

УДК 544.22

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ АТОМАРНО ТОНКИХ ПЛЕНОК ДИСУЛЬФИДОВ ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ В МИКРОЭЛЕКТРОНИКЕ

Самарцев Алексей Станиславович

*Студент 3 курса бакалаврита,
кафедра «Электронные технологии в машиностроении»
Московский государственный технический университет*

*Научный руководитель: А.И. Беликов,
кандидат наук, доцент кафедры «Электронные технологии в машиностроении»*

В настоящее время изучение двумерных или иначе 2D-материалов (2 dimension, dimension – *англ.* измерение) находится на передовом крае науки. Первым полученным (в 2004 году) подобным материалом стали монослои углерода, так называемый графен. За открытие специфических свойств в графене физики А.К. Гейм и К.С. Новоселов получили в 2010 году Нобелевскую премию по физике.

Но материалы, практически и теоретически, имеющие двумерную структуру были известны почти так же давно как и графен. Полагая, что особыми свойствами обладают все 2D-материалы, ученые разных стран обратили усилия на открытие таких свойств в других двумерных материалах. Уже начиная с 2011 года, публикуются первые работы посвященные исследованию таких материалов. В частности, 30 января 2011 года швейцарские ученые опубликовали исследования посвященные перспективам дисульфида молибдена в качестве полупроводникового материала для наноэлектроники [1]. В настоящее время обнаружено не менее 92 потенциальных аналогов графена, среди которых такие материалы как: нитрид бора, дисульфид молибдена, дисульфид вольфрама, диселенид молибдена, теллурид ртути и теллурид висмута и другие. 52 материала из списка уже рассматриваются в качестве перспективного двумерного материала [2].

Основным требованием к полупроводниковому материалу в электронике является наличие достаточно широкой запрещенной зоны. Монослой дисульфида молибдена обладает требуемой запрещенной зоной. В то время как графен является проводником и ни о какой запрещенной зоне в нем говорить не приходится, монослой дисульфида молибдена имеет прямую запрещенную зону шириной в 1.79 эВ [3] (у кремния только около 1 эВ). Прямая запрещенная зона значительной ширины так же важна для изготовления таких устройств, как светодиоды, солнечные батареи, фотоприменики и т.д. Подвижность свободных зарядов в дисульфиде молибдена оценивается в $100 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, некоторые ученые сообщают о возможности достижения значения в $480 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, если использовать в качестве подложки полимер [4].

Стоит обратить внимание и на технологические свойства MoS_2 . О них стоит сказать, что во-первых MoS_2 встречается в большом количестве в виде минерала – молибденита, чья добыча для нужд наноэлектроники не вызовет особых сложностей, учитывая, что слоистый, не двумерный дисульфид молибдена уже давно используется в качестве твердой смазки. Во-вторых, MoS_2 не склонен окисляться или взаимодействовать с водяным паром в атмосфере до температур в $400\text{-}500^\circ\text{C}$, не реагирует с разбавленными кислотами и щелочами, не растворяется в воде, без доступа воздуха разлагается только при температуре около 1100°C , с большинством веществ реагирует только при нагреве. Имеет стабильные свойства до температур в 350°C .

Иначе можно сказать, что рассматриваемый материал не склонен к деградации при эксплуатации за счёт химических реакций. В-третьих, методы его получения не являются уникальными и хорошо известны.

Можно выделить как минимум 4 общих направления в методах получения (синтеза) MoS_2 :

- механический пилинг («Скоч-метод»)
- отшелушивание в среде растворителей под действием ультразвука
- химическое осаждение из газовой фазы в среде защитных газов (CVD)
- облучение многослойного MoS_2 зеленым лазером

У дисульфида молебдена, дисульфида вольфрама может быть много различных применений. О перспективах использования дисульфидов тугоплавких элементов в солнечных батареях, фоточувствительных матрицах, различными учеными проведены соответствующие исследования. Дисульфид вольфрама может использоваться как ключевой компонент для создания термоэлектрических нанолитов.

У дисульфида молибдена есть большой потенциал в области нанoeлектроники. Так, базовый компонент электроники – транзистор, может быть создан на основе MoS_2 и углеродных нанотрубок. На основе такого же сочетания был создан полупроводниковый диод. Ученые из MIT создали логические схемы из полупроводниковых элементов.

Практическим же применением, могут стать гибкие жидкокристаллические дисплеи, флеш-устройства с вместительностью во много раз большей, чем у современных аналогов, создание биосенсоров, высокочастотных датчиков на основе наномеханических резонаторов и многое другое. Круг устройств, которые могут быть созданы на основе нанoeлектроники, потенциально будет иметь свойства и преимущества, которые не могут предложить современные аналоги. Более того, потенциал 2D-материалов в целом и в нанoeлектронике в частности ещё не до конца ясен. Некоторые ученые, как, например Виктор Атучин из Института физики полупроводников СО РАН, считает, что главная особенность нанoeлектроники будет не в простой количественной миниатюризации или замене микроэлектроники, а в качественных отличиях, не доступных ей. Вероятно, что в будущем будут созданы принципиально новые устройства.

Но пока, даже на стадии опытного образца, не создано ещё ни одного нанoeлектронного устройства. Создание отдельных компонентов или целых схем ещё не гарантирует создание всего изделия в целом. Тем не менее, прогресс в этом направлении идет быстро. В скором времени можно ожидать первые попытки в этом направлении.

Литература

1. *B. Radisavljevic, J. Brivio, V. Giacometti & A. Kis* Single-layer MoS_2 transistors – Nature Nanotechnology 30.01.2011
2. *S. Lebègue, T. Björkman, M. Klintenberg, R. M. Nieminen, and O. Eriksson* Two-Dimensional Materials from Data Filtering and *Ab Initio* Calculations – Phys. Rev. X 3, 8.01.2013
3. *Eugene S. Kadantsev, Pawel Hawrylak* Electronic structure of a single MoS_2 monolayer – Solid State Communications, 10.02.2012
4. *Wenzhong Bao, Xinghan Cai, Dohun Kim, Karthik Sridhara and Michael S. Fuhrer* High mobility ambipolar MoS_2 field-effect transistors: Substrate and dielectric effects – Applied Physics Letters 102, 29.01.2013