

06;12

Условия формирования единичной проводящей наноструктуры при электроформовке

© В.М. Мордвинцев, С.Е. Кудрявцев

Институт микроэлектроники и информатики РАН,
150007 Ярославль, Россия
e-mail: mvm@imras.yar.ru

(Поступило в Редакцию 22 января 2001 г.)

Экспериментально показано, что при электроформовке (образовании углеродистой проводящей среды при прохождении тока через органический материал в условиях сильного электрического поля) в открытых "сэндвич"-структурах с изолирующей щелью шириной несколько десятков нанометров существуют факторы, которые способствуют (внешнее балластное сопротивление) или препятствуют (локальное сопротивление растекания и наличие начальной проводимости по изолирующей щели) формированию единичного проводящего элемента между электродами. В терминах эквивалентной электрической схемы построена простая модель, которая позволила сформулировать баланс этих факторов и получить диаграмму ток–напряжение, демонстрирующую наличие области, в пределах которой при выполнении электроформовки можно сформировать единичную проводящую наноструктуру. Получено выражение для минимального возможного значения сопротивления наноструктуры, связанного с ее геометрическими параметрами.

Введение

Процесс электроформовки в структурах металл–изолятор–металл (МИМ) [1,2] исследуется уже в течение длительного времени. На основании анализа большого количества экспериментальных результатов и с учетом последних полученных данных было установлено [3], что электроформовку (или просто формовку) можно рассматривать как процесс самоорганизации в углеродистой проводящей среде, возникающей в изолирующей щели между металлическими электродами МИМ структуры, изолирующего зазора принципиально нанометровой ширины. Углеродистая среда образуется за счет поступающего извне органического вещества (из газовой фазы или из пленки, например фоторезиста, нанесенной на структуру), проводимость которого меняется из-за деградации органических молекул при электронном ударе в результате прохождения через него тока.

В [4] была предложена конструкция прибора, названного нано-МИМ диодом с углеродистой активной средой, в форме открытой "сэндвич"-МДМ (металл–диэлектрик–металл) структуры, в которой изолирующая щель, свободная для доступа органического материала, образуется в виде торца диэлектрической пленки толщиной несколько десятков нанометров при локальном травлении двух верхних слоев обычной "сэндвич"-МДМ структуры. Эксперименты по электроформовке в открытых "сэндвич"-структурах Al–Al₂O₃–W (алюминий–оксид алюминия–вольфрам) с толщиной окисла 20–40 nm [5] показали, что в определенных условиях образование углеродистой проводящей среды происходит только в одном месте периметра открытого торца на длине, сравнимой с шириной изолирующей щели. Это позволило говорить о возникновении единичной проводящей структуры, имеющей нанометровые размеры по всем трем измерениям.

С точки зрения практического использования нано-МИМ диода в качестве элемента энергонезависимой памяти, оказалась перспективной его конструкция в виде открытой "сэндвич"-структуры Si–SiO₂–W (кремний–диоксид кремния–вольфрам) [6], характер электроформовки в которой существенно изменился по сравнению со структурой Al–Al₂O₃–W. Эти отличия проявляются в четко выраженной тенденции к образованию углеродистой проводящей среды сразу по всему периметру изолирующей щели, что сужает возможности формирования единичной проводящей наноструктуры. Основными факторами, приводящими к такому результату, являются высокое удельное сопротивление материала кремниевого электрода и наличие значительной начальной проводимости по поверхности изолирующей щели. В данной работе обсуждаются механизмы процессов и исследуются условия, в которых при наличии этих неблагоприятных факторов тем не менее возможно формирование единичных проводящих наноструктур.

Экспериментальные результаты и механизмы процессов

Как показано в [5], наличие последовательного балластного сопротивления R_b при выполнении электроформовки способствует образованию единичного проводящего элемента (наноструктуры) в изолирующей щели открытой "сэндвич"-структуры Al–Al₂O₃–W с толщиной диэлектрика несколько десятков нанометров. Механизм этого процесса состоит в следующем. Включение высокого (не менее нескольких МΩ) последовательного сопротивления при плавном увеличении напряжения V источника питания обеспечивает наличие сильной отрицательной обратной связи между током и напряжением U на структуре. Если за счет роста проводимости

изолирующей щели структуры ток начнет увеличиваться, напряжение на ней будет автоматически резко падать. Поэтому, как только с увеличением напряженности поля в щели начинается эмиссия с первого случайного наноострия на поверхности катода (вольфрама) и образуется углеродистая проводящая среда, условия для эмиссии на всех других участках сразу ухудшаются, что и обеспечивает единичность возникающего проводящего элемента. По мере роста последнего увеличиваются его проводимость, ток, а значит, и падение напряжения на балластном сопротивлении. Это продолжается до тех пор, пока при заданном R_b напряжение U собственно на МИМ структуре не уменьшится ниже порогового U_{th} (около 3 В), после чего образование углеродистой проводящей среды становится невозможным (см. ниже) и рост наноструктуры и увеличение ее проводимости прекращаются. В случае $R_b = 0$ в структуре Al–Al₂O₃–W развивается локальный разрушительный электрический пробой.

Процесс электроформовки в открытых "сэндвич"-структурах Si–SiO₂–W, создававшихся на пластинах кремния *p*-типа, легированного бором, с разным удельным сопротивлением, имеет целый ряд особенностей [6]. Во-первых, наблюдается значительная начальная (до выполнения формовки) проводимость по изолирующей щели структур, пропорциональная длине их периметра и обусловленная, очевидно, использованием определенной химической обработки при травлении окисла кремния (детали конструкции и технологии изготовления структур приведены в [6]). Во-вторых, формовка возможна без балластного сопротивления, при этом в отличие от структур Al–Al₂O₃–W разрушающего электрического пробоя не происходит, а в высокопроводящем состоянии достигаются токи, на несколько порядков большие. Этот результат означает, что электроформовка развивается параллельно по всей изолирующей щели, т.е. углеродистая проводящая среда одновременно образуется по всем открытому периметру структуры.

Причиной последних особенностей является относительно высокое удельное сопротивление кремния, приводящее к тому, что последовательно каждой возникающей в изолирующей щели проводящей наноструктуре включается значительное локальное сопротивление R_s растекания носителей заряда в кремниевый электрод. Как показывают оценки [6], величина R_s для кремния с удельным сопротивлением 10 Ω·см имеет порядок 1 МΩ, поэтому сопротивление растекания может оказывать существенное влияние на все процессы. Его наличие, в частности, предотвращает локальные разрушающие электрические пробои. Кроме того, падение напряжения на локальном сопротивлении растекания уменьшает напряжение на образующемся проводящем элементе, не влияя на общее напряжение на изолирующей щели. Поэтому рост соответствующей наноструктуры замедляется и при достижении порогового значения напряжения прекращается вовсе, в то время как на других участках изолирующей щели возможно зарождение новых проводящих элементов. Это означает, что наличие локального

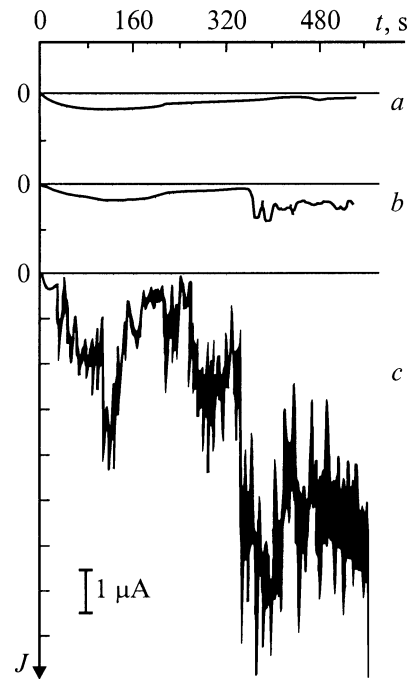


Рис. 1. Временные зависимости тока через открытые "сэндвич"-структуры Si–SiO₂–W при фиксированных напряжениях. Структуры закрыты слоем резиста. Удельное сопротивление кремния 10 Ω·см, толщина слоя SiO₂ 11.4 нм. U , В: *a* — 3.6, *b* — 4.0, *c* — 4.4.

последовательного проводящей наноструктуре сопротивления должно стимулировать параллельную электроформовку и затруднять формирование единичной наноструктуры. Эксперименты со структурами Si–SiO₂–W на высокоомном кремнии (с удельным сопротивлением 10 Ω·см) подтвердили правильность этих соображений. Все попытки реализовать режим образования единичной проводящей наноструктуры оказались безуспешными: во всех случаях развивалась параллельная формовка.

Существование начальной распределенной по изолирующей щели проводимости в структуре также способствует одновременной электроформовке на различных участках, поскольку соответствующие потоки электронов инициируют зарождение углеродистой проводящей среды сразу во многих местах. Если эта проводимость слишком высока, то, как показали эксперименты, даже в структурах на низкоомном кремнии (с удельным сопротивлением 0.1 Ω·см) не удается сформировать единичную проводящую наноструктуру.

Наличие заметного тока до начала процесса электроформовки позволяет зафиксировать собственно пороговое напряжение U_{th} начала образования углеродистой проводящей среды из органических молекул, которое проявляется как напряжение переключения электроформованной структуры из низко- в высокопроводящее состояние и обычно составляет около 3 В [2]. В данном случае оно уже не связано с напряжением, необходимым для появления тока в изолирующей щели, как это было

в структурах Al–Al₂O₃–W [5]. На рис. 1 приведены временные зависимости тока при фиксированных напряжениях U на структуре Si–SiO₂–W. Если U не превышает некоторого порогового значения U_{sf} , то наблюдается только плавный начальный ток. При напряжениях U , больших U_{sf} , с некоторым запаздыванием, тем меньшим, чем выше значение U , начинается процесс электроформовки, что видно по характерным скачкам тока с постепенным увеличением его среднего значения. Величина U_{sf} лежит в диапазоне 4–5 В и практически не меняется при варьировании толщины пленки SiO₂ в диапазоне от 10 до 40 nm. Тот факт, что она несколько больше характерных 3 В, говорит о падении части напряжения на каких-то элементах структуры. На величину U_{sf} не влияет также радиус кривизны края вольфрамового электрода (он мог меняться выбором режимов травления пленки вольфрама), что представляется вполне естественным в отличие от формовки в структурах Al–Al₂O₃–W.

Приведенные результаты позволяют утверждать, что в данном случае именно начальный плавный ток является фактором, инициирующим процесс электроформовки (образования углеродистой проводящей среды), а последний включается, когда напряжение U превышает пороговое значение U_{sf} . Все это хорошо соответствует представлениям, предложенным в [7]. Углеродистая проводящая среда возникает при деструкции органических молекул в потоке медленных электронов за счет процесса диссоциативного прилипания электрона к молекуле, состоящего в том, что при захвате электрона молекула переходит на автоталкивающий терм отрицательного иона [8]. Зависимость эффективного сечения σ такого процесса от кинетической энергии E электронов (рис. 2) имеет резонансный характер с максимумом, который может быть очень близок к нулевому значению E [9]. Для молекул, адсорбированных на поверхности твердого тела, что имеет место в рассматриваемой системе, распределение $\sigma(E)$ будет несколько смещено вниз от уровня вакуума V_0 , как качественно показано на рис. 2, *a*. Диссоциация молекулы возможна только в том случае, если электрон окажется в соответствующем энергетическом положении. Это происходит при приложении к структуре с нанометровой шириной H изолирующей щели напряжения U , несколько большего высоты потенциального барьера Φ (или несколько меньшего потенциала работы выхода ϕ_0), когда становится возможным туннелирование электрона на автоталкивающий терм молекулы (рис. 2, *b*). Поскольку типичная величина выхода составляет 4.5–5 eV, пороговое напряжение U_{sf} должно быть близко к физически выделенному значению U_{th} , которое несколько меньше ϕ_0 и бывает обычно около 3 В. Та же величина U_{th} будет получаться, если электрон туннелирует через барьер меньшей высоты и затем ускоряется электрическим полем до необходимой кинетической энергии.

Именно такой механизм определяет, очевидно, и пороговое напряжение для модификации (состоящей в деструкции молекулярных связей) поверхности твердого

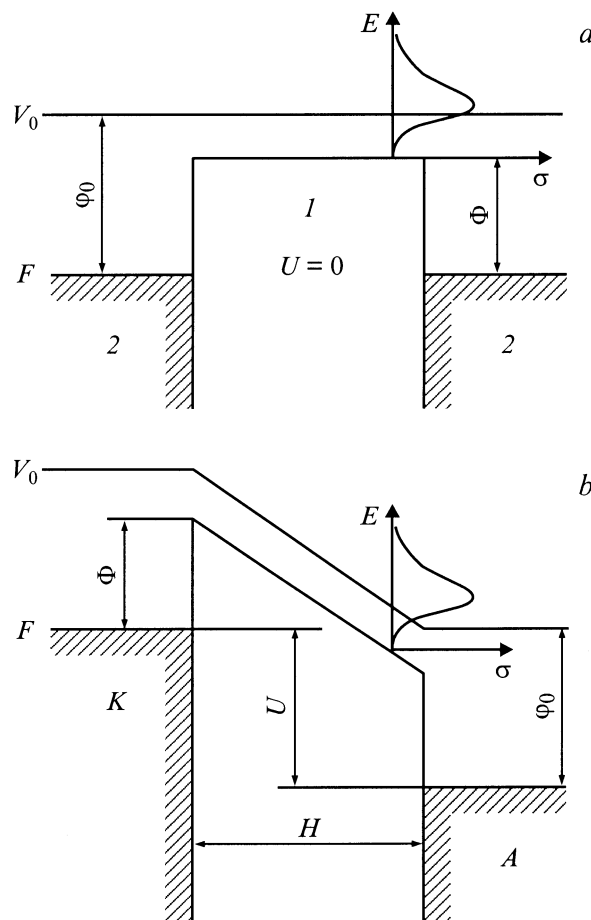


Рис. 2. Упрощенные потенциальные диаграммы МИМ структуры, поясняющие механизм, приводящий к наличию порогового напряжения U_{sf} около 3–4 В при электроформовке. Качественно показана зависимость сечения диссоциативного прилипания электрона к адсорбированной молекуле от кинетической энергии электрона. *I* — адсорбированный органический диэлектрик, *2* — металл, *K* — катод, *A* — анод.

тела с помощью сканирующего туннельного микроскопа, которое тоже составляет обычно 3–4 В [10–12], а также приводит к появлению максимума вблизи 3–4 В на квазистатических вольт-амперных характеристиках электроформованных МИМ структур, что является одной из характерных ее особенностей [2]. Наличие максимума при уменьшении напряжения связано с тем, что только при напряжениях, больших порогового, возможно образование углеродистой проводящей среды, а значит уменьшение ширины изолирующего зазора и изменение состава диэлектрика в нем.

Следует подчеркнуть, что пороговое напряжение U_{th} , определяемое описанным выше механизмом, не могло быть выявлено при исследовании начала электроформовки в структурах Al–Al₂O₃–W, поскольку в них отсутствовала начальная проводимость и процесс образования углеродистой проводящей среды лимитировался током, который начинал протекать только при напряжении,

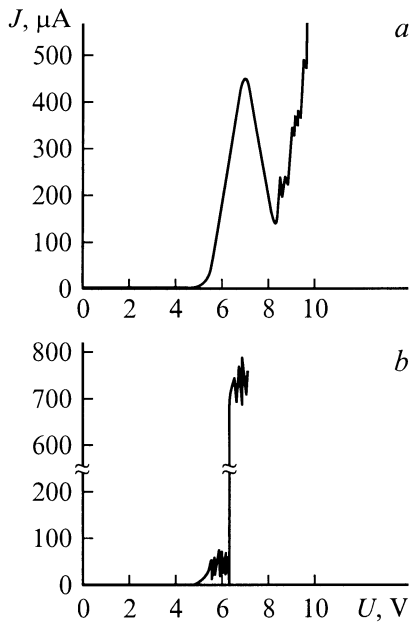


Рис. 3. Квазистатические вольт-амперные характеристики открытых "сэндвич"-структур Si-SiO₂-W в процессе их электроформовки, полученные при первом цикле увеличения напряжения без балластного сопротивления. Структуры закрыты слоем резиста. Длина открытого периметра 64 μm. Скорость изменения напряжения 0.05 V/s. Удельное сопротивление кремния, Ω·cm: *a* — 10, *b* — 0.1. Толщина слоя SiO₂, nm: *a* — 16, *b* — 17.

создающем электрическое поле, необходимое для эмиссии электронов из катода. В зависимости от профиля вольфрамового электрода U_{sf} менялось от 5 до 15 V [5]. В структурах Si-SiO₂-W ток по открытому торцу присутствует уже при очень малых напряжениях и не лимитирует начала образования проводящей среды, которое сдерживается только малыми энергиями электронов. Поэтому увеличение напряжения U позволяет достаточно надежно зафиксировать значение U_{sf} , близкое к U_{th} .

Приведенные выше результаты позволили предположить, что основное влияние удельного сопротивления ρ кремниевой подложки на процесс электроформовки в структурах Si-SiO₂-W будет состоять в изменении сопротивления растекания в кремниевый электрод. Поэтому уменьшение ρ должно приближать ситуацию к наблюдающейся в МИМ структурах. Экспериментальные данные полностью подтверждают этот вывод. На рис. 3 показаны вольт-амперные характеристики в процессе электроформовки для двух структур с близкой толщиной окисла кремния, изготовленных на разных кремниевых пластинах с удельным сопротивлением, отличающимся на два порядка. Уменьшение тока с ростом напряжения обусловлено, как известно [7], частичным выгоранием углеродистой проводящей среды. На низкоомном кремнии усредненный максимум тока на порядок ниже и смещен в сторону меньших напряжений, а ток существенно колеблется. Эти отличия от случая с высокоомным кремнием связаны именно со значительным уменьшением

сопротивления растекания, приводящим к тому, что эффект стимулирования параллельной формовки выражен очень слабо: отдельные пики тока — это акты формовки на одном или нескольких участках изолирующей щели, на которых углеродистая проводящая среда успевает образоваться и выгореть раньше, чем начинается ее образование на других участках. Поэтому амплитуды тока разнесены во времени и не складываются, как это имеет место на рис. 3, *a*.

На низкоомном кремнии путем использования высокого балластного сопротивления с дискретно меняющимся номиналом без проблем может быть реализован режим формирования единичной проводящей наноструктуры [6], аналогичный тому, который характерен для МИМ структур Al-Al₂O₃-W.

Модель

Таким образом, при электроформовке в реальных структурах Si-SiO₂-W имеют место сразу несколько факторов, влияющих на возможность формирования единичной проводящей наноструктуры, которые действуют в противоположных направлениях. Представляет очевидный интерес найти условия их равновесия. Строго говоря, процессы накопления проводящей среды и увеличения тока должны описываться системой дифференциальных уравнений, приводящих к сложной математической задаче. Однако возможно упрощенное описание таких объектов в терминах эквивалентной электрической схемы, которое учитывает основные особенности процессов.

Поскольку электроформовка обычно выполняется в квазистационарных условиях, т.е. при медленных изменениях напряжения, и интересует обычно не мгновенное, а усредненное состояние углеродистой проводящей среды в изолирующей щели, в первом приближении можно ограничиться простейшей эквивалентной схемой, включающей только активные сопротивления. Такая эквивалентная схема реальной структуры металл-изолятор-полупроводник показана на рис. 4. Последовательно всей структуре включено внешнее балластное сопротивление R_b . Последовательно каждому участку изолирующей щели 3, где возможно образование углеродистой проводящей среды (они выделяются нановыступами 4 на поверхности катода 1), существует локальное сопротивление растекания R_s . Начальная распределенная по изолирующей щели проводимость моделируется сопротивлением R_0 . Поскольку соответствующий ток распределяется по большей площади, сопротивление растекания, последовательное R_0 , не учитывается. Напряжение V источника питания медленно увеличивается (это типичный режим электроформовки), при этом напряжение U собственно на изолирующей щели структуры в общем случае составляет только его часть.

Будем сначала считать, что начальная проводимость структуры пренебрежимо мала, т.е. R_0 стремится к бесконечности. Ясно, что зарождение (автоэмиссия со случайного наноострия и последующее образование угле-

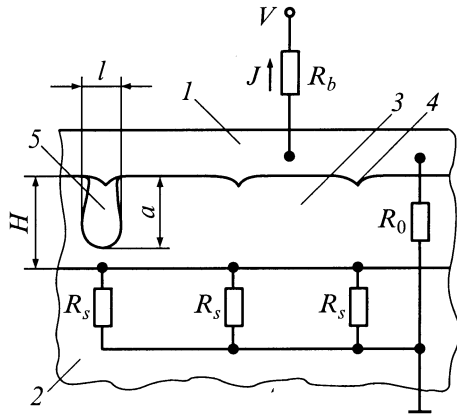


Рис. 4. Вид изолирующей щели структуры металл–изолятор–полупроводник и эквивалентная электрическая схема при электроформовке: 1 — металлический катод, 2 — полупроводниковый анод, 3 — изолирующая щель, 4 — нанострия на поверхности катода, 5 — проводящая наноструктура (углеродистая проводящая среда).

родистой проводящей среды) первого проводящего элемента при увеличении V не зависит от величин R_b и R_s и обусловлено неоднородностью эмиссии по периметру изолирующей щели, которая в реальных условиях всегда присутствует. Это и приводит к тому, что всегда начинает расти единственная наноструктура 5. Однако поскольку при этом увеличивается проводимость и ток через структуру, приводящий к появлению падения напряжения на сопротивлениях, возникает вопрос, до какого состояния (какой проводимости) она может вырасти без зарождения проводящих элементов на других участках щели.

Возникновение первого проводящего элемента характеризуется напряжением зарождения $V = U_{g1} = U_g$, соответствующим началу эмиссии в самом “слабом” месте, и только им. По мере роста наноструктуры и величины тока напряжение V перераспределяется между изолирующей щелью и сопротивлениями R_b и R_s . При условии существования только одной первой наноструктуры весь ток J протекает через нее и напряжение U_{ON} на ней

$$U_{ON} = V - J(R_b + R_s). \quad (1)$$

Напряжение U_{OFF} на всех других участках изолирующей щели, поскольку тока через них нет, равно

$$U_{OFF} = V - JR_b. \quad (2)$$

Условие того, что не произойдет зарождения других проводящих элементов, $U_{OFF} < U_{gi}$, где $i = 2, 3$ и т.д., а U_{gi} — напряжения зарождения второго и последующих элементов, представляющие собой монотонно увеличивающуюся последовательность. Если считать, что условия начала эмиссии на различных участках изолирующей щели близки, вместо последнего неравенства можно взять более сильное

$$U_{OFF} < U_g, \quad (3)$$

т.е. считать, что процесс зарождения характеризуется только одной величиной $U_g = U_{g1}$, минимальной в этой последовательности.

Условие того, что зародившаяся наноструктура может расти за счет накопления углеродистой проводящей среды,

$$U_{ON} > U_{th}. \quad (4)$$

На рис. 5 показана диаграмма, полученная из соотношений (1)–(4). Существование единичной проводящей наноструктуры возможно только в заштрихованной области. Координаты критической точки, соответствующей пересечению прямых, получаются из решения системы уравнений (1) и (2)

$$V_{cr} = U_g + (U_g - U_{th}) \frac{R_b}{R_s}, \quad (5)$$

$$J_{cr} = \frac{U_g - U_{th}}{R_s}. \quad (6)$$

Для заданных значений R_b и R_s максимальное напряжение V , при котором еще возможно сохранение единственной проводящей наноструктуры, равно V_{cr} , причем наноструктура может дорасти до такой максимальной проводимости, чтобы ток не превышал значение J_{cr} . В критической точке ее собственное сопротивление, определяемое как отношение U_{cr} к J_{cr} , равно

$$r_{cr} = \frac{U_{th}}{U_g - U_{th}} R_s, \quad (7)$$

оно не зависит ни от внешнего напряжения V , ни от внешнего балластного сопротивления R_b . Поскольку проводимость наноструктуры определяется (в предположении неизменности удельного сопротивления углеродистой проводящей среды) ее геометрическими характеристиками: величиной оставшегося зазора $h = H - a$ и шириной l (рис. 4), то условие (7) означает ограничение на размеры a и l единичной проводящей наноструктуры.

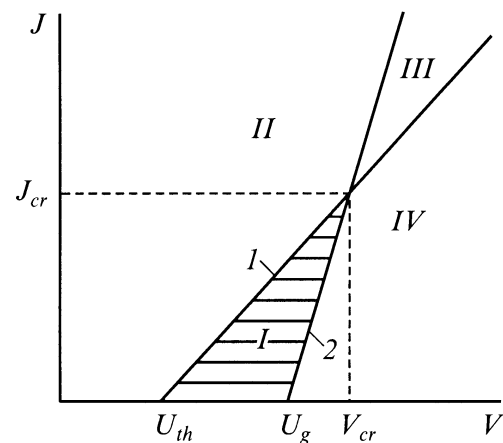


Рис. 5. Диаграмма ток–напряжение V , показывающая область существования единичной проводящей наноструктуры (заштрихована) для случая нулевой начальной проводимости.

Наклон прямой 1 на рис. 5 равен $1/(R_b + R_s)$, а прямой 2 — $1/R_b$. Поэтому в частном случае $R_s = 0$, соответствующем МИМ структуре, прямые на диаграмме становятся параллельными, критическая точка исчезает и рост единичной наноструктуры становится возможным до любой проводимости.

Область II на рис. 5 характеризуется тем, что в ней невозможно зарождение других проводящих элементов, но в отличие от области I невозможен и рост первой наноструктуры. В области III могут зарождаться другие проводящие элементы, но невозможен дальнейший рост первой наноструктуры. Наконец, в области IV могут развиваться оба процесса.

В случае, если в структуре есть заметная начальная проводимость, т.е. R_0 имеет конечную величину, включаются два дополнительных эффекта: во-первых, понижается напряжение зарождения U_g , поскольку распределенный по изолирующей щели ток инициирует образование углеродистой проводящей среды, во-вторых, R_0 оказывает шунтирующее действие на остальные процессы. Первый облегчает зарождение всех проводящих элементов, второй затрудняет появление даже первого из них.

Необходимо отметить, что напряжение зарождения U_g не есть некоторая физическая константа. Оно зависит от ширины изолирующей щели, профиля катода в нанометровом масштабе, величины распределенного начального тока по изолирующей щели, скорости нарастания напряжения. Но U_g легко находится экспериментально по скачку тока при плавном нарастании напряжения, поэтому для конкретной структуры оно имеет вполне определенную величину.

До появления первого проводящего элемента весь ток протекает через R_0 . Поскольку для его зарождения необходимо достижение на изолирующей щели напряжения U_g , должно выполняться неравенство

$$J > \frac{U_g}{R_0} = J_0. \quad (8)$$

После появления первого проводящего элемента становятся справедливыми следующие уравнения:

$$\begin{aligned} V &= JR_b + U + J_1 R_s, \\ U + J_1 R_s &= J_2 R_0, \quad J = J_1 + J_2, \end{aligned} \quad (9)$$

где J_1 — ток через "включенную" проводящую наноструктуру, J_2 — ток через сопротивление R_0 , U — напряжение на изолирующей щели.

Решение этой системы уравнений совместно с неравенством (4), соответствующим условию возможности нарастания наноструктуры дает следующее выражение для тока:

$$J < \frac{1}{R_b + \frac{R_s R_0}{R_s + R_0}} \left(V - \frac{R_b}{R_s + R_0} U_{th} \right). \quad (10)$$

Наконец, условие невозможности зарождения других проводящих элементов, кроме первого, получается из

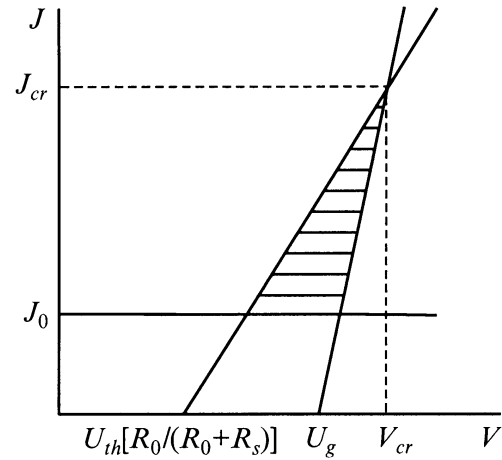


Рис. 6. То же, что на рис. 5, в общем случае.

соотношений (2) и (3) и по-прежнему дает неравенство

$$J > \frac{1}{R_b} V - \frac{1}{R_b} U_g. \quad (11)$$

Чтобы сохранялась ситуация роста единичной проводящей наноструктуры, неравенства (8), (10) и (11) должны выполняться одновременно, что соответствует заштрихованной области на диаграмме, приведенной на рис. 6. Она аналогична рис. 5, за исключением того, что появилось ограничение снизу величиной тока J_0 . Критическая точка соответствует пересечению прямых (10) и (11) и имеет следующие координаты:

$$U_{cr} = \frac{R_b R_s + R_b R_0 + R_s R_0}{R_s R_0} U_g - \frac{R_b}{R_s} U_{th}, \quad (12)$$

$$J_{cr} = \frac{R_s + R_0}{R_s R_0} U_g - \frac{1}{R_s} U_{th}. \quad (13)$$

Критическое значение тока J_{cr} по-прежнему не зависит ни от V , ни от R_b , поэтому если начальная проводимость настолько велика, что $J_0 > J_{cr}$, то образование единичной наноструктуры принципиально невозможно при любых значениях внешних параметров. Минимально возможное сопротивление единичной проводящей наноструктуры, соответствующее ее максимальному размеру, в общем случае дается формулой

$$r_{cr} = \frac{U_{th} + U_g \frac{R_s}{R_0}}{U_g - U_{th}} R_s.$$

Как видно, все последние выражения при стремлении R_0 к бесконечности переходят в аналогичные формулы, полученные для случая отсутствия начальной проводимости.

Результаты проведенного анализа хорошо согласуются с экспериментальными данными, приведенными выше. Процесс электроформовки, результатом которого должно быть формирование единичной проводящей наноструктуры, должен выполняться так, чтобы ситуация не выходила за пределы заштрихованной области на рис. 6.

Заключение

Как показали результаты экспериментов, существуют различные факторы, которые как способствуют (внешнее балластное сопротивление), так и препятствуют (локальное сопротивление растекания и начальная проводимость) формированию единичного проводящего элемента при электроформовке в открытых ”сэндвич”-структурах с изолирующей щелью шириной несколько десятков нанометров. Простая модель, построенная в терминах эквивалентной электрической схемы, позволила сформулировать баланс этих факторов и получить область в координатах ток–напряжение, оставаясь в пределах которой можно гарантированно сформировать единичную проводящую наноструктуру при выполнении электроформовки. Проводимость, а значит и размеры такого проводящего элемента, принципиально ограничены сверху, получено выражение для соответствующего крайнего значения сопротивления наноструктуры.

Работа выполнена при финансовой поддержке государственной научно-технической подпрограммы ”Перспективные технологии и устройства микро- и нанoeлектроники” Министерства науки Российской Федерации.

Список литературы

- [1] Дирнлей Дж., Стоунхэм А., Морган Д. // УФН. 1974. Т. 112. Вып. 1. С. 83–127.
- [2] Pagnia H., Sotnik N. // Phys. Stat. Sol. (a). 1988. Vol. 108. N 11. P. 11–65.
- [3] Валиев К.А., Левин В.Л., Мордвинцев В.М. // ЖТФ. 1997. Т. 67. Вып. 11. С. 39–44.
- [4] Валиев К.А., Кудрявцев С.Е., Левин В.Л. и др. // Микроэлектроника. 1997. Т. 26. № 1. С. 3–11.
- [5] Мордвинцев В.М., Кудрявцев С.Е., Левин В.Л. // ЖТФ. 1998. Т. 68. Вып. 11. С. 85–93.
- [6] Мордвинцев В.М., Кудрявцев С.Е. // Микроэлектроника. В печати.
- [7] Мордвинцев В.М., Левин В.Л. // ЖТФ. 1994. Т. 64. Вып. 12. С. 88–100.
- [8] Елецкий А.В., Смирнов Б.М. // УФН. 1985. Т. 147. Вып. 3. С. 459–484.
- [9] Johnson J.P., Christophorou L.G., Carter J.G. // J. Chem. Phys. 1977. Vol. 67. N 5. P. 2196–2215.
- [10] Лускинович П.Н., Фролов В.Д., Шавыкин А.Е. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1995. Т. 62. Вып. 11. С. 868–872.
- [11] Голов Е.Ф., Михайлов Г.М., Редькин А.Н. и др. // Микроэлектроника. 1998. Т. 27. № 2. С. 97–102.
- [12] Penner R.M., Heben M.J., Lewis N.S. // Appl. Phys. Lett. 1991. Vol. 58. N 13. P. 1389–1391.