

УДК 537.311.322

А.И. Попов

АМОРФНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКИ В МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКЕ

Рассмотрены отличия физики неупорядоченных полупроводников от физики монокристаллов, вопросы управления свойствами некристаллических полупроводников и области их применения.

Ключевые слова: некристаллические полупроводники, химическая и структурная модификация, применение.

Введение. Рассматривая историю твердотельной электроники, нетрудно заметить, что основной путь развития (с материаловедческой точки зрения) заключался в совершенствовании атомного порядка в полупроводниковых материалах. Первые полупроводниковые приборы (выпрямители) были созданы на основе поликристаллических оксида меди и селена. Затем наступила эра монокристаллов. Начиная с этого времени, основной целью полупроводникового материаловедения стало получение монокристаллов больших размеров с меньшим количеством дефектов. В противоположность этому, в течение последних 30 – 40 лет серьезное внимание уделяется антиподу монокристаллов – неупорядоченным полупроводникам. В отличие от «общепринятых» кристаллических полупроводников, последние не обладают дальним порядком в расположении атомов и трансляционной симметрией.

Под термином неупорядоченные понимаются полупроводниковые материалы, в которых имеются существенные нарушения дальнего порядка в расположении атомов. К таким материалам относятся:

- некристаллические твердые (аморфные) материалы;
- нано- и микрокристаллические материалы;
- химически неупорядоченные сплавы;
- органические материалы;
- расплавы и жидкости.

Все эти материалы, наряду с существенными нарушениями трансляционной симметрии, в большей или меньшей степени характеризуются прыжковым механизмом электропроводности и пониженной чувствительностью свойств к легирующим примесям.

В настоящей статье мы, в основном, остановимся на некристаллических (аморфных)

материалах. Термин «некристаллические полупроводники» вошел в обращение после открытия в 1954 году Б.Т. Коломийцем и Н.А. Горюновой халькогенидных стеклообразных полупроводников.

Определения некристаллических твердых тел. Любую задачу целесообразно начинать с определения предмета изучения. Однако в случае некристаллических материалов уже на этом этапе возникают серьезные трудности, заключающиеся в том, что общий принцип определения – от общего к частному – в данном случае вынужденно нарушается.

Хронологически первым из некристаллических твердых тел было определено понятие стекла. Стандарт СССР 1939 года дает следующее определение: «Стеклом называют все аморфные тела, полученные переохлаждением расплава ... и обладающие, в результате увеличения вязкости, механическими свойствами твердых тел...». Нетрудно заметить, что это определение не объекта, а лишь метода его изготовления, его предыстории. Это неудачно не только потому, что противоречит общему принципу определения (от общего к частному), но и потому, что закалка расплава не является единственным методом получения вещества в стеклообразном состоянии.

Однако стекло является лишь частным случаем некристаллических тел. Рассмотрим, как определяют этот класс материалов в целом. Можно сказать, что это определение уже дано в названии материалов. Действительно, с точки зрения взаимного расположения атомов все материалы могут быть разделены на две группы:

- **кристаллы**, в которых атомы выстроены в периодическую кристаллическую решетку. Другими словами, в кристаллах существуют трансляционная симметрия или дальний порядок в расположении атомов. На дифракционных

картинах кристаллы дают резкие рефлексы;

- **некристаллические тела.** К ним относятся все системы, у которых дальний порядок в расположении атомов отсутствует. Потеря дальнего порядка приводит к исчезновению на дифракционных картинах резких рефлексов, свойственных кристаллам, и появлению диффузных гало.

Таким образом, мы можем определить некристаллические материалы как материалы, в которых отсутствует дальний порядок в расположении атомов. Однако отрицательный характер определения чреват рядом осложнений. Дело даже не в противоречии с общим принципом определений, а в практически более важных вещах. Например, в ответе на вопрос: является ли конкретный образец кристаллом или некристаллическим материалом.

Действительно, идеальным дальним порядком в расположении атомов обладает лишь идеальный монокристалл бесконечных размеров. С другой стороны, отсутствие дальнего порядка в некристаллических телах совсем необязательно приводит к полному беспорядку в расположении атомов. В подавляющем большинстве аморфных тел присутствует так называемый ближний порядок в расположении атомов, обусловленный их химической природой. Более того, было установлено, что в некристаллических материалах существует также и средний порядок. Следовательно, упорядоченность в расположении атомов в некристаллических материалах простирается на расстояния, существенно большие, чем расстояния между ближайшими соседями. Отсюда следует, что ответ на вопрос, является ли конкретный образец кристаллическим или нет, зависит от того, насколько протяженный порядок в расположении атомов будет принят соответствующим кристаллу, то есть от субъективной оценки.

Казалось бы, для ответа на поставленный вопрос можно воспользоваться результатами дифракционного эксперимента, который дает четкие рефлексы на дифрактограммах кристаллов и диффузные гало в случае некристаллических материалов. Вместе с тем такой подход трудно назвать обоснованным, поскольку различная аппаратура имеет различные точность, чувствительность и т. д. Кроме того, образцы, состоящие из ультрадисперсных кристалликов, дают дифракционную картину в виде диффузных гало, точно такую же, как и некристаллические материалы.

Место физики неупорядоченных систем в физике твердого тела. Проблема неупорядоченных полупроводников относится к одной из

наиболее интересных и наименее изученных областей физики конденсированных сред. Действительно, достаточно очевиден разрыв между возможностями теории конденсированного состояния и тем реальным миром, который нас окружает. Наибольших успехов теория конденсированных сред добилась в приложении к крайне идеализированному объекту – монокристаллическому состоянию вещества. С другой стороны, очевидно, что монокристаллы встречаются несравненно реже, чем неупорядоченные системы – микро- и нанокристаллы, неупорядоченные сплавы, аморфные и стеклообразные материалы. Во многих случаях к перечисленным материалам оказываются неприменимы основные положения физики монокристаллов, поскольку последние основаны на существовании периодической кристаллической решетки (трансляционной симметрии). В результате мы сталкиваемся с парадоксальной ситуацией, когда на основе "классической" теории невозможно объяснить простейших и очевидных свойств некристаллических материалов.

Резюмируя, можно сказать, что в академическом плане на будущее стоит проблема создания теории широкого класса конденсированных веществ, которая бы, как частный случай, включала бы существующую теорию монокристаллов.

Управление свойствами некристаллических полупроводников. Известно, что электропроводность кристаллических полупроводников проявляет высокую чувствительность к присутствию примесей. Введение примесей в количестве тысячных или сотых долей процента изменяет абсолютные значения электропроводности на порядки величины, меняет тип проводимости полупроводника. Именно возможность достаточно простого управления свойствами кристаллических полупроводников путем легирования позволила создать различные полупроводниковые приборы и обеспечила развитие современной твердотельной электроники и микроэлектроники.

Однако при введении примесных атомов в некристаллический полупроводник электрические свойства последнего, как правило, практически не меняются. Рассмотрим причины этого явления. Первая из них, характерная для халькогенидных стеклообразных полупроводников (ХСП), заключается в том, что из-за отсутствия дальнего порядка и мягкой структурной сетки стекла примесные атомы могут насыщать все свои валентные электроны. В результате примесные атомы становятся элект-

рически неактивными. Но даже если при легировании расплава ХСП образовалось достаточное количество электрически активных атомов примеси, то перестройка структуры материала приводит к изменению соотношения между положительно и отрицательно заряженными собственными дефектами (C_3^+ и C_1^-). В результате положение уровня Ферми не изменяется, а следовательно, не изменяются электрофизические свойства материала.

Вторая причина, характерная для аморфного кремния, заключается в высокой плотности локализованных состояний, обусловленных собственными дефектами, в запрещенной зоне полупроводника из-за потери дальнего порядка в условиях жесткой четырехкоординированной структурной сетки. В этих условиях, даже при образовании активных донорных или акцепторных уровней, их концентрация оказывается существенно меньше концентрации собственных дефектов и, следовательно, не оказывает влияния на положение уровня Ферми и на свойства материала.

Сложность управления свойствами является серьезным тормозом в вопросах применения некристаллических полупроводников. Поэтому в последние десятилетия интенсивно разрабатывались и разрабатываются способы управления свойствами некристаллических полупроводников.

Легирование гидрогенизированного аморфного кремния. Важнейшей особенностью гидрогенизированного аморфного кремния, предопределившей его широкое применение в различных приборах и устройствах, является возможность целенаправленного изменения свойств материала путем легирования. Впервые это было продемонстрировано В. Спиром в 1976 году на пленках $a-Si:H$, полученных методом разложения газообразного силана (SiH_4) в плазме тлеющего разряда. Наличие водорода в $a-Si:H$ пассивирует оборванные связи атомов кремния и значительно снижает плотность локализованных состояний в запрещенной зоне полупроводника. В результате концентрация донорных (или акцепторных) уровней превышает концентрацию уровней собственных дефектов, что приводит к сдвигу уровня Ферми при введении примесей.

Поскольку пленки $a-Si:H$ получают из газообразного материала, то наиболее распространенный способ легирования $a-Si:H$ заключается в контролируемом введении в газовую среду в процессе получения пленок добавок фосфина (PH_3) или диборана (B_2H_6). Зависимость проводимости при комнатной температуре от степени легирования $a-Si:H$, полученного

разложением силана в плазме тлеющего разряда, приведена на рисунке 1 [1]. Как видно из рисунка, изменение концентрации легирующей примеси приводит к изменению абсолютных значений электропроводности на 7–10 порядков величины.

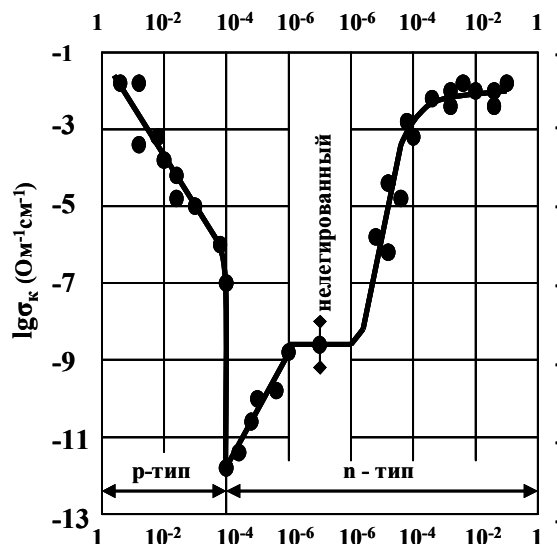


Рисунок 1 – Зависимость проводимости $a-Si:H$ при комнатной температуре от уровня легирования

Химическая модификация пленок ХСП.

Как отмечалось выше, халькогенидные стеклообразные полупроводники нечувствительны к легированию в обычном смысле этого слова из-за релаксации структуры стекла вокруг примесных атомов. Таким образом, чтобы сохранить электрическую активность примесных атомов, надо избежать релаксации структуры стекла. Для этого надо вводить примесные атомы при таких условиях, когда любая перестройка структуры материала затруднена. Другими словами, надо вводить атомы примеси в твердое тело. В этом случае подвижность основных атомов будет мала и релаксации структуры не произойдет. Реализация этого возможна методом сораспыления ХСП и примеси на холодную подложку. На этих принципах в 1977 году С. Овшинским был разработан метод химической модификации пленок ХСП [2].

Модифицированные пленки получают методом высокочастотного ионно-плазменного распыления ХСП и модифицирующего металла на холодную подложку. Металл в виде дисков диаметром в несколько миллиметров помещается на поверхность мишени из ХСП. Концентрация металла в пленке определяется соотношением площадей поверхности ХСП и металла на мишени и коэффициентов распыления этих материалов. На рисунке 2 представлены температурные зависимости проводимости пленок

ХСП состава $\text{Ge}_{32}\text{Te}_{32}\text{Se}_{32}\text{As}_4$, модифицированных никелем.

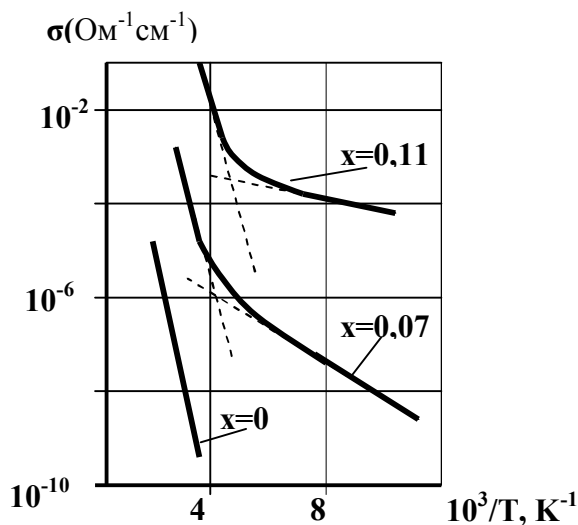


Рисунок 2 – Температурные зависимости проводимости пленок $(\text{Ge}_{32}\text{Te}_{32}\text{Se}_{32}\text{As}_4)_{1-x}\text{Ni}_x$

Как видно из рисунка, у немодифицированных образцов энергия активации проводимости постоянна во всем температурном диапазоне измерений и составляет примерно половину ширины запрещенной зоны. Модификация пленок ХСП никелем приводит к возрастанию абсолютных значений проводимости до восьми порядков величины и к появлению участка примесной проводимости на зависимостях $\sigma(1/T)$. Энергия активации на участке примесной проводимости с увеличением концентрации никеля уменьшается от 0,74 до 0,18 эВ. При этом оптическая ширина запрещенной зоны изменяется незначительно. Это свидетельствует о том, что изменения энергии активации проводимости обусловлены сдвигом уровня Ферми. Кроме того, измерения термо-эдс показали, что с ростом концентрации никеля её абсолютные значения уменьшаются, а затем термо-эдс меняет знак, то есть происходит переход от дырочного к электронному типу проводимости. Таким образом, химическая модификация пленок ХСП приводит к эффектам, аналогичным легированию кристаллических полупроводников и $\alpha\text{-Si:H}$.

Структурная модификация свойств некристаллических полупроводников. Одной из наиболее существенных особенностей некристаллических полупроводников является их слабая чувствительность к примесям. И хотя были найдены исключения из этого правила, описанные выше, методы управления свойствами этих материалов остаются весьма ограниченными. С другой стороны, из-за отсутствия дальнего порядка структура некристаллических полупро-

водников может изменяться при изменении условий и режимов изготовления материала. Долгое время влияние условий изготовления на структуру и свойства некристаллических твердых тел расценивалось как недостаток этих материалов, приводящий к плохой воспроизводимости свойств получаемых образцов. Однако знание причин и закономерностей этого влияния может не только обеспечить получение высоковоспроизводимых результатов, но и дать новый метод управления свойствами.

В качестве альтернативы методу управления свойствами полупроводников путем их легирования был предложен метод структурной модификации свойств некристаллических материалов, заключающийся в управлении свойствами путем изменения структуры при неизменном химическом составе материала. Физической основой метода является наличие у некристаллических материалов нескольких минимумов на зависимости потенциальной энергии от обобщенной координаты, соответствующих различным метастабильным состояниям системы [3].

Существуют четыре уровня структурной модификации, отличающиеся различными изменениями структуры материала: на уровне ближнего порядка в расположении атомов, на уровне среднего порядка в расположении атомов, на уровне морфологии и на уровне подсистемы дефектов.

Воздействия на структуру **на уровне ближнего порядка** в расположении атомов приводят к значительным изменениям всех фундаментальных свойств материала. Так, полиморфные кристаллические модификации углерода (алмаз, графит, карбин) обладают диаметрально противоположными физико-химическими свойствами вследствие различной гибридизации электронных орбиталей. Это приводит к различной атомной структуре на уровне ближнего порядка. В пленках аморфного углерода содержатся структурные единицы различных аллотропных модификаций. Их соотношение в конкретном образце определяется режимами изготовления и может изменяться в широких пределах даже в рамках одного метода изготовления. Соответственно меняются координация атомов (от 2 до 4) и другие параметры первой координационной сферы. Поэтому в пленках аморфного углерода возможны кардинальные изменения свойств материала при изменении режимов изготовления. Так в пленках, полученных методом ионно-плазменного распыления, удельное сопротивление изменялось более чем на 10 порядков величины (от $5 \cdot 10^9$ Ом·см для пленок с алмазоподобной структурой до 0,1 Ом·см для пленок с

графитоподобной структурой), а ширина запрещенной зоны изменялась от 1,85 до 0,02 эВ в зависимости от режимов изготовления (температуры подложки и мощности разряда) [3].

Изменения структуры **на уровне среднего порядка** - это изменения распределений величин и знаков двугранных углов, степени полимеризации молекул, степени химической упорядоченности сплавов и т. п. Эти изменения при неизменном ближнем порядке приводят, в основном, к изменению макросвойств материала: вязкости, микротвердости, модуля Юнга, фотосжатия пленок и т. д. Эффективность управления свойствами некристаллического полупроводника путем модификации его структуры на уровне среднего порядка определяется подвижностью его структурной сетки.

Структурная модификация **на уровне морфологии**. Необходимым условием получения любого некристаллического твердого тела является термодинамически неравновесный процесс его синтеза. В соответствии с принципами синергетики неравновесные условия изготовления материала ведут к образованию в нем неоднородностей вследствие процессов самоорганизации. Присутствие макронеоднородностей (столбов, глобул, конусов и т.п.) с размерами от десятков нанометров и более в пленках некристаллических материалов рассматривается как наличие морфологии. Определенная морфология присутствует в пленках многих некристаллических полупроводников. Управление морфологией возможно путем изменения режимов изготовления образцов. Изменения на уровне морфологии влияют на свойства, чувствительные к макронеоднородностям (оптические свойства, электропроводность на переменном токе и другие).

Структурная модификация **на уровне подсистемы дефектов**. Как известно, дефекты создают уровни локализованных состояний в запрещенной зоне. Поэтому изменения в подсистеме дефектов приводят к модификации спектра локализованных состояний, а следовательно, к сдвигу уровня Ферми и к изменению свойств, связанных с электронной подсистемой. При структурной модификации на этом уровне важен выбор воздействующего фактора. Его надо выбрать так, чтобы он преимущественно оказывал влияние именно на дефекты, а не на всю структурную сетку в целом. В случае пленок гидrogenизированного аморфного кремния в качестве такого фактора используется, например, ультрафиолетовое (УФ) излучение. При поглощении УФ излучения у поверхности пленки a-Si:H генерируются фононы. Диффундируя вглубь полупроводника, фононы локализируются

преимущественно на дефектах, так как сечение захвата у последних больше, чем у атомов с нормальной координацией. В результате выделения энергии фононов происходит перестройка дефектов. Об этом свидетельствует изменение площадей пиков в спектрах ИК поглощения, соответствующих разным формам вхождения водорода в a-Si:H. Перестройка дефектов приводит к изменению распределения плотности локализованных состояний в запрещенной зоне.

Применение некристаллических полупроводников. Халькогенидные стеклообразные полупроводники, гидrogenизированный аморфный кремний и сплавы на его основе, органические материалы широко используются во многих электронных приборах и устройствах. К последним относятся:

- фотоэлектрические преобразователи энергии (солнечные батареи) на основе гидrogenизированного аморфного и микрокристаллического кремния и его сплавов;
- матрицы тонкопленочных транзисторов для управления жидкокристаллическими дисплеями и телевизионными экранами;
- устройства для записи и обработки оптической и голографической информации;
- видеконы (принимавшие телевизионные трубки);
- оптические диски;
- фототермопластические носители информации;
- фото-, электро- и рентгенорезисты;
- устройства для копирования информации и принтеры для ЭВМ (ксерокс-процесс);
- устройства памяти на фазовых переходах в халькогенидных сплавах;
- сенсоры (детекторы) для медицинской диагностики;
- элементы инфракрасной оптики.

Преимущества неупорядоченных полупроводников, определяющие их применение в указанных приборах и устройствах, заключаются в следующем:

- фактическое отсутствие ограничений по площади устройства;
- низкая (по сравнению с монокристаллами) стоимость производства, слабая связь «размеры – стоимость»;
- возможность изготовления активных электронных матриц на некристаллических подложках;
- соотношения некоторых электрофизических характеристик, недостижимые в кристаллах;

- наличие ряда уникальных эффектов, отсутствующих в кристаллах и позволяющих создавать приборы на новых принципах.

Рассмотрим подробнее перечисленные преимущества.

Когда говорят о сочетании свойств «большие площади и низкая стоимость», в первую очередь приводят примеры солнечных батарей на основе гидрогенизированного аморфного кремния. Действительно, при достигнутом в промышленных образцах КПД 7-9% и стоимости электроэнергии 14 - 16 центов/кВт/ч такие преобразователи становятся экономически целесообразными. В качестве примера можно привести фотоэлектрическую станцию для нефтедобывающего предприятия, реализованную в 2003 году в Калифорнии, США. Установленная мощность станции 0,5 МВт. Она состоит из 4800 панелей размером 5,4 на 0,4 метра. Общая площадь преобразователей составляет примерно 2,5 гектара. Однако мощные фотоэлектрические станции большой площади едва ли станут магистральным путем развития энергетики, так как не выдержат конкуренции со стороны традиционных методов её производства. Не говоря уже об экологических последствиях.

Однако второй параметр – низкая стоимость определил область применения ФЭП на a-Si:H. Именно эти источники энергии, благодаря их низкой стоимости, вошли в бытовую электронику. Я имею в виду солнечные батареи для часов, калькуляторов, детских игрушек, автономных источников освещения, устройств зарядки аккумуляторов и так далее.

Возможность получения фоточувствительных полупроводниковых пленок большой площади и, кроме того, на подложках любой формы стала одной из двух основных причин монополии неупорядоченных полупроводников в электрофотографии (копировальные аппараты и принтеры на основе ксерокс-процесса). Основным элементом этих устройств является электрофотографический цилиндр (ЭФЦ), представляющий собой цилиндрическую проводящую подложку с нанесенным на неё слоем высокоомного полупроводника. Высота цилиндра должна быть не менее ширины копируемого оригинала.

Вторая причина монополии неупорядоченных полупроводников в электрофотографии заключается в следующем. Полупроводниковый слой в этой группе приборов должен обладать высокой фоточувствительностью в видимой области спектра (для создания за время экспозиции необходимого потенциального рельефа). С другой стороны, он должен обладать высоким

удельным сопротивлением (для сохранения созданного потенциального рельефа в период визуализации или считывания изображения). В видеоконках, где экспозиция и считывание проводятся за время телевизионного кадра (0,04 сек), удельное сопротивление материала должно быть не менее 10^{11} Ом·см. В электрофотографии в термопластических носителях необходимы ещё более высокоомные материалы. Указанные требования весьма жестки и противоречивы. Действительно, электропроводность (удельное сопротивление) полупроводника определяется концентрацией и подвижностью носителей заряда:

$$\sigma = 1/\rho = q \cdot n \cdot \mu_n + q \cdot p \cdot \mu_p.$$

В свою очередь, минимальная концентрация носителей заряда в собственном полупроводнике определяется шириной его запрещенной зоны:

$$n_i = p_i = A \cdot \exp(-\Delta E / kT).$$

Таким образом, для увеличения удельного сопротивления полупроводника необходимо выбирать полупроводники с большой шириной запрещенной зоны. С другой стороны, максимум фоточувствительности полупроводника наблюдается при взаимодействии с ним излучения с энергией квантов, близкой к ширине запрещенной зоны. Поскольку видимая область спектра лежит в диапазоне 0.4 – 0.7 мкм, то для обеспечения фоточувствительности в красной области спектра ширина запрещенной зоны полупроводника должна составлять $\Delta E = 1.7 - 1.9$ эВ ($\lambda = 1.234 / \Delta E$). Однако традиционные кристаллические полупроводники при таких значениях ширины запрещенной зоны не обеспечивают необходимого удельного сопротивления. Решить это противоречие удалось, используя некристаллические полупроводники, которые при той же ширине запрещенной зоны обладают удельным сопротивлением на 4 – 5 порядков выше за счет меньшей подвижности носителей заряда.

Возможность изготовления активных электронных матриц на некристаллических подложках. Во всех жидкокристаллических телевизорах и дисплеях управляющая экраном матрица создается на тонкопленочных транзисторах на a-Si:H. Почему не используются транзисторы на монокристаллическом кремнии?

Само по себе создание плоского экрана на жидких кристаллах практически любой площади не представляет больших проблем. Проблема заключается в управлении экраном. Действительно, если исходить из разрешающей способности 10 точек на миллиметр, то экран

размером 10 x 10 см должен иметь 10^6 ячеек, каждой из которых необходимо независимо управлять. Это означает, что между системой управления и экраном необходимо иметь миллион соединений. Выход из создавшейся ситуации заключается в создании системы управления непосредственно на стеклянной подложке жидкокристаллического экрана. Но этот вывод сразу определяет технологию – она должна быть тонкопленочной. С помощью монокристаллов задачу решить не удастся, но она решается при использовании транзисторов на основе гидрогенизированного аморфного кремния. Электрическая схема жидкокристаллического экрана представляет собой матрицу тонкопленочных транзисторов на $a-Si:H$, истоки которых соединены с вертикальными шинами, затворы – с горизонтальными шинами, а стоки – с электродами ячеек.

Эффекты переключения и фазовые переходы в ХСП. Халькогенидные стеклообразные полупроводники обладают уникальным свойством – эффектом переключения, то есть быстрым переходом материала из высокоомного состояния в низкоомное при приложении напряжения определенной величины. Другими словами, структура металл – ХСП – металл имеет S-образную вольт-амперную характеристику с участком отрицательного сопротивления. Впервые эффект переключения был обнаружен в ХСП в 1963 году Б.Т. Коломийцем с сотрудниками и С. Овшинским независимо друг от друга. Несмотря на проведенные с того времени многочисленные исследования, единой теории эффекта переключения до настоящего времени не создано. Разработан лишь ряд моделей и гипотез. Вместе с тем на базе этого эффекта были созданы две группы приборов: моностабильные переключатели и переключатели с памятью.

Типичный переключатель представляет собой пленку ХСП толщиной менее 1 мкм, заключенную между двумя металлическими электродами. Вольт-амперная характеристика порогового переключателя симметрична и подобна ВАХ симметричного кремниевого диода (рисунок 3). Первоначально переключатель находится в высокоомном состоянии. Его сопротивление составляет порядка 10^5 Ом. При достижении некоторой пороговой величины напряжения (U_{th}) происходит переключение прибора в низкоомное состояние. Переключение обусловлено образованием токового канала в пленке ХСП. Величина порогового напряжения соответствует величине электрического поля порядка 10^5 В/см. При этом сопротивление прибора

уменьшается на 5 – 6 порядков величины. Динамическое сопротивление прибора в низкоомном состоянии составляет примерно 1 Ом. В низкоомном состоянии при уменьшении тока до некоторой величины I_h происходит обратное переключение прибора в высокоомное состояние.

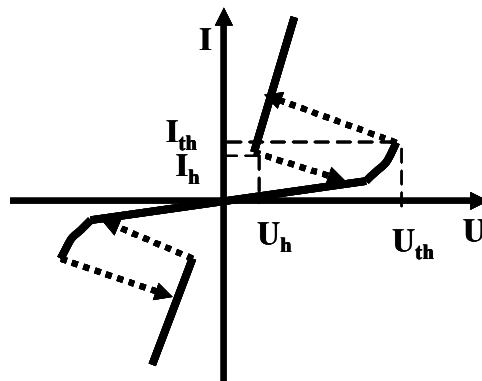


Рисунок 3 – Вольт-амперные характеристики порогового переключателя

Конструкция переключателя с памятью полностью аналогична предыдущей. Первоначально вольт-амперная характеристика переключателя с памятью повторяет ВАХ порогового переключателя. Исходное сопротивление прибора велико, а при достижении порогового напряжения происходит быстрое переключение прибора в низкоомное состояние. Если в этот момент уменьшить ток через прибор ниже величины тока удержания, то прибор перейдет в высокоомное состояние, точно так же как пороговый переключатель. Однако если низкоомное состояние поддерживать в течение, примерно 10^{-3} с, то прибор остается в низкоомном состоянии даже после снятия напряжения. В этом случае перевод в высокоомное состояние производится подачей на прибор «стирающего» импульса тока любой полярности, но специальной формы. Таким образом, данный тип приборов дает возможность хранения информации без затраты энергии. Два различных типа поведения приборов одинаковой конструкции обусловлены различным химическим составом пленок ХСП, входящих в прибор.

Процесс запоминания низкоомного состояния объясняется структурно-фазовыми изменениями материала в токовом канале: под действием протекающего через канал электрического тока происходит разогрев материала и его кристаллизация. На основе переключателей с памятью в конце 70-х годов прошлого столетия в США и в СССР были созданы интегральные схемы репрограммируемых постоянных запоминающих устройств (РПЗУ). Однако вскоре выяснилось, что новые изделия обладают недостаточной надежностью. В процессе эксплуатации

отдельные ячейки самопроизвольно переходили из одного состояния в другое. По этой причине приборы не нашли дальнейшего развития, и единственным положительным результатом на то время можно было считать использование идеи записи информации с помощью фазовых переходов в оптических дисках. Однако история свидетельствует, что все развивается по спирали.

В начале 2000-х годов появились первые сообщения о новом виде устройств памяти на основе системы Ge – Sb – Te, получившей название **памяти на фазовых переходах**. В 2004 году в разработке интегральных схем на этой основе участвовали такие компании, как Intel, Ovonyx, STMicroelectronics, Samsung, Phillips. Были созданы первые интегральные схемы этого вида памяти емкостью 64 и 512 Мб со следующими характеристиками: размер ячейки 0,32 – 0,50 мкм² (фотолитография 0,18 мкм), что соответствует 64 Мбитам памяти на 100 мм²; время записи в ячейке менее 10 нс; время хранения информации 10 лет при 110 – 130 °С; количество циклов перезаписи 10¹³; электрические параметры: напряжение – до 3,3 В, токи – до 1 мА; различие сопротивлений в высокоомном и низкоомном состояниях – примерно в 100 раз. Фирмы-разработчики полагают, что новый вид памяти может успешно конкурировать в устройствах флеш-памяти, динамической и статической памяти, в радиационно-стойких схемах специального назначения.

Что же принципиально нового произошло с переключателями, описанными выше, за эти годы? Ячейка матрицы и общая структура переключающего элемента принципиально не изменились. Элемент представляет собой сэндвич: проводящий электрод – халькогенидный сплав – проводящий электрод (рисунок 4).

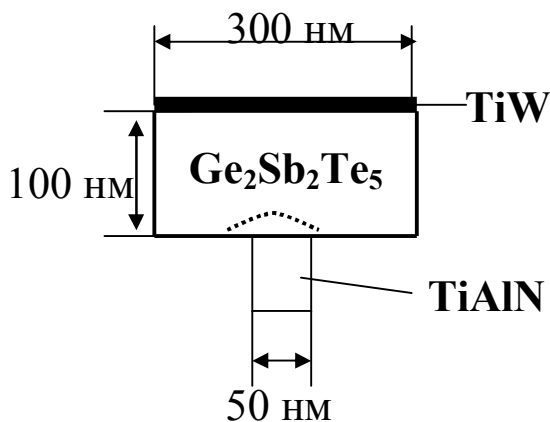


Рисунок 4 – Конструкция ячейки памяти на фазовых переходах

Отличие заключается в том, что халькогенидный сплав находится в кристаллическом, а

не в стеклообразном состоянии. Следовательно, первоначально переключатель находится в низкоомном состоянии. Следующее отличие – в размерах.

Как видно из рисунка 4, основные размеры находятся в диапазоне десятков – сотен нанометров. Это принципиально не только с точки зрения увеличения плотности записи информации, но и с точки зрения физики работы прибора. И, наконец, ещё одно отличие: нижний электрод изготовлен из нитридов металла, а следовательно, обладает повышенным электрическим сопротивлением.

Исходно прибор находится в низкоомном состоянии. При подаче стирающего импульса тока (достаточно большого по величине и с крутым задним фронтом) происходит разогрев халькогенидного материала. Причем наибольший разогрев будет происходить в области, прилегающей к нижнему контакту, так как в этой области плотность тока максимальна и, кроме того, происходит дополнительный разогрев от резистивного электрода. В результате материал в этой области расплавляется (пунктир на рисунке) и при резком окончании импульса переходит в стеклообразное состояние. Толщина области, в которой происходит фазовый переход, не превышает 50 нм. При обратном переключении подается более длительный, но меньший по абсолютной величине импульс тока. В результате вся стеклообразная область кристаллизуется, и прибор переходит в высокоомное состояние. Таким образом, вместо кристаллизации и плавления канала, которые имели место в переключателях на ХСП, в данных приборах фазовые переходы происходят в объёме, что существенно повышает надежность. Интегральные схемы памяти на фазовых переходах достаточно легко реализуются по тонкопленочной технологии, что дает возможность изготовления данных схем по так называемой 3D-технологии, когда на одной подложке в несколько слоев размещается несколько интегральных схем. Это позволяет в разы увеличить плотность записи.

Эффект переключения на фазовых переходах, кроме традиционного использования в элементах памяти, может найти и другие применения, например в качестве аналоговой памяти или управляемых резисторов. При переключении элемента из низкоомного состояния в высокоомное объем материала, перешедшего в стеклообразную фазу, и сопротивление элемента зависят от величины тока. Следовательно, изменяя ток программирования, можно менять в широких пределах

сопротивление элемента и вместо двух состояний (высокоомное и низкоомное) записать более полутора десятков состояний с различными сопротивлениями.

Принцип записи информации на **оптических дисках** также основан на фазовых переходах. В случае многократной записи используется либо процесс локальной кристаллизации аморфной халькогенидной пленки, либо процесс аморфизации, если исходная пленка находилась в кристаллическом состоянии. Фазовый переход инициируется коротким импульсом лазерного излучения и приводит к изменению оптических свойств локальной области. Считывание информации осуществляется лазером малой мощности. Требование увеличения плотности записи обуславливает необходимость уменьшения размеров локальных областей, в которых происходят фазовые переходы. Минимальные размеры областей фазового перехода определяются, в основном, длиной волны лазерного излучения, обеспе-

чивающего запись информации. Уменьшение длины волны от 780 до 405 нанометров совместно с улучшением оптической системы и уменьшением расстояния от поверхности диска до записывающего слоя позволило увеличить емкость диска от 650 МБ в 1997 году до 23,3 ГБ в 2003 году и 50 ГБ в 2004 году [4].

Библиографический список

1. Физика гидрогенизированного аморфного кремния. Вып 1/ под ред. Д. Джоунупулоса. М.: Мир, 1987. 368 с.
2. *Ovshinsky S.* Chemical modification of amorphous chalcogenides. //Proc. 7 Int. Conf. Amorphous and Liquid Semiconductors, Edinburgh, 1977. P.519-523.
3. *Понов А.И.* Физика и технология неупорядоченных полупроводников, М, Изд дом МЭИ, 2008. 272с.
4. *Matthias Wuttig, Noboru Yamada,* Phase-change materials for rewriteable data storage// Nature materials. Vol. 6, 2007. P. 824-832.