

Флеш-память: запомнить всё!

Почему фотоаппарат сохраняет сделанные нами кадры, а телефон позволяет прослушивать любимые мелодии? Все мы пользуемся флешками, планшетами и другими гаджетами, но не всегда задумываемся, каким образом они работают. Исследованиями и разработкой флеш-памяти занимаются в [Институте физики полупроводников](#) им. А. В. Ржанова СО РАН.

Флеш-память широко используется в цифровых портативных устройствах и носителях информации. Она работает благодаря диэлектрикам, имеющим низкую проводимость и обладающим эффектом памяти. Оксид (SiO_2) и нитрид (Si_3N_4) кремния – два ключевых диэлектрика, на которых и основаны приборы кремниевой микроэлектроники. Но их полезные свойства не проявились бы без так называемых ловушек.

Главному научному сотруднику [ИФП СО РАН](#) доктору физико-математических наук **Владимиру Алексеевичу Гриценко** 12 марта 2017 года исполнилось 70 лет. Владимир Гриценко – известный в мире специалист в области физики диэлектрических плёнок и флеш-памяти, автор более 180 статей, трёх монографий, соавтор десяти коллективных монографий, имеет 25 патентов по приборам флеш-памяти. Индекс Хирша на март 2017 года – 25.

– Ловушки – это некая интрига в физике диэлектриков: дефекты, которые могут захватывать инжектированные из контактов (например, с металлами либо электролитами) электроны, – поясняет Владимир Гриценко. – Дело в том, что в металлических проводниках они свободно движутся, обеспечивая протекание электрического тока. А вот в диэлектриках собственных электронов нет и проводимость осуществляется только за счёт «пойманных» электронов: ловушки не позволяют им двигаться по диэлектрику, захватывая в глубоких потенциальных «ямах». Представьте, что бежит животное, а впереди яма: оно падает и уже не может из неё выбраться. Так же хранится информация в приборах флеш-памяти на основе нитрида кремния – около 10 лет при 85 °С. А вот низкая проводимость, которую обеспечивают диэлектрики, необходима для того, чтобы захваченные электроны оставались в локализованном состоянии большое время: мелкие ловушки они могут и покинуть.

У оксида кремния SiO_2 низкая плотность ловушек, что обеспечивает стабильную работу микросхем. Нитрид кремния Si_3N_4 , наоборот, имеет высокую концентрацию ловушек и обладает эффектом памяти – свойством локализовать инжектированные в него частицы. Как правило, в металлах такими носителями заряда являются электроны, а в полупроводниках и диэлектриках к ним присоединяются дырки – квазичастицы, в отличие от электронов имеющие положительный заряд.

Совместно с доктором физико-математических наук **Камилем Ахметовичем Насыровым** из [Института автоматизации и электрометрии](#) СО РАН было установлено, что проводимость нитрида кремния не описывается широко принятой во всем мире моделью ионизации ловушек по механизму Френкеля. Долгое время предполагалось, что свойство локализовать электронные дырки является фундаментальным для аморфных диэлектриков с отсутствием строгой периодичности в расположении атомов. Однако нитрид кремния является аморфным и захватывает электроны и дырки, а вот аморфный оксид кремния этого сделать не способен – значит, гипотеза оказалась неверной. Вопрос был в том, какую атомную и электронную структуру имеют ловушки, которые захватывают электронные дырки в Si_3N_4 . С помощью экспериментов и теоретических расчётов выяснилось, что ловушкой является вакансия азота, насыщенная одним атомом водорода.

– Эффект памяти в нитриде кремния обнаружили в 1970-х годах, но природа ответственных за эффект памяти ловушек была окончательно выявлена нашей группой только в 2016 году, – добавляет Владимир Гриценко. – Так, твёрдое тело состоит из чередующихся атомов: кремний, азот, кремний, азот, кремний... Если мы удалим атом азота, то рядом останутся Si–Si связи – такой дефект называется вакансией азота. Вакансия – это, по сути, пустое место. Наше открытие даёт возможность управлять запоминающими свойствами флеш-памяти: прежде всего концентрацией ловушек и их энергией.

Подобные исследования новосибирского учёного легли в основу контрактов с компанией Samsung Electronics: она внедрила в серийное производство флеш-память на основе нитрида кремния при использовании диэлектриков с высокой диэлектрической проницаемостью и вывела флеш-память на основе локализации электронов в Si_3N_4 . Сейчас эта технология занимает 70 % мирового рынка. В её основе лежит трёхмерная память – структура, состоящая из 56 слоёв нитрида кремния (раньше делался только один слой). На такой флеш-памяти производятся твердотельные диски, мобильные телефоны, видеокамеры, планшеты, персональные компьютеры и другие устройства.

Еще одно открытие, запатентованное совместно учёными из [ИФП СО РАН](#) и сотрудниками завода «Микрон» в Зеленограде – флеш-память на основе мультиграфена как запоминающей среды для хранения электрического заряда. Дело в том, что в качестве альтернативы Si_3N_4 используется изолированный поликремний (материал, состоящий из мелких кристаллитов кремния), окружённый диэлектриком, который выступает в качестве большой ловушки для электронов. Но большая толщина поликремния неизбежно приводит к ограничению информационной ёмкости. Однако если его заменить на мультиграфен, открывается возможность дальнейшего увеличения объёма флеш-памяти: использование этого вещества позволит перейти от гигабит к терабитам.

– Сейчас на рынке доминирует флеш-память на нитриде кремния, – поясняет учёный. – Однако промышленность уже подходит к физическому пределу, который просто не позволяет ещё больше увеличивать информационную ёмкость таких микросхем. Поэтому во всём мире ведутся исследования физических процессов, которые могут быть положены в основу разработки новых поколений флеш-памяти – на основе резистивного эффекта, открытого в 2008 году компанией Hewlett-Packard.

Оказывается, если к тонкому диэлектрику приложить большое напряжение, он способен перейти в высокое проводящее состояние – это основной принцип работы резистивной памяти, которая имеет быстродействие в миллион раз выше (порядка наносекунды) по сравнению с флеш-памятью на нитриде кремния (порядка миллисекунды). Другим её преимуществом является меньшее потребление энергии в режиме записи информации: то есть подобные устройства будут работать от батарей значительно большее время. Такая память, возможно, ляжет в основу нового поколения микросхем, которые даже вытеснят флеш-память, но этого следует ждать не раньше чем через пять–десять лет. Пока учёные пытаются решить ряд научных проблем: прежде всего, неясна физика переключения диэлектрика из малопроводящего в сильнопроводящее состояние и обратно.

Алёна Литвиненко

Источники:

[Флеш-память: запомнить все!](#) – Наука в Сибири (sbras.info), 20 март 2017.

[Флеш-память: исследования новосибирских ученых](#) – Новости сибирской науки (sib-science.info), 20 март 2017.