

Новый двумерный материал для нанoeлектроники

1. Эра двумерных материалов

Эру двумерных материалов открыли Андрей Константинович Гейм (1958 г.р.) и Константин Сергеевич Новоселов (1974 г.р.) с получением графена (рис. 1) и его детальным описанием в журнале *Science* в 2004 году [1]. Авторы уже в 2010 году получили Нобелевскую премию по физике, что необычайно быстро и показывает важность этого открытия. Один из ведущих теоретиков по физике твердого тела, профессор Кацнельсон, в своей монографии отмечает: «Графен – только первый из двумерного класса материалов, и другие материалы этого класса широко изучаются, например, слоистый нитрид бора (BN). Свойства этих материалов совершенно разные: графен – это металл с достаточно высокой электронной проводимостью, а нитрид бора – диэлектрик. Также интересными двумерными материалами являются дисульфид молибдена (MoS_2) и дисульфид вольфрама (WS_2), которые также были получены Геймом и Новоселовым» [2].

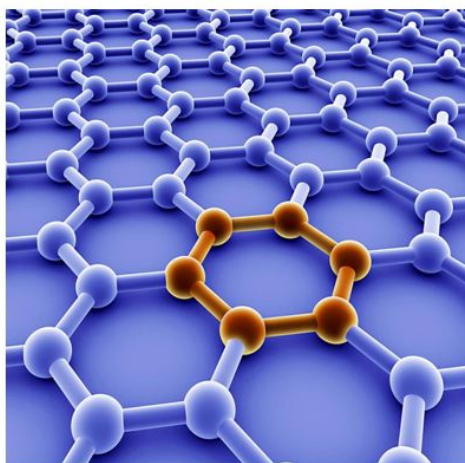


Рисунок 1 – Графен представляет собой плоскую кристаллическую решетку из шестиугольников атомов углерода (6C) толщиной в один атом [3]

В 2012 году было открыто двумерное соединение кремния (Si)– *силицен* (англ.: *silicene*), структура которого похожа на графен с кольцом атомов кремния (6Si), рис. 2 [3]. В отличие от графена, который является плоским 2D материалом, кольцо атомов Si деформировано, и 2DSi является неровным материалом (высота неровностей $\delta \sim 0,53 \text{ \AA}$, рис.2) [4]. Двумерный силицен находит применение в полупроводниковой электронике.

Прогноз профессора Кацнельсона оказался правильным, и в настоящее время идет широкий поиск разных 2D материалов. Ученые из *IBM Center* (Цюрих) в сотрудничестве с Химическим факультетом Уорикского университета (*University of Warwick*) в Великобритании

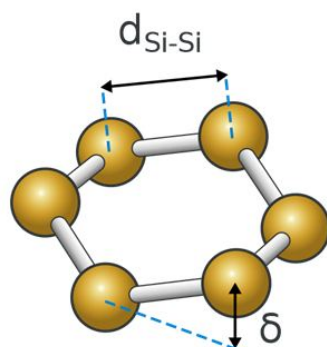


Рисунок 2 – Двумерный кремний (Si) – силицен похож на графен с кольцом атомов кремния (6Si). В отличие от графена, который является плоским 2D материалом, кольцо атомов Si деформировано и 2DSi является неровным материалом с высотой неровностей $\delta \sim 0,53\text{Å}$ [4].

синтезировали первое двумерное циклическое соединение углеводорода - *триангулен* (англ.: *triangulene*), который содержит шестиатомное (бензольное) кольцо (6C) углерода [5]. Углеродное кольцо присутствует во всех ароматических соединениях углерода. Это кольцо содержится также в графене, который, обладая высокой электронной проводимостью и высокой твердостью, сильно отличается от триангулена $C_{22}H_{12}$. В дальнейшем можно расширить методы синтеза для создания более сложных ароматических соединений с широким спектром применений.

Необычные свойства графена делают его интересным объектом, но графен также может служить подложкой для стабилизации других 2D материалов. В частности, йодида меди (CuI), который стабилен только в узком температурном диапазоне и отделение монослоев от 3D кристалла для получения двумерного материала невозможно. Двумерный йодид меди был синтезирован в виде слоев толщиной от одного до двадцати атомов из меди (Cu) и йода (I) влажным химическим процессом. Структура CuI является сложной с шестиугольной атомной сеткой. Синтезированный йодид меди стабилен только между двумя слоями графена [6].

Недавно профессор Мишель Спенсер (*Michelle Spencer*) с сотрудниками синтезировала гетероструктуру для барьера Шоттки, которая состоит из двух 2D материалов, расположенных один на другом (рис. 3) [7].

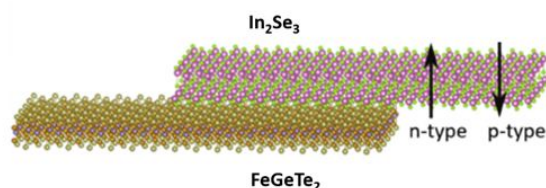


Рисунок 3 – Схема переключаемого 2D диода Шоттки: гетероструктура In_2Se_3/Fe_3GeTe_2 состоит из двух монослоев двумерных материалов, расположенных один на другом. Это позволяет использовать гетероструктуру в качестве р-типа (дырочная проводимость) или n-типа (электронная проводимость)

2. Два двумерных материала создают новый материал для нанoeлектроники

Профессор Мишель Спенсер и доктор Мария Яваид (*Maria Javaid*) в Университете *Royal Melbourne Institute of Technology* (RMIT) недавно закончили исследовательский проект по разработке нового материала для нанoeлектроники, состоящего из двух атомных слоев, расположенных один над другим [7]. Университет RMIT был основан в 1887 году и находится под покровительством королевы Элизабет II (*Queen Elisabeth II*), это единственный

университет Австралии, который имеет право носить титул королевского (*Royal*). Сегодня RMIT – это общественный исследовательский колледж с 95 000 студентами и высоким финансированием исследований. С 2001 года RMIT имеет большой филиал в городах Хо Шимин и Ханой (Вьетнам), а также партнерские отношения в Китае, Гонконге, Индонезии, Сингапуре и Шри-Ланке.

Исследовательская группа профессора Спенсер и доктора Яваид использует гетероструктуру двух 2D-монослоев: In_2Se_3 и Fe_3GeTe_2 в качестве барьера Шоттки для полупроводниковых диодов (рис. 4). In_2Se_3 (рис. 5) представляет собой двумерный полупроводник, ферроэлектрик с превосходными фотоэлектрическими свойствами [7]. Ферроэлектрики (или сегнетоэлектрики) имеют спонтанную поляризацию электрического поля, которая может быть изменена внешним электрическим полем. Слово «*ferro*» немного искусственно, потому что большинство ферроэлектриков не содержат железа (Fe). Ширина запрещенной зоны In_2Se_3 (англ.: *gap*) зависит от толщины слоя. In_2Se_3 имеет высокое поглощение света и высокую стабильность в атмосфере при комнатной температуре. Fe_3GeTe_2 – металлический ферромагнитный материал с высокой температурой Кюри и хорошей стабильностью в атмосферных условиях.

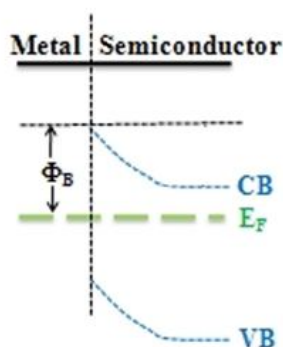


Рисунок 4 – Барьер Шоттки в полупроводниковом диоде: CB – зона проводимости; VB – валентная зона; E_F – общий уровень Ферми для металла и полупроводника; Φ_B – барьер Шоттки (эВ) (в диоде течет ток, если приложенное напряжение позволяет преодолеть барьер; диоды Шоттки широко используются в выпрямителях)

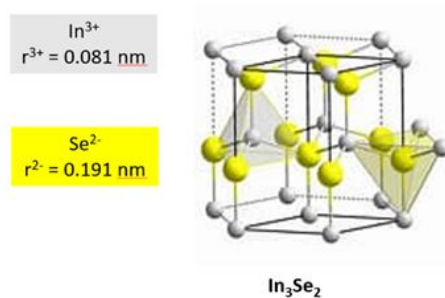


Рисунок 5 – Селенид индия In_2Se_3 , являющийся полупроводником с ковалентной связью и шириной запрещенной зоны $E_g = 1.9$ эВ

Профессор Спенсер отмечает: «Наши результаты показывают, что гетероструктура $\text{In}_2\text{Se}_3/\text{Fe}_3\text{GeTe}_2$ имеет свойства, сопоставимые с другими гетероструктурами, и легко управляется внешним электрическим полем». И далее: «С этой гетероструктурой мы можем не только контролировать высоту барьера, но также переключить барьер от-типа (электронная

проводимость) к барьеру р-типа (дырочная проводимость)» [8]. Эта возможность расширяет применение структуры, в частности для создания элементов памяти.

Свойства двумерного гетеро-барьера $\text{In}_2\text{Se}_3/\text{Fe}_3\text{GeTe}_2$ были исследованы для разных положений атомов Se в In_2Se_3 . Были созданы три разных конфигурации (G1, G2 и G3, рис. 6 и табл. 1). Конфигурации G1 и G3 имеют разные направления спонтанной электрической поляризации. Конфигурация G2 имеет ослабленную электрическую поляризацию и была отклонена для дальнейших исследований.

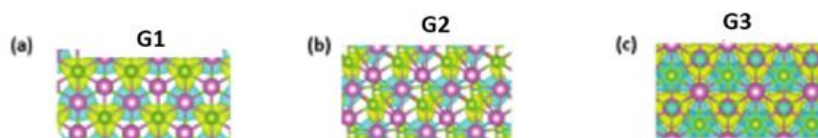


Рисунок 6 – Разработанная профессором Спенсер гетероструктура $\text{In}_2\text{Se}_3/\text{Fe}_3\text{GeTe}_2$, исследованная при различных позициях атомов Se в In_2Se_3 (Табл. 1). Лучшие свойства имеют конфигурации G1 и G3

Зонная структура In_2Se_3 показывает, что Fe_3GeTe_2 хорошо представляет свои магнитные и металлические свойства в гетероструктуре $\text{In}_2\text{Se}_3/\text{Fe}_3\text{GeTe}_2$, которая применяется в нанoeлектронике.

Таблица 1 – Параметры конфигураций

Конфигурация	Барьер Шоттки, эВ	Ширина запрещенной зоны E_g , эВ
$\text{In}_2\text{Se}_3/\text{Fe}_3\text{GeTe}_2$ (G1)	0.52	0.74
$\text{In}_2\text{Se}_3/\text{Fe}_3\text{GeTe}_2$ (G2)	0.68	0.72
$\text{In}_2\text{Se}_3/\text{Fe}_3\text{GeTe}_2$ (G3)	0.50	0.73

Двумерные слои были получены двумя методами: путем абляции трехмерного кристалла и осаждением на субстрате из паровой фазы (англ.:chemical vapor deposition). In_2Se_3 имеет несколько кристаллических структур, из которых α - In_2Se_3 имеет лучшие качества. Барьер Шоттки был создан на металлическом интерфейсе Fe_3GeTe_2 . Для получения оптимальной гетероструктуры использовались разные процедуры, в том числе дотирование для получения р - полупроводника.

Синтезированная гетероструктура представлена на рис. 3 [7]. Доктор Яваидпишет: «Мы обнаружили значительные изменения в структуре и электронных свойствах в гетероструктуре $\text{In}_2\text{Se}_3/\text{Fe}_3\text{GeTe}_2$. Такие изменения преобразуют эту гетероструктуру и позволяют переключить диод Шоттки от электронного (n-типа) к дырочному (p-типа)» [8]. Этот гибридный материал имеет ценные свойства для использования в будущих электронных устройствах, таких как телевизоры, компьютеры и телефоны. Самое главное, что электронные свойства новой структуры могут контролироваться без использования внешнего напряжения, что прокладывает путь для использования в нанoeлектронике.

Список литературы

- 1 Novoselov K.S., Geim A.K., et al. Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films, Science, 306, 666 (2004). doi:10.1126/science.1102896
- 2 Katsnelson M.I. Graphene: Carbon in two dimensions (Cambridge: Cambridge University Press, 2012, 363 p.).
- 3 Vogt P., De Padova P., Quaresima C., Avila J., Frantzeskakis E., Asensio M.C., Resta A., Ealet B., Le Lay G. Silicene: Compelling Experimental Evidence for Graphene like Two-Dimensional Silicon, Physical Review Letters, 108, 155501 (2012). doi:10.1103/PhysRevLett.108.155501

-
- 4 Lan Chen, Cheng-Cheng Liu, Baojie Feng, Xiaoyue He, Peng Cheng, Zijing Ding, Sheng Meng, Yugui Yao, Kehui Wu. Evidence for Dirac Fermions in a Honeycomb Lattice Based on Silicon, *Physical Review Letters*, 109, 056804 (2012). doi:10.1103/PhysRevLett.109.056804
 - 5 Shinobu Arikava. Synthesis and Isolation of a Kinetically Stabilized Crystalline Triangulene, *J. Am. Chem. Soc.*, 143, 19599-19605(2021). doi: 10.1021/jacs.1c10151
 - 6 Mustonen K., Hofer Ch., Kotrusz P., Markevich A., Hulman M., Mangler C., Susi T., Timothy J. Pennycook, Karol Hricovini, Richter Ch., Jannik C. Meyer, Jani Kotakoski, and Skakalova V. Toward Exotic Layered Materials: 2D Cuprous Iodide, *Adv. Mater.* 34, 2106922 (2022). doi: 10.1002/adma.202106922
 - 7 Javaid M., Taylor P.D., Sherif Abdulkader Tawfik and Michelle J.S. Spencer. Tuning the Schottky barrier height in a multiferroic $\text{In}_2\text{Se}_3/\text{Fe}_3\text{GeTe}_2$ van der Waals heterojunction, *Nanoscale*, 14, 4114 (2022). doi: 10.1039/d1nr06906c
 - 8 Spencer M. Entwicklung eines neuen Schichtenmaterials für zukünftige Elektronik RMIT 17 März 2022. [Электронный ресурс] - URL: <https://phys.org/news/2022-03-layered-material-future-electronics.html> (дата обращения: 02.05.2022)

Сведения об авторах:

Шварц К. - академик Латвийской академии наук, доктор физико-математических наук, профессор GSI (Центр по изучению тяжёлых ионов имени Гельмгольца), Дармштат, Германия.

Даулетбекова А.К. - кандидат физико-математических наук, профессор кафедры технической физики, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Нур-Султан, Казахстан.

Сорокин М. - кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия.

Schwartz K. - Academician of the Latvian Academy of Sciences, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of GSI (Helmholtz Centre for Heavy Ion Research), Darmstadt, Germany.

Dauletbekova A. - Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department Technical Physics, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Nur-Sultan, Kazakhstan.

Sorokin M. - Candidate of Physical and Mathematical Sciences. Senior Researcher at the National Research Centre "Kurchatov Institute", Moscow, Russia.