

УДК 544.22, 621.38

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ И ОЦЕНКА СВОЙСТВ ДВУМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

Александр Иванович Семочкин

*Студент 3 курса, бакалавриат,
кафедра «Электронные технологии в машиностроении»
Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана*

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

Одной из быстроразвивающихся областей современной нанoeлектроники являются двумерные материалы (2D), имеющие толщину от одного до нескольких атомных слоев. В современном мире, это самые тонкие из возможных полупроводников, проводников и изоляторов. Использование двумерных материалов обеспечит дальнейшую миниатюризацию устройств, применяемых в области нанoeлектроники.

2D материалы обладают уникальными свойствами: рекордно высокой теплопроводностью, большой механической прочностью высокой электропроводностью, а так же прозрачностью и гибкостью. Наиболее известным и изученным представителем двумерных материалов является графен. Структура графена представлена гексагональной кристаллической решеткой, толщиной в один атом углерода. Такие свойства графена, как высокая подвижность электронов, низкое удельное сопротивление и другие, открывают перспективы для создания различных электронных датчиков, фотоэлектрических устройств для преобразования солнечной энергии, сенсорных экранов и др. На основе графена могут быть созданы высокочувствительные фотоплёнки. Высокая скорость распространения плазменных волн в исследуемом проводнике открывает перспективы создания источников и приемников терагерцового диапазона.

Ключевым и наиболее важным требованием к полупроводниковому материалу в нанoeлектронике является наличие запрещенной зоны. Атомарный слой графена вследствие отсутствия запрещенной зоны, не подходит для ряда применений в области электроники и оптики, поэтому в качестве других перспективных материалов в последнее время исследователями изучаются монослойные пленки на основе дихалькогенидов переходных металлов (ДПМ). Дихалькогениды переходных металлов ($NbSe_2$, MoS_2 , WS_2 , WSe_2 , TaS_2 и др.) относятся к слоистым соединениям, кристаллы которых, как и графит, можно разделять на отдельные монослои. Дихалькогениды переходных металлов имеют сходное строение и химическую формулу (MX_2) , где М-это переходный материал (например, молибден или вольфрам), а X-халькоген (например, сера, селен или теллур) [1]. Толщина монослоя дисульфида молибдена MoS_2 оценивается в 0.65 нм. Свойства зависят от структуры, толщины и меняются от металлических до полупроводниковых. В частности, показано, что с уменьшением толщины увеличивается ширина запрещенной зоны и при переходе от многослойной структуры к монослойной непрямая структура энергетических зон трансформируется и MoS_2 становится прямозонным полупроводником [2], что проявляется в значительном

усилении фотолюминесценции монослоев, обнаруженном для MoS_2 , MoSe_2 , WS_2 , WSe_2 [3].

Таблица 1. Свойства двумерных материалов

№ п/п	Двумерные материалы	Ширина запрещенной зоны, эВ	Подвижность носителя заряда $\text{см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$	Тип
1	Графен (C_n)	0 [6]	20000-150000 [6]	Проводник (полуметалл)
2	Дисульфид молибдена (MoS_2)	1,2-1,8 [6]	200 -500 [10]	Полупроводник (диамагнетик)
3	Нитрид бора (h-BN)	3-7,5 [9]	1-7 [9]	Изолятор
4	Дисульфид вольфрама (WS_2)	1,4-2,26 [2]	50-150 [2]	Полупроводник
5	Диселенид Вольфрама (WSe_2)	1,71 -2,3 [2]	80-120 [2]	Полупроводник

Свойства наиболее широко исследуемых двумерных материалов приведены в таблице 1. Недавние эксперименты показывают возможности различных их применений, включая полевые транзисторы [4], низкоэнергетические переключатели, энергоемкие устройства, устройства спинтроники и оптоэлектроники [5]. Возможно также применение монослойных пленок MoS_2 в светодиодах, солнечной энергетике, устройствах флэш-памяти. Первыми стали исследовать транзисторы на основе дисульфида молибдена, изготовленные из монослоев этого материала. В транзисторных структурах были получены значения подвижности носителей заряда на уровне $200\text{--}350 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$. Полевой транзистор с каналом из MoS_2 , подзатворным диэлектриком из BN и затвором из графена был собран и исследован в работе [6]. Как показали результаты эксперимента, прозрачность таких структур достигает 95%.

Транзисторы с каналом из MoS_2 могут быть использованы и в области гибкой электроники, способны заменить элементы логики на гибких дисплеях. Полученная в работе [6] подвижность носителей в транзисторах на гибкой подложке и их прозрачность являются рекордными, по сравнению с достижимыми в настоящее время подвижностью $4\text{--}12 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ и прозрачностью 60% [7]. В работе [8] показана возможность создавать гетероструктуры на основе слоев WS_2 , WSe_2 или MoS_2 для фотоэлементов с высоким внутренним квантовым выходом (отношение количества разделенных электронно-дырочных пар к количеству упавших фотонов). В наноплазмонике носители заряда генерируются лазером в слое полупроводника (WS_2 , WSe_2 или MoS_2) и, в случае приложенного к структуре напряжения, происходит разделение носителей и накопление их в разных слоях графена. Внутренний квантовый выход для структур графен/ WS_2 /графен составляет 0.2–0.3 при мощности возбуждающего лазера до 10 мкВт. Двумерные материалы могут быть использованы для создания гетероструктур, обладающих эффектом памяти. Гетероструктуры на основе графена, дихалькогенидов переходных материалов и, особенно, вертикальные гетероструктуры рассматриваются в настоящее время как основное направление развития тонкопленочной электроники. Для вертикальных гетероструктур на основе двумерных материалов введено специальное название – Ван-Дер-Ваальсовы гетероструктуры, так как предполагается их формирование последовательным перенесением слоев, когда слои в единой структуре будут удерживаться только за счет сил Ван-дер-Ваальса. Важным достижением разрабатываемых гетероструктур является

демонстрация возможностей новых физических подходов и новых принципов построения приборных структур, отличных от традиционных подходов в кремниевой электронике, когда ограничение в использовании графена для создания транзисторов из-за отсутствия запрещенной зоны может преодолеваться благодаря конструктивным решениям.

На основании приведенного анализа можно сделать вывод о том, что существенный прогресс, наблюдаемый в последнее время в разработке, создании и исследовании устройств нанoeлектроники на основе двумерных материалов отражает широкие возможности и перспективы развития этого направления. Дальнейший прогресс зависит, с одной стороны, от разработки устройств с применением 2D материалов, а с другой – развитием методов получения ультратонких и монослойных материалов.

Литература

1. *K.F. Mak, M.Y. Sfeir, Y. Wu, C.H. Lui, J.A. Misewich, T.F. Heinz.* Phys. Rev. Lett., Seeing electrons in two dimensions: Optical spectroscopy of graphene // Solid State Communications 2012.Vol.152,pp.1341-1349. DOI:10.1016/j.ssc.2012.04.064.
2. *R. Gordon, D. Yang, E. Crozier, D. Jiang, R. Frind.* Phys. Rev.B, Tunable nonlinear refractive index of two-dimensional MoS₂, WS₂, and MoSe₂ nanosheet dispersions//Photonics Research.2015.Vol.3,pp.A51-A55. DOI:10.1364/PRJ.3.000A51.
3. *W. Zhao, Z. Ghorannevis, L. Chu, M. Toh, C. Kloc, P.-H. Tan,G. Eda.* Evolution of electronic structure in atomically thin sheets of WS₂ and WSe₂//Optical Materials Express 2017.Vol.7,pp.1180-1187. DOI:10.1364/OME.7.003998.
4. *Eugene S.Kadantsev, Pawel Hawrylakb.* Electronic structure of a single MoS₂ monolayer // Solid State Communications, 2012.Vol.152,pp.909-913. DOI:10.1016/j.ssc.2012.02.005.
5. *Q.H. Wang, K. Kalantar-Zadeh, A. Kis et al.,* Electronics and optoelectronics of two-dimensional transition metal dichalcogenides //Nat. Nanotechnol.Vol.7,pp.699-712. DOI:10.1038/nnano.2012.193.
6. *G.-H. Lee, Y.-J. Yu, X. Cui, N. Petrone, C.-H. Lee, M.S. Choi,D.-Y. Lee, C. Lee, W.J. Yoo, K. Watanabe, T. Taniguchi,C. Nuckolls, P. Kim, J. Hone.* Optical identification of MoS₂/graphene heterostructure on SiO₂/Si substrate //Optic Express.Vol.22,pp.15969-15974. DOI:10.1364/OE.22.015969.
7. *J. Pu, Y.J. Zhang, Y. Wada, J.T.W. Wang, L.J. Li, Y. Iwasa,T. Takenobu.,*Effects of substrates on the nonlinear optical responses of two-dimensional materials //Optic Express,Vol.23,pp.31817-31827. DOI:10.1364/OE.23.031817. .
8. *L. Britnell, R.M. Ribeiro, A. Eckmann, R. Jalil, B.D. Belle,A. Mishchenko, Y.-J. Kim, R.V. Gorbachev, T. Georgiou,S.V. Morozov, A.N. Grigorenko, A.K. Geim, C. Casiraghi,A.H. Castro Neto, K.S. Novoselov.,* Strong Light-Matter Interactions in Heterostructures of Atomically Thin Films// Science Vol.340,pp.1311-1314. DOI:10.1126/science.1235547
9. *M. V. Serzhantova, A. A. Kuzubov, A. S. Fedorov, F. N. Tomilin, P. O. Krasnov* Theoretical study of the influence of deformation on the electronics structure of a Hexagonal Boron Nitride Monolayer. 2011. 14. 515.