

05;06;12

Электроформовка как процесс самоорганизации нанометрового зазора в углеродистой среде

© К.А. Валиев, В.Л. Левин, В.М. Мордвинцев

Институт микроэлектроники РАН,
150007 Ярославль, Россия

(Поступило в Редакцию 6 мая 1996 г.)

На основе анализа имеющихся экспериментальных данных, а также предложенных механизмов и моделей процессов, имеющих место при электроформовке структуры металл–изолятор–металл, делается вывод, что она включает следующие две стадии: образование углеродистой проводящей среды из органических молекул за счет протекания тока в изолирующей щели и самоорганизацию нанометрового зазора в углеродистой проводящей среде через бифуркацию при локальном превышении температурой этой среды некоторого критического значения из-за ее саморазогрева. Можно утверждать, что нанозазор является диссипативной структурой, возникающей в силу тепловой неустойчивости в углеродистой среде при прохождении через нее потока электронов и наличии сильного электрического поля, стабильность которой обеспечивается существенной нелинейностью происходящих в нем процессов, включенных в механизм обратной связи. Показано, что необходимая для выполнения электроформовки начальная проводимость структуры может быть реализована за счет нанометровой ширины изолирующей щели, что продемонстрировано экспериментально с помощью конструкции, названной открытой "сэндвич"-МИМ структурой.

Структуры металл–изолятор–металл (МИМ структуры), необычные электрофизические свойства которых возникают после выполнения специфической операции, называемой электроформовкой, изучаются с начала 60-х годов. Первые результаты были получены на "сэндвич"-МИМ структурах, представляющих собой последовательно напыленные друг на друга слои металла и диэлектрика [1]. Электроформовка состоит просто в подаче на образцы, помещенные в вакуум, постоянного либо медленно циклирующего напряжения в диапазоне от 0 до 15 В, что приводит к увеличению проводимости структуры на несколько порядков и появлению у нее *N*-образной квазистационарной вольт-амперной характеристики. В таких объектах наблюдаются и другие особенности (эмиссия электронов, электролюминесценция), однако в данной работе мы будем обсуждать только эффекты, связанные с проводимостью формованных МИМ структур. На первых порах эти характеристики пытались объяснять исключительно процессами в объеме диэлектрика, в качестве которого, как правило, использовали аморфные окислы. Однако впоследствии Пагния с сотрудниками [2] обнаружили точно такое же поведение планарных МИМ структур, а соответствующие эксперименты позволили однозначно установить, что источник необычных электро-физических характеристик — это адсорбированные из вакуума углеродсодержащие молекулы.

Планарную МИМ структуру изготавливают следующим образом. Между двумя толстыми пленочными металлическими электродами, сформированными на поверхности изолирующей подложки, напыляют тонкую металлическую пленку, которую пережигают подачей на электроды достаточного для этого импульса напряжения. Последнее приводит к образованию в тонкой металли-

ческой пленке изолирующей микрощели со случайной геометрией и шириной порядка нескольких микрометров, на поверхности которой остаются частицы металла различных размеров. Такую структуру помещают в вакуум, содержащий органические молекулы, и формируют обычным образом, как указано выше. Все авторы считают присутствие металлических частиц в изолирующей щели необходимым условием для успешного проведения электроформовки, хотя никто не обсуждает их роль в этом процессе. В соответствии с существующими представлениями высокую проводимость формованной МИМ структуры связывают с образованием некоторым образом из адсорбированных органических молекул проводящих углеродистых путей (нитей) между металлическими электродами, а отрицательное дифференциальное сопротивление — с их последовательным разрывом, по сути совпадающим с пережиганием, при росте напряжения и каким-то процессом регенерации при уменьшении напряжения на электродах. Реальная вольт-амперная характеристика получается сложением случайно распределенных проводимостей отдельных нитей, имеющих предположительно молекулярные размеры сечения. Такие представления позволили говорить о целом классе приборов — МИМ диодах с углеродистыми проводящими путями.

Аналогичные процессы имеют место и в "сэндвич"-МИМ структурах. Однако, как показали исследования, на первом этапе формовки здесь образуются локальные области диаметром порядка долей микрометра, названные в [3] формованными каналами и по своей структуре подобные каналам пробоя. Это сопровождается локальным повышением проводимости диэлектрика, испарением металла верхнего электрода и формированием, таким образом, структуры, аналогичной изолирующей щели в

случае планарного МИМ диода и открытой для доступа органических молекул из газовой фазы. Несмотря на длительное экспериментальное изучение таких объектов, до последнего времени не было предложено механизмов, достаточно полно описывающих процессы в МИМ структурах с углеродистыми проводящими путями, что сдерживало понимание сути эффектов возникновения и поведения проводящей структуры в углеродистой среде в подобных условиях.

Новые результаты, касающиеся МИМ структур с углеродистой средой в изолирующей щели, были получены в [4]. В этих экспериментах в качестве МИМ диода служил туннельный зазор сканирующего туннельного микроскопа (СТМ), работающего в эмиссионном режиме. При этом электродами являлись вольфрамовый зонд СТМ (катод) и металлическая поверхность образца, а в туннельном зазоре находились органические молекулы. Обратная связь СТМ поддерживала постоянным ток через зазор, поэтому величина последнего была переменной и менялась в зависимости от напряжения на зонде в диапазоне десятков нанометров. Несмотря на некоторые особенности, такая система демонстрировала поведение проводимости, аналогичное традиционным МИМ структурам с углеродистыми проводящими путями. Полученная в этих экспериментах информация совместно с уже имевшейся ранее позволила предложить новый механизм возникновения N -образной вольт-амперной характеристики, существенной чертой которого является нанометровая величина изолирующего зазора. Такую структуру в отличие от традиционных МИМ диодов мы будем называть нано-МИМ диодом.

Суть предложенного в [4] механизма состоит в следующем. Предполагается, что проводимость структуры с постоянной шириной изолирующего зазора h , совпадающей в данном случае с шириной изолирующей щели H , на участке с отрицательным дифференциальным сопротивлением, являющемся наиболее интересной и информативной областью вольт-амперной характеристики, лимитируется туннелированием электронов через барьер вблизи катода (рис. 1, *a*). В силу нанометровых размеров зазора необходимые электрические поля достигаются уже при малых напряжениях U на структуре. Прохождение инжектированных электронов через зазор, заполненный органическими молекулами, обеспечивается высокой напряженностью поля и сопровождается диссоциацией последних при электронном ударе, приводя к расслоению органического диэлектрика за счет выделения со стороны анода частиц углеродистой фазы с повышенными проводимостью и диэлектрической проницаемостью. Соответствующая область, которую мы называем формованным диэлектриком (ФД), представляет собой фактически композиционный материал "проводящие частицы в диэлектрической матрице", электрические характеристики которого зависят прежде всего от концентрации проводящих частиц. Это изменяет распределение потенциала в зазоре, уменьшая ширину δ барьера вблизи катода, что ведет к росту тока через структуру

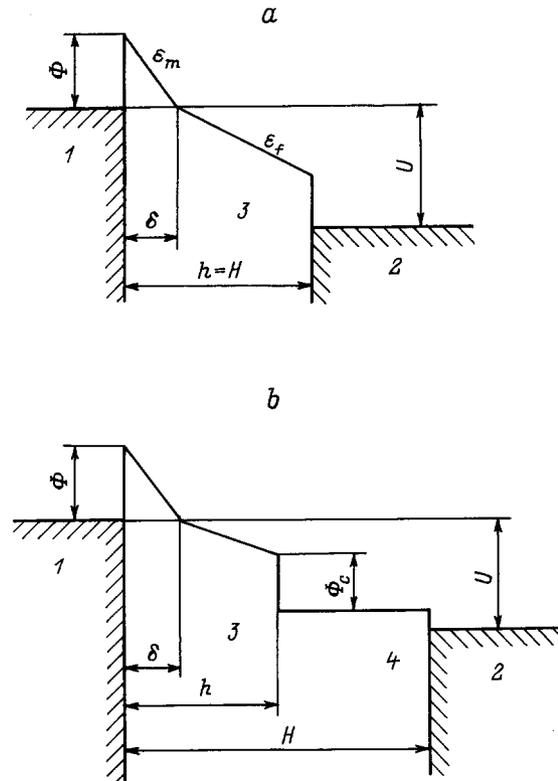


Рис. 1. Упрощенные потенциальные диаграммы МИМ структур. Φ — высота потенциального барьера для электронов на границе катод–изолирующий зазор, U — напряжение между электродами; *a* — нано-МИМ структура при фиксированной ширине зазора $h = H$ с ФД; относительная диэлектрическая проницаемость: ϵ_m — матрицы, ϵ_f — формованного диэлектрика; *b* — МИМ структура при наличии перколяции в формованном диэлектрике, Φ_c — потенциальный барьер на границе ФД и углеродистой проводящей среды (УПС); 1 — металл I (катод), 2 — металл II (анод), 3 — ФД, 4 — УПС (анод).

и разогреву диэлектрика. Как установлено экспериментально [2], локальные температуры в МИМ диодах могут достигать 1500 К. За счет некоторого термически активируемого процесса, например окисления и десорбции либо перехода из проводящего графитизированного состояния в диэлектрическое алмазоподобное, концентрация частиц проводящей углеродистой фазы уменьшается с ростом температуры диэлектрика (соответствующая зависимость включает экспоненту от обратной температуры), что, наоборот, должно вызвать уменьшение тока. Таким образом, в структуре существует внутренняя отрицательная обратная связь. Она приводит к тому, что для заданного значения напряжения U на МИМ диоде устанавливается стационарное состояние, характеризующееся, в частности, определенной концентрацией углеродистой проводящей фазы в формованном диэлектрике и соответствующим распределением потенциала в зазоре (рис. 1, *a*). Увеличение напряжения U в этом случае вызовет рост рассеиваемой в ФД мощности, его разогрев, уменьшение концентрации проводящей углеродистой фа-

зы, изменение распределения потенциала в зазоре, сопровождающееся увеличением ширины барьера δ , а значит, уменьшение тока через структуру. Это и означает наличие ветви с отрицательным дифференциальным сопротивлением на вольт-амперной характеристике. Такой механизм был назван в [4] модуляцией ширины барьера за счет расслоения диэлектрика. Основные процессы, приводящие к нелинейным характеристикам, происходят здесь в углеродсодержащем материале, находящемся в изолирующем зазоре структуры, что позволяет говорить об углеродистой активной среде нано-МИМ диода.

В предложенном механизме необходимо выделить два элемента существенных для понимания сути процессов, происходящих в таком объекте: наличие внутренней обратной связи в системе и модуляции параметров (в данном случае ширины) потенциального барьера. Цепь обратной связи, одним из звеньев которой являются структурные характеристики системы, а именно концентрация частиц проводящей углеродистой фазы и зависящая от нее ширина барьера, обуславливает протекание процесса самоформирования, самоорганизации наноструктуры в углеродистой среде при функционировании нано-МИМ диода. Поскольку эта обратная связь отрицательна (наличие тока через структуру приводит к образованию частиц проводящей углеродистой фазы, но его рост вызывает розогрев формованного диэлектрика и их исчезновение), то возникающая наноструктура устойчиво существует в зазоре МИМ диода и путем подстройки своих характеристик отслеживает изменения внешних параметров, в частности напряжения на электродах. Самоорганизация проявляется также в том, что первоначально однородный по составу и электрическим характеристикам нанометровый зазор в итоге разделяется на два слоя. Как показал анализ модели [5], развитой на основе описанного выше механизма, основным фактором стабильного существования стационарного состояния наноструктуры является баланс двух экспонент: экспоненты в зависимости туннельного тока от параметров потенциального барьера и экспоненты Больцмановского множителя в выражении для концентрации частиц проводящей углеродистой фазы.

В то же время наличие обратной связи само по себе недостаточно для возникновения N -образной вольт-амперной характеристики. Последнее обеспечивается модуляцией ширины барьера для туннелирующих электронов, т.е. некоторым механизмом "принудительного" его изменения, причем именно такого, что прозрачность барьера уменьшается при росте напряжения на структуре. В данном случае это происходит за счет расслоения диэлектрика, однако можно предложить и другие механизмы с приблизительно такими же результатами.

В настоящее время убедительно показано с помощью ряда экспериментов, что и в случае традиционных электроформованных МИМ диодов фактически работает не вся изолирующая щель, а только ее участок с нанометровой шириной, остальная поверхность щели служит только токоподводом к этому нанометровому

зазору. Так, в [6] с применением СТМ, работающего в режиме потенциального контраста, получено распределение потенциала в изолирующей щели планарного МИМ диода с углеродистыми проводящими путями: все напряжение, приложенное к МИМ структуре, падает на участке с шириной, не превышающей несколько десятков нанометров. Авторы также считают, что углеродистый материал с высокой проводимостью, который выравнивает потенциал остальных областей поверхности изолятора — это графит, образовавшийся из органических молекул газовой фазы. Для "сэндвич"-МИМ структур также существуют экспериментальные результаты [3], полученные с помощью просвечивающей электронной микроскопии, которые говорят о том, что в формованных каналах "рабочими" являются участки шириной 15–25 nm, расположенные по периметру каналов. Таким образом, нано-МИМ структура — это, очевидно, не экзотическое образование, а устойчивый объект, характерный для всех МИМ диодов с углеродистой активной средой, в том числе и полученных традиционными способами.

Как уже говорилось, на базе приведенного выше механизма в [5] была развита модель функционирования нано-МИМ диода с углеродистой активной средой при постоянной, фиксированной металлическими электродами ширине нанометрового зазора. Не вдаваясь в детали, необходимо отметить, что модель дает слишком высокие значения образующихся из органики частиц проводящей углеродистой фазы, при которых должен превышать предел протекания [7] в формованном диэлектрике. Это качественно меняет ситуацию, поскольку диэлектрик уже не может рассматриваться просто как композиционный материал "проводящие частицы в диэлектрической матрице", он превращается в проводящую среду. Поэтому учет перколяции в такой системе становится принципиальным. В простейшем варианте это можно сделать, если учесть расширение потока электронов в зазоре по мере перемещения их от катода к аноду, что представляется естественным в силу неоднородной эмиссии, которая реально происходит с нановыступов поверхности катода. При этом по направлению к аноду будет падать плотность тока, а значит, и температура формованного диэлектрика, которая определяет концентрацию частиц проводящей фазы. Концентрация, соответствующая пределу протекания, будет задавать координату границы углеродистой проводящей среды, становящейся фактически подвижным анодом (рис. 1, *b*). По составу и свойствам, как отмечалось выше, эта среда близка к графиту.

Мы не будем здесь более детально развивать эти идеи и описывать соответствующую модель, отметим только тот факт, что величина зазора h в этом случае становится переменной, и приведем типичные результаты расчетов (рис. 2) в качестве иллюстрации. В целом такая модель лучше описывает экспериментальные данные и дает более разумные оценки параметров. В то же время необходимо обратить внимание на то, что переменный зазор h означает введение в механизм функционирования нано-

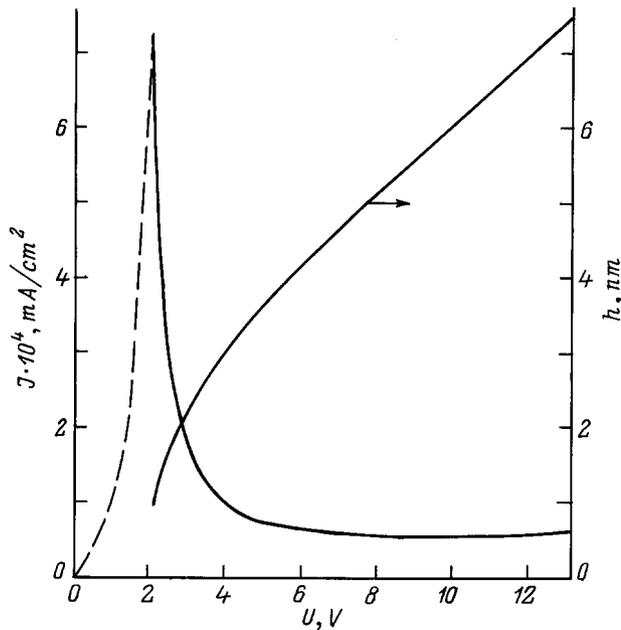


Рис. 2. Типичные расчетные зависимости плотности тока J и ширины h изолирующего зазора от напряжения U на МИМ структуре в модели с учетом перколяции в сформированном диэлектрике.

МИМ диода еще одной обратной связи, связанной со структурными характеристиками объекта: кроме концентрации частиц углеродистой фазы и ширины барьера в процессе самоорганизации наноструктуры включается и ширина зазора, которая самопроизвольно подстраивается под приложенное напряжение. При этом становится не критично расстояние H между металлическими электродами МИМ структуры (изолирующей щели), поскольку анодом становится углеродистая проводящая среда. В этом смысле такой модифицированный механизм правильно отражает ситуацию не только в нано-, но и в традиционном МИМ диоде и дает подсказку, как может возникать и развиваться наноструктура, в том числе и в микронной изолирующей щели.

Все сказанное выше относится к функционированию уже сформированной МИМ структуры. Но как достигается такое состояние первоначально однородной изолирующей щели микронных размеров? Развитые выше представления позволяют ответить на этот вопрос и тем самым объяснить, в чем заключается механизм процесса электроформовки.

Прежде всего, необходимо обратить внимание на то, что условия электроформовки и функционирования МИМ структуры практически не различаются и включают минимум два компонента: органические молекулы в окружающей газовой среде и напряжение на структуре. Естественно предположить, что в обоих случаях протекают те же самые процессы. А это означает, что через изолирующую щель структуры, подвергающейся формовке, должен начать протекать ток, который за счет

диссоциации органических молекул при электронном ударе будет приводить к образованию частиц проводящей углеродистой фазы. Это и является причиной постепенного и значительного повышения проводимости структуры. Принципиальным является вопрос, почему в начале формовки возможно протекание тока через изолирующую щель микронных размеров при относительно низких напряжениях, как это имеет место в случае традиционного планарного МИМ диода. Ответ состоит в особой технологии ее формирования путем пережигания тонкой металлической пленки, после чего на поверхности остаются металлические частицы, в том числе, очевидно, и атомных размеров, т.е. роль частиц металла в изолирующей щели, необходимость которых для выполнения формовки отмечают многие авторы, состоит просто в обеспечении начальной проводимости структуры.

В случае "сэндвич"-МИМ структуры ситуация несколько сложнее, поскольку собственно электроформовка совмещена здесь с развитием как бы мягкого пробоя диэлектрика, приводящего к образованию соответствующих локальных каналов [3]. Однако и в этом случае для успешной формовки важно, чтобы диэлектрик был не слишком качественным: обычно это нестехиометрический или дефектный окисел, что и обеспечивает начальную проводимость. Известно, что диэлектрики с хорошими электроизолирующими характеристиками не формируются [8]. Таким образом, еще одним общим условием осуществления электроформовки является достаточная начальная проводимость МИМ структуры.

Однако образование проводящей углеродистой среды в изолирующей щели, объясняя значительное уменьшение сопротивления структуры при формовке, еще не дает ответа на вопрос о причине возникновения N -образной вольт-амперной характеристики. Очевидно, ситуация развивается следующим образом. Увеличение проводимости приводит к росту тока через структуру и возникновению неустойчивости, связанной с саморазогревом углеродистой среды. При этом максимальная температура достигается в локальной области с максимальным выделением мощности и наихудшими условиями теплоотвода, положение которой в реальной изолирующей щели определяется случайно. Когда температура здесь достигает значений, при которых исчезают частицы углеродистой проводящей фазы (скорость их исчезновения и концентрация экспоненциально зависят от температуры), в этой области зарождается изолирующий зазор и напряжение, приложенное к структуре, начинает падать в основном на нем. Далее включается механизм самоорганизации и стабилизации нанометрового зазора с N -образной вольт-амперной характеристикой, как это описано выше. Роль катода при этом выполняет уже не металлический электрод, а один из краев углеродистой проводящей среды.

Таким образом, в соответствии с предложенным механизмом электроформовка МИМ структуры включает следующие две стадии: образование углеродистой про-

водящей среды из органических молекул за счет протекания тока в изолирующей щели и самоорганизацию нанометрового зазора в углеродистой проводящей среде через бифуркацию при локальном превышении температурой этой среды некоторого критического значения. Помимо собственно механизма возникновения такой объект обладает и общими на уровне явления признаками самоорганизации. Действительно, внешние воздействия (электрическое напряжение), которые мы прикладываем к первоначальной структуре (изолирующей щели), не имеют той степени пространственной локальности, которую приобретает конечная структура (нанозазор), т. е. нанообъект формируется самопроизвольно. В целом, учитывая вышеизложенное, можно утверждать, что нанозазор является диссипативной структурой [9], возникающей в силу тепловой неустойчивости в углеродистой среде при прохождении через нее потока электронов и наличии сильного электрического поля, стабильность которой обеспечивается существенной нелинейностью происходящих в нем процессов, включенных в механизм обратной связи.

Выделение в процессе электроформовки двух стадий является не просто логическим приемом. Известно много экспериментов [10], когда в обычных условиях выполнения формовки, но в различных газовых средах (около 30 органических соединений) надежно наблюдалось значительное увеличение проводимости планарных МИМ структур, однако получить *N*-образные вольт-амперные характеристики не удалось. Это может означать, что проводимость образующейся при прохождении тока углеродистой среды в этих случаях недостаточна для возникновения тепловой неустойчивости, поэтому точка бифуркации не достигается. При этом нанометровый зазор не формируется, приложенное напряжение равномерно распределяется по ширине изолирующей щели, которая работает просто как резистор, и *N*-образные вольт-амперные характеристики не возникают.

Предложенный в [4] механизм функционирования нано-МИМ диода объясняет и хорошо известный [2] эффект памяти при быстром выключении напряжения на структуре, что связано с "замораживанием" состояния с относительно большой шириной барьера на катоде из-за относительной медленности процесса накопления углеродистых проводящих частиц. С точки зрения поведения при этом диссипативной структуры, каковой является нанометровый зазор в углеродистой среде, это означает, что после резкого снятия напряжения, т. е. внешнего источника накачки энергии в углеродистую среду, эта структура "замораживается" и остается в таком кинетически заторможенном неравновесном состоянии неограниченно долго. Следует обратить внимание на условия, сопровождающие самоформирование нанозазора. Как отмечалось выше, локальные температуры в зазоре МИМ диода могут достигать 1500 К. Особенно впечатляют условия при формовке "сэндвич"-структур: пробивается диэлектрик, испаряется металл верхнего электрода и только после этого возникает стабильная наноструктура,

т. е. ситуация самопроизвольно и стабильно приходит к стационарному состоянию, каковым является нанозазор в углеродистой среде, несмотря на весьма далекие от него начальные условия, через разрушительные процессы в материалах конструкции и высокие температуры собственно формованного диэлектрика. Это означает, что наноструктура в углеродистой среде чрезвычайно устойчива, поэтому есть физические предпосылки к ее долговременной стабильности даже в кинетически заторможенном состоянии.

Выше уже отмечалось, что необходимым условием выполнения электроформовки является достаточная начальная проводимость МИМ структуры. В традиционном МИМ диоде она обеспечивается наличием частиц металла на поверхности изолирующей щели. Однако если последняя имеет ширину 15–30 нм, то уже при напряжениях 10–20 В достигаются электрические поля, в которых начинается туннелирование электронов из металлического электрода в адсорбированный на поверхности органический диэлектрик, а тянущего поля достаточно для их прохождения через диэлектрический слой, т. е. можно предположить, что в нано-МИМ диоде автоматически будут реализовываться условия для электроформовки без разрушительных процессов типа испарения металла, необходимых для обеспечения начальной проводимости. В этом случае проблема сводится просто к получению нанометровой изолирующей щели, поверхность которой открыта для поступления органических молекул из газовой фазы.

Для проверки таких предположений была изготовлена конструкция, которую мы назвали открытой "сэндвич"-МИМ структурой (рис. 3). В ней обычная "сэндвич"-структура локально травится и вскрывается торец диэлектрической пленки для свободного доступа органических молекул. Этот торец и является изо-

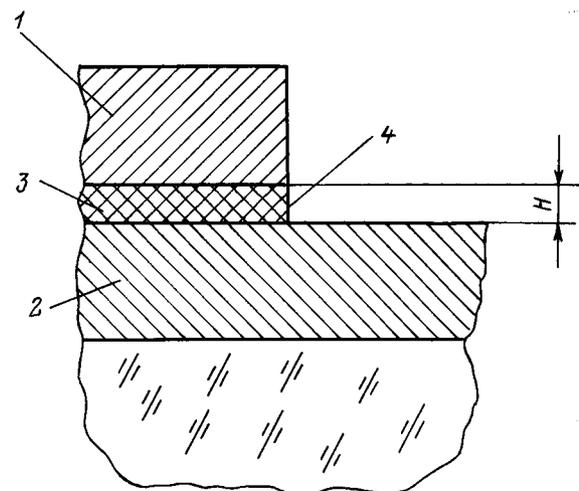


Рис. 3. Схематическое изображение нано-МИМ диода в виде открытой "сэндвич"-структуры. 1 — верхний металлический электрод, 2 — нижний металлический электрод, 3 — тонкая диэлектрическая пленка, 4 — изолирующий зазор.

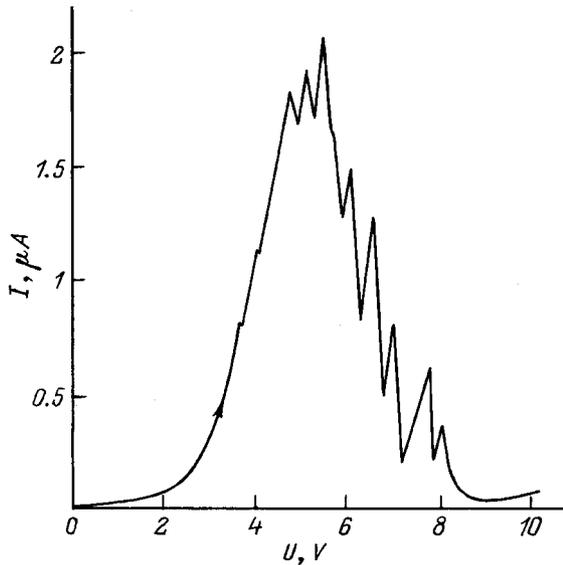


Рис. 4. Типичная экспериментальная вольт-амперная характеристика формованной открытой "сэндвич"-МИМ структуры (толщина диэлектрической пленки 24 nm).

лирующей щелью. Ее ширина определяется толщиной диэлектрической пленки, которую без особых проблем можно сделать достаточно тонкой с приемлемым качеством диэлектрика. Формовка выполнялась в обычных условиях: структура помещалась в вакуум, создаваемый паромасляным насосом, на нее подавался треугольный импульс напряжения с периодом около 10 с и амплитудой значительно меньшей величины, чем та, при которой возникает пробой структуры. В течение нескольких минут наблюдалось постепенное значительное увеличение тока в таком МИМ диоде, а после окончания формовки структуры демонстрировали (рис. 4) характерные вольт-амперные характеристики с участком отрицательного дифференциального сопротивления. Мы не будем обсуждать здесь детали эксперимента, соответствующая кривая приведена просто в качестве иллюстрации успешного выполнения электроформовки nano-МИМ структуры без каких-либо предварительных пережиганий металлических элементов, как это имеет место в традиционных конструкциях. Высококачественный окисел, служивший диэлектрической пленкой, а также малые наблюдавшиеся мощности исключают пробойные явления и в процессе формовки, в случае же преднамеренного пробоя происходило закорачивание нижнего и верхнего электродов, толщины которых составляли 0.2–0.3 μm . Контрольные эксперименты подтвердили, что процессы формовки развиваются именно на торцах диэлектрической пленки, вскрытых травлением. Полученные результаты позволяют утверждать, что открытые "сэндвич"-МИМ структуры с нанометровой толщиной диэлектрической пленки являются еще одним интересным объектом для исследования явления электроформовки. Кроме того, они представляют собой простую реализацию нано-

МИМ диода с углеродистой активной средой, который может оказаться перспективным прибором наноэлектроники при создании запоминающих устройств со сверхвысоким уровнем интеграции.

Авторы выражают благодарность С.Е. Кудрявцеву за активное участие в проведении эксперимента.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке государственной научно-технической программы "Перспективные технологии и устройства микро- и наноэлектроники" Министерства науки Российской Федерации.

Список литературы

- [1] *Hickmott T.W.* // J. Appl. Phys. 1964. Vol. 35. N 9. P. 2679–2689.
- [2] *Pagnia H., Sotnik N.* // Phys. Stat. Sol. (a). 1988. Vol. 108. N 11. P. 11–65.
- [3] *Гапоненко В.М.* // Изв. вузов. физика. 1992. № 5. С. 115–120.
- [4] *Мордвинцев В.М., Левин В.Л.* // ЖТФ. 1994. Т. 64. Вып. 12. С. 88–100.
- [5] *Мордвинцев В.М., Левин В.Л.* // ЖТФ. 1996. Т. 66. Вып. 7. С. 83.
- [6] *Pagnia H., Sotnik N., Wirth W.* // Int. J. Electron. 1990. Vol. 69. N 1. P. 25–32.
- [7] *Шкловский Б.И., Эфрос А.Л.* Электронные свойства легированных полупроводников М.: Наука, 1979. 416 с.
- [8] *Дирнлей Дж., Стоунхэм А., Морган Д.* // УФН. 1974. Т. 112. Вып. 1. С. 83–127.
- [9] *Николис Г., Пригожин И.* Самоорганизация в неравновесных системах. М.: Мир, 1979. 512 с.
- [10] *Pagnia H., Sotnik N., Stauss.* // Phys. Stat. Sol. (a). 1985. Vol. 90. P. 771–780.