

ФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛЯРНОЗАВИСИМОГО ЭЛЕКТРОМАССОПЕРЕНОСА В КРЕМНИИ (ПЭМП)

Б. А. Панфилов

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН,
141190, Московская обл., г. Фрязино, пл. Академика Введенского, 1

Статья поступила в редакцию 28 ноября 2018 г.

Аннотация. Под действием приложенного к электродам тестовой структуры импульса образуется область теплового шнура (ОТШ), которая расположена в объёме кремния, имеет форму цилиндра, соединяющего электроды структуры. При дальнейшем увеличении таких параметров, как напряженность электрического поля, плотность электрического тока и температуры начинается образование “снопа” - процесс полярнозависимого электромассопереноса атомов металла электрода в ОТШ. В результате этого выполняется “формовка” - превращение ОТШ в капилляр цилиндрической формы, соединяющий электроды структуры и заполненный жидким металлоподобным сплавом (ЖМС) металл - электрода – кремний. В результате прохождения импульса тока в противоположном направлении через капилляр, заполненный остывшим ЖМС, происходит процесс “выключения” - полное или частичное выдавливание ЖМС из капилляра. В результате прохождения импульса тока через пустой капилляр в направлении тока формовки происходит повторное заполнение капилляра ЖМС, или процесс “включения”. Включение и выключение может выполняться порядка 10^4 раз с сохранением любого состояния энергонезависимо сколько угодно долго. Пропусканием нарастающего импульса тока через заполненный остывшей ЖМС капилляр в направлении тока формовки можно выполнять “подстройку” - регулировать заполнение капилляра ЖМС. Можно утверждать, что совокупность процессов ПЭМП не имеет аналогов.

Ключевые слова: электромассоперенос в кремнии, тепловой шнур, металлоподобная перемычка.

Abstract. Under the action of a pulse structure applied to the electrodes, a region of thermal cord (RTC) is formed. RTC is located in the volume of silicon, has the shape

of a cylinder connecting the structure's electrodes. With further increase of such parameters as the electric field intensity, the density of the electric current and the temperature, the process of polar dependent electro migration in silicon (PDEM) of the atoms of the metal of the electrode in the RTC begins. As a result of this, the RTC is transformed into a cylindrical capillary shape, connecting the structure's electrodes and filled with a liquid metal-like alloy (LMA) electrode-metal - silicon. This process has been termed "forming". As a result of the passage of a current pulse in the direction opposite to the molding current, through a capillary filled with cooled LMA, the process of "switching off" occurs. Switching off - complete or partial extrusion of the liquid simulator from a capillary under the action of Laplace pressure forces. As a result of the passage of a current pulse through an empty capillary in the direction coinciding with the direction of the current of the molding, the capillary is refilled with LMA. This process is called "inclusion". The application to the test structure of a sequence of corresponding pulses allows switching on and off about 10^4 times while preserving any state in a non-volatile manner for an arbitrarily long time. As a result of the passage of an increasing current pulse through a capillary filled with a cooled metal-like alloy, in the direction of the forming current, after the current reaches a certain critical value, resistance oscillations are observed. This process is called the "trimming" process. It is characterized by a sharp increase in resistance with an increase in current to the next critical value. After each such oscillation, the resistance decreases. As a result, a part of the LMA is squeezed out of the capillary, at the same time around the capillary there is formed a RTC of the tubular form. It can be argued that the set of PDEM processes has no analogues.

Key words: polar dependent electro migration in silicon, thermal cord, metal-jumper.

1. Введение

С учётом имеющихся результатов постановку задачи можно сформулировать следующим образом: выяснение природы наблюдаемых физических явлений, обоснование причинно - следственной связи между ними, построение качественной физической модели функционирования основных

процессов ПЭМП: формовки, включения, выключения, подстройки сопротивления электрическим сигналом. Исследования проводились на универсальной тестовой структуре. Основные параметры этой конструкции: расстояние между электродами от 5 до 300 мкм., радиус кривизны электродов от 3 до 50 мкм., и от - 5 до - 50 мкм., трехэлектродная унифицированная конструкция, транзисторная структура, диодная структура, фрагмент резистивной матрицы (переключатель и диод) и др. В качестве задающего генератора использовался программатор, который может выдавать следующие сигналы и реализовать следующие функциональные возможности:

- 1) Трапециидальные импульсы в режиме генератора тока с регулировкой длительности переднего, заднего фронта в интервале 5мкс. - 100 Мс. и регулировкой амплитуды в интервале 0 - 1 А.
- 2) Трапециидальные импульсы в режиме генератора напряжения с такими же временными параметрами и регулировкой напряжения в диапазоне 0 - 200 В.
- 3) Производить формовку, переключать в высокопроводящее (ВП) состояние, подстраивать сопротивление в ВП состоянии до заранее заданной величины в интервале 5 - 200 Ом.
- 4) Переключать в низкопроводящее (НП) состояние, подстраивать сопротивление в НП состоянии больше заранее заданной величины в интервале 0,2 - 5 кОм.
- 5) Производить переключение из низкопроводящего состояния (НП) в высокопроводящее состояние (ВП) и обратно при заранее заданных уровнях сопротивления ВП и НП состояний в том же диапазоне, что и в п.п. 3 и 4; производить подсчёт количества полных циклов переключений.
- 6) Одновременно наблюдать: - на первом двухлучевом запоминающем осциллографе зависимости тока и напряжения от времени: на втором осциллографе - вольтамперные характеристики.

2. Формовка

Формовкой называется процесс первого включения. После проведения формовки, которую также можно охарактеризовать как технологическую

операцию, на структуре наблюдается ПЭМП. Последующие процессы имеют другую физическую природу.

Формовка заключается в пропускании через электроды структуры нарастающего импульса тока (в режиме генератора тока) в направлении, определяемом материалом электродов. Использование режима генератора тока определяется тем, что вольтамперная характеристика (ВАХ) процесса формовки имеет S-образный вид, то есть она однозначна по току и неоднозначна по напряжению [1]. Когда падение напряжения на структуре достигает пороговой величины, линейно зависящей от расстояния между электродами, происходят последовательно во времени следующие процессы:

- 1) образование электронно-токового шнура;
- 2) образование теплового шнура, когда область теплового шнура (ОТШ) соединяет электроды структуры;
- 3) электрогидродинамическое растекание расплавленного материала электрода по участку поверхности, являющейся проекцией ОТШ (образование «выступа»);
- 4) аномально быстрый полярнозависимый электромассоперенос вещества электродов в ОТШ, приводящий к образованию металлоподобной перемычки, состоящей из сплава металла электрода и кремния, заполнившего ОТШ.

Процессы образования электронно-токового шнура, теплового шнура, растекания электропроводящей жидкости известны и описаны в литературе [2,3,4]. Применительно к нашему случаю эти процессы изложены в [5]. Аномально быстрый полярнозависимый электромассоперенос вещества электродов в ОТШ был обнаружен при исследовании ПЭМП [6] и характеризуется образованием объемной иглообразной, переходящей в цилиндрическую конфигурации атомов металла электрода в ОТШ, названной нами «сноп». Сноп обладает следующими свойствами: 1) концентрация атомов убывает в продольном направлении (по мере удаления от электрода) и в поперечном направлении (по мере удаления от осевой линии ОТШ); 2) концентрация атомов в продольном направлении (x) убывает по

экспоненциальному закону: $N(x) = N_0 e^{-x/L}$, где N_0 — количество атомов, приходящихся на единицу поверхности изображения выступа, L - постоянная спада. Для образцов, у которых межэлектродное пространство покрыто слоем двуокиси кремния толщиной ~ 1 мкм. $L = 8 - 9$ мкм, если межэлектродное пространство не покрыто слоем двуокиси кремния, то $L = 4 - 5$ мкм. 3) пропускание импульса тока в том же направлении приводит к увеличению концентрации атомов металла электрода в каждой точке снопа и к увеличению его длины; пропускание тока в обратном направлении приводит к уменьшению концентрации атомов металла электрода в каждой точке снопа и к уменьшению его длины; 4) конфигурация атомов в снопе сохраняется при отключении питания, то есть энергонезависимо; 5) в тех местах снопа, где концентрация атомов металла достигает критической величины, образуется жидкая фаза сплава металл электрода — кремний (жидкая металлоподобная смесь, ЖМС). Сначала жидкая фаза сплава образуется в области максимальной концентрации атомов, вблизи выступа. Затем, по мере увеличения тока этот процесс распространяется вдоль всей ОТШ и достигает противоположного электрода.

Таким образом, в результате формовки образуется область, заполненная жидким сплавом с металлическим характером проводимости. Конфигурация этой области совпадает с ОТШ, и она соединяет электроды, т.е. является капилляром, заполненным ЖМС и соединяющим электроды. После прекращения действия импульса тока сплав остывает и переходит в твердое состояние. Сформированная таким образом металлоподобная перемычка (МП) обладает металлическим характером проводимости, находится в объеме кремния и соединяет электроды структуры [6,7].

С образованием МП процесс формовки считается завершенным. Приведенная выше качественная физическая модель формовки нуждается в комментариях.

1) Electroдами структуры является конструкция из двух электродов, нанесенных на поверхность кремния. При этом ПЭМП наблюдается как на планарных структурах [5] (электроды сформированы на одной стороне

поверхности кремниевой пластины), так и на объёмных структурах [8] (электроды сформированы с разных сторон кремниевой пластины). Для проведения исследований использовались структуры планарной конструкции, т.к. такая конструкция позволяет исследовать процессы, происходящие в межэлектродном пространстве. Используется кремний n - типа, компенсированный золотом, удельное сопротивление такого кремния равно $10^3 - 10^4$ Ом. см. Технология получения компенсированного кремния и его свойства изложены в [9].

2) Линейная зависимость напряжения формовки от расстояния между электродами показывает, что процессы формовки происходят при постоянной напряженности электрического поля $E \approx 10^3 - 10^4$ В/см. Полярность прикладываемого напряжения зависит от материала электродов. На электроды из алюминия, серебра прикладывают «плюс», на электроды из золота прикладывают «минус». (Вопрос о полярности прикладываемого напряжения см. ниже).

3) Наличие в n - кремнии введенных предварительно атомов золота (глубоких ловушек) обеспечивает возникновения электронно-токового шнура, что в свою очередь приводит к локальному увеличению проводимости и существенно облегчает возникновение теплового шнура [5].

4) Электрогидродинамическое растекание расплавленного материала электрода (в сторону противоположного электрода) по участку поверхности кремния, являющейся проекцией ОТШ, происходит в результате действия следующих факторов [5]:

а) на расплавленную часть электрода (прилегающую к ОТШ) со стороны электрического поля действует сила, направленная к противоположному электроду $F = E^2/8\pi$;

б) также на расплавленную часть жидкости, но в противоположную сторону, действует сила лапласовского давления $F = \alpha/R$, где E - напряжённость электрического поля вблизи расплавленной части металлического электрода; α — коэффициент поверхностного натяжения расплавленной части

металлического электрода; R - радиус кривизны фронта жидкости. При дальнейшем увеличении тока развивается неустойчивость, в результате которой жидкий металл вытекает по поверхности кремния вдоль проекции ОТШ в сторону противоположного электрода. Неустойчивость обусловлена тем, что по мере увеличения тока увеличивается напряженность электрического поля, увеличивается плотность поверхностного заряда в месте выгиба фронта жидкости, увеличивается температура. Это вызывает увеличение поля в месте выгиба и соответственно увеличение силы электрического поля, действующей на жидкость и уменьшения силы лапласовского давления за счёт уменьшения коэффициента поверхностного натяжения при увеличении температуры. Так образуется выступ.

Дальнейшее увеличение тока приводит еще раз к нарушению баланса сил, действующих на жидкий металл. Движение металла останавливается. Остановка электрогидродинамического растекания расплавленного металла электрода происходит, как правило, на какой либо технологической неоднородности. К этому моменту времени в ОТШ увеличиваются напряженность электрического поля, плотность электрического тока достигает величин порядка $10^7 - 10^8$ А/см², температура возрастает до ≈ 1000 К.

5) Начинается новый процесс — аномально быстрый полярнозависимый электромассоперенос атомов металла электродов в ОТШ (образование снопа). Из [10,11] следует, что при таких значениях плотности тока и температуры необходимо учитывать «электронный ветер» либо «дырочный ветер», т.е. рассеяние электронов или дырок на активированных ионах и ионах примеси. Если при достижении критической температуры, характерной для каждого вида ионов примеси в кремнии, окажется, что сечение рассеяния электронов на ионах примеси достаточно большое, то эффективный заряд ионов примеси может либо уменьшиться, либо изменить знак (при условии, что в исходном состоянии он был положительным) и направление переноса будет совпадать с движением электронов. Если же в исходном состоянии заряд иона был отрицательным, то под действием электронного ветра величина отрицательного

эффективного заряда иона увеличится. В нашем случае действие электронного ветра приводит к тому, что в том интервале температур, при котором происходят процессы ПЭМП в ОТШ, атомы золота приобретают отрицательный эффективный заряд, в то время как атомы алюминия сохраняют положительный заряд. Из этого экспериментального результата можно сделать вывод о том, что сечение рассеяния электронов на примесных ионах золота в кремнии больше, чем на примесных ионах алюминия. Таким образом, из экспериментальных результатов следует, что в кремнии существуют снопы двух сортов: у одних атомы металла в снопе имеют эффективный отрицательный заряд, а у других атомы металла в снопе имеют положительный (или, точнее, эффективный положительный) заряд. С этой точки зрения металлы можно разбить на два сорта: «положительные» и «отрицательные». Строгое решение задачи об определении эффективного заряда атомов металлов в ситуации, близкой к той, которая возникает при образовании снопа, нам неизвестно.

б) Изображение выступа и снопа на экране растрового электронного микроскопа (РЭМ) показано на рис. 1а. Из микрорентгеноспектрального анализа на рис. 1 в, г следует, что в состав снопа входят атомы металла электрода. При максимальном разрешении ~ 200 Å не было обнаружено в снопе каких либо структурных образований. Таким образом, можно предположить, что сноп представляет собой поток атомов металла электрода (в нашем случае Au или Al) в кремнии.

7) Во время действия импульса формовки происходит перемещение снопа вперед, к противоположному электроду. Это происходит вследствие того, что вместе со снопом перемещается основание снопа, то есть та часть, где уже произошло увеличение концентрации атомов металла до такой величины, при которой образовался металлоподобный сплав металл электрод - кремний. Экспериментально определена скорость перемещения основания снопа, приблизительно равная 10 м/с.

8) Микрорентгеноспектральный анализ состава МП показал, что: а) для

электродов из золота МП состоит на 90% из золота (здесь и далее весовые концентрации) и 10% кремния; б) для электродов из алюминия - 50% алюминия и 50% кремния. Из фазовых диаграмм двойных сплавов [12] были получены значения температуры жидкой фазы МП при формовке: для сплава Au - Si температура равна 920 C^0 ; для сплава Al - Si температура равна 1030 C^0 .

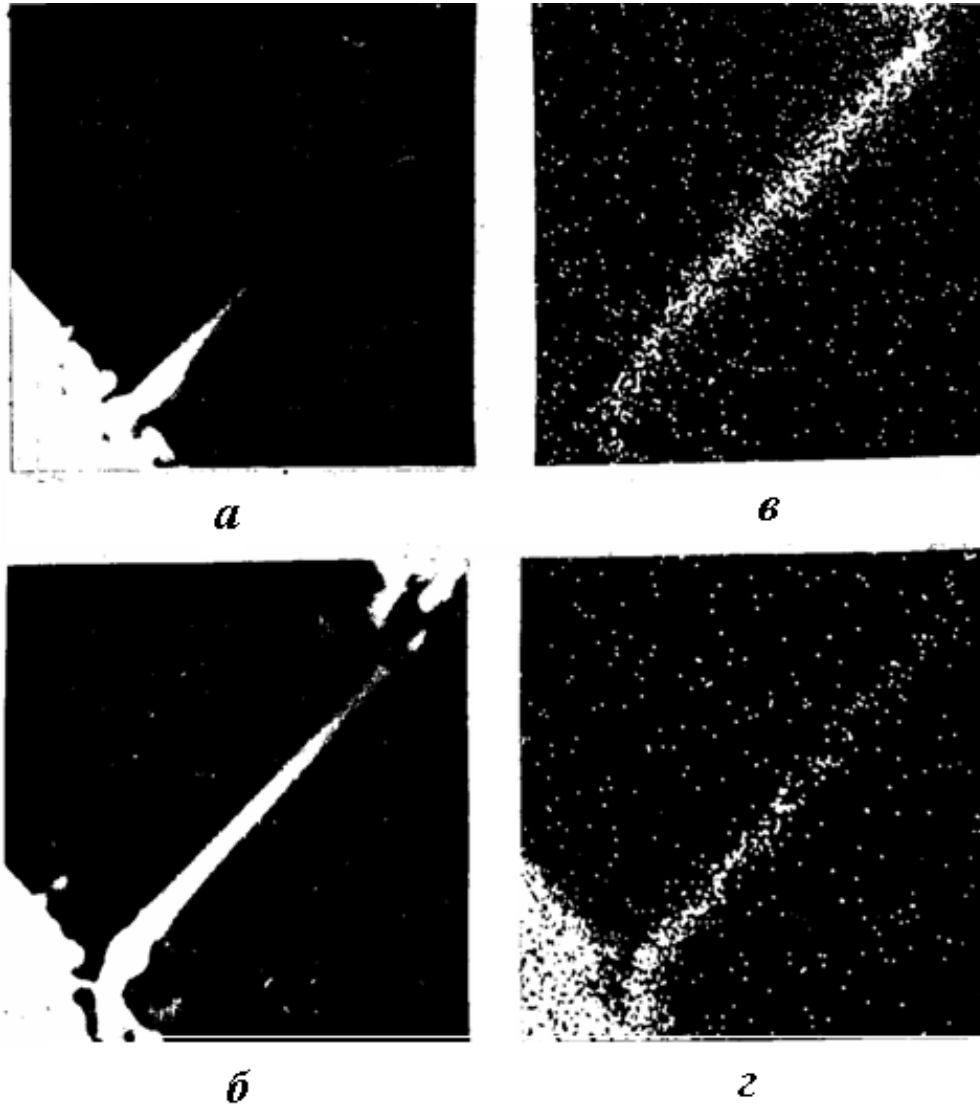


Рис. 1. Изображение выступа и снопа на экране растрового электронного микроскопа.

- а) изображение выступа и снопа во вторичных электронах после приложения двух импульсов с энергией $3 \cdot 10^{-4}$ Дж;
- б) изображение поверхности того же образца в отраженных электронах после приложения четырёх импульсов с энергией $3 \cdot 10^{-4}$ Дж.;
- в) изображение того же участка поверхности образца в характеристических лучах $AlK_{\alpha 1}$;
- г) изображение того же участка поверхности образца в характеристических лучах AuL_{α} .

Таким образом, в процессе выключения ЖМС частично или полностью выводится из капилляра.

Эти результаты получены в предположении, что неравновесное распределение концентраций двойного сплава было «заморожено» в результате прекращения действия импульса формовки и последующего резкого понижения температуры. Сохраненное таким образом распределение концентраций затем при комнатной температуре было определено рентгеновским микроанализатором на РЭМ. Из [13] следует, что для такого соотношения концентраций удельное сопротивление жидкого сплава Al - Si в интервале температур 850 - 1150 С⁰ при нормальном атмосферном давлении равно 80 мкОм см. Очевидно, что в нашем случае процессы в ОТШ происходят при давлении, намного превосходящем атмосферное.

9) Нам неизвестны результаты (если они есть) исследований, измерений или теоретических расчётов давления, температуры, удельного сопротивления и других параметров, при которых происходят процессы ПЭМП и, в частности, процесс образования МП при формовке.

10) Исследование формовки на РЭМ при сканировании электронным лучом по стандартной телевизионной развертке (Т кадра = 40 мсек., в кадре 625 строк) показали, что с разрешением 64 мксек. процесс заполнения ОТШ металлоподобным сплавом происходит непрерывно до самого завершения.

11) При исследовании структур, у которых один электрод сформирован из золота, а другой из алюминия (рис. 1 в, г), оказалось, что одновременно происходит образование двух снопов, направленных друг против друга и расположенных в ОТШ. Снопы из атомов золота и алюминия находятся в разных условиях. Действительно, атомы золота имеют эффективный отрицательный заряд и движутся в том же направлении, что и электронный ветер. Атомы алюминия сохраняют положительный заряд и в снопе движутся против электронного ветра. Казалось бы, что один сноп мог бы опередить другой по фазе развития в своем движении к противоположному электроду, при этом у основания этого снопа смогла бы образоваться ЖМС и какая то часть

ОТШ уже была бы заполнена ЖМС. Это было бы легко зафиксировать с помощью РЭМ. Но этого не происходит и создается впечатление, что существует механизм синхронизации развития снопов. Вероятно, механизм синхронизации заключается в следующем: если у одного из снопов образовалась ЖМС и падение напряжения на нём уменьшилось, то произойдет перераспределение падения напряжения на всей протяженности ОТШ таким образом, что падение напряжения на втором снопе увеличится. Это в свою очередь приведёт к увеличению интенсивности протекания процессов во втором снопе и, в конечном счете, приведет к выравниванию состояний снопов. Микрорентгеноспектральный анализ показал, что наложение двух снопов представляет собой тройной сплав кремния, золота и алюминия. По-видимому, это может представлять интерес с точки зрения микрометаллургии создания тройных сплавов металлов и кремния.

12) Для выяснения механизма формирования МП необходимо знать местонахождение и форму МП [7]. Предположим, что для планарной конструкции:

- МП формируется в результате электрогидродинамического процесса растекания металлоподобного сплава под действием электрического поля по поверхности кремния (а может быть и окиси кремния), являющейся проекцией образовавшегося в объеме кремния теплового шнура, с учетом сил лапласовского давления, электрокапиллярности и др. В этом случае МП должна быть расположена на поверхности кремния (а может быть и на окиси кремния), и её сечение должно иметь форму искаженного круга;
- МП формируется в результате протекания первой стадии (кинетический режим) физико-химического процесса растекания жидкого металла по поверхности кремния, являющейся проекцией теплового шнура. [4]. В этом случае МП должна быть расположена на поверхности кремния под слоем окиси кремния и иметь лентообразную форму;
- МП формируется в области теплового шнура. Тогда МП должна быть расположена в объеме кремния и иметь сечение в форме круга.

Таким образом, вопрос об определении местоположения и формы МП является ключевым при выяснении механизма и построении физической модели функционирования ПЭМП. Методом косого шлифа были проведены исследования местоположения и формы МП.

Из экспериментальных результатов следовало, что для планарной конструкции исследуемых структур:

а) МП формируется в объеме кремния;

б) МП имеет форму, близкую к цилиндрической;

Это, в свою очередь, дает основание сформулировать основные положения качественной физической модели функционирования ПЭМП:

- после приложения к электродам соответствующих электрических сигналов в межэлектродном пространстве (т.е. в объеме кремния) происходит ряд электронных процессов (электронная стадия), которые приводят к образованию теплового шнура в объеме кремния (тепловая стадия).

- формирование МП происходит за счет протекания процессов полярнозависимого электромассопереноса вещества электродов в области теплового шнура.

- процессы выведения материала МП из межэлектродного пространства и регулирования поперечного сечения МП происходят в той части объема кремния, которая в процессе формирования МП являлась областью теплового шнура.

- есть все основания полагать, что физическая природа ПЭМП, наблюдаемого на объёмных [8] и планарных структурах [5] - одинакова.

Изложенная выше модель формовки содержит физически обоснованную последовательность процессов и не содержит (по нашему мнению) противоречивых положений. В таком виде она сформулирована впервые.

3. Процесс выключения

В процессе выключения через МП пропускают нарастающий импульс тока в направлении, противоположном току формовки. При достижении током некоторой пороговой величины, определяемой поперечным сечением МП,

происходит оплавление МП и её превращение в ЖМС. При дальнейшем увеличении тока происходит разрыв МП в результате взрыва «металлических проволочек». Как правило, это происходит в месте соединения (контакте) МП с противоположным электродом, изготовленным либо из металла другого «сорта», либо сформированным из n^+ области в кремнии. В результате разрыва МП в капилляре, ранее полностью заполненном ЖМС, образуется «пустое место» BEFC (см. рис. 2).

Иллюстрацией вышеизложенного может служить рис. 3, на котором представлены эпюры тока и напряжения в процессе выключения при пропускании через МП пилообразного импульса тока в режиме генератора тока. Из рис. 3 следует, что на кривой $U(t)$ участок 1 соответствует твёрдому состоянию МП. По мере увеличения тока МП нагревается и на участке 2 - 3 происходит оплавление МП, при этом МП представляет собой капилляр, заполненный ЖМС. При дальнейшем увеличении температуры МП наблюдается разрыв (участок 4), когда за время не более 10^{-5} с. происходит резкое увеличение сопротивления.

Здесь уместно вспомнить, что [3]: 1) в ОТШ по мере роста тока шнур расширяется, пока не заполнит всё сечение; 2) плотность тока шнура остаётся постоянной, пока шнур расширяется.

В момент разрыва МП сразу же включаются следующие механизмы:

1. При прохождении тока по внутренней части стенок «пустого места» капилляра плотность тока достигает величин 10^7 А/см². и образуется тепловой шнур наподобие того, что мы рассматривали при формовке (участок 5 на рис. 3). Область теплового шнура имеет трубчатую форму и простирается по всей длине капилляра, соединяющего электроды. Начиная с линии смачивания ВС (см. рис. 2) образуется сноп, который также имеет трубчатую форму и обладает теми же свойствами, что и сноп при формовке.

При прохождении снопа через линию смачивания развивается неустойчивость, в результате которой линия смачивания перемещается в сторону электрода 1. Это происходит потому, что активированные атомы кремния и атомы металла

электрода под действием снопа удаляются с прилегающей к линии ВС внутренней поверхности капилляра и таким образом происходит процесс принудительного динамического «несмачивания» под действием снопа. В результате линия смачивания перемещается в сторону электрода 1, уменьшается радиус кривизны r , увеличивается лапласовское давление и, вследствие этого, какая-то очередная часть ЖМС выводится (выдавливается) из капилляра.



Рис. 2. Схематическое изображение капилляра в процессе выключения.

1 - металлический электрод (например из алюминия), 2 - электрод, сформированный из n^+ области, AEFD - капилляр, ABCD часть капилляра, заполненная жидким металлом (ЖМС), BEFC - пустая незаполненная ЖМС часть капилляра, BC — линия (окружность) смачивания.

При этом необходимо подчеркнуть, что сила, действующая на ЖМС в капилляре, прикладывается в том месте, где находится линия смачивания BC. Таким образом, в процессе выключения ЖМС частично или полностью выводится из капилляра.

2. Необходимо учесть и тот факт, что в результате резкого увеличения сопротивления при прохождении тока по стенкам пустого капилляра выделяется избыточное тепло и за счёт разогрева остаточных газов и стенок в пустой части капилляра создается избыточное давление, которое стремится выдавить ЖМС из капилляра в электрод 1 (участок 4 на рис. 3). По мере уменьшения объёма ЖМС в капилляре мощность выделения избыточного тепла увеличивается. Выдавливанию ЖМС препятствуют капиллярные силы. Величина лапласовского давления может оказаться больше избыточного давления и компенсировать действие избыточного давления. Соотношение

величин давления остаточных газов и лапласовского давления трудно оценить по причине, изложенной в замечании 10 раздела 1.1. По видимому, оно существенно не сказывается на протекании процесса выключения. Из эксперимента известно, что ток выключения (разрыва) пропорционален радиусу капилляра (т.е. при увеличении тока до пороговой величины, соответствующей оплавлению МП, происходит разрыв МП), напряжение выключения не зависит от радиуса капилляра. Получается, что процесс выключения никак не связан с величиной лапласовского давления. Это можно объяснить, предположив, что давление остаточных газов, как и лапласовское давление, пропорционально величине $1/r$, где r – радиус капилляра.

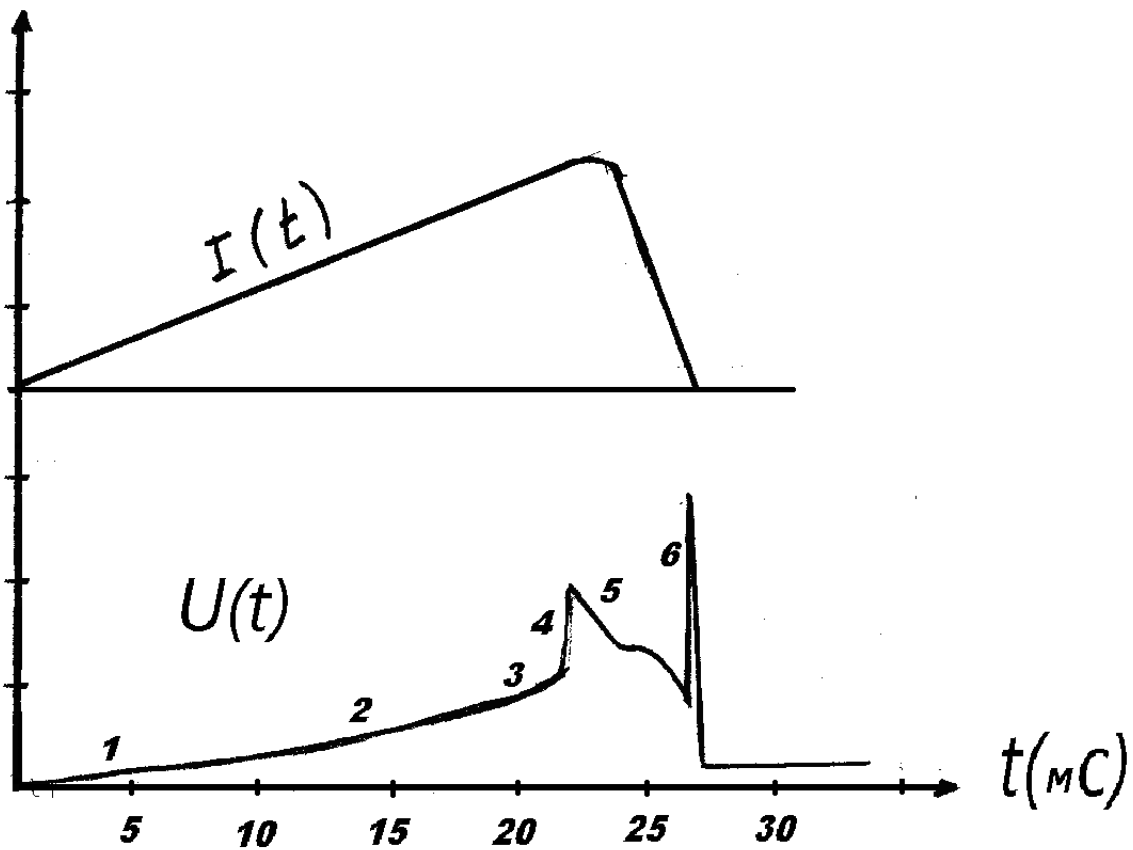


Рис. 3. Зависимости $I(t)$ и $U(t)$ в процессе выключения.

1 - МП в твердом состоянии; 2-3 - оплавление МП; 4 - процесс разрыва; 5 - образование трубчатой ОТШ; 6 - всплеск напряжения, следовательно, скачек сопротивления, обусловленный тем, что «погас» тепловой шнур и сопротивление увеличилось.

3. На конце заполненной ЖМС части капилляра, обращенной к электроду 2 (см.

рис. 2), наводится поверхностный электрический заряд, который с силой $F = E^2/8\pi$ притягивается к электроду 2. Под действием этой силы ЖМС заостряется (уменьшается радиус кривизны). В результате взаимодействия этих сил (см. п.п. 1-3) ЖМС выводится из капилляра полностью или частично. Исследование процесса выключения на РЭМ при сканировании электронного луча в режиме телевизионной развертки представлено на рис. 4 г, д., е, ж, з. Анализируя кадры видеозаписи процесса выключения можно сделать следующие выводы. Сила, которая приводит в действие механизм выведения металлоподобной смеси из капилляра, прикладывается к тому концу капилляра, где произошел разрыв МП, по линии смачивания. Это полностью согласуется с механизмом воздействия трубчатого снопа на линию смачивания, изложенным в п. 1. и подтверждается тем, что на кадрах видеозаписи наблюдается участок с большим поперечным сечением в виде капли в месте нахождения линии смачивания. Наличие такого участка с увеличенным поперечным сечением свидетельствует о том, что: сила взаимодействия снопа и капилляра приложена в районе линии смачивания; пропускная способность капилляра не позволяет сразу же вывести всю выдавливаемую жидкость в исходный металлический электрод; локальное увеличение поперечного сечения можно объяснить тем, что окружающая капилляр среда не является твердым кристаллическим кремнием, а аморфной мягкой, по-видимому, жидкой средой из расплавленного кремния. Действие поля (п. 3) сказывается в том, что конец капилляра (рис. 4 е, ж, з) имеет малый радиус кривизны.

Процесс выключения можно считать состоявшимся, если капилляр частично или полностью освободился от металлоподобной смеси (рис. 4 з). Анализируя вышеизложенное, можно заключить, что: а) основным механизмом процесса выключения является развитие неустойчивости, в результате которой под действием трубчатого снопа линия смачивания перемещается в сторону электрода 1 и ЖМС выводится из капилляра; б) капилляр в процессе выключения находится в аморфной, легко деформируемой (жидкой?) среде.

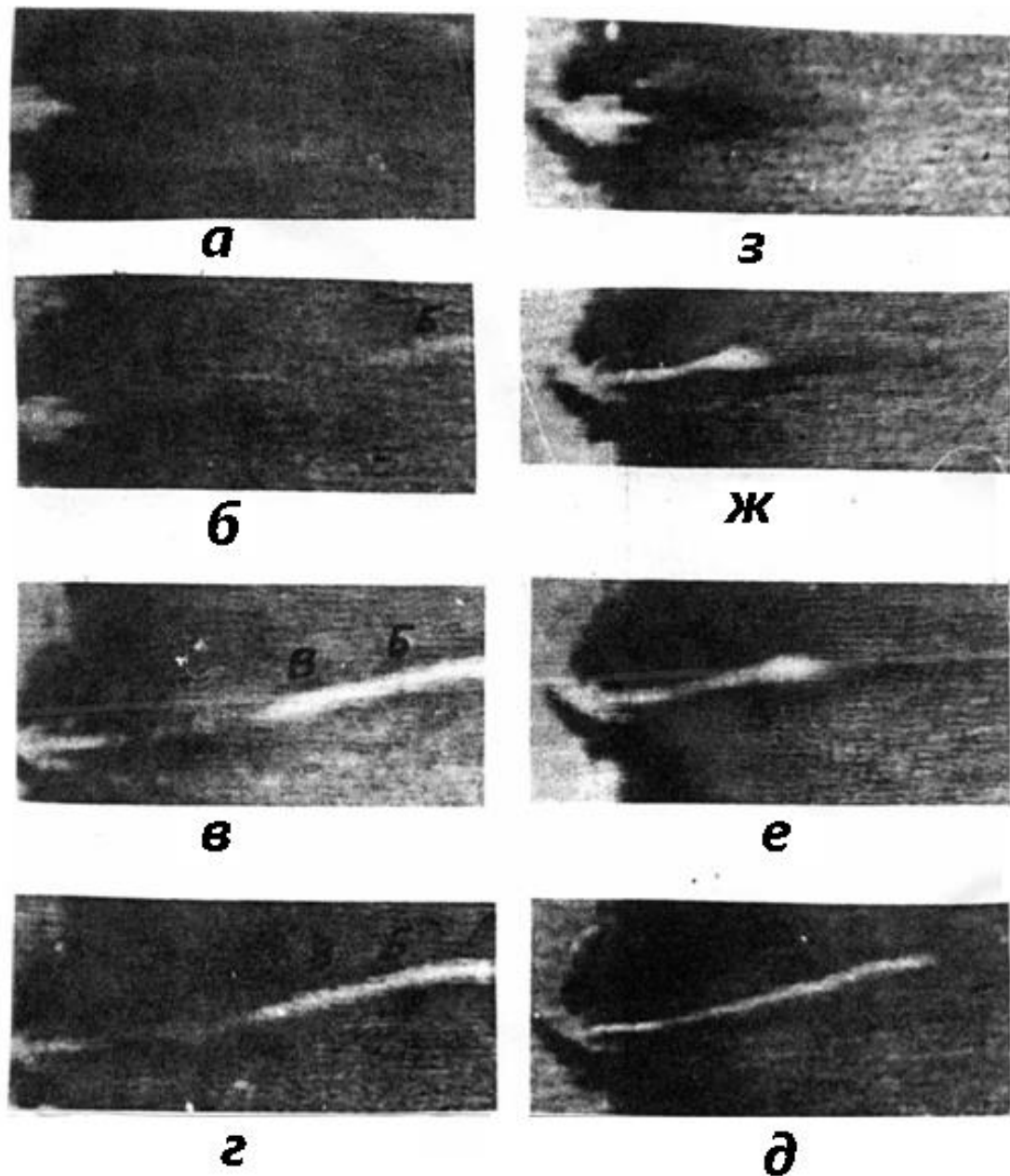


Рис. 4. Кадры видеозаписи процессов включения и выключения.

а - исходное выключенное состояние; б - спустя 40 мс после подачи напряжения включения; в - спустя ещё 40 мс, г - конечное включенное состояние, оно же является исходным для процесса выключения: д, е, ж, -этапы процесса выключения с интервалом 40 мс; з - конечное выключенное состояние.

4. Процесс включения

В процессе включения через пустой капилляр, соединяющий электроды структуры, пропускают нарастающий импульс тока в режиме генератора тока в том же направлении, что и при формовке. В результате последовательно во времени происходят следующие стадии процесса включения, которые

иллюстрируются на рис. 5.

1. При прохождении тока по внутренней части стенок капилляра плотность тока достигает величин 10^7 А/см.² и образуется тепловой шнур наподобие того, что мы рассматривали при формовке. Область теплового шнура имеет трубчатую форму и простирается по всей длины капилляра. В ОТШ образуется сноп, который также имеет трубчатую форму, расположен в приповерхностной области капилляра с внутренней стороны и обладает теми же свойствами, что сноп при выключении и формовке.

2. Трубчатый сноп невозможно наблюдать на РЭМ вследствие его тонких стенок.

3. Под действием снопа ЖМС тонким слоем покрывает внутреннюю поверхность капилляра и движется в сторону противоположного электрода 2. Такое покрытие является идеальной средой для полного смачивания ЖМС на стен-

ках капилляра. Таким образом, происходит процесс динамического смачивания под действием снопа. В результате, сноп, как насос, перекачивает ЖМС от одного электрода (1) к другому (2) и «заодно» смачивает внутреннюю поверхность капилляра тонким слоем ЖМС.

4. Часть ЖМС, выведенная из капилляра во время предыдущего процесса выключения и остывшая (перешедшая в твердое состояние), под действием выделяемого в капилляре тепла переходит в жидкое состояние и деформируется под действием электрического поля (рис.5 б). В результате дальнейшего увеличения напряженности электрического поля расплавленная часть ЖМС отрывается от холодной твердой части и перемещается внутри капилляра в сторону электрода 2. (рис.5 в). Такое перемещение капли ЖМС внутри капилляра характеризуется следующими особенностями: материал капли и внутреннего покрытия стенок капилляра одинаков или почти одинаков, следовательно, материал капли будет полностью или почти полностью смачиваться со стенками капилляра и равномерно растекаться по внутренней поверхности капилляра, принимая форму трубчатой капли. При этом

внутреннее покрытие вместе со снопом перемещается в сторону электрода 2. В таком виде трубчатая капля ЖМС перемещается внутри капилляра под действием силы электрического поля и снопа и достигает противоположного электрода; через какое то время очередная порция расплавленной части сплава отрывается от основной холодной твёрдой массы и таким же образом достигает противоположного электрода. Этот процесс продолжается до полного заполнения капилляра ЖМС.

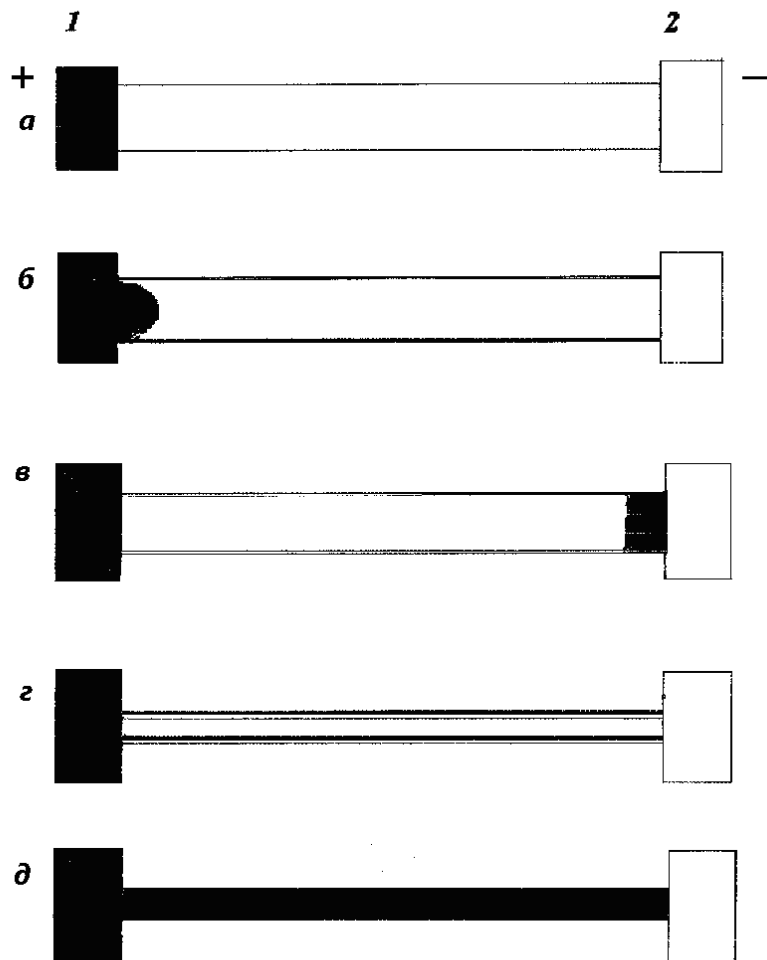


Рис.5. Схематическое изображение капилляра в процессе включения.

1 - металлический электрод (например, из алюминия), 2 - электрод, сформированный из n-области.

а. Исходное состояние.

б. После приложения импульса включения образовался тепловой шнур, в ОТШ образовался трубчатый сноп, прилегающая к капилляру часть остывшей ЖМС расплавилась и под действием электрического поля деформировалась.

в. Под действием сил электрического поля часть ЖМС оторвалась и переместилась по капилляру до противоположного электрода 2.

г. В тонком капилляре в результате образования трубчатого снопа внутренняя часть капилляра покрылась тонким слоем ЖМС.

д. Под действием капиллярных сил и сил электрического поля ЖМС заполнила капилляр.

5. При рассмотрении процесса включения необходимо учитывать тот факт, что при прохождении электрического тока по внутренней приповерхностной области капилляра (образование ОТШ, снопа) выделяется для такого объёма ($V \approx 50 \text{ мкм}^3$) за время действия импульса включения огромное количество тепла ($Q \approx 10^{-4}$ кал.), в результате чего давление остаточных газов повысится (до величин порядка $10^3 - 10^5$ атмосфер). Если бы перемещение ЖМС происходило сплошным потоком (как поршень), то необходимо было бы рассматривать механизм преодоления такого давления. Перемещение ЖМС по стенкам капилляра происходит либо в виде трубчатой капли, либо растекается равномерно по внутренним стенкам капилляра в сторону противоположного электрода. Это снимает проблему.

Таким образом, в предлагаемой модели процесса включения рассматриваются два варианта электропереноса: 1) растекание ЖМС по внутренней поверхности капилляра под действием сил электрического поля (снопа), когда скорость оплавления ЖМС равна скорости её расхода в результате перекачки ЖМС по стенкам капилляра; 2) когда скорость оплавления и электрическое поле увеличиваются, возможен вариант движения ЖМС в виде капель.

Первый вариант растекания ЖМС более вероятен для тонких капилляров ($r < 1 \text{ мкм}$), когда расход ЖМС требуется небольшой, а капиллярные силы препятствуют образованию капли под действием электрического поля (см. рис. 5 г, д). Во втором варианте, наоборот, при $r > 1 \text{ мкм}$ более вероятно развитие событий так, как было при образовании выступа в процессе формовки: - В результате нагревания часть твёрдой металлоподобной смеси переходит в жидкое состояние (т.е. ЖМС). На поверхности ЖМС под действием электрического поля наводится поверхностный электрический заряд. Под

действием силы электрического поля, действующей на этот заряд, развивается неустойчивость, в результате которой образуется деформация на поверхности ЖМС (рис. 5 б.), которая переходит в каплю, капля разрастается, отрывается и в виде трубчатой капли под действием сил поля и снопа и перемещается по капилляру до электрода 2 (см. рис. 5 в). Независимо от радиуса капилляра процесс продолжается до полного заполнения капилляра металлоподобной жидкостью. В зависимости от величины импульса тока и его продолжительности в процессе включения, ЖМС в капилляре будет иметь форму трубы с возрастающей со временем толщиной стенок вплоть до полного заполнения, т.е. цилиндрической формы.

Изложенная выше физическая модель подтверждается результатами исследований процесса включения на РЭМ, работающего в режиме телевизионной развертки. На рис.4 а, б, в, г показаны кадры видеозаписи процесса включения. На рис. 4 а исходное выключенное состояние. На рис. 4 б. показано изображение поверхности структуры, когда первая капля (Б) прошла через капилляр до противоположного электрода, последующие капли наслаиваются на предыдущие (рис 4 в). На рис. 4 в. капилляр заполнен больше чем наполовину и рост МП, то есть наполнение капилляра ЖМС, происходит от противоположного электрода и в противоположном направлении в полном соответствии с вышеизложенной моделью. На рис. 4 г. показан заполненный капилляр. Это означает, что процесс включения завершен.

Из вышеизложенного следует, что представленная модель процесса включения и результаты эксперимента находятся в полном согласии.

При рассмотрении процессов формовки, выключения и включения представляет интерес следующий эксперимент, подтверждающий изложенные выше качественные физические модели этих процессов. Изготовлена симметричная структура, у которой оба электрода одинаковы и сформированы из одинакового металла, например, из алюминия. После приложения импульса формовки «работает» тот электрод (первый), к которому приложен положительный потенциал и происходят процессы, изложенные в качественной

физической модели формовки. Если и после формовки мы приложим импульс тока той же полярности к тому же первому электроду, то, в полном соответствии с изложенной качественной физической моделью процесса включения, из него алюминий будет перекачиваться через капилляр в противоположный, отрицательный (второй) электрод и поступать в него уже в виде ЖМС. При этом на РЭМ или даже в оптическом микроскопе будет отчетливо видно, как на втором электроде накапливается ЖМС в виде увеличивающейся капли, а в окрестности первого электрода отчетливо наблюдается уменьшение площади, покрытой алюминием. Если поменять знак прикладываемого напряжения, то будет наблюдаться то же самое, только электроды поменяются местами. Из этого эксперимента следует, что капилляр выполняет функцию микронасоса, который качает ЖМС только в одном направлении, определяемом полярностью прикладываемого напряжения (в зависимости от материала электрода), в данном случае от положительного электрода к отрицательному.

Такой же эксперимент проведен и с электродами из золота. Но теперь капилляр качает ЖМС также в одном направлении в зависимости от полярности прикладываемого напряжения, т.е. ЖМС движется от отрицательного электрода к положительному. Из этого эксперимента следует, что капилляр можно рассматривать как микронасос, который «качает» в строго определённом направлении, зависящем от материала электрода.

5. Подстройка сопротивления МП электрическим сигналом

В исходном состоянии исследуемая структура находится во включенном состоянии. Подстройка сопротивления происходит за счет пропускания через МП, т.е. через заполненный металлоподобной смесью капилляр, нарастающего импульса тока в том же направлении что и при формовке в режиме генератора тока. Иллюстрацию процессов подстройки сопротивления удобно проводить с использованием перерисованных с экрана осциллографа зависимостей тока и напряжения от времени в процессе подстройки сопротивления и схематического изображения процесса подстройки сопротивления на рис.б.

Сначала рассмотрим процессы подстройки сопротивления на структурах с электродами из золота.

В результате прохождения через МП нарастающего импульса тока последовательно во времени происходят следующие процессы:

нагревание МП, оплавление МП, разрыв МП в месте технологической неоднородности за счет термодиффузии, образование ОТШ вокруг капилляра. Следствием разрыва является образование пустого места в ранее заполненном капилляре (см. рис.6 б, BEFC).

При образовании разрыва напряжение практически мгновенно ($\Delta t < 10^{-5}$ с) возрастает на величину, равную падению напряжения на участке разрыва, (ток при этом продолжает нарастать). За короткий отрезок времени, определяемый «скачком» напряжения на участке разрыва выделяется большое количество тепла. Результатом является резкое повышение температуры и давления, а, следовательно, частичное испарение ЖМС и резкое уменьшение её коэффициента поверхностного натяжения α . Одновременное уменьшение α и увеличение давления за этот короткий отрезок времени приводит к тому, что баланс сил (лапласовского давления и направленной в противоположную сторону силы давления за счёт разогрева остаточных газов в месте разрыва МП) нарушается в пользу увеличившейся силы давления остаточных газов. Это приводит к тому, что ЖМС перемещается на некоторое расстояние и образуется «пустое» место BEFC (см. рис.6 б). С течением времени за счёт теплопроводности кремния температура несколько спадает, а, следовательно, уменьшается давление и увеличивается α , ток растёт, растёт напряженность электрического поля, растет площадь поперечного сечения ОТШ и снопа вокруг «пустого» места (см. рис.6.б). Это в свою очередь приводит к реализации механизма, действующего в процессе включения. В итоге на участке разрыва формируется МП вновь, но большего поперечного сечения. Вокруг капилляра, который был вне области разрыва и остался заполненным ЖМС (участок ABCD на рис.6.б), также вследствие увеличения тока, образуется ОТШ и сноп, а затем во всём объёме этого снопа формируется

ЖМС.

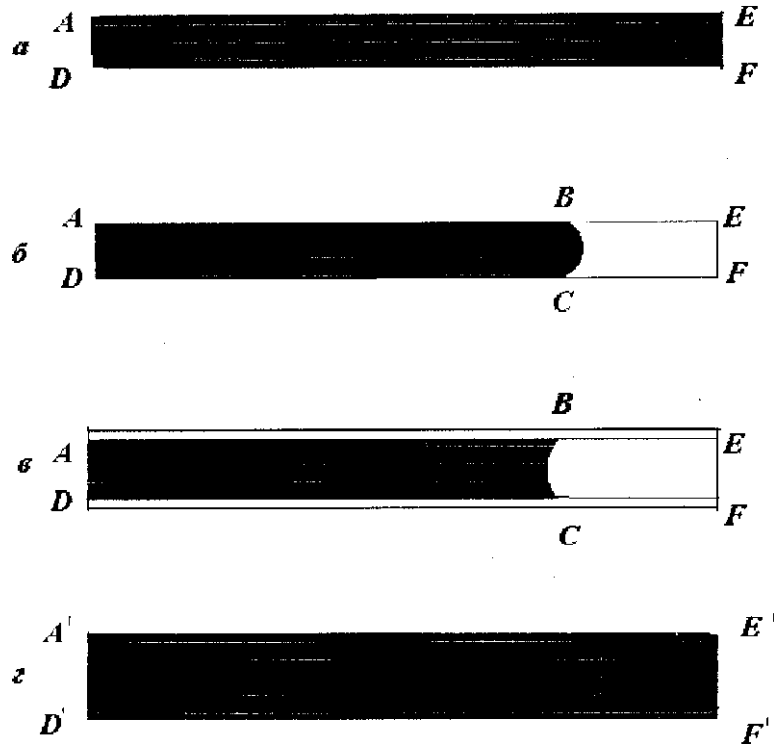


Рис. 6. Схематическое изображение капилляра в процессе подстройки сопротивления электрическим сигналом.

- а. Исходное состояние. Капилляр заполнен ЖМС.
- б. Промежуточное состояние после первого «скачка» напряжения.
- в. Образование ОТШ трубчатой формы вокруг капилляра.
- г. Конечное состояние после первого «скачка» напряжения.

Таким образом за время первого скачка напряжения на всей протяженности ОТШ формируется новая перемычка большего поперечного сечения, то есть меньшего сопротивления (рис.6 в). Но ток продолжает увеличиваться и по достижении следующей критической величины повторяется то же самое, только при ещё больших токах и больших поперечных сечениях, и т.д. до прекращения действия импульса тока. Аналогичная картина подстройки сопротивления сформированной МП наблюдается на структурах с электродами из алюминия с той лишь разницей, что частота осцилляции сопротивления у таких структур примерно на порядок больше, чем у структур с электродами из золота. При рассмотрении этого вопроса необходимо учесть следующий фактор: для структур, у которых электроды сформированы из золота или из алюминия,

основные параметры расплава металл электрода - кремний, определяющие течение процесса подстройки сопротивления, примерно одинаковы: температура, удельное сопротивление, удельный вес, коэффициент поверхностного натяжения, удельная теплоёмкость. Принципиальная разница заключается лишь в том, что для электродов из золота и алюминия процесс происходит при разных, т.е. противоположных, направлениях тока. Это, несомненно, должно сказаться на величине тепла Пельтье, которое выделяется или поглощается в месте контакта капилляра с электродом 2 (см. рис. 6). Так как этот процесс происходит при больших значениях температуры и давления за время формирования новой МП большего диаметра, то даже качественная оценка затруднительна.

Несомненно, одно: разница в виде ВАХ для электродов из Au и Al объясняется (по крайней мере «в том числе») тем, что для структур с электродами из Au тепло Пельтье выделяется в месте контакта капилляра с электродом 2 (см. рис. 6). Выделение дополнительного тепла приводит к увеличению температуры и давления в процессе разрыва и как следствие этого к увеличению объёма пустого места BEFC. Это, в свою очередь, приводит к увеличению времени до следующего скачка сопротивления, а следовательно, приводит к уменьшению частоты осцилляции. Поглощение дополнительного тепла в структурах с электродом из алюминия, наоборот, приводит в конечном счете к увеличению частоты осцилляции сопротивления.

Методика подстройки сопротивления в процессе формовки изложена в [14], для сформованных структур, т.е. в процессе эксплуатации, изложена в [15]. Необходимо отметить, что обнаружение явления электрической подстройки сопротивления с энергонезависимым хранением выставленного состояния существенно расширяет функциональные возможности элементов и устройств на базе ПЭМП.

6. Заключение

В результате выяснения природы наблюдаемых физических явлений ПЭМП и обоснования связи между ними была построена качественная

физическая модель функционирования основных процессов ПЭМП, которую кратко можно сформулировать следующим образом:

1. Формовка.

Под действием приложенного к электродам структуры импульса формовки образуется ОТШ, которая расположена в объёме кремния, имеет форму цилиндра, соединяющего электроды структуры; - при увеличении напряженности электрического поля до $\sim 10^4$ В/см., плотности электрического тока до 10^7 А/см.², температуры до 1000 °С начинается процесс полярнозависимого электромассопереноса атомов металла электрода в ОТШ, названный нами жаргонным словом «сноп». Было выяснено, что: - первоначально сноп имеет форму острья, выходящего из выступа; - концентрация атомов в снопе уменьшается вдоль оси по мере удаления от исходного металлического электрода и в радиальном направлении в направлении от оси; - атомы металла электрода в снопе имеют как положительный эффективный заряд (Al), так и отрицательный эффективный заряд (A), направление тока формовки определяется материалом электрода; - с течением времени концентрация атомов металла электрода растет в каждой точке снопа и в основании снопа в первую очередь достигает критической величины, соответствующей образованию жидкой фазы двухкомпонентного сплава металл электрода - кремний: - в течение действия импульса формовки жидкая фаза распространяется вдоль ОТШ и заполняет её; - таким образом, ОТШ превращается в капилляр цилиндрической формы, соединяющий электроды структуры и заполненный жидким металлоподобным сплавом (ЖМС) металл - электрода - кремний; - после окончания действия импульса формовки ЖМС остывает и превращается в твердую металлоподобную перемычку (МП), соединяющую электроды. С образованием МП процесс формовки считается завершенным. Вышеизложенные основные положения процесса формовки сформулированы на основании обобщения результатов проведенных экспериментальных исследований. Анализ литературных источников показал, что неизвестны научные публикации, в которых бы

описывалась последовательность физических явлений, в результате протекания которых два электрода, нанесённые на поверхность полупроводника, становились соединёнными металлической перемычкой, сформированной в объёме полупроводника. Из анализа литературы также следует, что не описаны такие физические явления как образование снопа и его свойства, образование капилляра внутри полупроводника, заполненного жидким металлоподобным сплавом и соединяющего электроды структуры.

2. Процесс выключения.

В результате прохождения импульса тока в направлении, противоположном току формовки, через капилляр, заполненный остывшей металлоподобной смесью, реализуется ситуация, в результате которой происходит принудительное несмачивание нагретой ЖМС со стенками капилляра. Следствием этого является выдавливание ЖМС из капилляра под действием сил лапласовского давления. Процесс выключения считается завершённым, если ЖМС частично или полностью выводится из капилляра.

3. Процесс включения.

В результате прохождения импульса тока через пустой (т.е. в нём нет ЖМС) капилляр в направлении, совпадающем с направлением тока формовки, реализуется ситуация, при которой происходит принудительное смачивание стенок капилляра ЖМС. Следствием этого является реализация двух вариантов заполнения капилляра ЖМС: - движение ЖМС по стенкам капилляра в результате полного смачивания в сторону противоположного электрода вплоть до заполнения капилляра (этот вариант реализуется для капилляров, у которых радиус меньше 1 мкм.); - движение капель ЖМС, имеющих трубчатую форму, т.е. форму колец, вдоль стенок капилляра под действием сил электрического поля до противоположного электрода одновременно с движением ЖМС под действием сил лапласовского давления. Процесс включения считается завершённым, когда капилляр заполнится ЖМС. При этом капилляр можно рассматривать как микронасос, перекачивающий ЖМС от одного электрода к другому. Приложение к структуре, на которой наблюдается ПЭМП,

последовательности импульсов, в результате которых происходят процессы включения и выключения, позволяет производить циклические переключения порядка 10^4 раз с сохранением любого состояния энергонезависимо сколько угодно долго. Из анализа литературы следует, что неизвестны какие либо физические процессы, состоящие из последовательного протекания нескольких физических явлений, сначала приводящие к формированию металлической перемычки в объеме кремния, а затем к выведению материала металлической перемычки из места нахождения металлической перемычки, и при этом такое переключение могло бы происходить много раз с сохранением любого состояния энергонезависимо неопределенно долго.

4. Подстройка сопротивления электрическим сигналом.

В результате прохождения нарастающего импульса тока через капилляр, заполненный остывшим металлоподобным сплавом, в направлении тока формовки, после достижения током некоторой критической величины, определяемой поперечным сечением капилляра, наблюдаются осцилляции сопротивления. При этом после каждого акта осцилляции сопротивление уменьшается. Каждый акт осцилляции характеризуется протеканием следующих процессов: при увеличении тока до очередной критической величины происходит резкое увеличение сопротивления в результате термодиффузии на технологической неоднородности (участке с повышенным сопротивлением) и образованием пустого (т.е. свободного от ЖМС) места; следствием этого является резкое выделение огромного (для объема пустого места) тепла, в результате чего резко увеличиваются температура и давление. Перечисленные процессы происходят за отрезок времени не более 10^{-5} секунды. Далее ЖМС нагревается и частично испаряется: уменьшается коэффициент поверхностного натяжения ЖМС а, следовательно и величина лапласовского давления; баланс между давлением в пустом месте и лапласовским давлением нарушается, и часть ЖМС выдавливается из капилляра; одновременно с этим вокруг капилляра образуется ОТШ трубчатой формы. Далее происходит всё как в процессе включения.

Из анализа литературы следует, что подобный процесс подстройки сопротивления нигде не описан.

Также можно утверждать, что совокупность процессов ПЭМП не имеет аналогов.

Представляют определённый интерес работы, посвященные высокотемпературным исследованиям теплового пробоя [16] и токовым неустойчивостям [17] в кремнии. Собственно интерес представляют эти работы только включая стадию образования ОТШ (выражаясь в терминах ПЭМП), так как дальнейшее развитие событий в них имеет мало общего с ПЭМП. Здесь уместно подчеркнуть, что специфика ПЭМП только и начинается после образования ОТШ.

Большой интерес вызывают работы по исследованию свойств металлов в процессе их быстрого нагрева электрическим током большой мощности [18]. Разработаны методики исследования процессов плавления и параметров жидкого состояния металлов. Особый интерес представляют методики экспериментов, в которых металлы (как правило, в виде проволоки) помещаются в толстостенные капилляры для исследования зависимости электросопротивления жидких металлов от давления. В частности, для ситуации, которая реальна для таких процессов ПЭМП как выключение и подстройка сопротивления, оценена величина давления, равная $\sim 10^4$ атм. Там же приведены результаты исследования процессов электрического взрыва металла и как следствие этого, исчезновения металлической проводимости. Очевидно, подобные процессы в той или иной степени происходят и в ПЭМП. Можно заключить, что освоение методик [18] для исследования структур, в которых наблюдается ПЭМП, позволит получить новые интересные результаты по физической природе процессов ПЭМП.

Литература

1. С.А.Гаряинов, Ю.С.Тиходеев Физические модели полупроводниковых приборов с отрицательным сопротивлением, Москва, «Радио и связь», 1997.
2. А.Ф.Волков, Ш.М.Коган, УФН, 96, 633, 1968.

3. А.Милнс. Примеси с глубокими уровнями в полупроводниках, «Мир», Москва, 1977.
4. Б.Д.Сумм, Ю.В.Горюнов. Физико-химические основы смачивания и растекания, Москва, Химия, 1976.
5. Панфилов Б.А., Степанов Г.В., Елинсон М.И. и др. Исследование явления переноса материала электродов по поверхности кремния, приводящее к переключению с памятью. - Микроэлектроника, 1977, т.6, с.20.
6. Б.А.Панфилов. Исследование бистабильного переключения с массопереносом вещества электродов в структурах металл - кремний - металл, Дис. к.ф-м.н. М., ИРЭ АН СССР, 1981.
7. Панфилов Б. А. К вопросу о местонахождении и форме высокопроводящей перемычки при полярнозависимом электромассопереносе в кремнии // Микроэлектроника. 2002. т. 31. в 4. С 303-306.
8. Панфилов Б.А., Огрин Ю.Ф., Елинсон М.И. Эффект переключения и памяти на структуре металл-кремний-металл. Микроэлектроника, 1975, т.4, вып.4, с, 366.
9. Болтакс Б.И., Бахадырханов М.К., Городенский С.М., Куликов Г.С. Компенсированный кремний. Л., Наука, 1972.
10. Белашенко Д.К. Явления переноса в жидких металлах и полупроводниках. Атомиздат, М., 1970.
11. Фикс В.Б. Ионная проводимость в металлах и полупроводниках (электрперенос). Наука, М., 1969.
12. Massalski T.V. Binary Alloy Phase Diagrams (American Society for Metals International. Ohio, 1990) 2nd ed., p. 428.
13. Okada T. and Onho S. Electrical Properties Si and Liquid Au-Si Alloys. Journal of the Phys. Soc. of Japan, vol. 72, No.2, February 2003, pp. 352-356.
14. Панфилов Б. А. Способ соединения в приборах на основе твердого тела. Патент РФ №1311536. Бюллетень изобретений, 1992, №11, С. 255.
15. Панфилов Б.А. Способ соединения электродов металлической перемычкой в твердотельных приборах. Патент РФ №1389135. Бюллетень изобретений, 1992, №11, С. 251.

16. Палко Э.В., Тарасова А.А., Шулекин А.Ф., Юферов В.С. Высокотемпературная стадия теплового пробоя полупроводников. ЖТФ, т. 61, в. 6, 1991, с. 76-82.
17. Кардо-Сысоев А.Ф., Козлов В.А. Высокотемпературные токовые неустойчивости в кремнии, ФТП, т. 14, в. 6, 1980, с. 1167-1174.
18. Лебедев С.В., Савватимский А.И. Металлы в процессе быстрого нагревания электрическим током большой плотности. УФН, т. 144, в. 2, 1984, с. 215-250.
19. Тихонов А.Н., Самарский А.А., Уравнения математической физики, Гостехиздат, 1953.
20. Панфилов Б.А. Физико-технические и функциональные характеристики унифицированной структуры ячейки памяти, работа которой основана на полярнозависимом электромассопереносе в кремнии. РНТОРЭС им. А.С. Попова. LVII НАУЧНАЯ СЕССИЯ, ПОСВЯЩЕННАЯ ДНЮ РАДИО, труды, т. 2, Москва 2002, С. 255 - 258.
21. Панфилов Б.А., РНТОРЭС им. А.С.Попова, LIII НАУЧНАЯ СЕССИЯ, ПОСВЯЩЕННАЯ ДНЮ РАДИО, тезисы докладов, М; 1998. С. 203 – 204.
22. Панфилов Б. А. Однократно программируемая матрица памяти на основе полярнозависимого электромассопереноса в кремнии (ПЭМП) для ЗУ долговременного хранения информации. ТРУДЫ РНТОРЭС им. А.С.Попова. Серия: НАУЧНАЯ СЕССИЯ, ПОСВЯЩЕННАЯ ДНЮ РАДИО, Выпуск: LIX - 2, Москва - 2004. С. 197 - 198.
23. Панфилов Б.А. // РНТОРЭС им. А.С.Попова, LV научная сессия, посвященная дню Радио “Радиотехника, электроника и связь на рубеже тысячелетия”, труды, М., 2000. С. 293.

Для цитирования:

Б. А. Панфилов. Физические исследования полярнозависимого электромассопереноса в кремнии (ПЭМП). Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. № 12. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/dec18/6/text.pdf>
DOI 10.30898/1684-1719.2018.12.6