

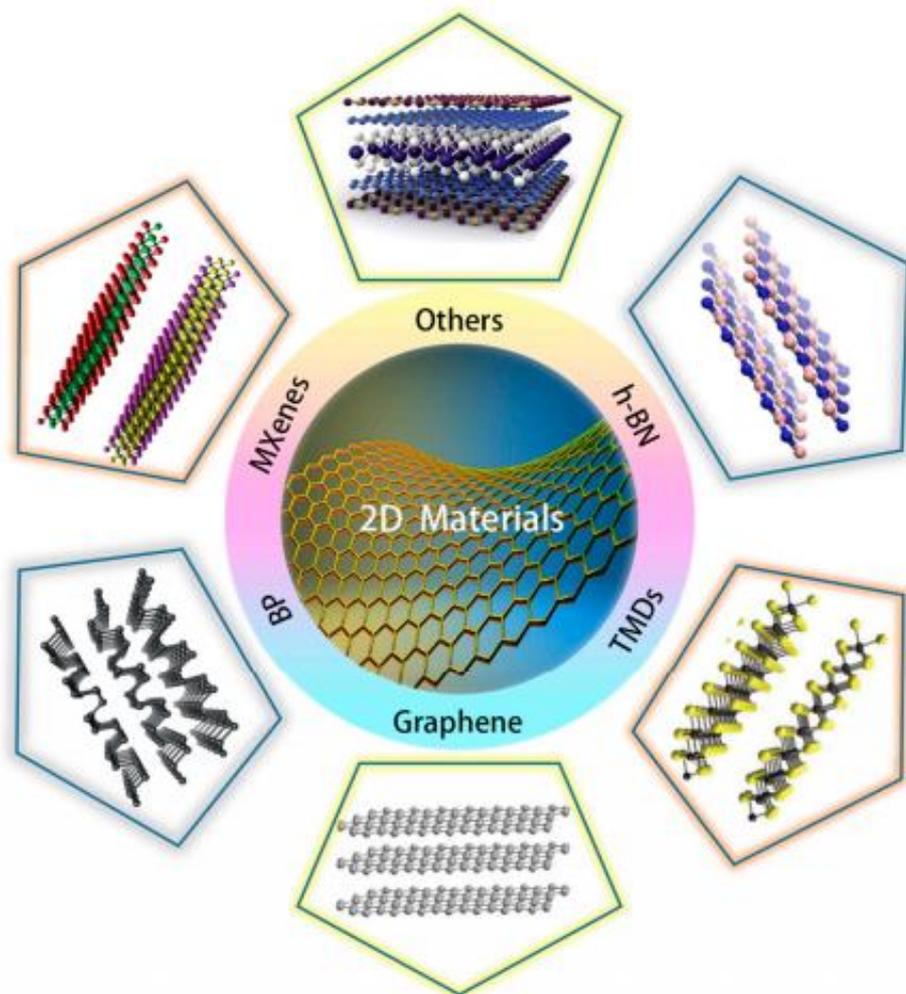


**СПБГЭТУ «ЛЭТИ»**  
**ПЕРВЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ**

**Наука настоящего и будущего –  
2D материалы и Ван-дер-  
Ваальсовы гетероструктуры**

С.С. Налимова, к.ф.-м.н.,  
доцент кафедры микро- и  
наноэлектроники СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

# Представители класса двумерных слоистых материалов



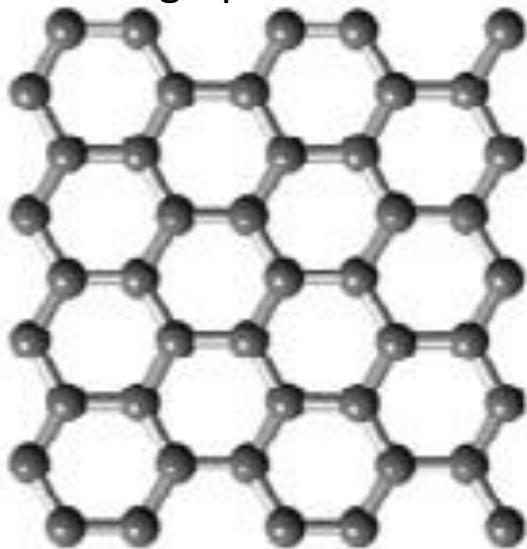
- Графен
- Черный фосфор (BP)
- Максены (MXenes)
- Гексагональный нитрид бора (h-BN)
- Дихалькогениды переходных металлов (TMDs)

Другие:

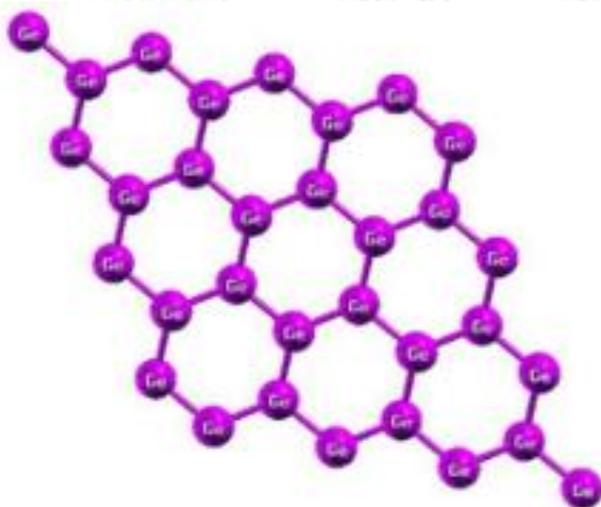
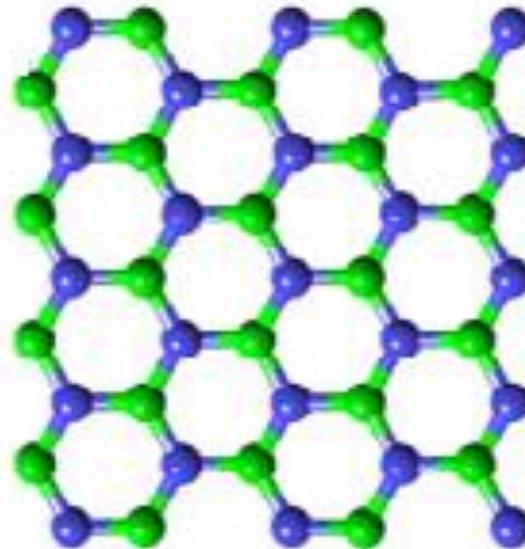
- Топологические изоляторы (TIs)
- Металлоорганические каркасы (MOFs)
- Графитоподобный нитрид углерода (g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>)

## 2D-материалы со структурой, подобной графену

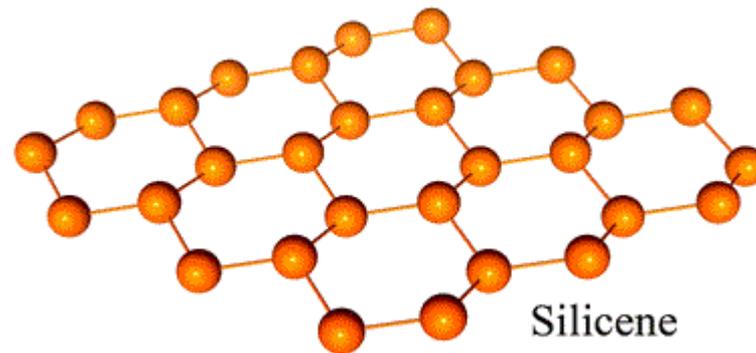
graphene



h-BN



Germanene



Silicene

# Методы синтеза 2D-материалов

## *Bottom-Up*

**CVD:** graphene, h-BN, MoS<sub>2</sub>

Главное преимущество –  
большая площадь получаемых  
материалов

Возможность получения  
электронных устройств, таких как  
транзисторы

Подходит для синтеза материалов,  
не существующих в 3D слоистой  
фазе (например, силицен)

**Синтез из растворов** – полученные  
материалы близки к полученным  
методами “top-down”

## *Top-Down*

**Механическое отслаивание:**

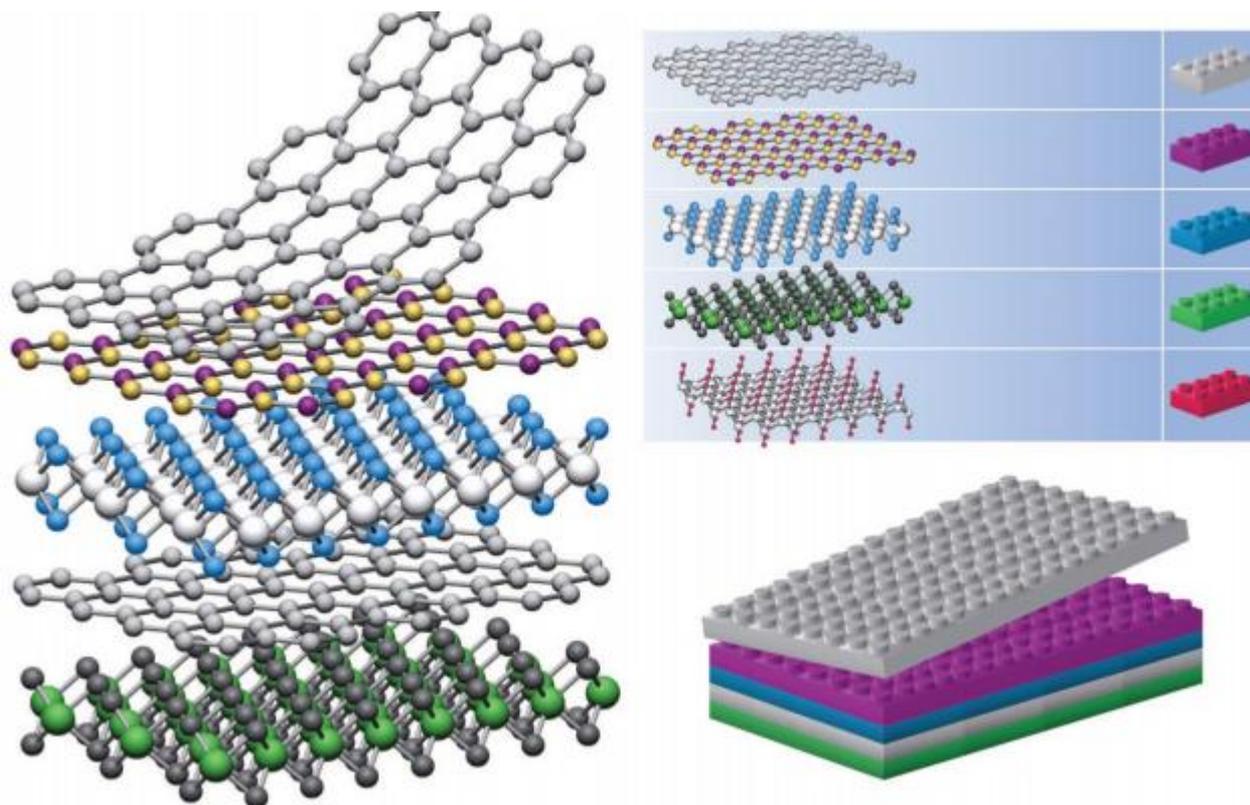
graphene, h-BN, MoS<sub>2</sub>, TMDs, MoO<sub>3</sub>,

Простой в реализации, однако  
сложный для масштабирования метод

Подходит для материалов со слабой  
связью между слоями

**Химическое отслаивание** – разрыв  
связей между слоями с помощью  
химического, химико-термического  
или химико-механического  
воздействия.

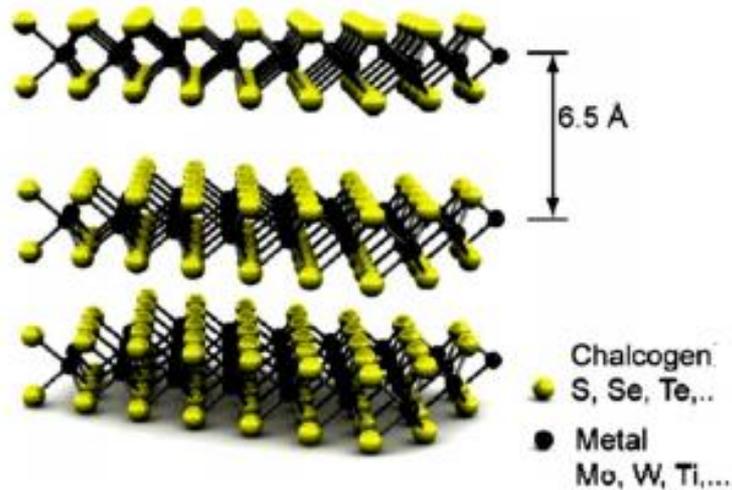
# Схема построения Ван-дер-Ваальсовой (вертикальной) структуры



A. K. Geim, I. V. Grigorieva. Van der Waals heterostructures. Nature, 499, 419-425 (2013)

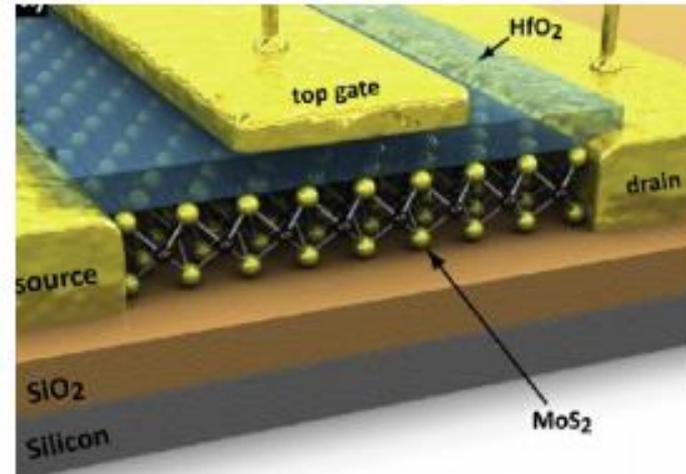
# Структура слоистых соединений TMDs и приборы на их основе

$\text{MX}_2$  - transition metal dichalcogenides



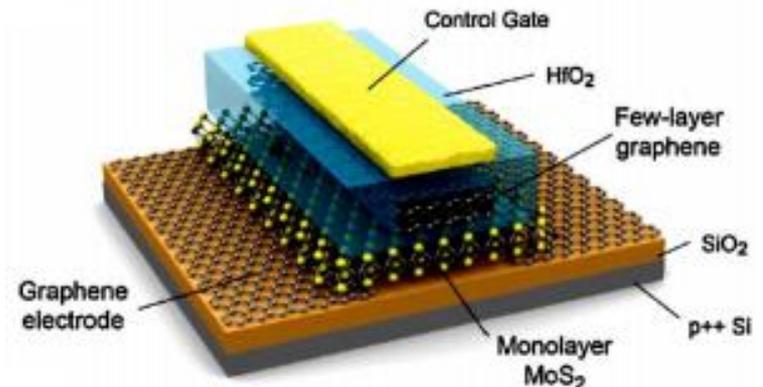
Соединения металлов группы V (V, Nb и Ta) являются металлическими, Соединения металлов группы VI (Mo и W) являются полупроводниковыми или металлическими, в зависимости от кристаллической структуры

Транзистор на монослойном  $\text{MoS}_2$



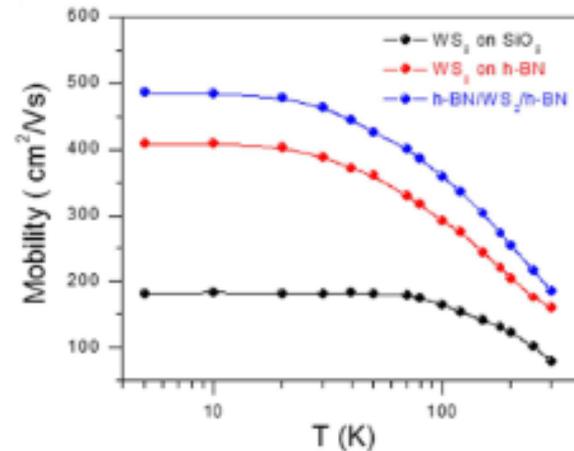
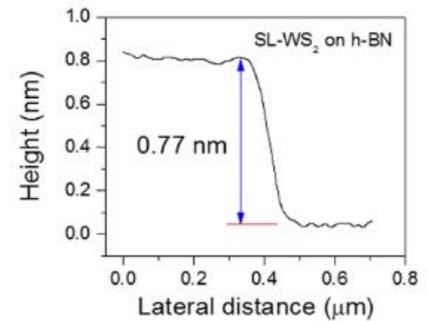
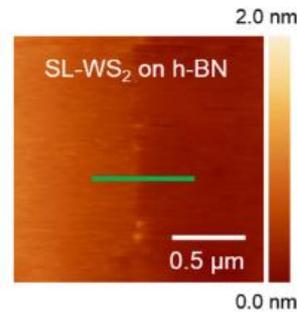
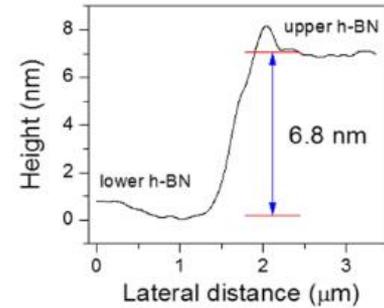
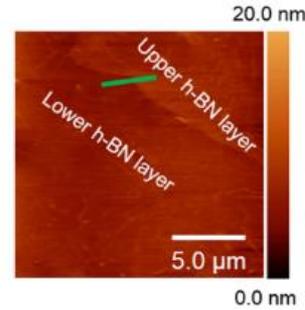
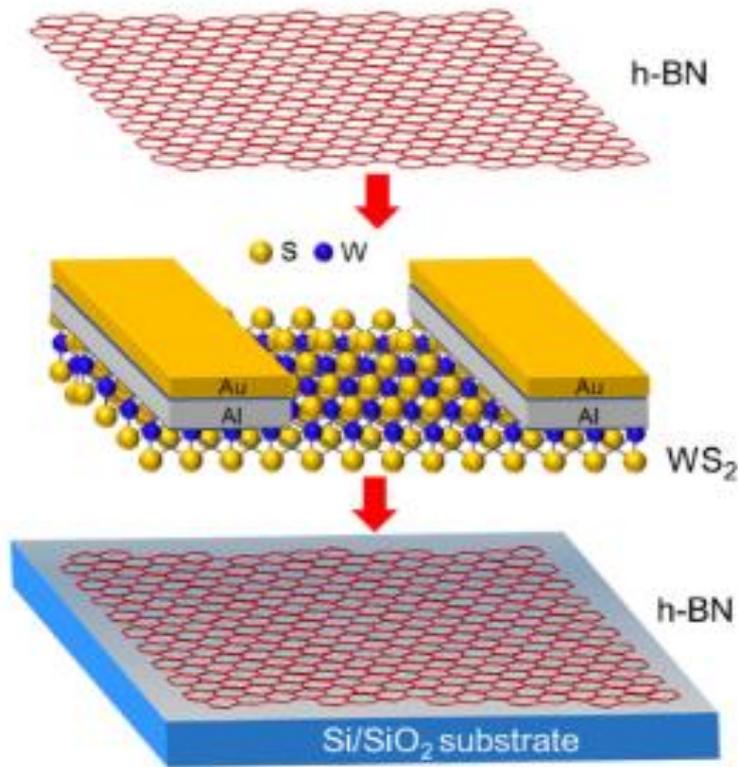
Radisavljevic, B., Radenovic, A., Brivio, J. *et al.* Single-layer  $\text{MoS}_2$  transistors. *Nature Nanotech* **6**, 147–150 (2011).  
<https://doi.org/10.1038/nnano.2010.279>

Гетероструктурная ячейка памяти  $\text{MoS}_2/\text{graphene}$



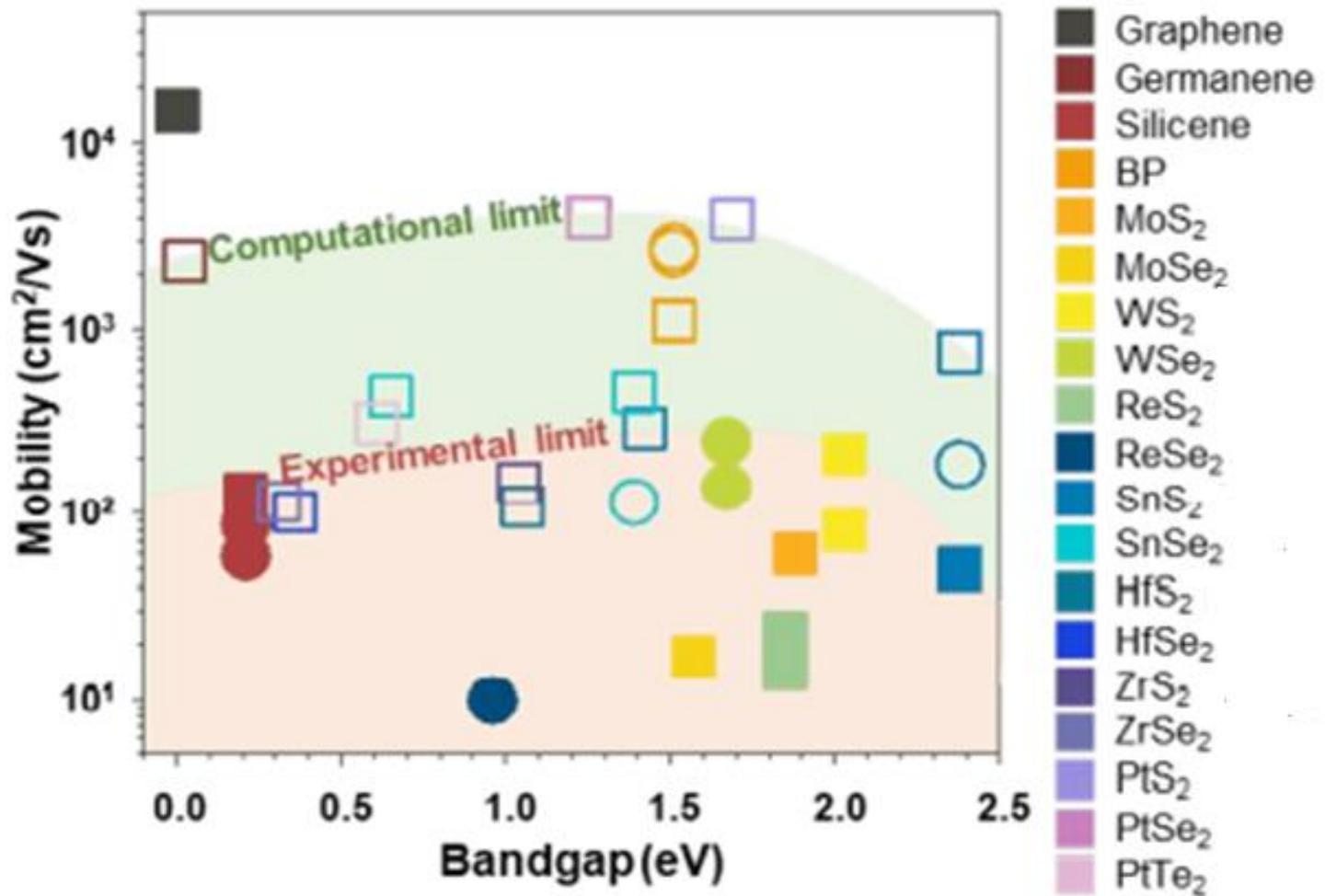
O.V. Yazyev and A.Kis.  $\text{MoS}_2$  and semiconductors in the flatland. *Materials Today*. 2015. Vol.18, No.1. P.20-30

# Полевой транзистор на основе структуры h-BN/SL-WS<sub>2</sub>/h-BN



M.V. Iqbal et al. 2015 High-mobility and air-stable single-layer WS<sub>2</sub> field-effect transistors sandwiched between chemical vapor deposition-grown hexagonal BN films Sci Rep 5 10699

# Применение различных 2D-материалов для каналов полевых транзисторов



# 2D туннельные устройства

Транзистор на основе гетероструктуры Graphene–WS<sub>2</sub>

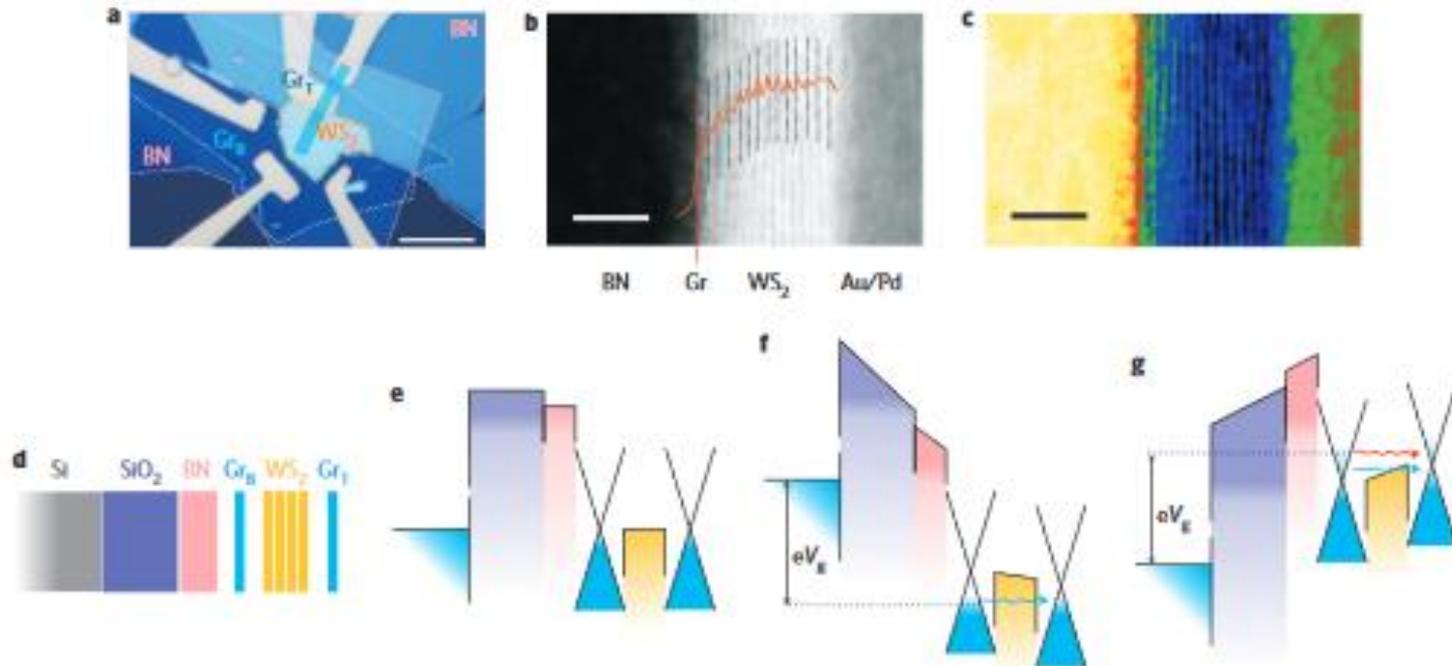
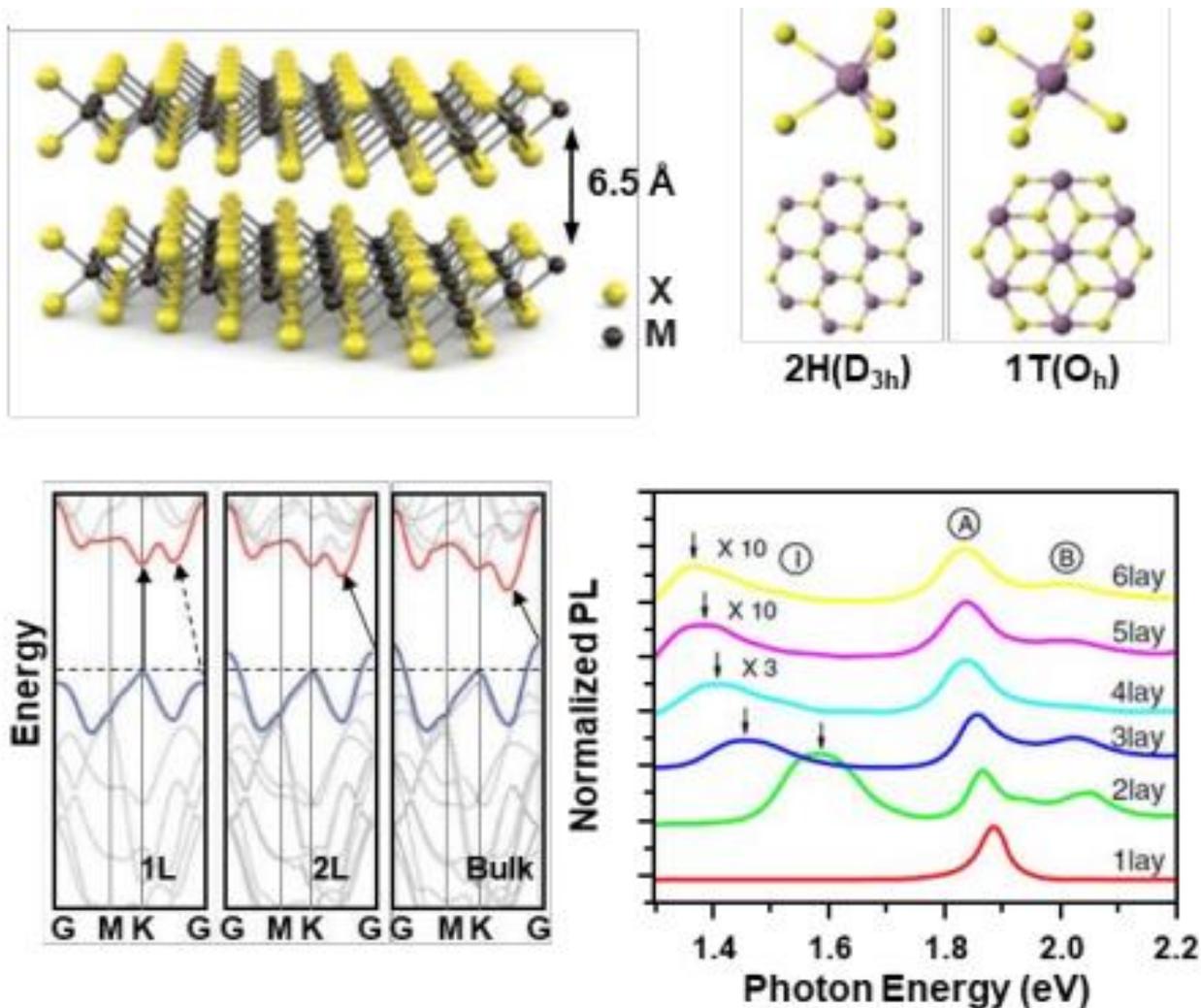


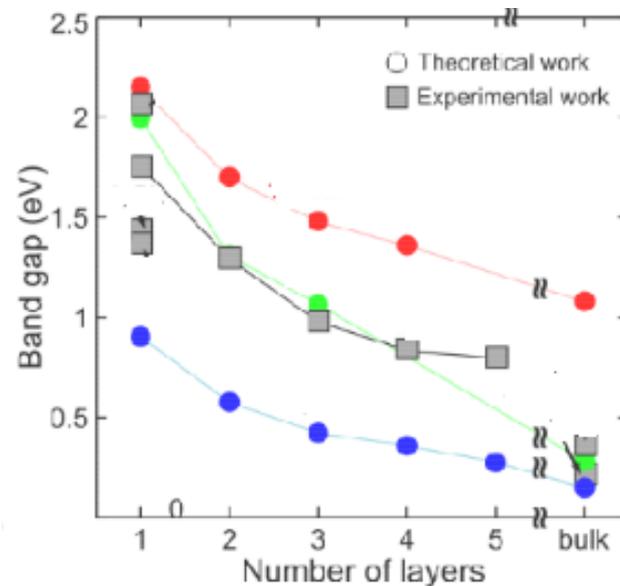
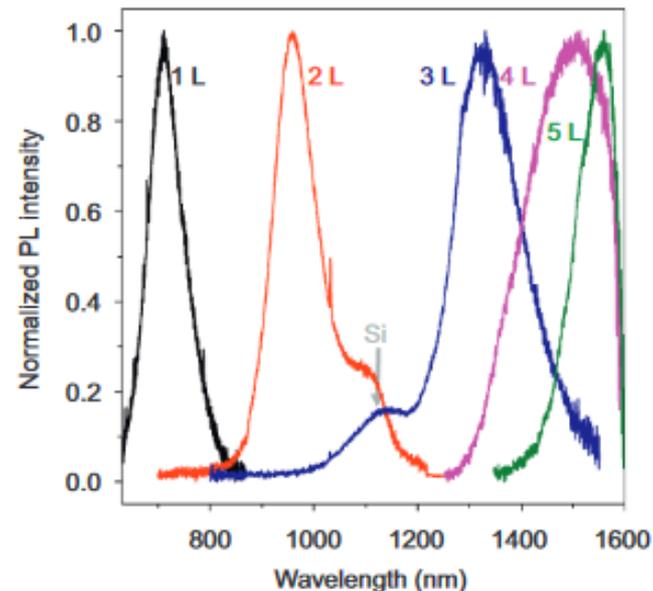
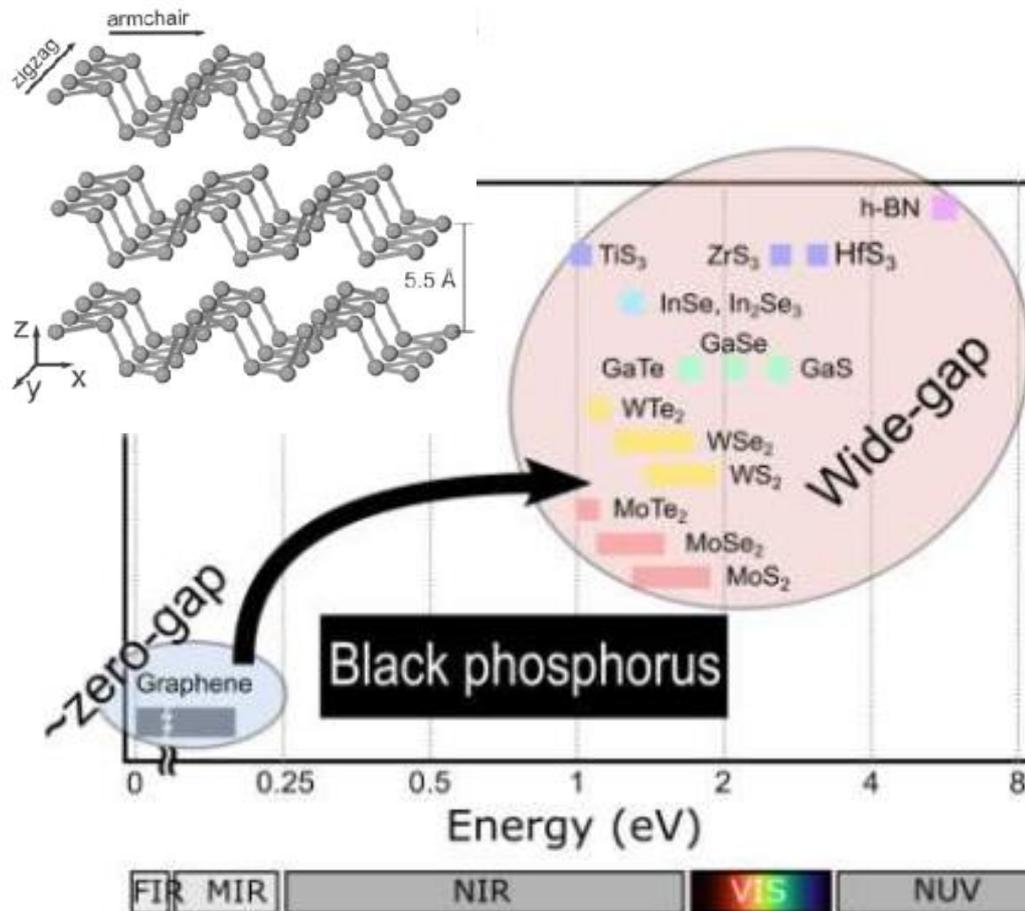
Схема вертикальной архитектуры транзистора

1. Зонная диаграмма, соответствующая состоянию  $V_g = 0$ ,  $V_b = 0$ .
2. Отрицательное  $V_g$  сдвигает уровень Ферми слоев графена вниз, приводя к увеличению потенциального барьера (OFF).
3. Приложение положительного  $V_g$  приводит к увеличению тока между верхним и нижним слоями графена за счет туннельной и термоионной составляющих.

# Структура и зависимость фотолюминесценции MoS<sub>2</sub> от числа слоев

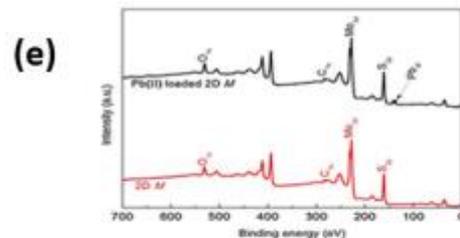
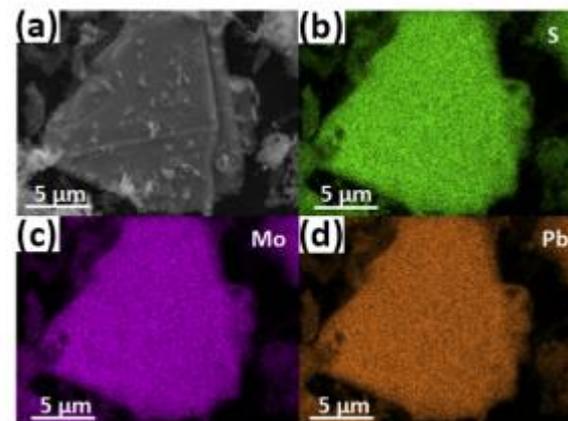
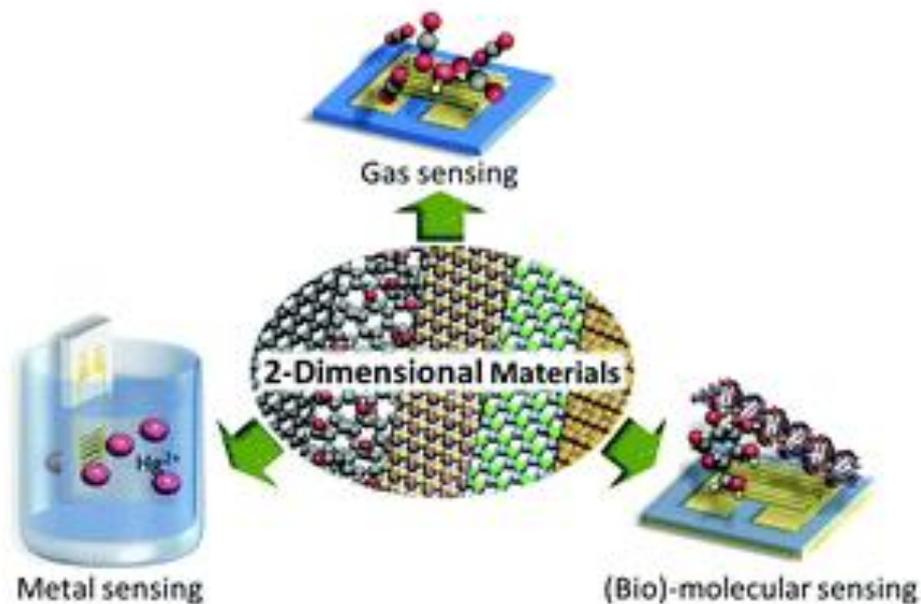


# Структура и зависимость фотолюминесценции ВР от числа слоев

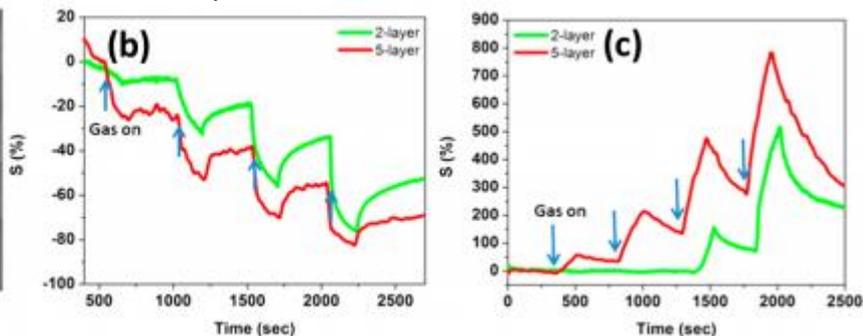
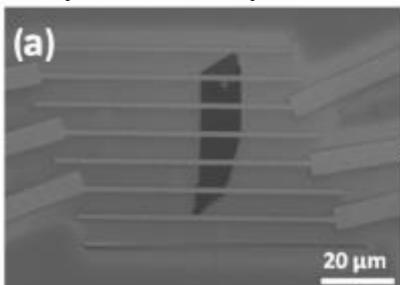


# 2D материалы для сенсорных устройств

Адсорбция Pb(II) на слое MoS<sub>2</sub>

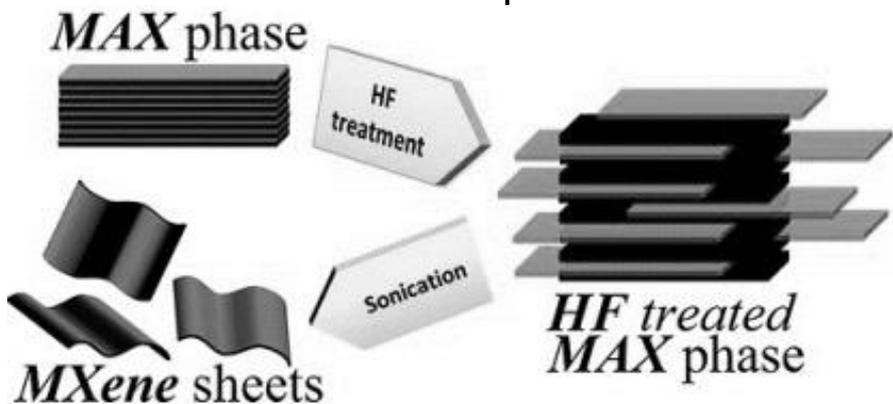


Транзистор на основе MoS<sub>2</sub>, отклик к NH<sub>3</sub> и NO<sub>2</sub>



# Максены

Схема получения максена (MX-фазы) из  
MAX-фазы



Сканирующая электронная микроскопия  
максена, полученного травлением в HF  
MAX-фазы  $Ti_3AlC_2$

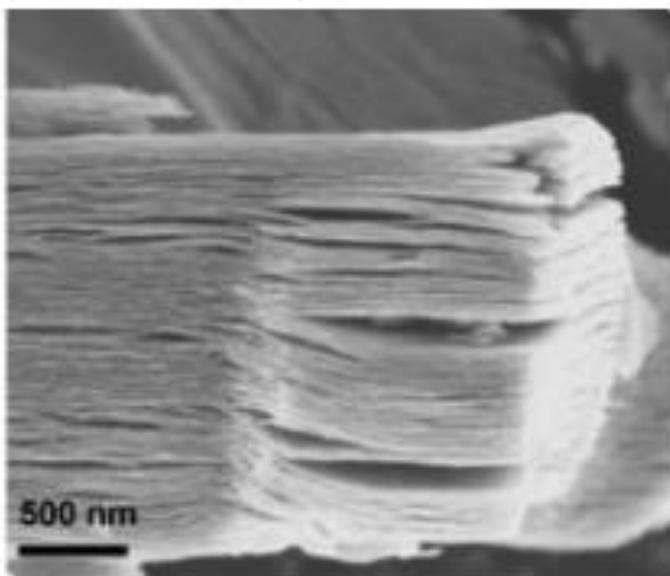
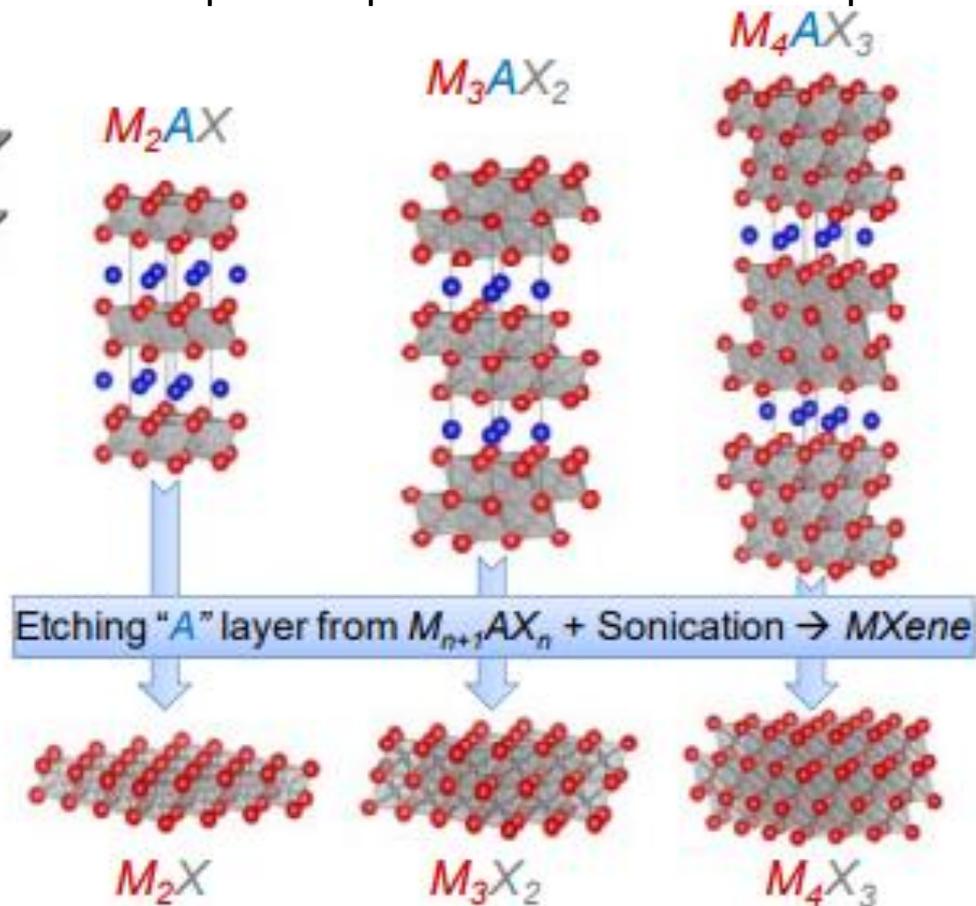
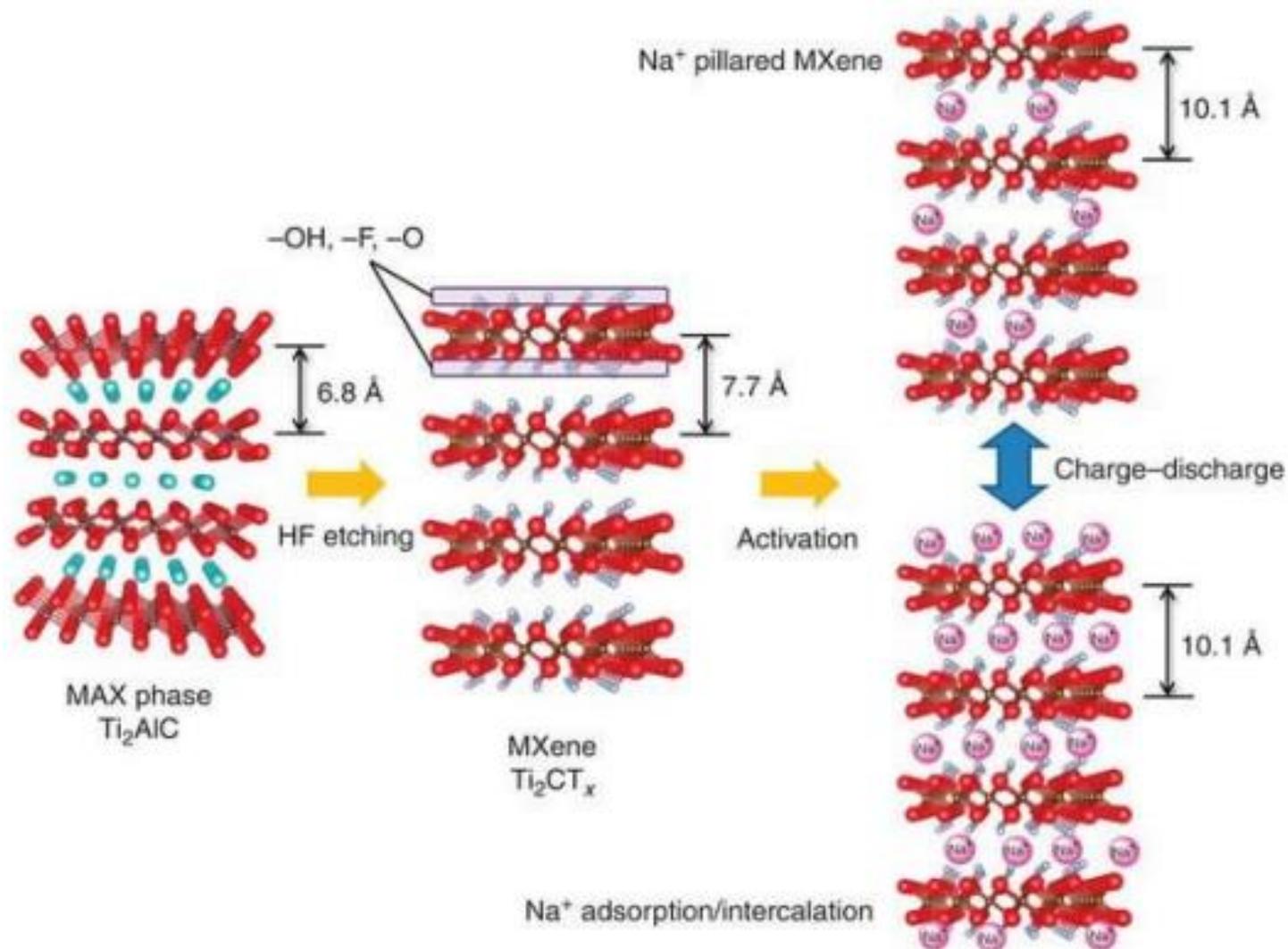


Схема строения различных MAX- и MX-фаз



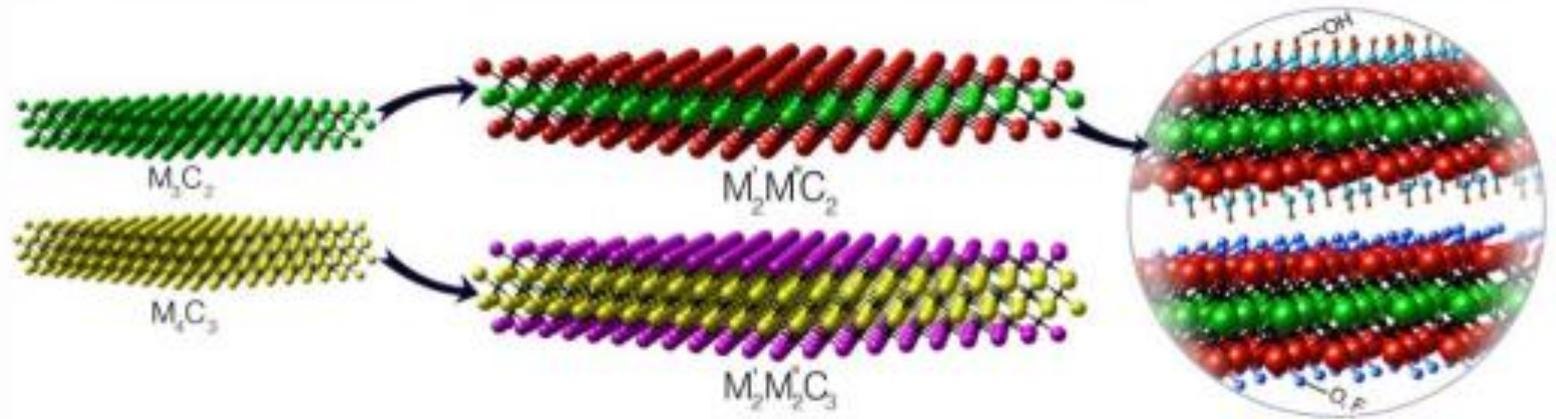
Наночастицы, наносистемы и их применение. Часть II.  
Углеродные и родственные слоистые материалы для  
современной наноэлектроники: Учеб. пособие / под ред. В. А.  
Мошникова, О. А. Александровой. Уфа: Аэтерна. – 2016

# Электрохимическая активация $Ti_2CT_x$ ионами $Na^+$



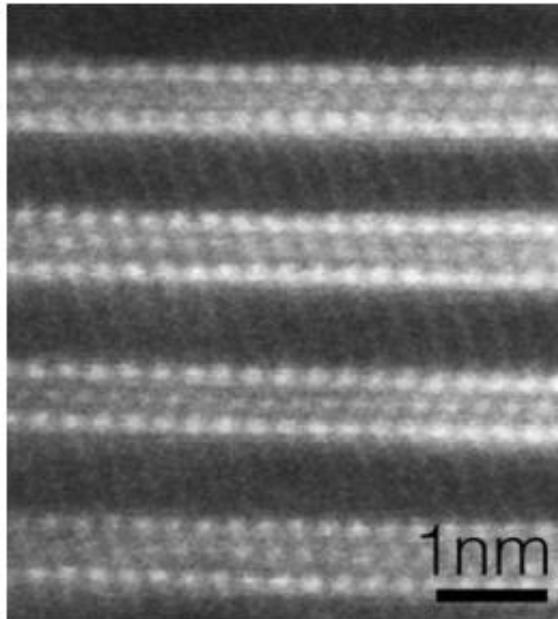
X. Wang et al. Pseudocapacitance of MXene nanosheets for high-power sodium-ion hybrid capacitors, Nature communications 6 (2015).

# Максены с двойным слоем атомов переходного металла



- а) структура исходного максена, б) структура максенов с двойным слоем, с) укрупненный фрагмент структуры с различной функционализацией поверхности [81]

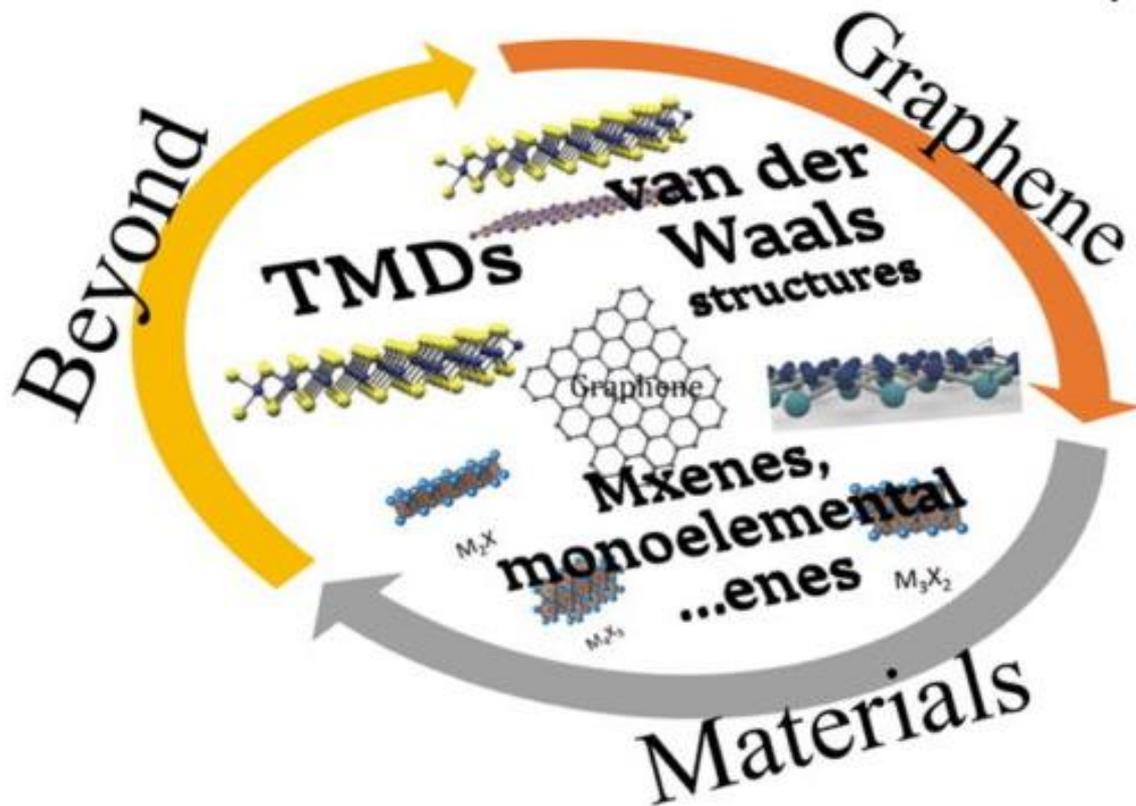
M. Naguib et al. Two Dimensional Nanocrystals Produced by Exfoliation of Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub>, Advanced Materials, 2011



Изображение просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения слоистой структуры двойного максена Mo<sub>2</sub>Ti<sub>2</sub>C<sub>3</sub>T<sub>x</sub>.

M. Ghidui et al. «Conductive two-dimensional titanium carbide clay with high volumetric capacitance». B: Nature (2014)

# Спасибо за внимание!



*ACS Nano*, 2015, 9 (12), pp 11509–11539