

Разработки новосибирских физиков могут использоваться для создания компьютерной памяти нового поколения

Специалисты Института физики полупроводников предложили новые способы создания элементов для универсальной компьютерной памяти ReRAM

Учёные Института физики полупроводников им А.В. Ржанова СО РАН (ИФП СО РАН) разработали прототипы мемристоров (элементов памяти) для матриц энергонезависимой памяти большого объёма, определили каким должен быть состав активных слоёв, чтобы получать мемристоры с лучшими характеристиками и предложили неразрушающий метод контроля состава слоев во время их синтеза.

Компьютерная память нового типа — универсальная — может совмещать в себе энергонезависимость, как флэш-память или жёсткий диск, высокую скорость работы, характерную для оперативной памяти и большой информационный объём. Один из лучших кандидатов на роль универсальной памяти — резистивная ReRAM, в которой данные записываются за счёт изменения электрического сопротивления. Разработкой универсальной памяти занимаются крупнейшие технологические центры мира.

Элемент ReRAM — мемристор — представляет собой структуру металл-диэлектрик-металл, в которой тонкий слой диэлектрика обратимо меняет сопротивление, при подаче переключающего импульса напряжения – из-за образования и рассасывания в нем тонкого проводящего канала (филамента). В качестве таких диэлектриков, в частности, используются обеднённые кислородом оксиды металлов — тантала, циркония и гафния. Особенность оксидов в нестехиометрическом составе — соотношение между атомами металла и кислорода не выражается простыми целыми числами. Например, $\text{HfO}_{1.42}$ — нестехиометрический оксид.

Молодые учёные ИФП СО РАН создали мемристоры на основе всех вышеперечисленных оксидов и исследовали свойства элементов памяти. Благодаря широкому использованию этих оксидных соединений в кремниевой технологии, мемристоры на их основе не потребуют больших затрат при внедрении. Кроме того, на основе нестехиометрических оксидов тантала возможно создание многоуровневых устройств памяти. Подробные результаты работ изложены в диссертациях на соискание степеней кандидата наук. Соискателями стали сотрудники ИФП СО РАН — [Алина Константиновна Герасимова](#) и [Виталий Александрович Воронковский](#). Исследования велись в рамках крупного научного проекта [«Квантовые структуры для посткремниевой электроники»](#).

Достижения молодых учёных и их коллег применимы при разработке промышленных образцов резистивной памяти.

Материал для мемристоров с оптимальными характеристиками

Алина Герасимова выяснила взаимосвязь условий роста и химического состава, оптических и электрических свойств плёнок нестехиометрических

оксидов гафния, циркония и тантала. Результаты её работы могут быть полезны при создании технологических маршрутов изготовления элементов резистивной памяти и перспективной оксидной электроники — альтернативы полупроводниковой.

Для синтеза образцов учёные использовали метод ионно-лучевого распыления-осаждения. Он сравнительно легко позволяет получать тонкие плёнки оксидов, обеднённые кислородом.

«Мы установили, что плёнки оксидов металлов (гафния, циркония) нестехиометрического состава, полученные методом ионно-лучевого распыления-осаждения, состоят из трёх компонентов: металла, предельного оксида ($\text{HfO}_2/\text{ZrO}_2$) и субоксида определённого состава (Hf_4O_7 или Zr_4O_7).

В плёнках оксида тантала нестехиометрического состава тоже три компонента, но субоксиды TaO_x могут быть разного состава, в отличие от оксидов гафния и циркония.

Оказалось, что мемристоры с лучшими характеристиками — не требующие операции формовки, что упрощает технологию их производства, без существенного уменьшения “окна памяти” и быстродействия — получаются при максимальной концентрации субоксида. В перспективе это можно использовать при составлении технологических маршрутов», — рассказала младший научный сотрудник лаборатории физической химии поверхности полупроводников и систем полупроводник-диэлектрик ИФП СО РАН кандидат физико-математических наук Алина Константиновна Герасимова.

Кроме того, исследовательница предложила способ неразрушающего контроля состава плёнок нестехиометрических оксидов во время роста — с помощью эллипсометрии — оптического метода, использующего эффект изменения поляризации света при его отражении от объектов. Такой подход менее трудоёмок, чем традиционно применяемый — рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии.

Состав пленок, в данном случае, соотношение атомов кислорода к атомам металла — влияет на проводимость пленок, а значит и на характеристики резистивной памяти.

«Мы получили зависимость показателя преломления от состава плёнок (отклонения от стехиометрии) для нестехиометрических оксидов гафния и циркония. Зависимость линейна, и у нее есть важное практическое значение: она позволяет определять состав синтезированных слоёв оптическими методами без использования сложного метода рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии», — пояснила А. Герасимова

Эллипсометры — приборы для высокоточного контроля свойств тонких плёнок и структур — разработаны и произведены в ИФП СО РАН.

Высокоэффективные прототипы мемристоров

Младший научный сотрудник молодежной лаборатории нанотехнологий и наноматериалов ИФП СО РАН, кандидат физико-математических наук **Виталий Воронковский** вместе с коллегами определил составы слоёв оксидов гафния и циркония, подходящие для создания мемристоров. А также составы, при которых такие мемристоры не требуют формовки, что в перспективе позволит создавать матрицы памяти большого объёма. Формовка — это первое «включение»

мемристора, как правило, с подачей более высокого напряжения, чем требуется при последующих переключениях. При формовке образуется филамент — проводящий канал.

«Используя для синтеза оксидов ионно-лучевое распыление-осаждение с разным парциальным давлением кислорода, мы получили образцы, отличающиеся по составу. В ходе экспериментов установили, что часть полученных структур демонстрировала эффект резистивного переключения. А при сильном обеднении кислородом удалось создать бесформовочные мемристоры. Это важно, поскольку такие мемристоры значительно облегчают разработку матриц памяти высокой информационной емкости» — рассказал ученый.

Также работа ученых позволила добиться стабильности характеристик мемристоров, а в 2022 году на данную разработку получен [патент](#).

Резистивные переключения в мемристоре происходят благодаря образованию филамента. Но его зарождение и формирование происходит в случайном месте, обусловленном разными факторами, поэтому могут возникать несколько конкурирующих филаментов в одном и том же мемристоре. В результате появляется большой разброс напряжений резистивных переключений и сопротивлений от одного цикла переключения к другому, что снижает устойчивость переключений и, как следствие, уменьшает привлекательность мемристоров для использования в качестве ячеек памяти.

Учёные показали, что, если «посветить» электронным лучом на оксидный слой мемристора в области, сопоставимой с размерами поперечного сечения филамента, можно добиться возникновения проводящего канала в области действия луча.

«При воздействии электронного луча формировалась “затравка” филамента в диэлектрике. Напряжения формовки и резистивных переключений в таких мемристорах были значительно меньше, чем у мемристоров, полученных без воздействия электронного луча, что позволило исключить появление дополнительных проводящих каналов в других областях диэлектрика. В результате мемристоры демонстрируют кратное снижение разброса напряжений резистивного переключения и сопротивлений по сравнению с мемристорами без локального электронно-лучевого воздействия», — отметил В. Воронковский.

«Можно спроектировать электронно-лучевую систему, которая будет одновременно облучать матрицы мемристоров, чтобы сократить время, нужное для создания затравок», — добавил учёный.

Подробности о ловушках для электронов, «шубе» вокруг оксида, и как ученые обнаружили ее (впервые в мире!) — читайте ниже

В деталях: как происходит перемещение заряда? Ловушки для электронов

В своих работах молодые учёные устанавливали механизмы работы мемристоров на максимально детальном уровне. Считается, что в образовании филамента определяющее значение имеют вакансии кислорода в диэлектрическом слое мемристора. Вакансии — это пустующие узлы

кристаллической решётки. Вакансии кислорода могут выступать в качестве ловушек для электронов, и играют ключевую роль в транспорте заряда в диэлектрике. С увеличением концентрации вакансий кислорода уменьшается сопротивление оксидного диэлектрика.

Однако Виталий Воронковский с коллегами установил, что, хоть повышенная концентрация вакансий кислорода в диэлектрическом слое мемристора и способствует образованию филамента при формовке, вакансии кислорода в виде отдельных, изолированных друг от друга ловушек в транспорте заряда в мемристорах на основе оксидов гафния и циркония не участвуют.

«Однако, вакансии кислорода могут участвовать в образовании дефектных комплексов, играющих роль мелких ловушек и состоящих, например, из атомов металла и нескольких вакансий кислорода. Помимо вакансий кислорода, в транспорте заряда могут играть роль и междоузельные атомы кислорода, образующиеся в ходе формовки и резистивного переключения. Определение природы таких дефектов (вакансии и междоузельные атомы – дефекты) — важная задача, решить которую можно с помощью квантово-химического моделирования», — подытожил молодой ученый.

«Шуба» вокруг оксида.

«До нас никто не исследовал кристаллизацию нестехиометрических оксидов под действием электронного луча»

Алина Герасимова обнаружила, что при локальном воздействии электронного луча в нестехиометрических оксидах формируются металлические кластеры, вокруг которых образуется «шуба» из стехиометрического оксида. Существование такой оболочки объясняет, как могут сосуществовать междоузельный кислород и вакансии кислорода в плёнке нестехиометрического состава, которая является активным слоем устройств памяти. Если вакансии — это отсутствие ионов кислорода, то междоузельный кислород — «лишние» атомы кислорода между узлами кристаллической решетки. Обычно вакансии и междоузельные атомы нейтрализуют друг друга.

Также исследовательница выяснила, что под действием электронного луча в нестехиометрических оксидах формируются кристаллические оксидные фазы, которые обычно образуются при высоких температурах и давлениях. В частности, — орторомбическая фаза HfO_2 . Такие фазы интересны тем, что некоторые из них обладают сегнетоэлектрическими свойствами и интересны для создания разных типов датчиков (термо-, пьезо- и других), сенсоров температуры, давления, и для сегнетоэлектрической памяти FeRAM.

«Мы предполагаем, что в нестехиометрических оксидах гафния при формовке, вокруг проводящего канала (филамента) образуется оболочка HfO_2 . Она может служить резервуаром для накопления междоузельного кислорода, необходимого для реакции окисления филамента при резистивных переключениях, а также защищать этот кислород от рекомбинации с вакансиями кислорода, присутствующими в большом количестве в исходном нестехиометрическом оксиде.

Ещё один неожиданный результат: то что локальная электронно-стимулированная кристаллизация нестехиометрических оксидов HfO_x , в отличие от стехиометрических, приводит к образованию орторомбической фазы HfO_2 , которая обычно образуется только при больших давлениях. Этот результат был получен впервые. До нас никто не исследовал кристаллизацию нестехиометрических оксидов под действием электронного луча. Аналогичные процессы кристаллизации наблюдались и для оксида циркония и тантала», — резюмировала А. Герасимова.

В дальнейшем молодые ученые продолжают работать с нестехиометрическими оксидами. В частности, в их планах исследование нестехиометрического оксида титана, разработка на его основе композитного материала, чувствительного к терагерцовому излучению и создание матриц для болометров — приемников излучения.

Пресс-служба ИФП СО РАН

mailto: pressa@isp.nsc.ru

pressemicond@gmail.com

89133736776

Дмитриева Надежда Валерьевна

Фотографии можно найти здесь:

<https://disk.yandex.ru/d/mH0J7jvD3kYe0w>

Подписи к фото:

1. _ Виталий Воронковский, Алина Герасимова (фото Тимофея Перевалова)
2. _ Так выглядят прототипы элементов памяти, созданные учеными ИФП СО РАН (фото Надежды Дмитриевой)
3. _ Массивы элементов памяти под микроскопом (фото Надежды Дмитриевой)
- 4_1._ Измерение электрофизических характеристик элементов памяти (фото Надежды Дмитриевой)
- 4_2. Измерение электрофизических характеристик элементов памяти (фото Надежды Дмитриевой)
- 5_1 Алина Герасимова возле установки ионно-лучевого распыления-осаждения (фото Надежды Дмитриевой)
- 5_2. Алина Герасимова возле установки ионно-лучевого распыления-осаждения (фото Надежды Дмитриевой)
- 6._ Виталий Воронковский измеряет электрофизические характеристики элементов памяти (фото Надежды Дмитриевой)
- 7._ Виталий Воронковский и Алина Герасимова вместе со старшим научным сотрудником ИФП СО РАН кандидатом химических наук Владимиром Алиевым (фото Тимофея Перевалова)