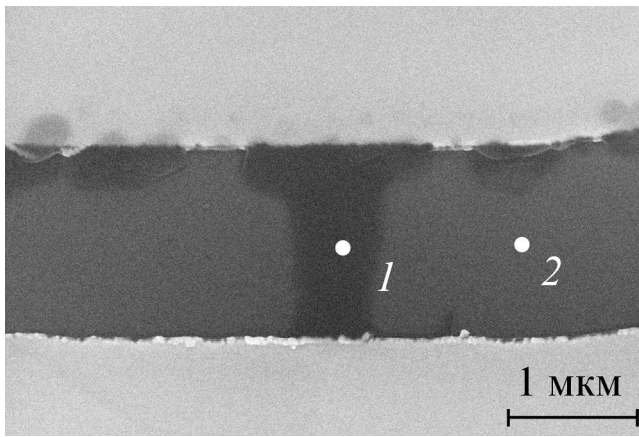


Рис. 3. Структуры в зазоре между платиновыми электродами, сформировавшиеся в результате подачи 10^4 импульсов, вид сверху. Белыми точками обозначены области энергодисперсионного анализа.

Таблица 1. Химический состав (ат. %) образца, изображенного на рис. 3

Химический элемент	Область 1	Область 2
C	2.69	1.40
O	62.80	66.59
Si	27.41	32.11
Cr	6.99	0.00
Pt	0.02	0.01

нию с подложкой. Видимо, материал структуры частично экранирует SiO_2 от бомбардирующих электронов и ослабляет рентгеновское излучение, идущее из этого слоя. Платина практически не детектируется в обеих областях. Эти данные позволяют предположить, что материалом струк-

тур является хром в комбинации с углеродом. Единственным источником Cr служит адгезионный слой электродов.

Полагая, что структура, изображенная на рис. 3, состоит из чистого хрома с удельным сопротивлением $\rho = 12.5 \text{ мкОм}\cdot\text{см}$ [11], можно оценить ее сопротивление как $R_s = \rho l / (wh) = 5 \text{ Ом}$, где $l = 2.0$, $w = 0.5$ и $h = 0.1 \text{ мкм}$ — длина, ширина и высота структуры. Сигнальные дорожки, соединяющие электроды с контактными площадками, обладают сопротивлением $R_L = 35 \text{ Ом}$. Общее сопротивление цепи между площадками должно составлять $R = R_s + R_L = 40 \text{ Ом}$, однако измерение дает несколько десятков мегаом. Следовательно, материал структур обладает удельным сопротивлением порядка $10^8 \text{ мкОм}\cdot\text{см}$. Эта величина существенно превышает сопротивление карбидов хрома, как правило, находящееся в диапазоне от 10 до $10^3 \text{ мкОм}\cdot\text{см}$ [12, 13]. Однако электрические свойства системы Cr—C сильно зависят от соотношения атомов Cr и C [12], а также от количества включений Ag и O [13]. Полученное удельное сопротивление может соответствовать богатому углеродом материалу с паразитными включениями.

Дальнейшая подача импульсов напряжения приводила к слиянию отдельных структур в более крупные образования высотой до 1 мкм (рис. 4). Химический анализ подтвердил наличие в них хрома и углерода, а также отсутствие платины. Эти данные согласуются с химическим составом вышеописанных структур. Столь высокие образования являлись причиной выхода переключателя из строя. Балка контактировала с ними, в результате происходило залипание. Кроме того, вследствие относительно большого размера сопротивление структур было достаточно малым для того, чтобы вызвать короткое замыкание управляющего и коммутируемого электродов.

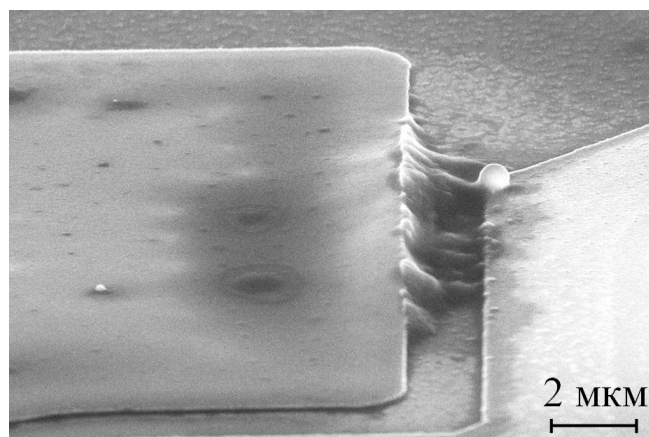


Рис. 4. Крупные структуры, сформировавшиеся между платиновыми электродами в результате подачи 2×10^4 импульсов. РЭМ-изображение получено под углом 20° к плоскости подложки.

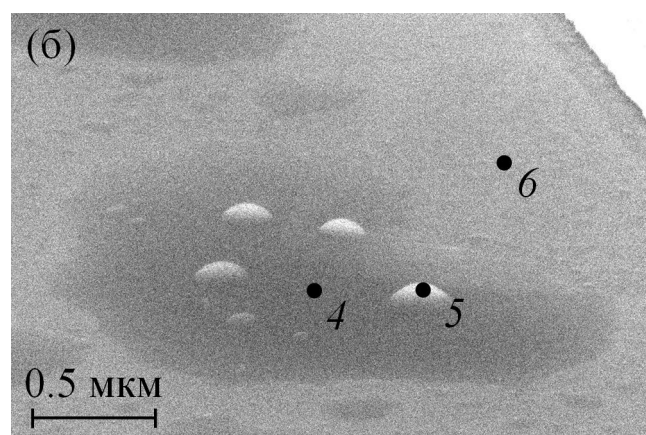
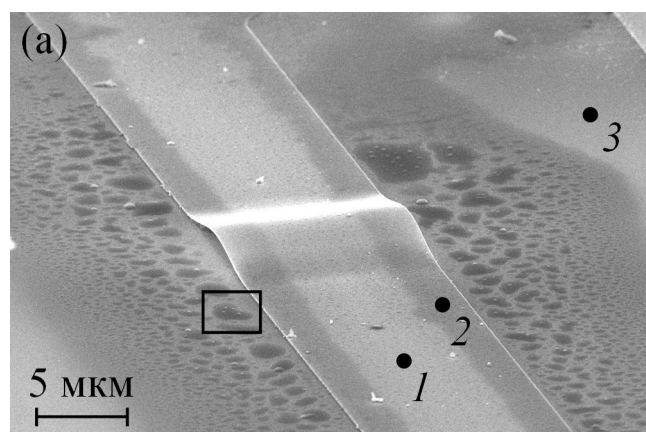


Рис. 5. Общий вид соединительной линии управляющего электрода после подачи 10^4 импульсов (а). Увеличенное РЭМ-изображение участка поверхности, выделенного прямоугольником (б). Точками обозначены области энергодисперсионного анализа.

Миграция вокруг положительного электрода

Наряду с образованием структур между электродами изменялась поверхность SiO_2 вокруг управляющего электрода и его соединительной дорожки. Это изменение было практически незаметно в оптический микроскоп, но хорошо наблюдалось в РЭМ. Образец показан на рис. 5а. Вокруг дорожки на поверхности SiO_2 находится темная область с более темными пятнами внутри. Вблизи дорожки размер пятен достигает 4 мкм и уменьшается по мере удаления от нее. Крупные пятна содержат светлые полусферические структуры размером 100–200 нм (рис. 5б).

Химический состав образца представлен в табл. 2. Пятна на поверхности SiO_2 (область 4) демонстрируют повышенное содержание Cr и C по сравнению с участком между пятнами (область 6). Концентрация этих элементов в полусферической структуре (область 5) еще выше и достигает 5.6 и 3.5% соответственно. Потемневшая поверхность SiO_2 отличается от исходной поверхности (область 3) несколько большим содержанием углерода и незначительным присутствием хрома. За пределами дорожки платина не детектируется. Следовательно, хром в комбинации с углеродом мигрирует с образованием пятен и объемных структур на поверхности SiO_2 . Можно также заметить, что край дорожки темнее, чем центральная часть. В светлой и темной областях (зоны 1 и 2) содержание хрома составляет 0.5 и 1.0% соответственно, хотя исходная пленка Cr/Pt обычно демонстрирует содержание хрома около 1.5%. По-видимому, хром перемещается от центра дорожки к краю и далее распространяется по подложке.

Модификация SiO_2 сопровождалась отслоением соединительной дорожки от подложки, заметным на рис. 5а. РЭМ-исследование показало, что пространство под отслоившимся участком заполнено материалом. На вершине этого участка регистрируется 4.6 ат. % хрома, в то время как не отслоившаяся область содержит лишь 0.1 ат. % хрома. Таким образом, деформация дорожки обусловлена скоплением хрома под пленкой платины. Однако в отличие от ранее показанных структур отслоившийся участок демонстрирует меньшее содержание углерода по сравнению с неповрежденной областью. Следовательно, углерод не участвует в переносе материала под электродом в отличие от процессов, происходящих на открытой поверхности SiO_2 . Это объясняется более низким содержанием углеродных остатков и загрязнений под пленкой платины по сравнению с открытой поверхностью.

Таблица 2. Химический состав (ат. %) образца, изображенного на рис. 5

Химический элемент	Область 1	Область 2	Область 3	Область 4	Область 5	Область 6
C	12.90	11.00	1.58	2.33	3.46	2.13
O	10.54	12.96	66.53	65.78	63.72	65.39
Si	16.63	16.98	31.94	29.45	26.04	32.06
Cr	0.47	0.99	0.00	2.03	5.58	0.02
Pt	51.19	51.20	0.00	0.00	0.00	0.00

Температура и электрическое поле

Миграцию хрома можно объяснить диффузией атомов в результате нагрева образца электрическим током. Для оценки температуры был измерен ток, протекающий через электроды в процессе роста структур. Использовали платиновый образец с предварительно сформированными крупными структурами (рис. 4). Сигнальный электрод был заземлен, а потенциал управляющего электрода V_g постепенно увеличивался от нуля до 15 В в течение 30 с (рис. 6). График также иллюстрирует изменение тока I . В течение первых 5 с напряжение увеличивалось от нуля до 6 В, ток не превышал 1 мкА. Подъем V_g до 8 В на шестой секунде вызвал скачок тока до 12 мкА и активировал образование структур в зазоре между электродами. С шестой по пятнадцатую секунды структуры продолжали расти, и происходило отслоение дорожки. В течение следующих 15 с напряжение постепенно увеличивалось до 15 В, но ток не превышал 7 мкА. Таким образом, ток находился на уровне нескольких микроампер, несмотря на присутствие круп-

ных структур в межэлектродном зазоре. Малая величина тока объясняется большим удельным сопротивлением мигрирующего материала.

В ходе эксперимента через электроды протекал усредненный по времени ток $I = 5$ мкА. Эта величина была использована для оценки нагрева дорожки длиной 200 мкм и шириной 10 мкм (рис. 5а). Джоулево тепло в дорожке составляет $Q = I^2 R_L t = 16$ нДж, где $R_L = 20$ Ом — ее сопротивление, $t = 30$ с — длительность процесса. При отсутствии теплообмена с подложкой и окружающим воздухом это количество теплоты увеличивает температуру на $\Delta T = Q / (C_{Pt} \xi_{Pt} V) = 28$ К, где $C_{Pt} = 0.133$ Дж/(г·К) и $\xi_{Pt} = 21.5$ г/см³ — теплоемкость и плотность платины [11], $V = 200$ мкм³ — объем дорожки. Полученное изменение температуры является максимальной оценкой, поскольку в эксперименте имел место теплообмен.

Как правило, диффузию металлов в SiO₂ активирует нагрев до нескольких сотен градусов [14], однако наблюдаемая миграция хрома происходила без существенного увеличения температуры образца. Таким образом, тепловая диффузия отсутствовала, а перенос хрома происходил под действием электрического поля. Для распределения поля в слое SiO₂ были проведены простые электростатические расчеты методом конечных элементов. При максимальном напряжении $V_g = 100$ В вблизи электрода напряженность поля не превышала 1.5×10^8 В/м, а вокруг дорожки она составляла не более 0.5×10^8 В/м [10]. Таким образом, напряженность поля не превосходила электрической прочности SiO₂, составляющей 3.0×10^8 В/м [6], и локальный пробой SiO₂ также не являлся причиной переноса материала.

ОБСУЖДЕНИЕ

Эксперименты, выполненные на образцах с удаленной балкой, выявили причину выхода МЭМС-переключателя из строя. Под действием

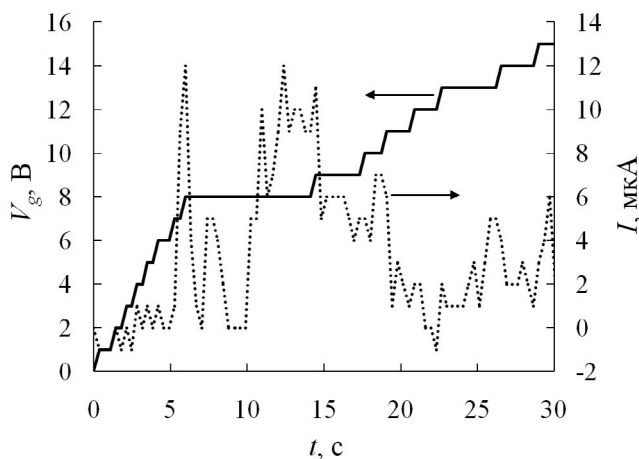


Рис. 6. Зависимость управляющего напряжения и тока, протекающего через платиновые электроды, от времени.

импульсов напряжения хром в сочетании с углеродом формировал объемные структуры, которые зарождались на положительном электроде и росли по направлению к заземленному электроду. С ростом числа поданных импульсов структуры увеличивались в размере, перекрывали межэлектродный зазор и приходили в контакт с балкой, что вызывало короткое замыкание или залипание. Рост структур сопровождался миграцией хрома по подложке SiO_2 и его агломерацией в пятна и полусферические образования. Хром также агломерировал под поверхностью электрода, вызывая его отслоение. Скорость роста структур значительно варьировалась от образца к образцу. Формирование небольших структур обычно требовало подачи от 10^2 до 10^5 импульсов, но с увеличением размера процесс ускорялся. Таким образом, миграция хрома снижала надежность МЭМС-переключателя, ограничивая срок службы весьма низкой величиной в 10^3 – 10^6 рабочих циклов.

Ток, протекающий через электроды в ходе роста структур, составлял несколько микроампер и нагревал образец незначительно, поэтому тепловая диффузия не вносила вклад в миграцию хрома. Вероятной причиной переноса хрома являлся дрейф ионов металла в диэлектрике под действием электрического поля. Этот эффект включает в себя формирование положительных ионов на границе металл–диэлектрик и их последующее движение в направлении отрицательного электрода [8]. Его используют в качестве рабочего принципа резистивной памяти [15]. Приложение напряжения к активному электроду приводит к растворению металла в диэлектрике как в твердом электролите и формированию проводящей нити, соединяющей электроды. Ряд работ [16–19] демонстрирует формирование нитей в SiO_2 . Дрейф ионов активирован электрическим полем напряженностью 10^7 – 10^8 В/м, близкой по величине к рассматриваемой системе. В качестве дрейфующих металлов обычно используют серебро и медь вследствие легкости окисления и высокой подвижности ионов. Благородные металлы, в том числе Au и Pt, не демонстрируют дрейфа вследствие их высокой химической инертности [15]. Именно поэтому они не были обнаружены в химическом составе структур. Титан, часто применяемый в качестве адгезионного материала, реагирует с поверхностью SiO_2 и образует оксид титана, который выступает диффузионным барьером и препятствует проникновению металла [14]. Это объясняет, почему миграция не наблюдалась у переключателей с титановым подслоем [20].

Хром, как и титан, имеет сильное сродство к кислороду и образует тонкий оксидный слой на границе раздела Cr– SiO_2 [21]. Этот слой предотвращает дрейф ионов в объеме SiO_2 под действием поля. Однако в отличие от ячеек памяти, представляющих собой структуры металл–диэлектрик–металл и использующих дрейф в объеме диэлектрика [15], рассматриваемые электроды имели планарную конфигурацию. Следовательно, большое значение могли иметь поверхностные эффекты. Представленные данные свидетельствуют о том, что миграция происходила именно на поверхности SiO_2 , но окончательное подтверждение этого тезиса требует дополнительного исследования.

Адгезионный слой хрома широко применяется в электростатических МЭМС-переключателях, сформированных на SiO_2 [22–26], но сообщения о миграции хрома под действием поля в литературе отсутствуют. По-видимому, этот эффект был обусловлен особенностями технологии изготовления образцов. В частности, плазменное травление жертвенного слоя могло активировать поверхность SiO_2 и снизить потенциальный барьер для дрейфа ионов. В дальнейшем планируется выполнить детальный анализ слоя SiO_2 на различных этапах процесса изготовления. Необходимо выяснить условия возникновения миграции, чтобы избежать ее нежелательных последствий для работоспособности переключателей и других МЭМС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе продемонстрирована миграция хрома по поверхности термически окисленной кремниевой пластины. Эффект обнаружен на планарных электродах МЭМС-переключателя, изготовленных из платины и золота с адгезионным подслоем хрома. Импульсы напряжения вызывают появление наноструктур на управляющем электроде и их рост в направлении коммутируемого электрода. Структуры объединяются в образования микронного размера, выводящие переключатель из строя вследствие залипания или короткого замыкания. Энергодисперсионный анализ показывает, что структуры состоят из хрома и углерода. По-видимому, их рост объясняется миграцией Cr по SiO_2 под действием электрического поля напряженностью порядка 10^8 В/м. Скорость миграции существенно меняется от образца к образцу. Небольшие структуры появляются после 10^2 – 10^5 рабочих циклов, но по мере их роста процесс ускоряется. В случае платиновых электродов миграция проходит быстрее и при меньшей амплитуде импульсов

по сравнению с электродами из золота. Вероятно, роль играет каталитическая активность платины. Перенос материала наблюдается не только в зазоре между электродами, но также вокруг управляющего электрода и его соединительной линии, где продукты миграции агломерируют в пятна и полусферические образования. Кроме того, материал перемещается под пленками Au и Pt, вызывая отслоение электрода от подложки. Оксид хрома блокирует проникновение ионов хрома в объем SiO_2 , поэтому миграция происходит на поверхности диэлектрика. Обнаруженный эффект может негативно влиять на работоспособность электронных устройств, поэтому условия его возникновения требуют дальнейшего исследования.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания ФТИАН им. К.А. Валиева РАН (тема № FFNN-2022-0017) с использованием оборудования Центра коллективного пользования “Диагностика микро- и наноструктур”.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Rebeiz G.M.* RF MEMS: Theory, Design, and Technology. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2003. 512 p.
2. *Cao T., Hu T., Zhao Y.* // *Micromachines*. 2020. V. 11. P. 694.
Doi: 10.3390/mi11070694
3. *Kurmendra, Kumar R.* // *Microsyst. Technol.* 2021. V. 27. P. 2525.
Doi: 10.1007/s00542-020-05025-y
4. *Rebeiz G.M., Patel C.D., Han S.K., Ko C.-H., Ho K.M.J.* // *IEEE Microw. Mag.* 2013. V. 14. P. 57.
Doi: 10.1109/MMM.2012.2226540
5. *Patel C.D., Rebeiz G.M.* // *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.* 2011. V. 59. P. 1230.
Doi: 10.1109/TMTT.2010.2097693
6. *Klein N., Gafni H.* // *IEEE Trans. Electron Dev.* 1966. V. ED-13. P. 281.
Doi: 10.1109/T-ED.1966.15681
7. *Sze S.M.* // *J. Appl. Phys.* 1967. V. 38. P. 2951.
Doi: 10.1063/1.1710030
8. *He M., Lu T.-M.* Metal-Dielectric Interfaces in Gigascale Electronics. New York, NY: Springer Science+Business Media, LLC, 2012. 149 p.
9. *Uvarov I.V., Kupriyanov A.N.* // *Russ. Microelectron.* 2018. V. 47. P. 307.
Doi: 10.1134/S1063739718050086
10. *Uvarov I.V.* // *Microelectron. Reliab.* 2021. V. 125. P. 114372.
Doi: 10.1016/j.microrel.2021.114372
11. *Lide D.R.* CRC Handbook of Chemistry and Physics. Boca Raton: CRC Press/Taylor and Francis, 2009. 2760 p.
12. *Groudeva-Zotova S., Vitchev R.G., Blanpain B.* // *Surf. Interface Anal.* 2000. V. 30. P. 544.
Doi: 10.1002/1096-9918(200008)30:1<544::AID-SIA814>3.0.CO;2-7
13. *Marechal N., Quesnel E., Pauleau Y.* // *J. Mater. Res.* 1994. V. 9. P. 1820.
Doi: 10.1557/JMR.1994.1820
14. *McBrayer J.D., Swanson R.M., Sigmon T.W.* // *J. Electrochem. Soc.* 1986. V. 133. P. 1242.
Doi: 10.1149/1.2108827
15. *Valov I., Waser R., Jameson J.R., Kozicki M.N.* // *Nanotechnology*. 2011. V. 22. P. 254003.
Doi: 10.1088/0957-4484/22/25/254003
16. *Tappertzhofen S., Mundelein H., Valov I., Waser R.* // *Nanoscale*. 2012. V. 4. P. 3040.
Doi: 10.1039/C2NR30413A
17. *Tappertzhofen S., Menzel S., Valov I., Waser R.* // *Appl. Phys. Lett.* 2011. V. 99. P. 203103.
Doi: 10.1063/1.3662013
18. *Thermadam S.P., Bhagat S.K., Alford T.L., Sakaguchi Y., Kozicki M.N., Mitkova M.* // *Thin Solid Films*. 2010. V. 518. P. 3293.
Doi: 10.1016/j.tsf.2009.09.021
19. *Yao J., Zhong L., Zhang Z., He T., Jin Z., Wheeler P.J., Natelson D., Tour J.M.* // *Small*. 2009. V. 5. P. 2910.
Doi: 10.1002/smll.200901100
20. *Uvarov I.V., Kupriyanov A.N.* // *Microsyst. Technol.* 2019. V. 25. P. 3243.
Doi: 10.1007/s00542-018-4188-4
21. *Jiang N., Silcox J.* // *J. Appl. Phys.* 2000. V. 87. P. 3768.
Doi: 10.1063/1.372412
22. *Zhang X., Adelegan O.J., Yamaner F.Y., Oralkan O.* // *J. Microelectromech. Syst.* 2018. V. 27. P. 190.
Doi: 10.1109/JMEMS.2017.2781255
23. *Shekhar S., Vinoy K.J., Ananthasuresh G.K.* // *J. Micromech. Microeng.* 2018. V. 28. P. 075012.
Doi: 10.1088/1361-6439/aaba3e
24. *Liu Y., Bey Y., Liu X.* // *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.* 2016. V. 64. P. 3151.
Doi: 10.1109/TMTT.2016.2598170
25. *Song Y.-H., Kim M.-W., Lee J.O., Ko S.D., Yoon J.B.* // *J. Microelectromech. Syst.* 2013. V. 22. P. 846.
Doi: 10.1109/JMEMS.2013.2248125
26. *Song Y.-H., Han C.-H., Kim M.-W., Lee J.O., Yoon J.-B.* // *J. Microelectromech. Syst.* 2012. V. 21. P. 1209.
Doi: 10.1109/JMEMS.2012.2198046

Migration of Chromium on the Silicon Oxide Surface under the Strong Electric Field

I. V. Uvarov^{1,*}, L. A. Mazaletsky¹

¹*Valiev Institute of Physics and Technology RAS, Yaroslavl Branch, NRC “Kurchatov Institute”, Yaroslavl, 150067 Russia*

**e-mail: i.v.uvarov@bk.ru*

Migration of chromium, which acts as an adhesive material for planar electrodes of a MEMS switch, over the surface of a thermally oxidized silicon wafer is demonstrated. Voltage pulses lead to the formation of chromium and carbon nanostructures on the driving electrode and their growth towards the signal electrode. Over time, the structures reach micron sizes and cover the interelectrode gap. Migration is activated by an electric field of about 10^8 V/m. The first structures appear after applying 10^2 – 10^3 pulses, but the process accelerates as they grow. For platinum electrodes, migration is faster and requires lower voltage compared to gold electrodes. Material transfer occurs not only in the gap between the electrodes, but also on the SiO_2 surface around the positive electrode. The material also moves under the Pt and Au films, peeling them off from the substrate. The described phenomena can damage electrostatically actuated MEMS switches and other devices that use high electric fields.

Keywords: MEMS, switch, electrodes, adhesive layer, chromium, migration, drift, silicon oxide, carbon, electric field.