

Эффект переключения проводимости в МДП структурах с диэлектриками на базе кремния, полученными методом низкочастотного плазмохимического осаждения

© А.Е. Бердников[¶], В.Н. Гусев, А.А. Мироненко, А.А. Попов, А.В. Перминов, А.С. Рудый, В.Д. Черномордик

Ярославский филиал Физико-технологического института Российской академии наук, 150007 Ярославль, Россия

(Получена 25 июня 2012 г. Принята к печати 25 июля 2012 г.)

Исследованы вольт-амперные характеристики МДП структур с диэлектриками на базе оксида кремния, полученных низкочастотным (55 кГц) плазмохимическим осаждением. Особенностью используемых диэлектриков были включения частиц других материалов с меньшей шириной запрещенной зоны. Установлено, что такие структуры обладают свойством биполярного переключения проводимости. Наилучшими характеристиками эффекта переключения проводимости обладали МДП структуры с многослойным диэлектриком, содержащим дополнительные слои нитрида кремния нанометровой толщины.

1. Введение

В настоящее время широко исследуются возможности создания энергонезависимой перепрограммируемой памяти на базе эффектов изменения состояний твердого тела, таких как изменение фазового состава (phase-change random access memory (PRAM), conductive bridge RAM (CBRAM), resistance change RAM (RRAM)), электрической поляризации (ferroelectric RAM (FERAM)) или намагнитичности (magnetoresistive RAM (MRAM)). Перечисленные подходы, как правило, требуют использования нетрадиционных для классической микроэлектронной технологии материалов, например редкоземельных элементов. Из практических соображений было бы удобно использовать материалы на базе кремния. В данной работе мы исследовали МДП структуры на базе кремния, обладающие S-образными вольт-амперными характеристиками (ВАХ) при одной полярности приложенного напряжения и N-образными при другой. При уменьшении приложенного напряжения до нуля структуры сохраняют состояние своей проводимости. Таким образом, переключение проводящего состояния структуры происходит в зависимости от полярности приложенного напряжения, превышающего определенный порог (биполярный эффект переключения).

Ранее биполярный эффект переключения проводящего состояния наблюдался в структурах типа проводник–диэлектрик–проводник с различными диэлектриками (широкозонными полупроводниками). В частности, в халькогенидных стеклообразных полупроводниках, один из контактных электродов к которому был выполнен из серебра [1], во фториде эрбия и оксиде иттербия [2,3], оксиде титана [4,5], в полимерах, в том числе в многослойных, с промежуточной тонкой металлической пленкой [6,7], представляющей собой наноразмерные металлические кластеры. В настоящее время проводятся широкие исследования по разработке приборов RRAM и

CBRAM, использующих эффект переключения проводимости в оксиде гафния, оксиде тантала [8], а также в некоторых других структурах.

Основными проблемами таких разработок являются плохая воспроизводимость эффекта переключения проводимости состояния структур и недостаточная масштабируемость структур. Причина этих проблем кроется в неоднородности материала диэлектрика, обусловленной его поликристаллической структурой. Мы исследовали эффект переключения проводимости в МДП структурах на основе аморфных широкозонных полупроводников (диэлектриков) на базе кремния, полученных методом плазмохимического осаждения из газовой фазы в низкочастотном (55 кГц) разряде (LF PECVD) [9]. Использование аморфных материалов позволит решить указанные выше проблемы за счет отсутствия границ кристаллитов в структуре используемых функциональных материалов.

2. Эксперимент

Для изучения эффекта переключения были изготовлены МДП структуры. В качестве полупроводника использовались кремниевые пластины p-типа или n-типа проводимости. На обратную сторону кремниевой пластины наносилась металлическая пленка. Для обеспечения омического контакта между пластиной и пленкой металла обратная сторона пластин подвергалась дополнительному легированию соответственно бором или фосфором до уровня порядка 10^{19} см^{-3} . Лицевая сторона кремниевых пластин перед нанесением пленок диэлектриков при необходимости также подвергалась легированию до уровня порядка $10^{15} - 10^{19} \text{ см}^{-3}$.

Осаждение пленок аморфных широкозонных полупроводников и диэлектриков производилось на установке низкочастотного плазмохимического осаждения „MiniGoupyl“ при температурах до 450°C. В качестве источника материалов использовались газовые смеси NO/SiH₄ для оксида кремния и NH₃/SiH₄ для

[¶] E-mail: berdnikov@recnti.uniyar.ac.ru

нитрида кремния. Для получения указанных смесей применялись особочистые газы для микроэлектроники. Меняя состав газовой смеси, можно получать пленки различного состава, от близкого к стехиометрическому до произвольного с избытком кремния [10]. Плотность мгновенной мощности газового разряда составляла $0.05\text{--}0.15\text{ Вт/см}^2$ при пульсирующем режиме горения разряда ($t_{\text{on}} = 1.2\text{ мс}$, $t_{\text{off}} = 4.8\text{ мс}$).

Метод LF PECVD имеет ряд особенностей. Во-первых, как нами было ранее установлено, в газовой фазе в результате газовой полимеризации силановых радикалов могут образовываться наноразмерные кремниевые кластеры. В дальнейшем, в условиях низкочастотного разряда, эти кластеры могут встраиваться в осаждаемую аморфную пленку. Во-вторых, показано, что в процессе осаждения нестехиометрического нитрида кремния избыток кремния выделяется в объеме формируемого материала в виде наноразмерных кластеров кремния [10].

Металлический электрод толщиной $0.3\text{--}0.7\text{ мкм}$ к диэлектрической пленке МДП структуры формировался магнетронным либо электронно-лучевым напылением. Отдельные МДП структуры формировались путем напыления металла через маску, либо методом фотолитографии сплошной напыленной пленки. Площадь металлических контактов МДП элементов составляла от 100 мкм^2 до 100 мм^2 . Были опробованы различные типы металлов, работа выхода электронов из которых была как меньше, так и больше работы выхода из кремния, а именно: алюминий, ванадий, никель, хром, титан, платина, сплав вольфрама, содержащий 10% титана, и индий, наносимый в расплавленном состоянии. Разницы в эффекте переключения проводимости при использовании в качестве диэлектрика обогащенного кремнием оксида кремния обнаружено не было. В связи с этим в большинстве изготовленных нами МДП структур применялся алюминий, как наиболее технологичный материал. Для формирования контакта с обратной стороны кремниевой пластины использовался алюминий толщиной $0.3\text{--}0.5\text{ мкм}$. При его нанесении контролировался омический режим работы перехода металл–полупроводник.

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) МДП структур измерялись на автоматическом измерителе параметров полупроводниковых приборов ИППП-1/2.

Изготовленная исходная МДП структура находится в закрытом состоянии. При подаче отрицательного напряжения ($5\text{--}10\text{ В}$) к металлическому электроду структуры (прямое включение) ток через структуру не идет. При подаче положительного напряжения к металлическому электроду МДП структуры (обратное включение) ток был так же незначительным. Но при увеличении напряжения до некоторой пороговой величины ($5\text{--}10\text{ В}$ для различных исследуемых структур) ток через МДП структуру резко возрастал, что показано на рис. 1. При последующем снижении напряжения ток плавно уменьшался примерно по параболическому закону. При повторном увеличении обратного напряжения и его уменьшении ВАХ повторяла эту параболическую ветвь.

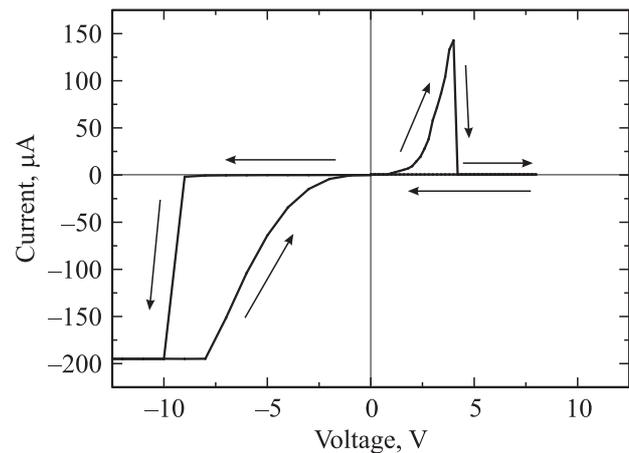


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика МДП структуры при переключениях состояния проводимости.

Это означало, что структура переключалась в открытое состояние.

При последующем прямом включении МДП структуры, переключенной в открытое состояние, ток плавно возрастает по параболическому закону и при некотором пороговом напряжении резко, на $3\text{--}4$ порядка, уменьшается. При последующем увеличении или уменьшении напряжения ток остается малым. Таким образом, МДП структура переключается в закрытое состояние.

При последующем обратном включении закрытая МДП структура вновь переходит в открытое состояние, а при последующем прямом включении при определенном пороговом напряжении структура переходит в закрытое состояние. Таким образом, можно переключать структуру в проводящее или непроводящее состояние приложением напряжения соответствующей полярности и величиной, превышающей соответствующий порог переключения.

Структура остается в открытом или закрытом состоянии, если напряжение, прикладываемое к такой структуре ниже порога переключения проводимости. Следовательно, определение состояния, в котором находится структура, возможно приложением небольшого напряжения любой полярности. Протекающий при этом в течение длительного времени (минимум в течение часа) ток переключения проводимости не вызывает. Характерной особенностью проводящего состояния МДП структуры, представленной на рис. 2, является наличие колебаний амплитуды тока при приложении постоянного напряжения. Состояние проводимости структуры сохраняется в течение длительного времени, минимум год. Факты спонтанного переключения не наблюдались, но обнаружено, что переключение проводимости возможно при ультрафиолетовом облучении. Приложение напряжения с полярностью, не приводящей к переключению, и выше порогового, но ниже приводящего к разрушению структуры, также не изменяет состояние проводимости в структуре. Таким образом, МДП структуры с диэлек-

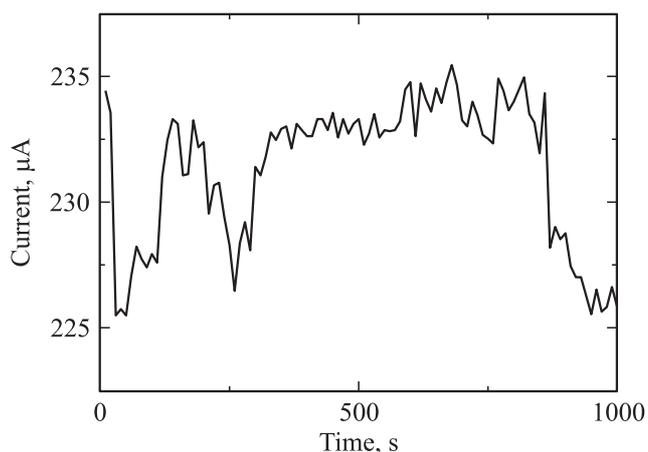


Рис. 2. Зависимость тока от времени при постоянном приложенном напряжении для МДП структуры в проводящем состоянии.

триком, полученным методом LF PECVD, могут использоваться как элементы энергонезависимой памяти.

Кроме структур с диэлектриком, полученным методом LF PECVD, для формирования элементов энергонезависимой памяти исследовались МДП структуры с нестехиометрическим оксидом кремния, полученным классическим методом в плазме высокочастотного разряда. Сформированные этим методом МДП структуры при обратном включении напряжения переключались в открытое состояние, но при прямом включении напряжения МДП структура в закрытое состояние не переключалась.

Были изучены МДП структуры, полученные методом LF PECVD, с различными диэлектрическими слоями. Способность диэлектрика создать структуру, обладающую эффектом переключения проводимости, оценивалась по выходу годных МДП структур в зависимости от их размеров. Выход годных МДП структур определялся как доля структур, изготовленных в одном технологическом цикле, в которых проявлялся эффект переключения проводимости и которые могли быть использованы в качестве элемента памяти. По нашему мнению, существуют две основные причины отказов работы МДП структур:

- высокая начальная проводимость диэлектрика, не позволяющая распознать открытое и закрытое состояния структур;

- диэлектрические свойства пленки не позволяют переключить МДП структуру в открытое состояние, так как для этого необходимо подать напряжение более 50 В, что приводит к пробую и механическому разрушению пленки диэлектрика.

Для формирования диэлектрических слоев использовались три основных метода их осаждения. Первый метод заключается в формировании пленок нестехиометрического оксида кремния. Для изготовления указанных пленок состав газовой смеси в реакторе ($k = \text{NO}/\text{SiH}_4$)

изменялся от 2 до 10 по объему. Наилучшие результаты по выходу годных МДП структур наблюдались для $4.5 < k < 7.5$. При $k > 7.5$ большая часть элементов не переключалась в открытое состояние, а при $k < 4.5$ открытые элементы не закрывались. Исследование состава пленок оже-спектроскопией показало, что при $k = 7.5$ содержание кремния в пленке составляет 34 ат%, при $k = 4.5\text{--}40$ ат%, что незначительно превышает содержание кремния в стехиометрическом диоксиде кремния.

Мы установили, что оптимальная толщина пленки диэлектрика для формирования работающих МДП структур составляет 50–60 нм. Осаждение производилось при температурах от комнатной до 450°C. Наилучшие результаты по выходу годных МДП структур наблюдались при температуре осаждения 200–400°C. Основным недостатком этого метода формирования диэлектрических слоев является уменьшение выхода годных структур при уменьшении размера МДП структуры менее 0.1 мм².

Второй метод заключался в предварительном нанесении на поверхность низкочастотного плазмохимического реактора наноразмерных частиц материала с меньшей шириной запрещенной зоны. При последующем осаждении оксида кремния эти частицы под действием условий, возникающих в низкочастотном разряде, переносятся на поверхность роста и встраиваются в растущую пленку. Этот механизм был подтвержден исследованиями полученных пленок на просвечивающем электронном микроскопе. Основные параметры осаждения соответствовали условиям роста пленок по первому методу. В качестве материала наноразмерных частиц были использованы нитрид кремния, аморфный кремний, карбид кремния и оксинитрид кремния. Наилучшие результаты были получены при использовании нитрида кремния. Эффект наблюдался на структурах площадью более 0.01 мм².

Из этого можно сделать вывод, что для существования эффекта переключения проводимости в диэлектрическом слое должны быть включения материала с меньшей шириной запрещенной зоны. Поэтому третий метод заключается в формировании многослойных структур из пленок диэлектриков с разной шириной запрещенной зоны. Были изготовлены трехслойные и пятислойные пленки со структурами оксид кремния–нитрид кремния–оксид кремния и оксид кремния–нитрид кремния–оксид кремния–нитрид кремния–оксид кремния. По результатам изучения экспериментальных серий определено, что один любой слой оксида кремния должен обладать толщиной 40–50 нм и содержать избыток кремния. Остальные слои должны иметь толщину около 5 нм и могут быть близкими по составу к стехиометрическим. Установлено, что МДП элементы с многослойным диэлектриком обладают наилучшей воспроизводимостью, стабильностью и масштабируемостью. В частности, эффект переключения проводимости наблюдался на структурах 6×6 мкм. Кроме того, изготовление многослойных структур является наиболее технологичным.

Важным технологическим параметром, влияющим на свойства материала, является температура получения диэлектрика и последующая термическая обработка. Установлено, что при отжиге пленок нестехиометрического оксида кремния в среде инертного газа до температуры 1100°C эффект переключения проводимости сохранялся, хотя число структур, на которых наблюдался данный эффект, уменьшилось.

Большая часть экспериментальных образцов была получена при 380°C, часть при 250°C. Для проведения тех или иных исследований использовались образцы из разных серий, поэтому в приведенных далее результатах имеются расхождения по пороговому напряжению смещения и величине проводимости при том или ином напряжении.

3. Изучение и обсуждение

Вольт-амперные характеристики двух МДП структур в открытом состоянии с площадью электродов, отличающейся в сто раз (1 и 100 мм²), приведены на рис. 3. Видно, что при увеличении прямого напряжения на структуры до 6 В токи, проходящие через структуры площадью 1 и 100 мм², практически одинаковы. При увеличении напряжения от 6 до 10 В ток, проходящий через МДП структуру с площадью контакта 100 мм², увеличивался на 10–15% по сравнению с током, протекающим по структуре с контактом площадью 1 мм². При этом отношение проводимости открытого состояния (I_{on}) к закрытому состоянию (I_{off}) различается примерно на 2 порядка, т.е. примерно пропорционально площади МДП структуры. Это означает, что основная часть тока в открытом состоянии протекает через один или несколько каналов проводимости малых размеров, а площадь МДП структуры определяет токи утечки в закрытом состоянии, когда проводимость по каналу отсутствует.

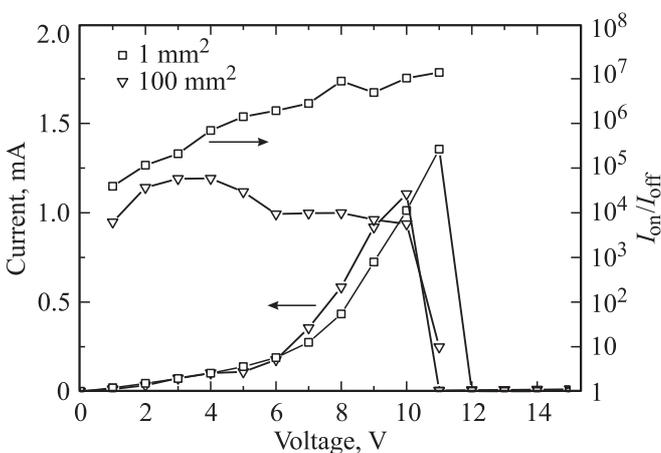


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики и отношение проводимости в открытом (I_{on}) состоянии к проводимости в закрытом (I_{off}) состоянии для МДП структур с площадью электродов 1 и 100 мм².

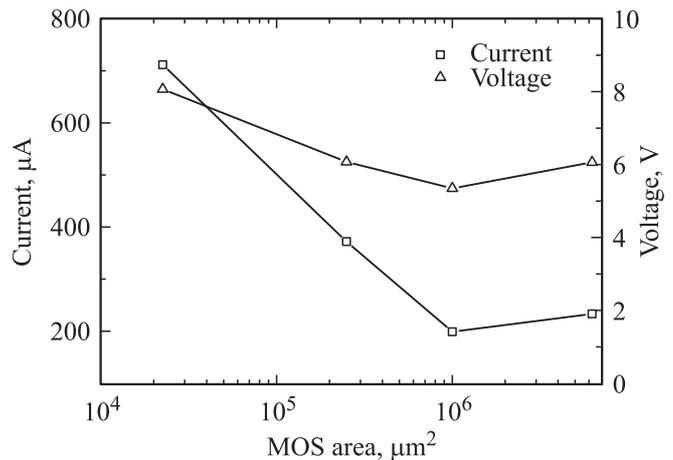


Рис. 4. Зависимости среднего значения напряжения выключения проводимости и среднего значения максимального прямого тока от площади электрода МДП структуры.

На рис. 4 представлены значения среднего напряжения включения и выключения в зависимости от площади структуры. Усреднение проводилось по 50 экспериментальным образцам МДП структур. Все образцы были изготовлены в едином технологическом цикле. Видно, что с уменьшением площади средние значения напряжения включения, а также соответствующие токи растут. Очевидно, это связано с тем, что на структурах с большей площадью больше число точек, благоприятных для возникновения канала проводимости. Первым возникает и начинает работать канал, для переключения которого требуется меньшее напряжение. Остальные потенциальные каналы проводимости остаются незадействованными. По этой причине среднестатистические значения напряжения переключения и максимального тока увеличиваются с увеличением размера МДП элемента.

Были изучены последовательные переключения проводимости для одного и того же образца МДП структуры, представленные на рис. 5. Установлено, что форма ВАХ повторяется в течение нескольких циклов переключения, но порог переключения проводимости изменяется от цикла к циклу (см. вставку на рис. 5). Вероятно, этот порог определяется статистическими механизмами, а форма ВАХ определяется индивидуальными особенностями проводящего канала. Иногда наблюдается изменение формы ВАХ. Видно, что во время седьмого цикла переключения ($F7$) переход МДП структуры в закрытое состояние произошел не полностью. Однако в следующем цикле ($F8$) работоспособность образца восстановилась, но при этом произошел переход на другую кривую ВАХ. При последующем переключении структуры в закрытое состояние начинает работать другой канал проводимости ($F9$). В последующих циклах переключения проводимости МДП структуры этот канал также продолжает работать.

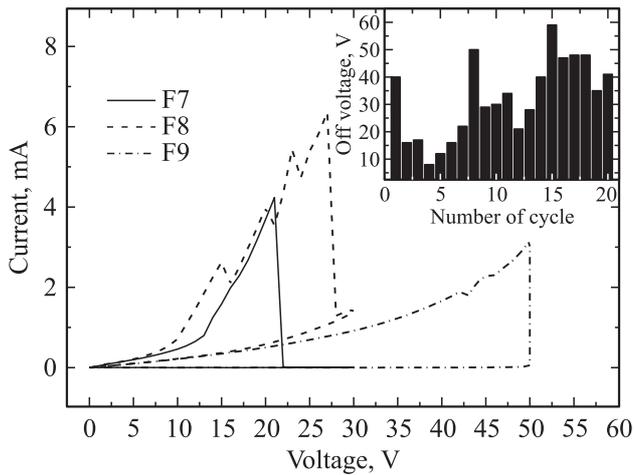


Рис. 5. Вольт-амперные характеристики, иллюстрирующие переход МДП структуры на другой канал проводимости. F — количество циклов переключения проводимости структуры. На вставке приведено напряжение выключения проводимости в зависимости от номера цикла переключения (F).

Определение механизмов эффекта переключения проводимости невозможно без анализа природы протекания тока через диэлектрик при проводящем состоянии МДП структуры. Для этого были изучены ВАХ открытого состояния. Для семи механизмов проводимости диэлектриков, описанных в литературе [11], была проведена линеаризация экспериментальных данных. Установлено, что зависимость тока от напряжения лучше всего описывается параболическим законом $I \propto V^2$, описывающим протекание тока через область пространственного заряда. Аналогичная зависимость имеет место при двухбарьерном туннелировании.

Кроме того, для изучения типа проводимости в открытом состоянии были проведены измерения температурных зависимостей ВАХ. Установлено, что при температуре жидкого азота ток через образцы не протекает, что связано с существенным увеличением сопротивления кремниевой подложки. При последующем нагревании образцов до комнатной температуры проводимость и эффект ее переключения восстанавливались. Однако после ряда термоциклирований образцов от комнатной до азотной температуры эффект исчезал. По всей видимости, это связано с механическим разрушением МДП структуры.

Для определения зависимости проводимости открытого состояния от температуры нами был выбран способ незначительного изменения температуры образца. Для регулирования температуры образца применялись полупроводниковые термоэлектрические элементы, работающие на основе эффекта Пельтье. Их преимуществом является простота регулирования температуры образца и возможность изучить температурные зависимости проводимости при температурах как ниже, так и выше комнатной. Для предотвращения образования конденсата на

поверхности тестовых МДП структур, предусмотрено вакуумирование или заполнение осушенным инертным газом рабочего пространства измерительной камеры.

Установлено, что вольт-амперная характеристика МДП структуры в проводящем состоянии зависит от температуры, но форма ВАХ практически не меняется. На рис. 6 представлены графики зависимости тока, протекающего через МДП структуру, от температуры при постоянных значениях прикладываемого напряжения при прямом и обратном включении структуры. Из рисунка видно, что в целом с понижением температуры ток через МДП структуру возрастает, следовательно, сопротивление структуры уменьшается, а проводимость увеличивается. Причем температурная зависимость носит практически линейный характер. Для обратной ветви вольт-амперной характеристики сопротивление структуры также падает с понижением температуры, однако зависимость здесь менее явная, чем для прямой ветви ВАХ. Таким образом, температурная зависимость носит аномальный для полупроводника характер.

Особенностью проведенных температурных измерений является то, что шумы при измерении проводимости при разных температурах малы по сравнению с шумами тока при постоянном приложенном напряжении, которые можно наблюдать на рис. 2. Это можно объяснить тем, что при постоянном пропускании тока происходит локальный разогрев МДП структуры в районе токового канала, что приводит к изменению сопротивления, тока и, как следствие, выделяемой мощности. Это приводит к изменению температуры области около канала и дальнейшему изменению протекающего через образец тока. В случае температурных измерений ток определялся при кратковременном приложении напряжения. Такой подход позволил уменьшить уровень шумов.

Если предположить, что заметный вклад в сопротивление исследуемой МДП структуры вносит сопро-

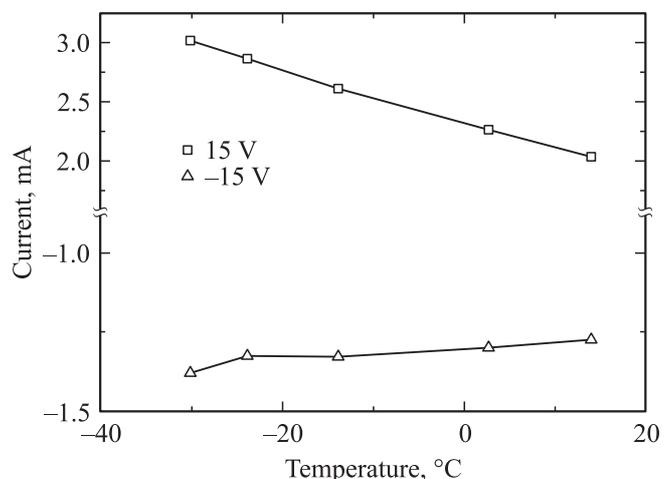


Рис. 6. Зависимости тока от температуры МДП структуры, находящейся в открытом состоянии при постоянном значении прикладываемого прямого (15 В) и обратного (–15 В) напряжения.

тивление растекания тока около проводящего канала, то температурная зависимость может быть объяснена наличием каналов проводимости малого размера. При протекании тока происходит инжекция носителей заряда из канала. Ток около контакта передается в основном неравновесными инжектированными носителями, вследствие чего проводимость в этой зоне определяется длиной свободного пробега носителей. При увеличении температуры образца длина свободного пробега уменьшается. Это приводит к уменьшению проводимости в этой зоне, что вызывает увеличение общего сопротивления структуры. Однако оценка такого механизма показала его недостаточность для описания температурной зависимости проводимости.

Другое объяснение может состоять в рассеянии носителей на промежуточном участке при двухбарьерном туннелировании. При увеличении температуры возрастает вероятность захвата носителя на квантовой точке. Это приводит к задержке последующего туннелирования. В результате уменьшается протекающий ток.

Таким образом, по зависимости параметров эффекта переключения проводимости от площади МДП структуры и, частично, температурной зависимости проводимости был сделан вывод о наличии в диэлектрике каналов протекания тока. Для их непосредственной визуализации был проведен эксперимент с использованием в качестве верхнего электрода 10% водного раствора медного купороса с диаметром капли 5–10 мм. Для такой структуры проводились исследования ВАХ. При последующем рассмотрении места расположения капли через микроскоп при прямом пропускании тока через структуру были обнаружены полусферические медные образования, но не в местах контакта электрода с каплей раствора. Оценка размеров полусферических медных образований по интегрированию прошедшего через образец тока совпала с их наблюдаемыми размерами. Таким образом, эти образования возникли в результате гальванического осаждения меди в местах образования токопроводящих каналов в диэлектрике, что также подтверждает канальный механизм проводимости.

В результате проведенных исследований нами установлено, что характерными особенностями эффекта переключения проводимости МДП структур на основе диэлектриков, полученных методом LF PECVD, являются:

- переключение проводимости структуры в открытое или закрытое состояние в зависимости от полярности прикладываемого напряжения;
- возможность повторного переключения проводимости структуры;
- сохранение открытого или закрытого состояния структуры в течение нескольких лет;
- протекание тока в открытом состоянии структуры через малоразмерные каналы проводимости.

Механизмы эффекта переключения проводимости для разных случаев описаны в литературе [1–8]. Из описаний следует, что существование подобного эффекта переключения проводимости предполагает наличие двух

электродов, слоя материала с низкой проводимостью между ними и, как правило, каких-либо включений, таких как квантовые точки, атомы или ионы металла, металлические нанокластеры и другие включения, находящиеся внутри этого материала. Кроме того, во всех описанных случаях ток протекает по каналу проводимости малого сечения. Наши экспериментальные данные соответствуют этим обобщениям.

В качестве механизма обычно рассматривают формирование нити из проводящего материала под действием напряжения одной полярности и ее частичное разрушение под действием напряжения противоположной полярности. Однако имеются литературные данные [12], отмечающие, что аналогичный эффект возможен в двухбарьерной структуре на базе арсенида галлия. При определенных условиях межбарьерный промежуток приобретает заряд, приводящий к уменьшению проводимости структуры и протекания через нее тока. Если при другой полярности электрический заряд из межбарьерного промежутка уходит, то проводимость восстанавливается.

В нашем случае это описание представляется более адекватным, поскольку: ВАХ открытого состояния соответствует ВАХ двухбарьерной структуры, возможно переключение под действием ультрафиолетового облучения, ток в проводящем состоянии при постоянном приложенном напряжении испытывает заметные флуктуации. Роль барьеров играют слои оксида кремния, а роль межбарьерного промежутка кластеры кремния, или нитрида кремния, или слои нитрида кремния.

Другой возможный механизм переключения проводимости в исследуемых структурах может быть описан следующим образом. При первом включении проводимости обратной полярностью формируется проводящий канал. Рядом с ним располагаются включения нитрида кремния, которые могут изменять свой электрический заряд в результате туннелирования электронов через диэлектрик. В результате возникает вертикально расположенный полевой транзистор с изолированным затвором, проводимость которого зависит от заряда на затворе.

Механизм переключения проводимости в МДП структурах с диэлектриком на базе кремния требует дальнейшего уточнения.

Работа выполнена на оборудовании Центра коллективного пользования научным оборудованием „Диагностика микро- и наноструктур“ при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ.

Список литературы

- [1] Б.Т. Коломиец, Г.А. Андреева, Н.П. Калмыкова, Э.А. Лебедев, И.А. Таксами, В.Х. Шпунт. Приборы и системы управления, **4**, 27 (1980).
- [2] В.А. Рожков, М.Б. Шалимова. ФТП, **27** (03), 438 (1993).
- [3] В.Б. Байбурун, Ю.П. Волков, В.А. Рожков. Письма ПЖТФ, **24** (12), 21 (1998).
- [4] D.S. Jeong, H. Schroeder, R. Waser. ESL, **10**, 51 (2007).

- [5] K. Terabe, T. Hasegawa, T. Nakayama, M. Aono. *Nature*, **433**, 47 (2005).
- [6] W. Wu, G.-Y. Jung, D.L. Olynick, J. Straznicky, Z. Li, X. Li, D.A.A. Ohlberg, Y. Chen, S.-Y. Wang, J.A. Liddle, W.M. Tong, R. Stanley Williams. *Appl. Phys.*, **A 80**, 1173 (2005).
- [7] J. Campbell Scott, Luisa D. Bozano. *Adv. Mater.*, **19**, 1452 (2007).
- [8] M.-J. Lee, Ch.V. Lee, D. Lee et al. *Nature Mater.*, **10**, 625 (2011).
- [9] А.А. Орликовский, А.Е. Бердников, А.А. Мироненко, А.А. Попов, В.Д. Черномордик, А.В. Перминов. Патент РФ на изобретение № 2449416 от 27 апреля 2012 г.
- [10] М.Д. Ефремов, В.А. Володин, Д.В. Марин, С.А. Аржанникова, Г.Н. Камаев, С.А. Кочубей, А.А. Попов. *ФТП*, **42** (2), 202 (2008).
- [11] С. Зи. *Физика полупроводниковых приборов* (М., Мир, 1984).
- [12] А.Н. Разжувалов, С.Н. Гриняев. *ФТП*, **42** (5), 595 (2008).

Редактор Т.А. Полянская

Effect of switching conductivity at MIS structures with isolator at the Si base prepared by low frequency plasma chemical vapor deposition

A.E. Berdnikov, V.N. Gusev, A.A. Mironenko, A.A. Popov, A.V. Perminov, A.C. Rudy, V.D. Chernomordick

Yaroslavl Branch of the Institute of Physics and Technology, Institution of Russian Academy of Sciences, 150007 Yaroslavl, Russia

Abstract Voltage-current characteristic of MIS structures with dielectrics on base of silicon oxide are investigated. MIS structures are prepared by low frequency (55 kHz) plasma chemical vapor deposition. The original feature of used dielectrics is inclusion of particles of other materials with smaller band gap. It was established that such structures possess property of bipolar switching conductivity. MIS structures with the multilayered dielectric containing additional layers of silicon nitride of nanometer thickness have the best characteristics of conductivity switching effect.