

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ В ГИБКИХ ТРАНЗИСТОРАХ

Янченко Н.И.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
филиал Минский радиотехнический колледж
г. Минск, Республика Беларусь*

Научный руководитель: Кусенок Е.Н. – преподаватель высшей категории дисциплин общепрофессионального и специального циклов, представитель цикловой комиссии «Микро- и нанoeлектронных технологий и систем».

Аннотация. В данной работе рассмотрены понятия и преимущества гибких транзисторов, материалы для их создания, перспективы их использования в будущем.

Ключевые слова: гибкий транзистор, дисульфид молибдена, молибденит, углеродные нанотрубки, предельный изгиб.

Гибкий транзистор – это инновационная конструкция, которую можно свернуть или согнуть [1]. Именно этим он отличается от обычных транзисторов, которые являются жесткими и не могут использоваться физически гибким способом. Гибкие транзисторы позволяют создавать гибкие дисплеи и другие аппаратные компоненты, такие как гибкие клавиатуры.

Новейшее изобретение имеет пока только сложное техническое название - биполярная комплементарная структура с металл-оксидным полупроводником. По сути – это тонкопленочный транзистор конструкция которого позволят сочетать несколько очень важных свойств – способность проводить высокие токи с минимальным выделением тепла, при этом гибкость транзистора сохраняется и не влияет на его электрические свойства.

В новой гибкой технологии высокотемпературное спекание заменено на использование наносинтетического клея, благодаря чему возможно создавать гибкие структуры быстро и менее затратно в производстве.

Буквально недавно удалось создать транзистор на основе графеноподобного двухмерного материала – дисульфида молибдена (MoS_2), подходящий для использования в управляющих цепях гибких дисплеев OLED.

Для демонстрации возможностей разработки была изготовлена матрица OLED разрешением 6 x 6 пикселей на пластиковой подложке толщиной 7 мкм. На финальном этапе разработки было выявлено, что “дисплей” получился настолько гибким, что его можно наклеивать на кожу. Сам же “дисплей” изображен на рисунке 1.

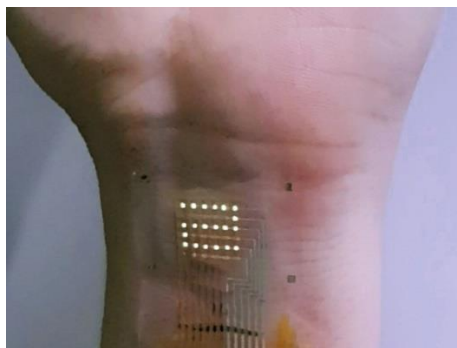


Рисунок 1 – Изображение гибкого транзистора на основе дисульфида молибдена на пластиковой подложке на руке человека

Поскольку материал MoS_2 является двухмерным, он практически прозрачен. В то же время, чтобы сделать транзисторы, подходящие для выбранной области применения, необходимо было уменьшить сопротивление контакта между MoS_2 и электродами. Нужного эф-

фекта удалось добиться, заменив обычно используемый в качестве диэлектрика оксид кремния SiO_2 оксидом алюминия Al_2O_3 . Схема такого транзистора показана на рисунке 2.

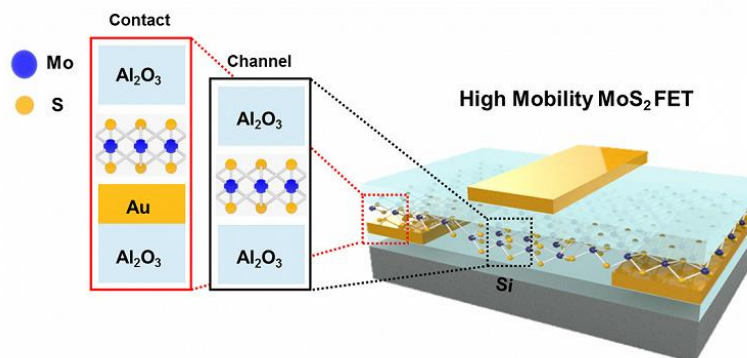


Рисунок 2 - Строение гибкого транзистора на основе дисульфида молибдена

В итоге удалось получить значение подвижности электронов, близкое к значению этого параметра в транзисторах на основе поликристаллического кремния.

Так же успешным изобретением стало создание высокопроизводительных молибдени-товых транзисторов на гибкой пластиковой подложке. Это открытие доказывает, что материал в будущем может идеально подходить для создания гибких, но при этом высокоскоростных и требующих малой мощности питания электронных устройств.

Молибденит, состоящий из молибдена и серы, может найти массу практических применений. Материал имеет прямую запрещенную зону шириной примерно 1,8 эВ. Это значит, что для изготовления фотонных устройств он подходит намного лучше, нежели кремний, имеющий непрямую запрещенную зону. На сегодняшний день некоторые научные группы даже утверждают, что молибденит может быть конкурентом удивительному материалу графену (не имеющему запрещенной зоны вовсе в своем первоначальном состоянии) в электронных схемах будущего. Наличие прямой запрещенной зоны очень важно, когда дело доходит до создания таких устройств, как светодиоды, солнечные батареи, фотоприемники и любых других фотонных компонентов, использующих возбуждение пары электрон-дырка проводимости, поскольку устройства с прямой запрещенной зоной обеспечивают наиболее эффективное преобразование энергии. Кроме того, наличие прямой запрещенной зоны означает, что устройство может легко включаться и выключаться, что важно для таких компонент, как обычный транзистор. Молибденит отличается высокой подвижностью свободных зарядов (подвижность оценивается в $100 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$, а некоторые научные группы оценивают ее в $500 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$), величина которой сравнима с подвижностью в самых современных образцах кремния. А поскольку отдельные двумерные слои вещества слабо скреплены между собой лишь ван-дер-ваальсовыми силами, в теории молибденит должен быть совместим с различными подложками, даже гибкими основаниями из пластика.

Тем не менее, предыдущие попытки смонтировать молибденит на пластике были не очень успешными. Полученные таким образом устройства функционировали довольно плохо в сравнении с элементами, размещенными на жестких основаниях. С использованием стандартных методов литографии стало возможным создание многослойного молибденитового транзистора на гибкой пластиковой подложке, имеющего высокое соотношение токов во включенном и выключенном состоянии (сопоставимое с параметрами устройств, размещенных на кремниевых подложках). Созданное устройство также отличается малыми энергозатратами в процессе работы; кроме того, оно может гнуться в любом направлении без возникновения каких-либо механических повреждений. Радиус предельного изгиба такого транзистора составляет всего 1 мм, что напоминает возможности графена – наиболее известного среди гибких кристаллических материалов. Разработка найдет применение в гибких электронных схемах, а также это изобретение доказало, что даже такой двумерный материал, как

молибденит, вполне пригоден для таких нетрадиционных подложек, как пластик, стекло и даже ткани.

Для создания самого гибкого транзистора использовались углеродные нанотрубки [2], с малой толщиной, высокой прочностью и одновременно гибкостью. Основой элемента стал поливиниловый спирт, использующийся в некоторых клеях в качестве загустителя. Он абсолютно прозрачный и гибкий как показано на рисунке 3.

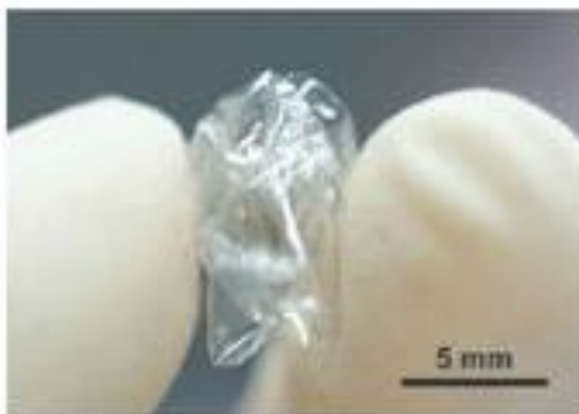


Рисунок 3 – Изображение гибкого транзистора из углеродных нанотрубок на прозрачной подложке

Это изобретение представляет собой полевой транзистор с толщиной схемы менее 15 микрон. Испытания устройства показали, что, лишь после того как схему скомкали 100 раз, она начала давать сбои (немного уменьшился максимальный ток стока). Как было выяснено после стольких механических нагрузок углеродные нанотрубки начали ломаться. Тем не менее, 100 складываний – очень неплохой показатель, который позволяет мечтать о применении новинки в электронных схемах, которым придётся работать в экстремальных условиях, там, где происходит множество изменений формы.

Исследования также показали, что минимальный радиус изгиба не должен быть более одного миллиметра, то есть о полном складывании речи не идёт. Но и такой показатель – достижение. Другие транзисторы брали планку 0,1 миллиметра.

Пока – это очень ранняя разработка, но в дальнейшем есть перспективы контроля свойств транзисторов и освоения их интеграции в другие устройства, а также идеи о создании коммерческой гибкой и прозрачной, полностью углеродной электроники.

Рассмотрим гибкий транзистор с плавающим затвором. Гибкий транзистор с плавающим затвором представляет собой транзистор, который может находиться не только в двух состояниях – закрытом и открытом, но и в промежуточных, а также способный изгибаться или сворачиваться до предельного изгиба.

Интересны находки по созданию массивов гибких транзисторов с плавающим затвором на основе органических полупроводников, в качестве такового был выбран пентацен. На рисунке 4 представлена плёнка с таким массивом и схема самого транзистора.

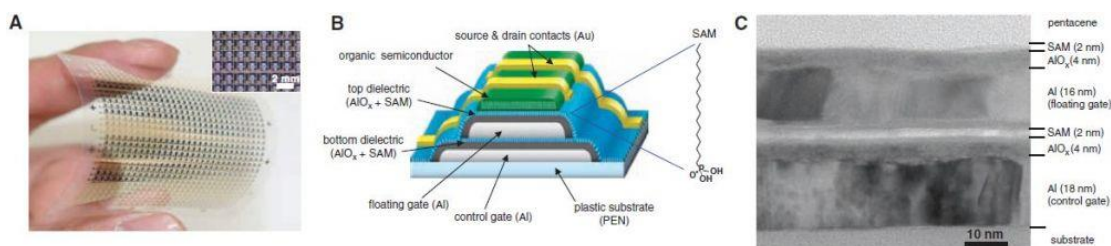


Рисунок 4 – (А) Фотография плёнки, состоящей из 26x26 органических транзисторов с плавающим затвором. (В) Схема органического транзистора с плавающим затвором. (С) ТЕМ-микрофотография «среза» транзистора.

Для описания свойств диэлектрика (оксид алюминия плюс самособирающийся монослой), используемого при создании транзисторов, также были изготовлены гибкие транзисторы без органического полупроводника [3]. Были измерены смещения порогового напряжения гибкого транзистора с органическим полупроводником в зависимости от напряжения, прикладываемого при записи, и времени, отведённого на запись информации. Выбрав, таким образом, оптимальные параметры для записи информации, на основе такого массива транзисторов был создан гибкий датчик давления.

В этой связи можно отметить, что развитие данного направления в микроэлектронике позволит в будущем создавать различные компоненты электронных устройств на основе органических полупроводников и успешно внедрять их, если не в полностью органические, то хотя бы в гибридные устройства, такие как солнечные батареи, светоизлучающие поверхности, сенсоры. Использование гибких транзисторов устранил текущую потребность в высокотемпературной обработке и последующую потребность в жаропрочных транзисторных материалах. Они также могут быть использованы для замены кремния, используемого в компьютерных дисплеях. Эта технология может привести к складным портативным компьютерам и электронным устройствам.

Список литературы

1. *Физические основы электроники. Транзисторы. Гальваномагнитные и термоэлектрические приборы. Оптоэлектронные приборы* : учеб. пособие / А.Д. Бялик, А.В. Каменская. - Новосибирск: Изд. НГТУ, 2017. - 92 с.
2. *Транзисторы на основе полупроводниковых гетероструктур* : моногр. / А.Н. Ковалев. - Москва : Изд. Дом МИСиС, 2011. - 364 с.
3. *Гибкие печатные платы: учеб. Пособие* / Медведев А. М. – Москва: Изд. ООО “Группа ИДТ”, 2008. – 266 с.