

Эпитаксиальные фториды как универсальная платформа для электроники More Moore и More than Moore на основе двумерных материалов



Илларионов Юрий Юрьевич

научный сотрудник ФТИ им. Иоффе РАН

А.Г. Банщиков, М.И. Векслер, С.М. Сутурин, В.В. Федоров, Н.С. Соколов
T. Knobloch, D.K. Polyushkin, S. Wachter, T. Mueller, T. Grasser

Содержание

- **Введение: More Moore, More than Moore и 2D**
- Причины интереса к фторидам и первые результаты
- Приборы на основе структур $\text{CaF}_2/\text{MoS}_2$ и $\text{CaF}_2/\text{графен}$
- Перспективы дальнейшего развития 2D электроники с фторидами в качестве универсальной платформы
- Заключение

More Moore и More than Moore

More Moore (~70%): полевые транзисторы, устройства памяти, ...



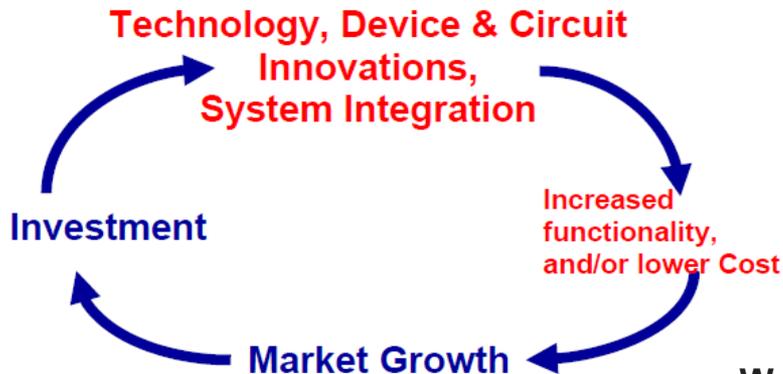
Миниатюризация:

Снижение стоимости

+

повышение производительности

More than Moore (~30%): фотодетекторы, сенсоры, ...



Новые материалы и гетероструктуры:

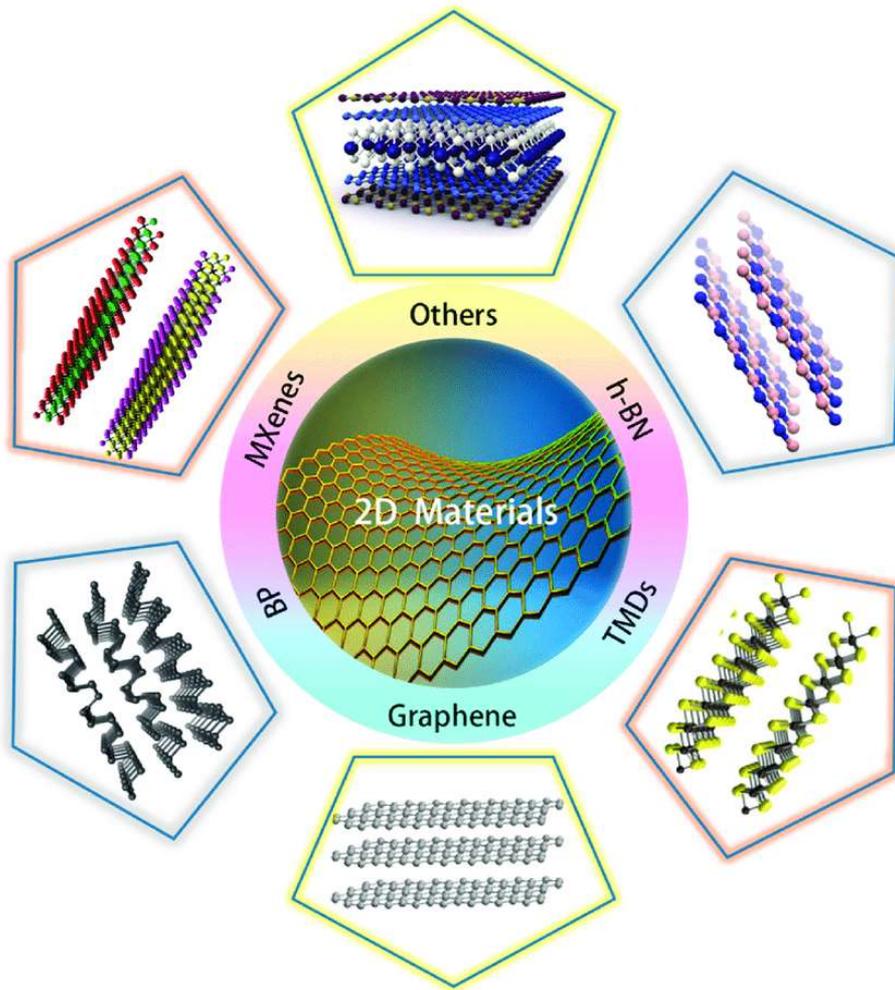
Снижение стоимости

+

повышение производительности

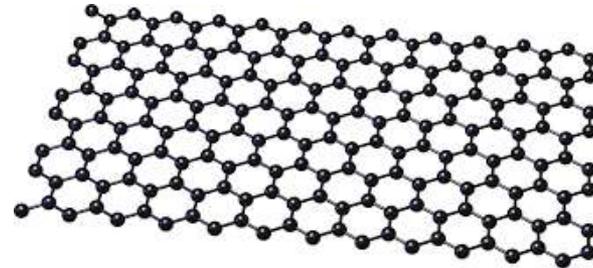
W. Arden et al, More-than-Moore white paper, *Version, 2010*

Огромный выбор двумерных материалов

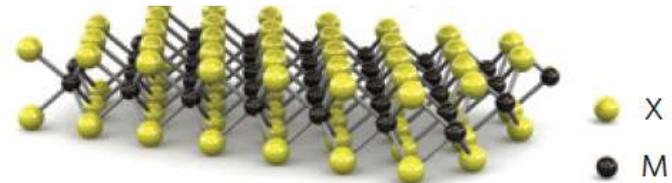


Z. Dong et al, *Molecules*, 2019

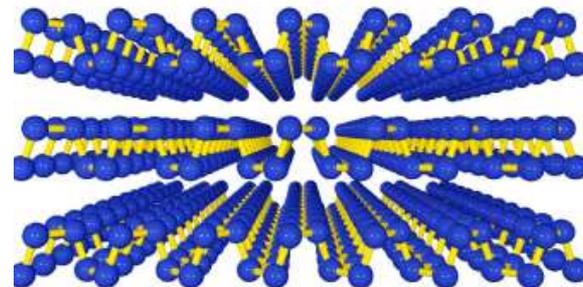
Графен (с 2004)



MoS_2 , MoSe_2 , WS_2 , ... (с 2011)



Черный фосфор (с 2014)

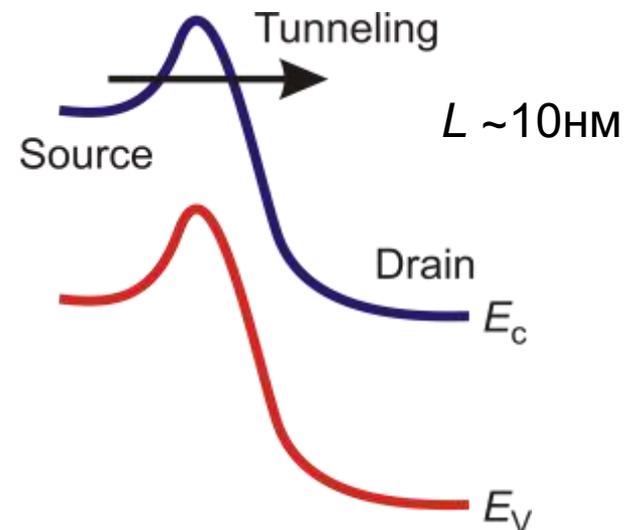
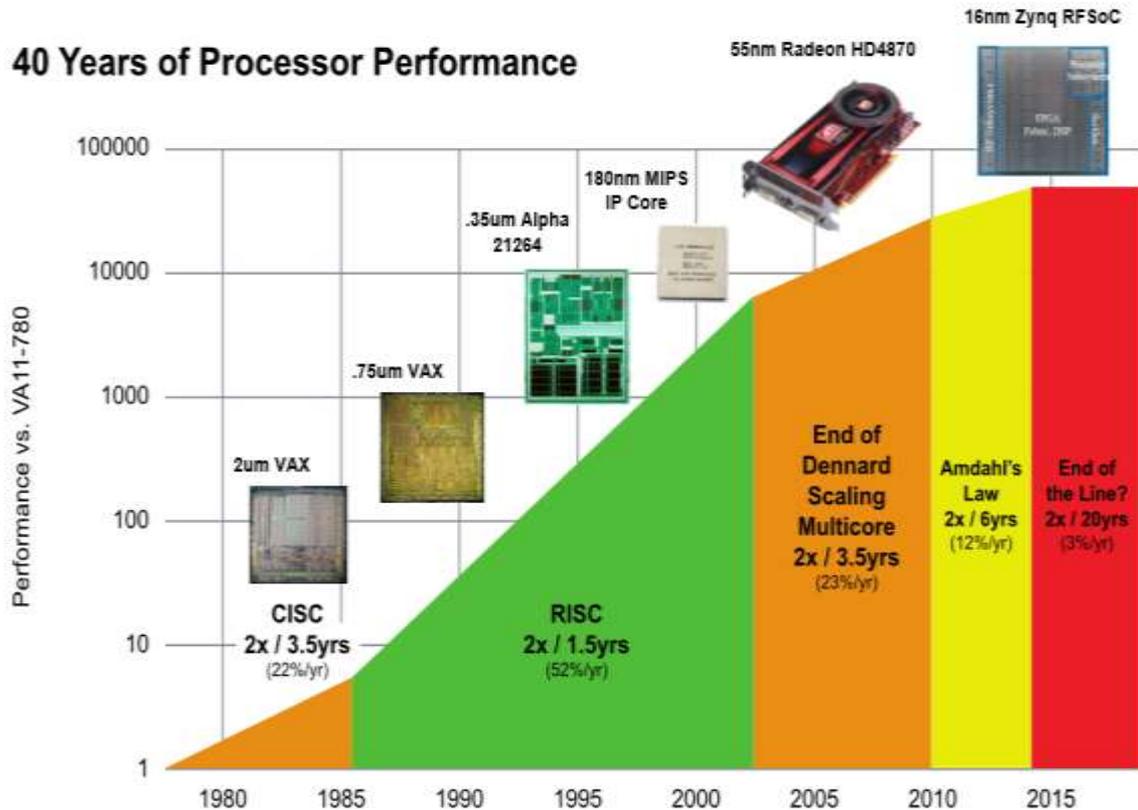


Широкие возможности применения в электронике нового поколения

Двумерные материалы для More Moore

Закон Мура: Число транзисторов на микросхемах удваивается каждые 1.5 года

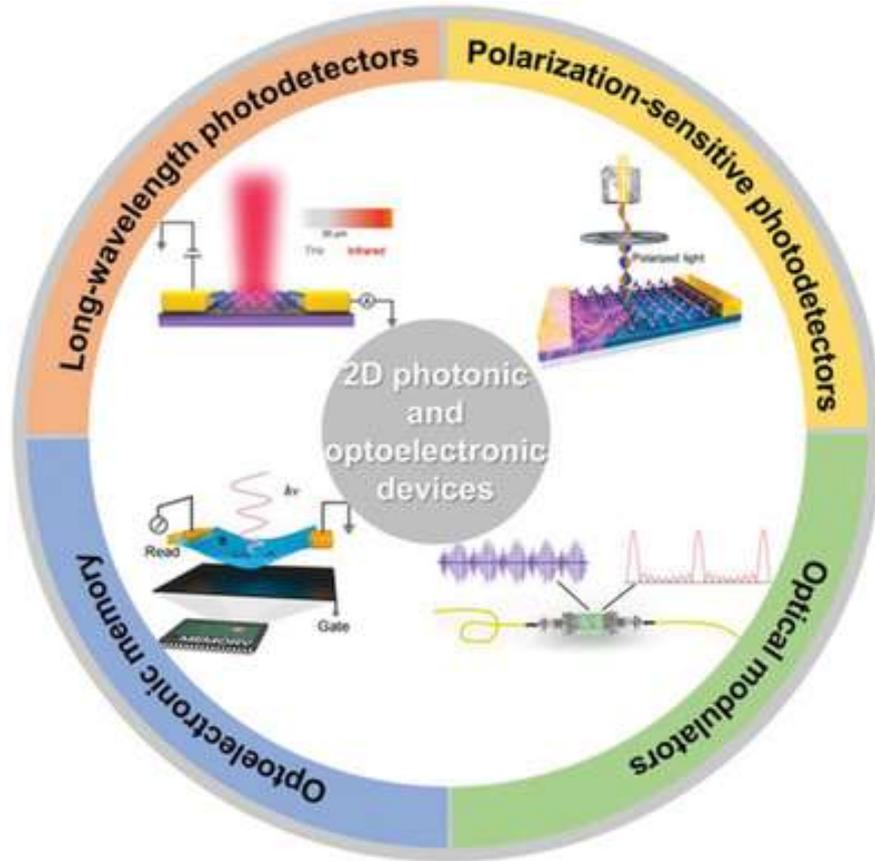
40 Years of Processor Performance



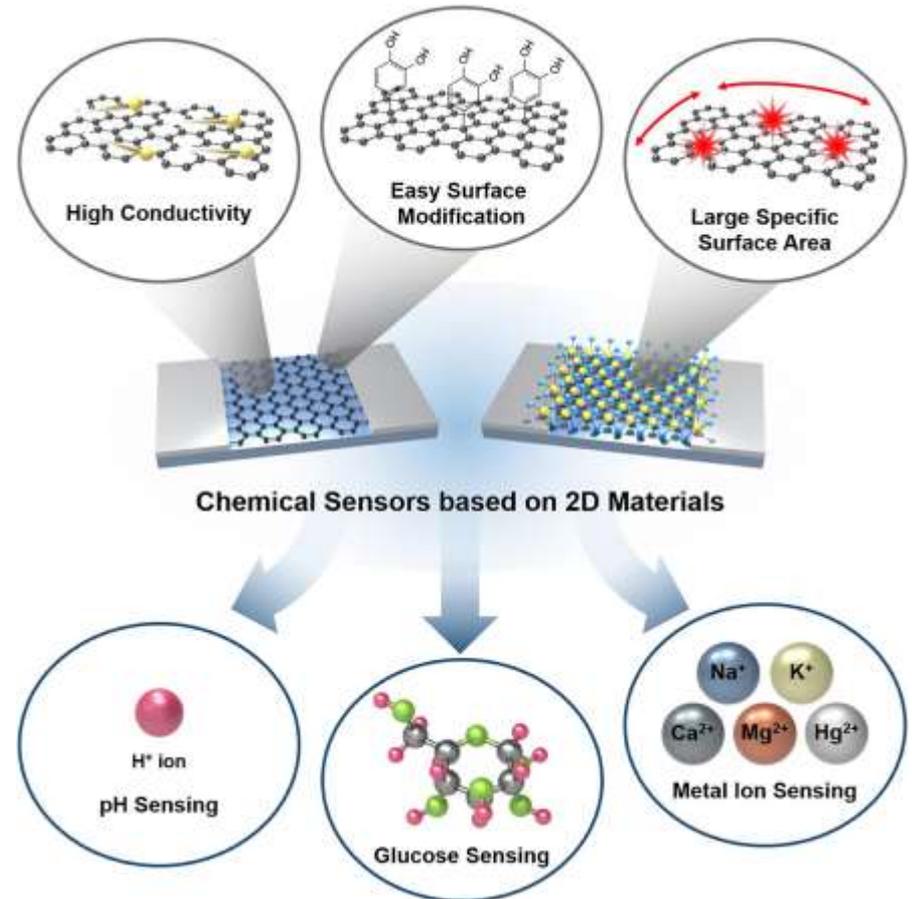
Слоистые 2D материалы позволят продолжить действие закона Мура

Двумерные материалы для More than Moore

Устройства оптоэлектроники и сенсоры



X. Wang *et al*, Adv. Opt. Mater. 2018



C.W. Lee *et al*, Front. in Chem. 2019

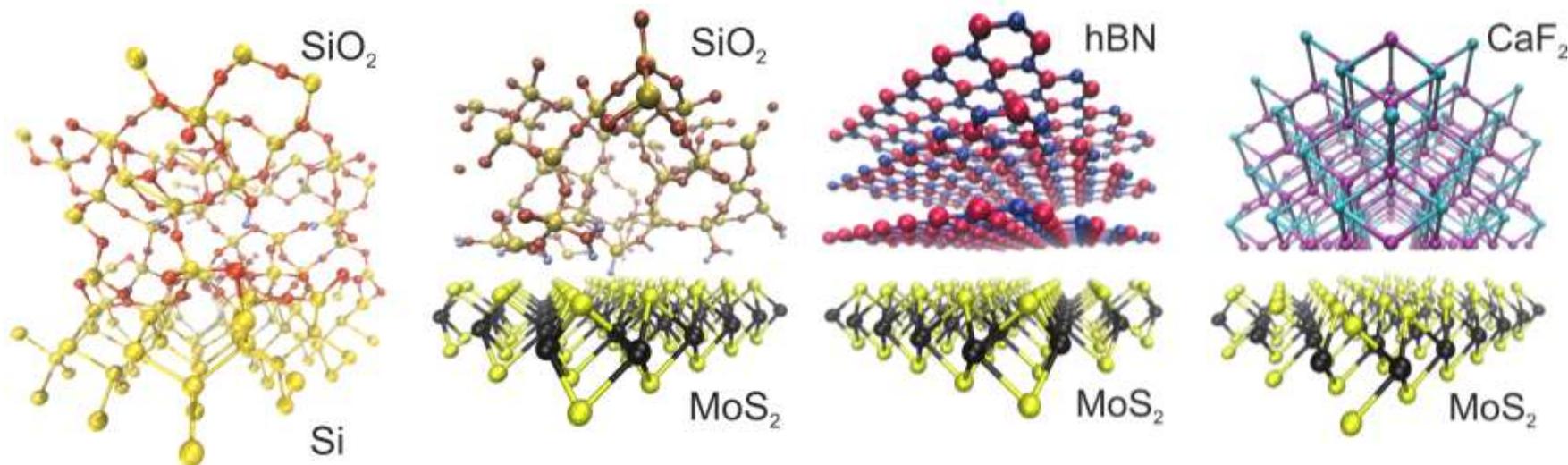
2D материалы и гетероструктуры на их основе имеют ряд новых свойств

Содержание

- Введение: More Moore, More than Moore и 2D
- **Причины интереса к фторидам и первые результаты**
- Приборы на основе структур $\text{CaF}_2/\text{MoS}_2$ и $\text{CaF}_2/\text{графен}$
- Перспективы дальнейшего развития 2D электроники с фторидами в качестве универсальной платформы
- Заключение

Главная проблема 2D: недостаток диэлектриков

Основные требования: качественный интерфейс и низкие утечки



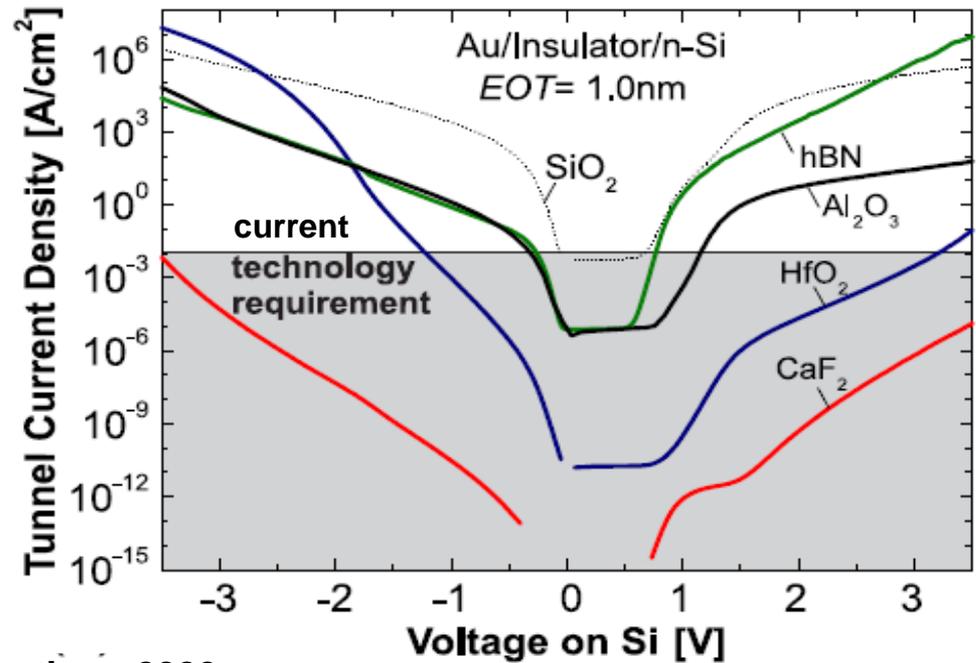
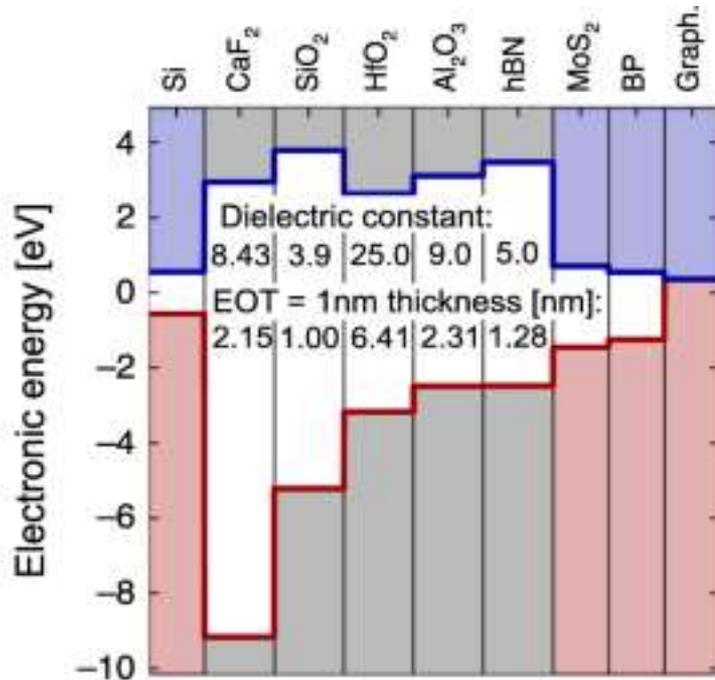
Yu.Yu. Illarionov *et al*, Nature Communications 2020

- Тонкие слои high-k оксидов являются аморфными → плохой интерфейс
- hBN имеет средние диэлектрические свойства → высокие утечки при малой толщине

CaF₂: **квази-вандерваальсов интерфейс с 2D материалами** и **низкие туннельные утечки при эквивалентной толщине менее 1нм**

Главная проблема 2D: недостаток диэлектриков

Основные требования: качественный интерфейс и низкие утечки



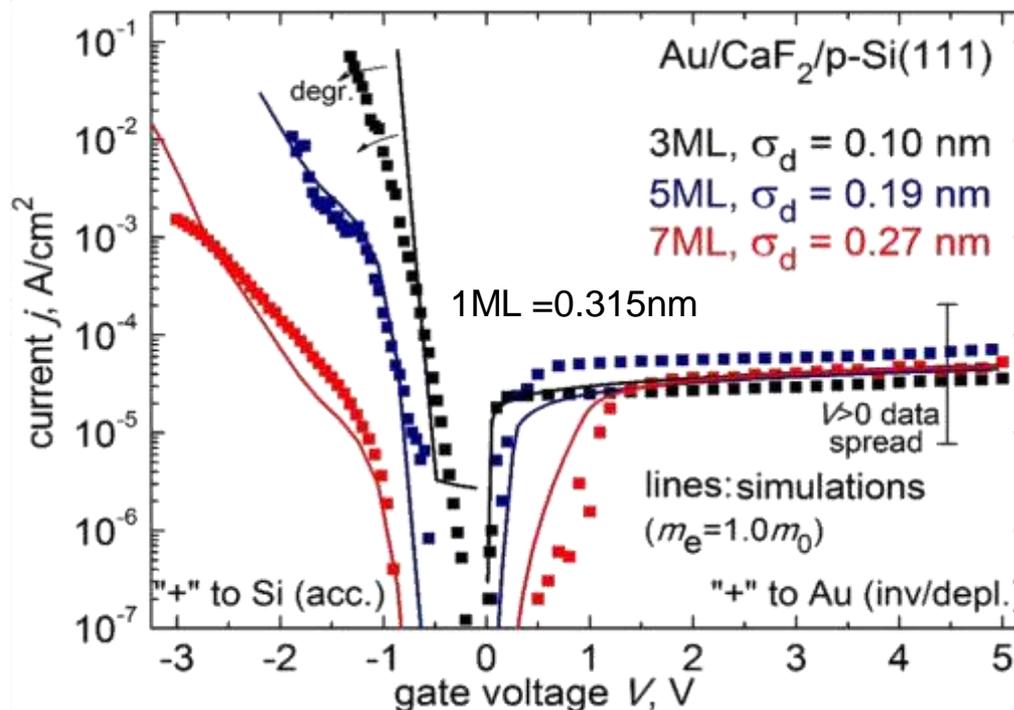
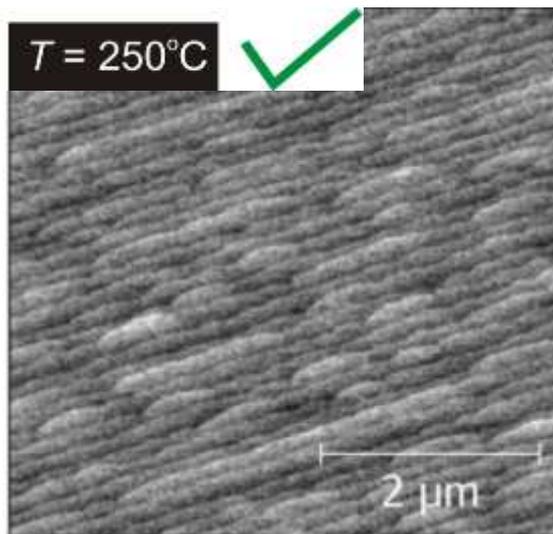
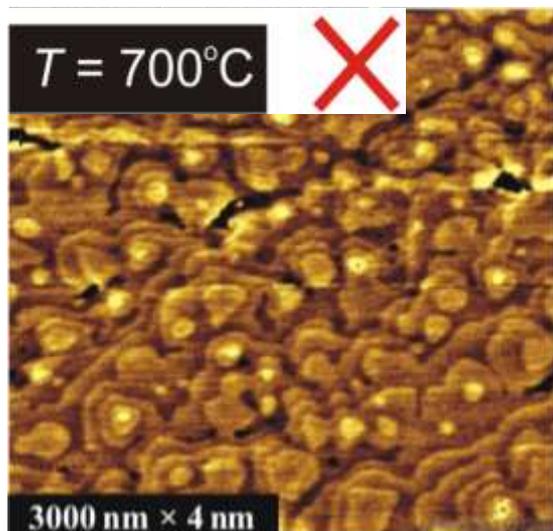
Yu.Yu. Illarionov *et al*, Nature Communications 2020

- Тонкие слои high-k оксидов являются аморфными → плохой интерфейс
- hBN имеет средние диэлектрические свойства → высокие утечки при малой толщине

CaF₂: квази-вандерваальсов интерфейс с 2D материалами и низкие туннельные утечки при эквивалентной толщине менее 1 нм

Эпитаксия тонких однородных пленок CaF_2 в ФТИ

Пленки CaF_2 толщиной 1-2 нм для приборных применений



Yu.Yu. Illarionov *et al*, Current Applied Physics, 2015

Yu.Yu. Illarionov *et al*, Journal of Applied Physics, 2014

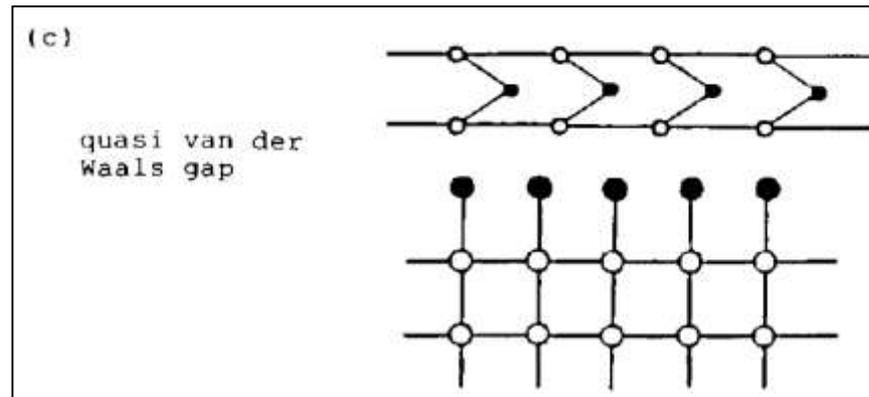
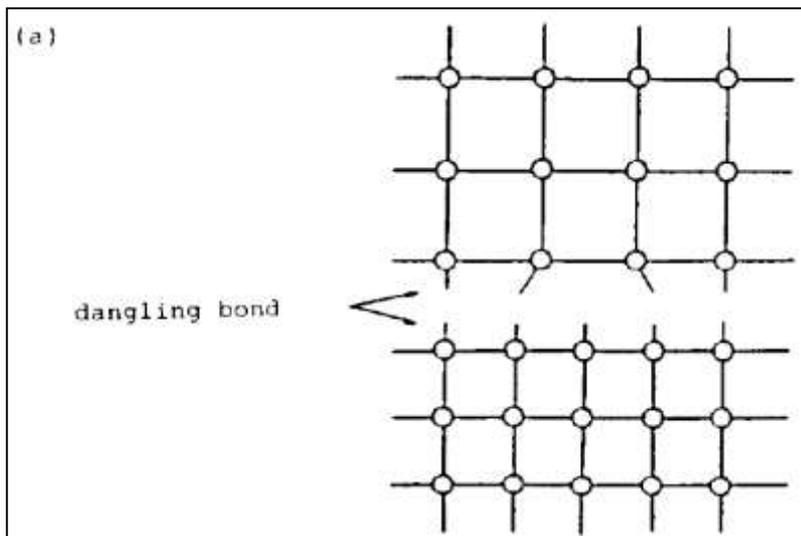
M.I. Vexler *et al*, Solid-State Electronics, 2011

M.I. Vexler *et al*, Semicond. Sci. and Technol., 2010

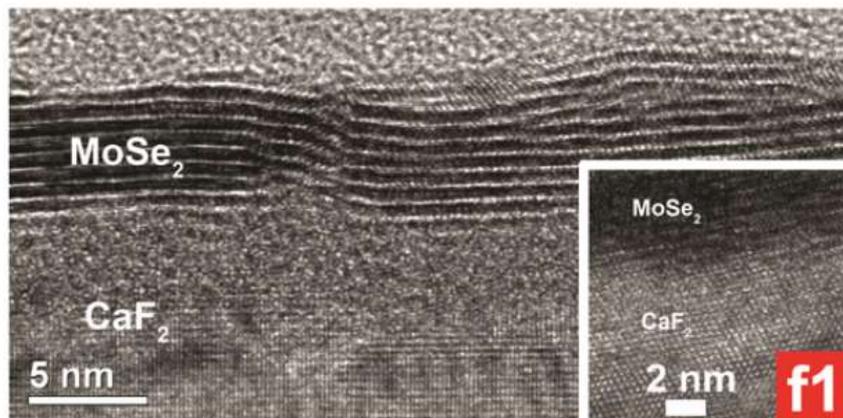
M.I. Vexler *et al*, Journal of Applied Physics, 2009

S.M. Suturin *et al*, Semiconductors, 2008

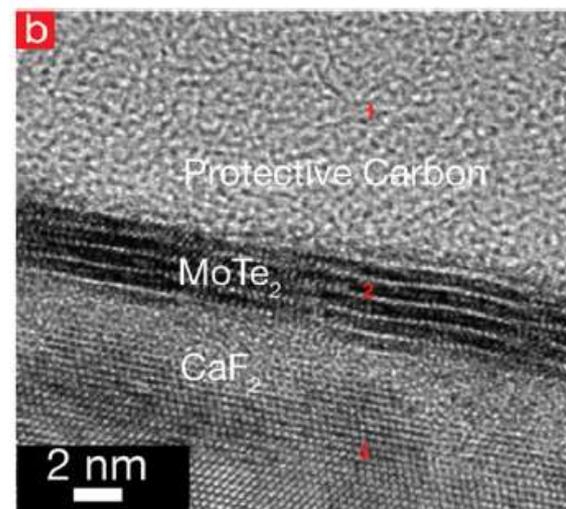
Возможности роста 2D материалов на CaF_2



A. Koma *et al*, *Appl. Surf. Sci.* 1989



S. Vishwanath *et al*, *2D Mater.* 2015



S. Vishwanath *et al*, *J. Cryst. Growth* 2018

На поверхности $\text{CaF}_2(111)$ возможна эпитаксия нескольких слоев MoSe_2 и MoTe_2

Содержание

- Введение: More Moore, More than Moore и 2D
- Причины интереса к фторидам и первые результаты
- **Приборы на основе структур $\text{CaF}_2/\text{MoS}_2$ и $\text{CaF}_2/\text{графен}$**
- Перспективы дальнейшего развития 2D электроники с фторидами в качестве универсальной платформы
- Заключение

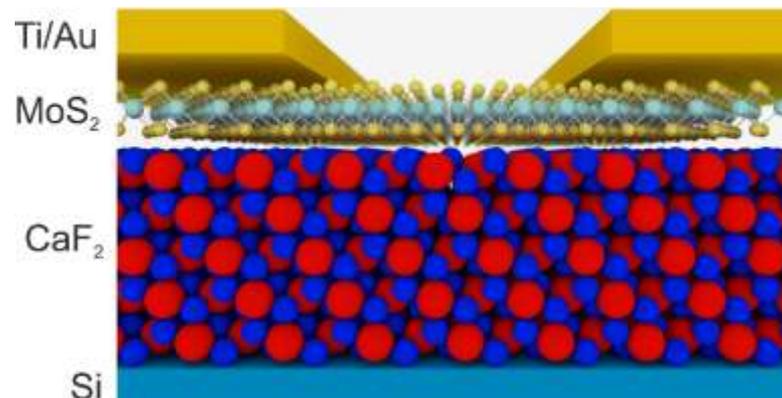
Si/CaF₂ как платформа для ПТ с каналом из MoS₂

ARTICLES
<https://doi.org/10.1038/s41928-019-0256-8>

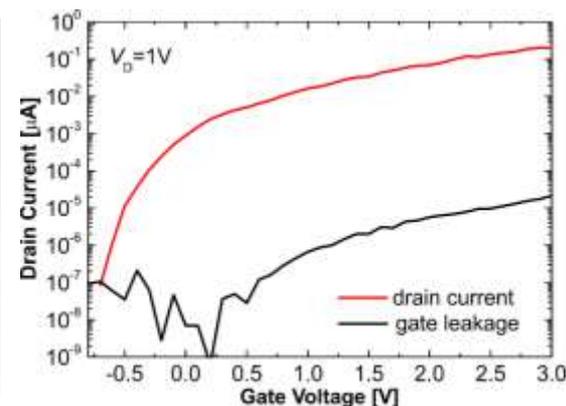
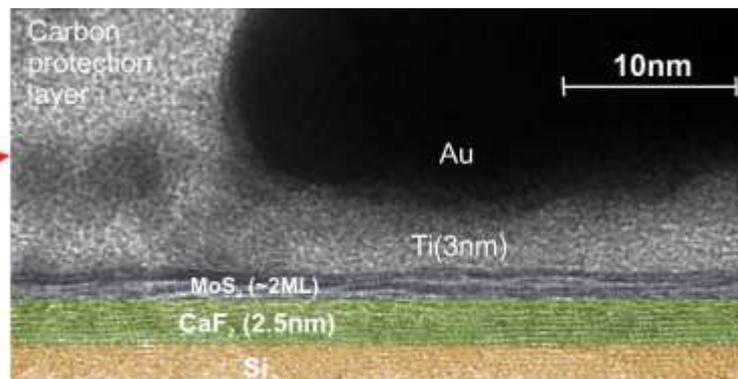
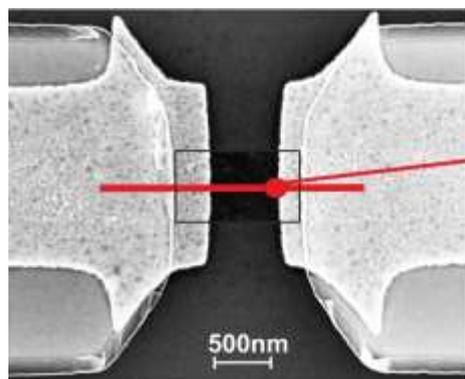
nature
electronics

Ultrathin calcium fluoride insulators for two-dimensional field-effect transistors

Yury Yu. Illarionov^{1,2*}, Alexander G. Banskchikov², Dmitry K. Polyushkin³, Stefan Wachter³, Theresia Knobloch¹, Mischa Thesberg¹, Lukas Mennel³, Matthias Paur³, Michael Stöger-Pollach⁴, Andreas Steiger-Thirsfeld⁴, Mikhail I. Vexler², Michael Waltl¹, Nikolai S. Sokolov², Thomas Mueller³ and Tibor Grasser^{1*}



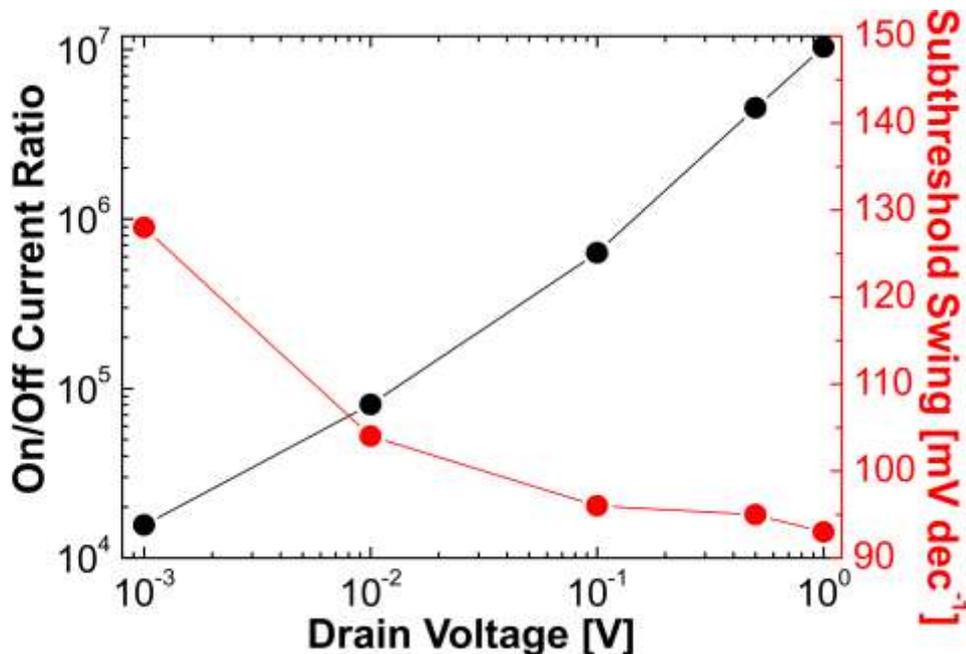
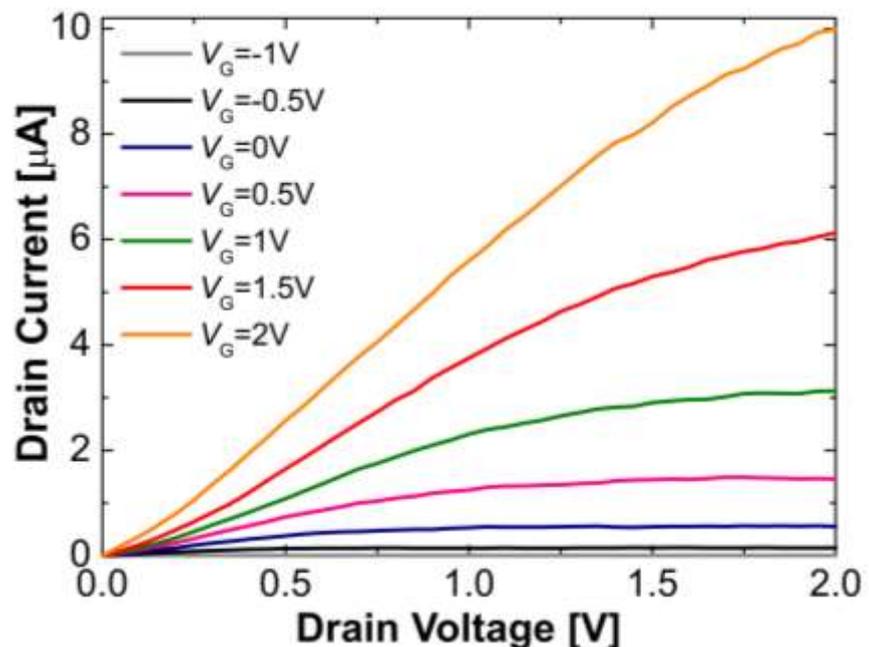
“Calcium fluoride could provide *ultra-scaled dielectric layers* for the development of *next-generation 2D nanoelectronics*.” (Illarionov et al, Nature Electronics 2019)



Yu.Yu. Illarionov et al, Nature Electronics 2019; 2D Materials 2019; Nature Communications 2020

Длинноканальные ПТ с MoS_2 и 2нм CaF_2

Основные характеристики

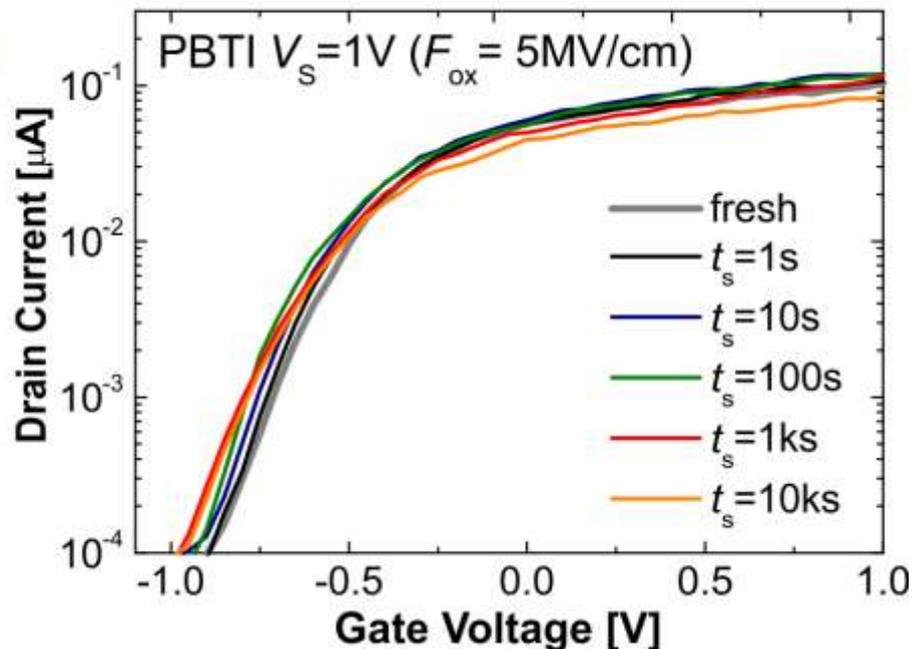
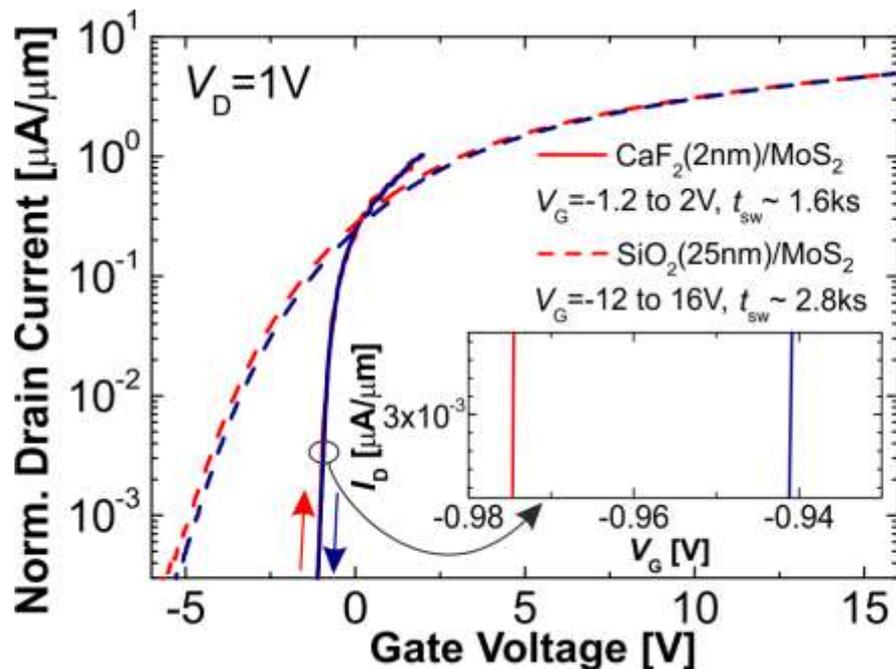


Yu.Yu. Illarionov *et al*, Nature Electronics 2019

- На одном чипе было изготовлено несколько тысяч транзисторов
- Для лучших приборов крутизна составляет до 90 мВ/дек при соотношении токов включения/выключения до 10^7

Длинноканальные ПТ с MoS₂ и 2нм CaF₂

Надежность при длительной работе

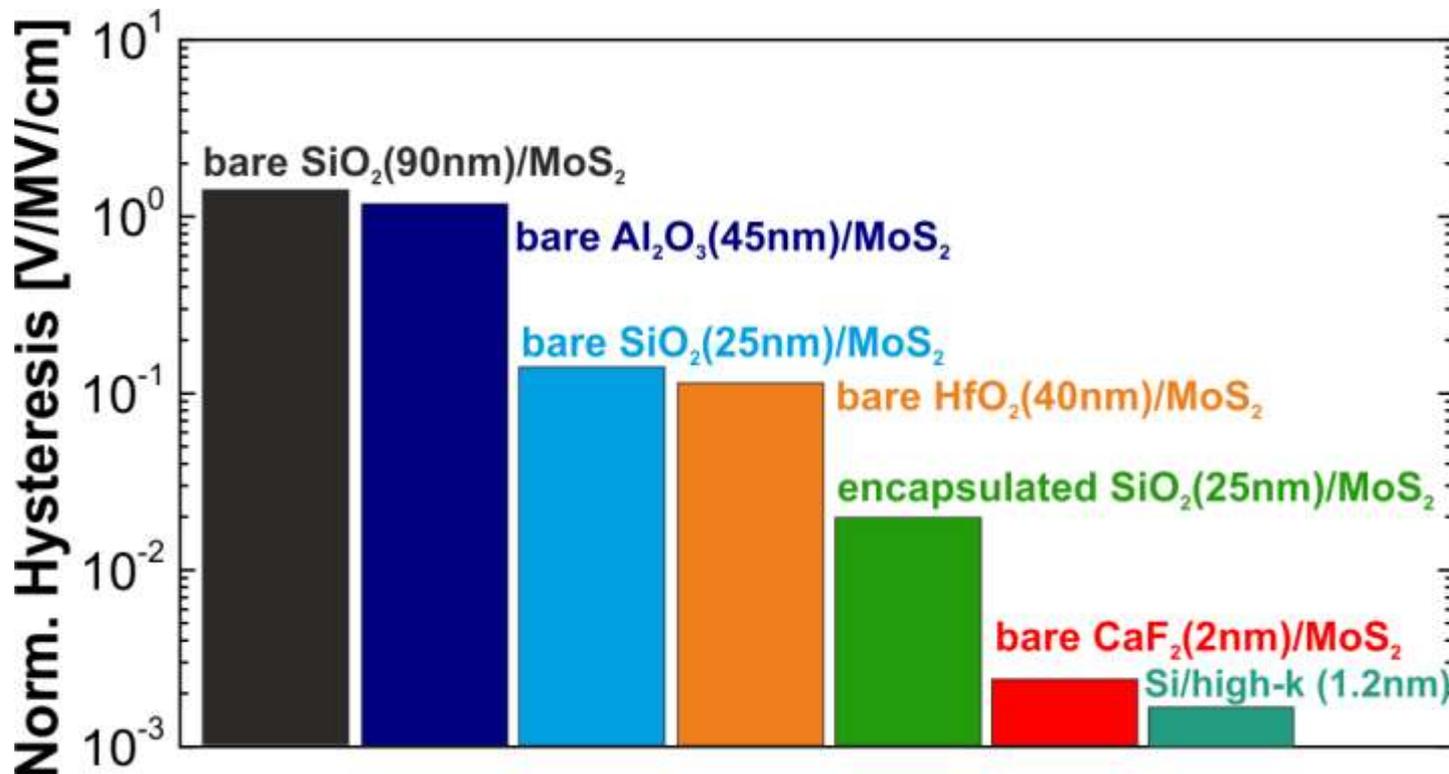


Yu.Yu. Illarionov *et al*, Nature Electronics, 2019; 2D Materials, 2019

- Показана стабильность работы транзисторов с CaF₂
- Возможно применение структур CaF₂/MoS₂ в сенсорах и фотодетекторах

Длинноканальные ПТ с MoS_2 и 2нм CaF_2

Сравнение с другими приборами

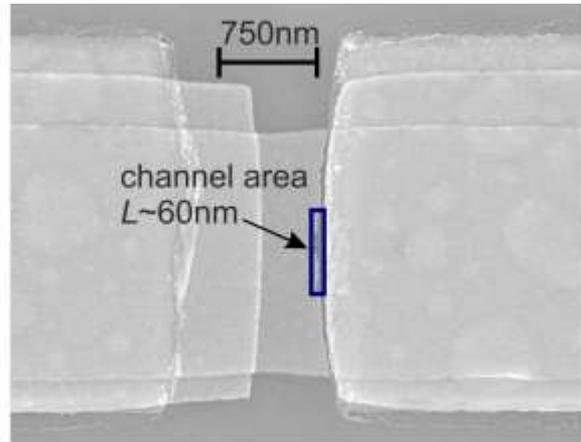


Yu.Yu. Illarionov *et al*, Nature Electronics, 2019; 2D Materials, 2019

- Надежность транзисторов $\text{CaF}_2/\text{MoS}_2$ существенно лучше по сравнению с аналогичными приборами на основе оксидов

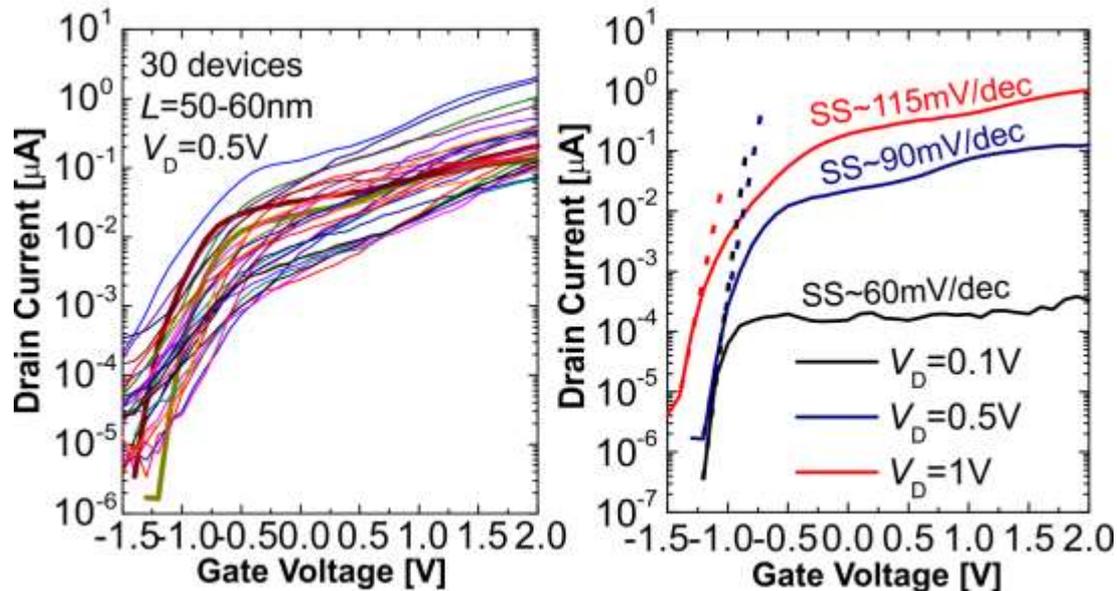
Короткоканальные ПТ с MoS_2 и 2нм CaF_2

Первые 2D транзисторы с 2нм CaF_2 и наноразмерными каналами

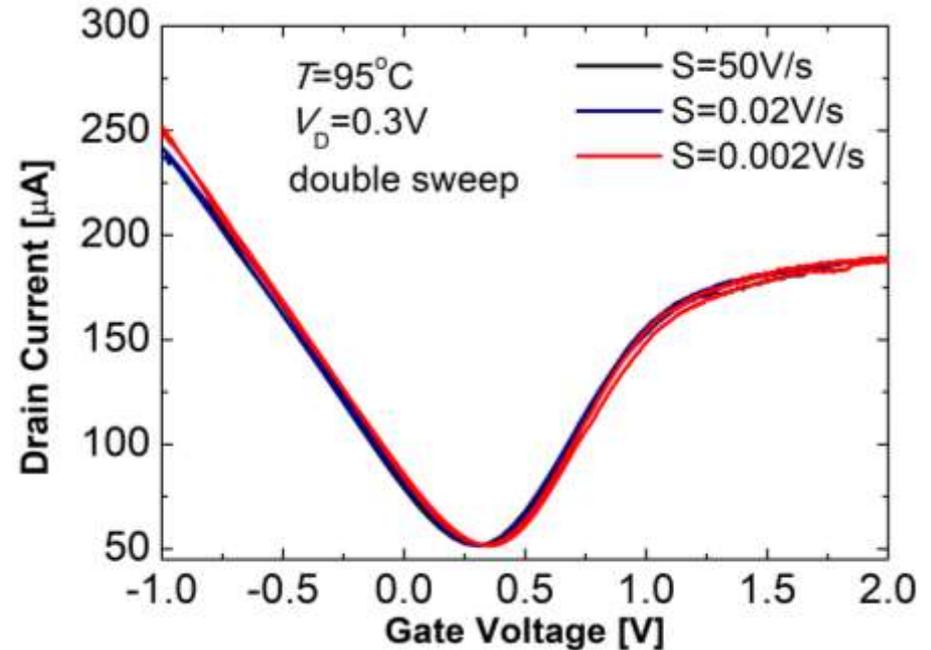
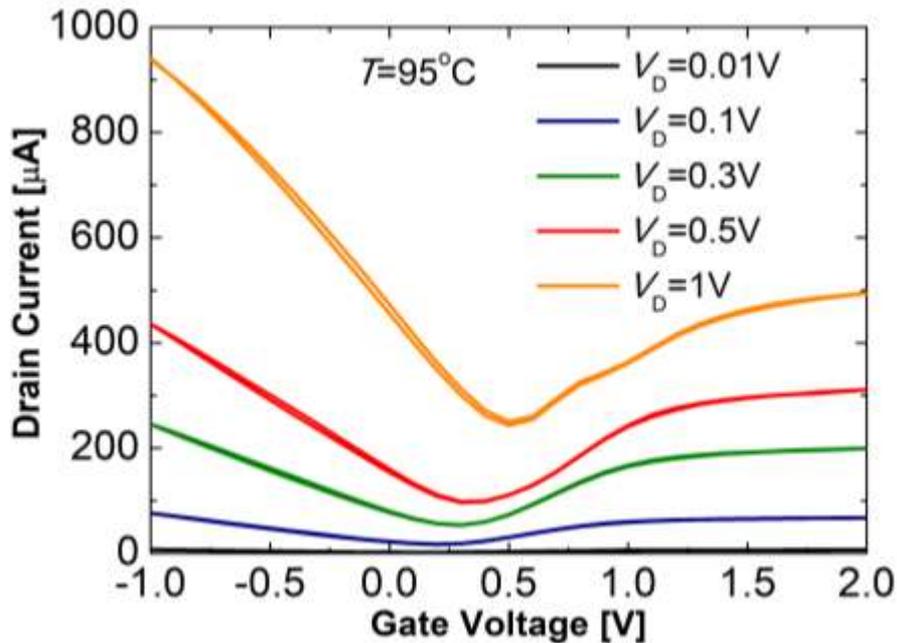
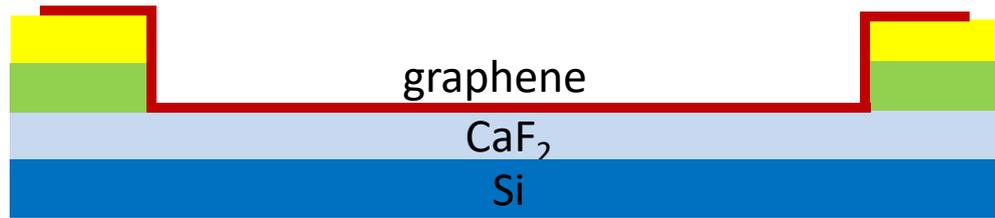


- Структуры $\text{CaF}_2/\text{MoS}_2$
- $L=50\text{-}60\text{nm}$
- SS до 60мВ/дек

Yu.Yu. Illarionov *et al*, *IEEE DRC 2020*



Первый шаг к More than Moore: графен на CaF_2



- Хорошие приборные характеристики
- Стабильность при высоких температурах

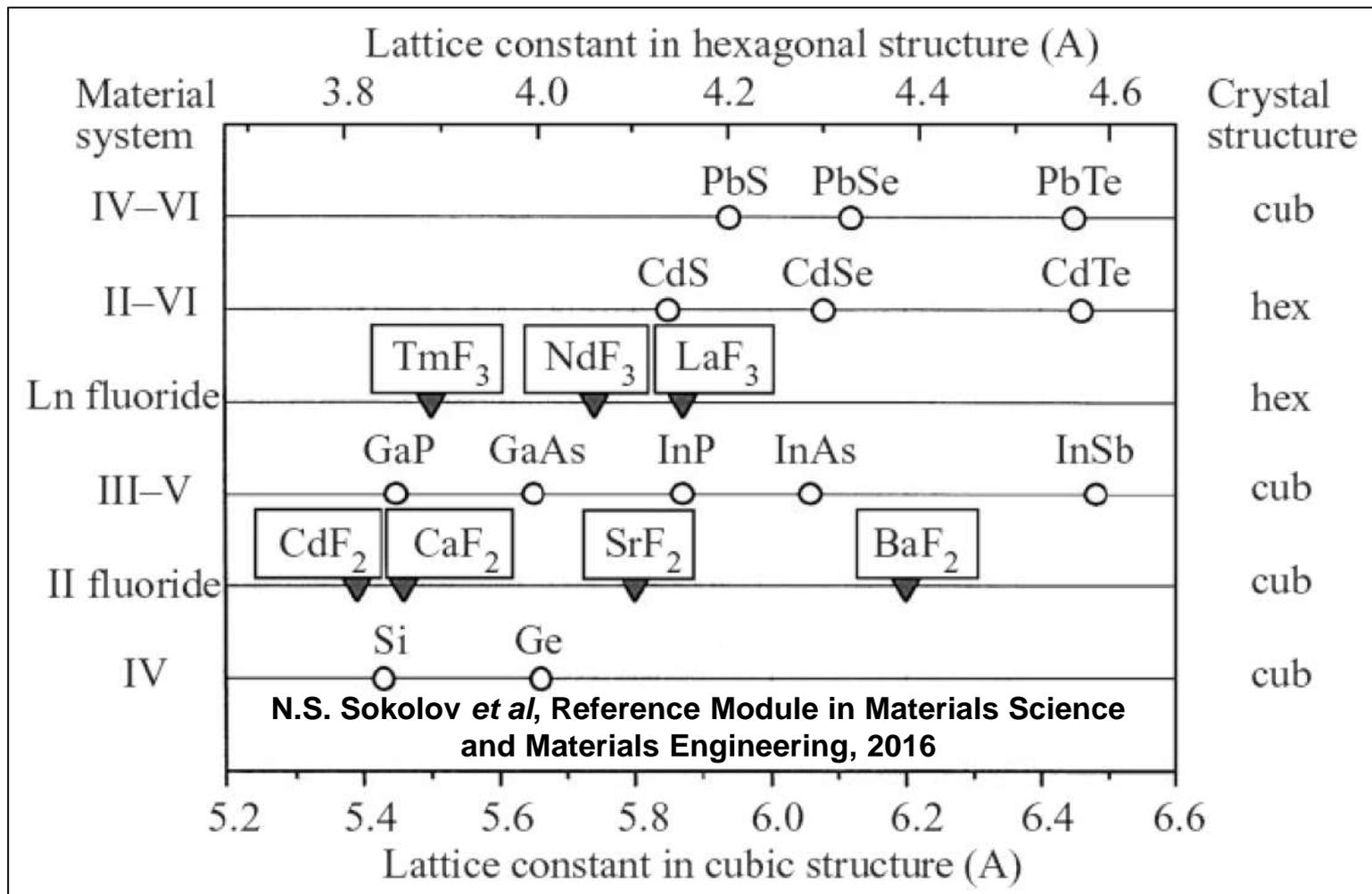
Сенсоры Холла, фотодетекторы, ...

Гетероструктуры Si/CaF_2 являются универсальной платформой для 2D электроники

Содержание

- Введение: More Moore, More than Moore и 2D
- Причины интереса к фторидам и первые результаты
- Приборы на основе структур $\text{CaF}_2/\text{MoS}_2$ и $\text{CaF}_2/\text{графен}$
- **Перспективы дальнейшего развития 2D электроники с фторидами в качестве универсальной платформы**
- Заключение

Исследования фторидов помимо CaF_2

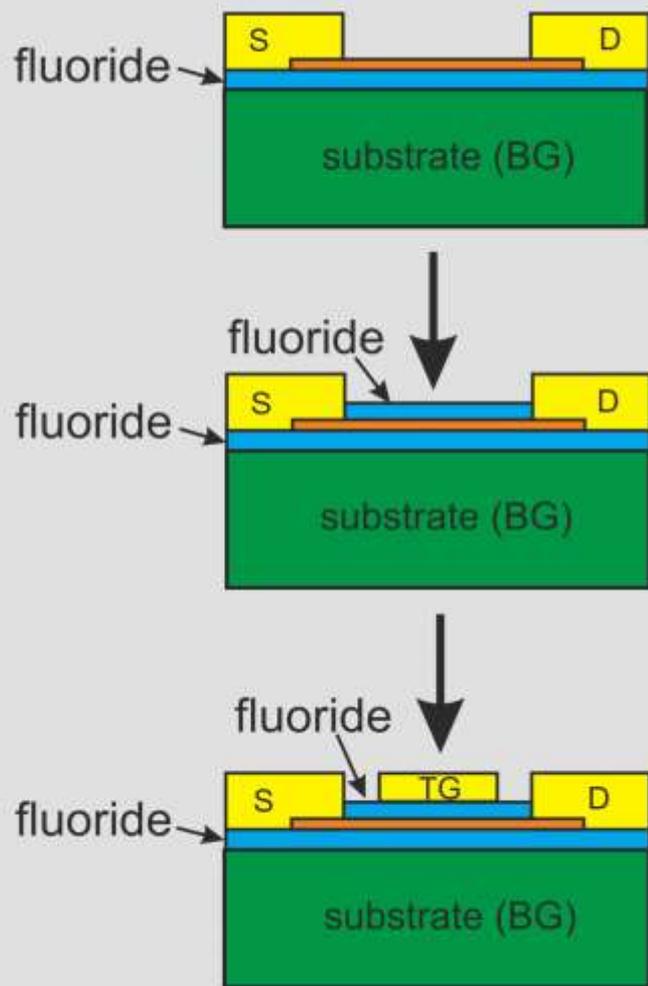


- Возможен подбор оптимальных подложек для роста других фторидов

Как и графен, CaF_2 - только первый материал...

ПТ с верхним затвором: рост фторидов на 2D

Основной процесс: эпитаксия гетероструктур фторид/2D/фторид



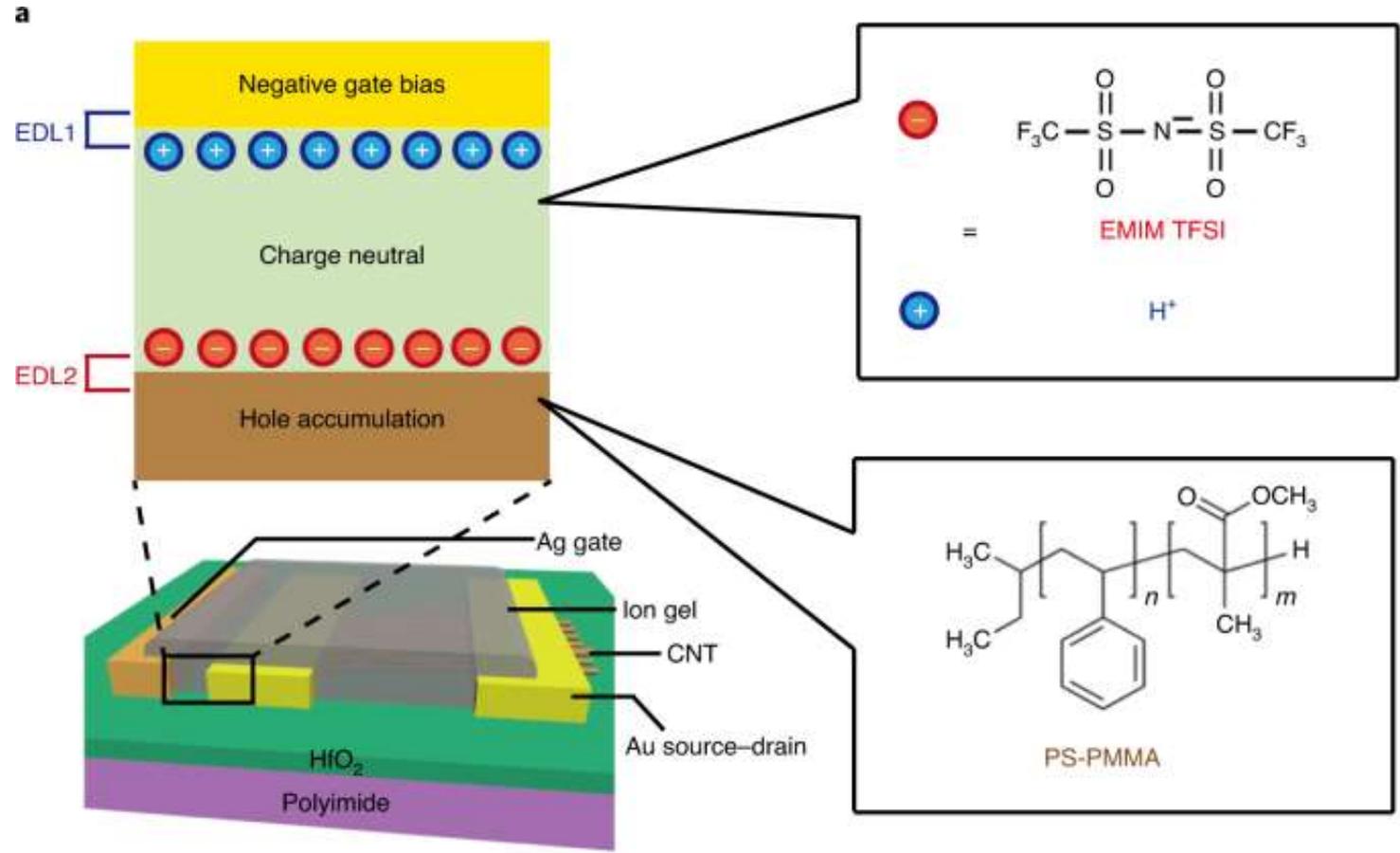
ПТ с нижним затвором

ПТ с покрытым каналом

ПТ с верхним затвором

ПТ с верхним затвором: использование ионных гелей

ПТ с углеродными нанотрубками и ионным гелем под верхним затвором

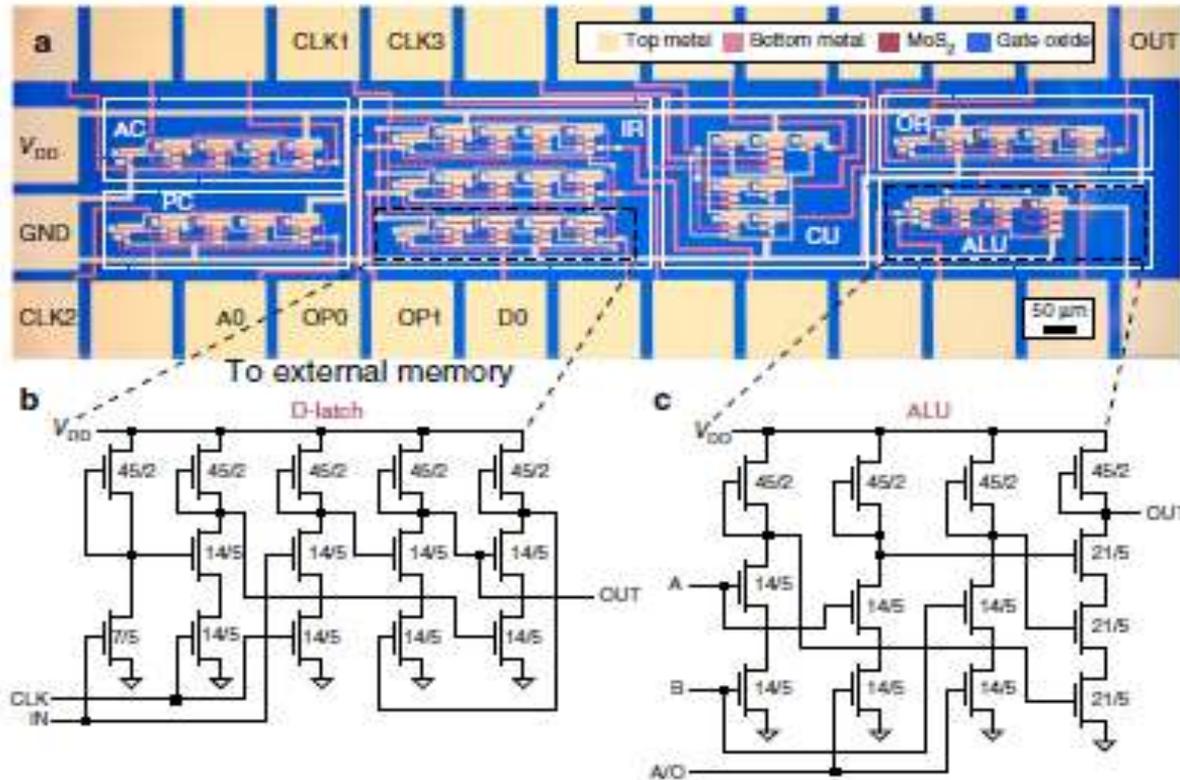


M. Zhu *et al*, Nature Electronics 2020

Может быть альтернативным решением для верхнего затвора в ПТ с $\text{CaF}_2/2\text{D}$

Цель: микросхемная интеграция фторид/2D ПТ

Первые микропроцессоры из ПТ с MoS₂



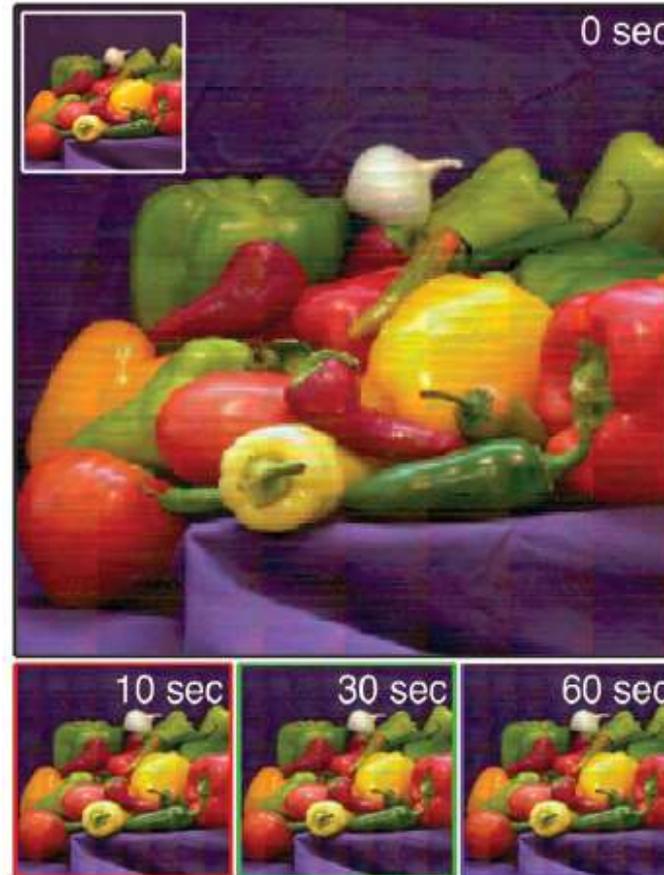
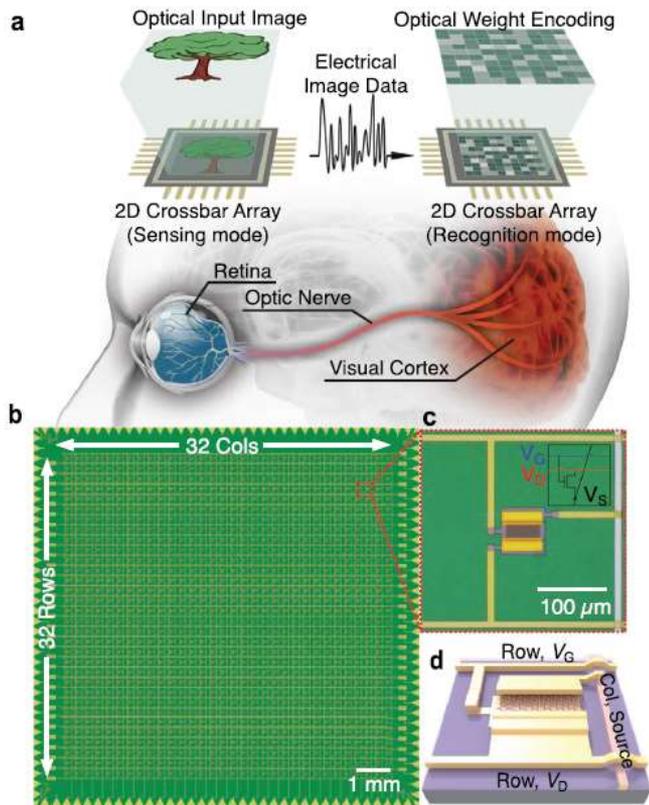
S. Wachter *et al*,
Nature Communications 2017

- Сделаны из ПТ на основе Al₂O₃/MoS₂ с размерами >10мкм
- Не является привлекательной для промышленности технологией

Фторид/2D ПТ позволят улучшить соотношение цена/производительность

Цель: микросхемная интеграция фторид/2D ПТ

Микропроцессоры машинного зрения с атомной толщиной

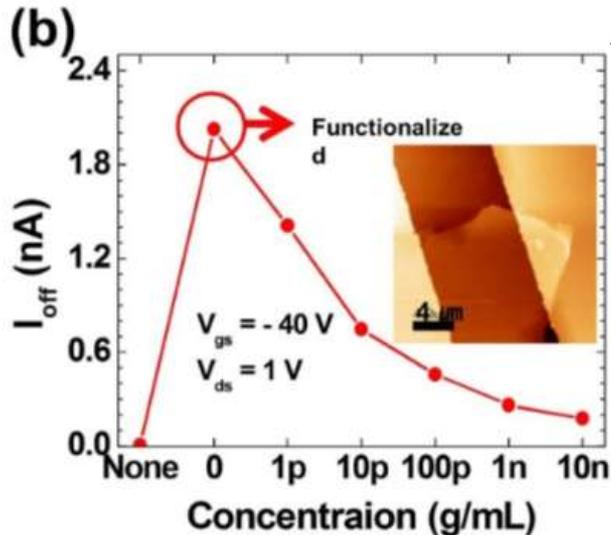
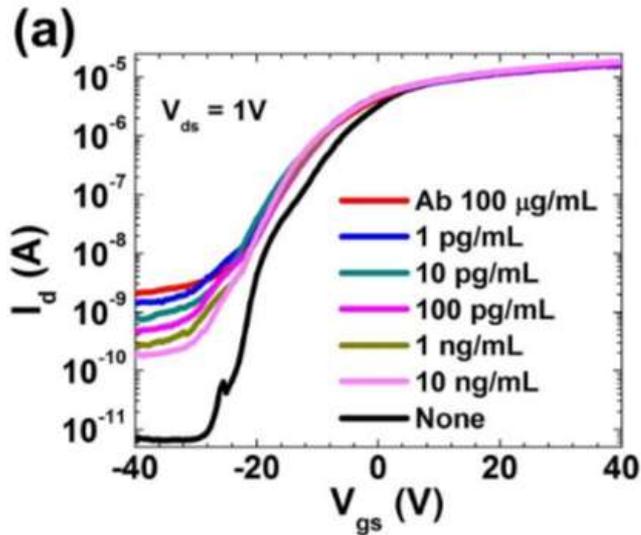
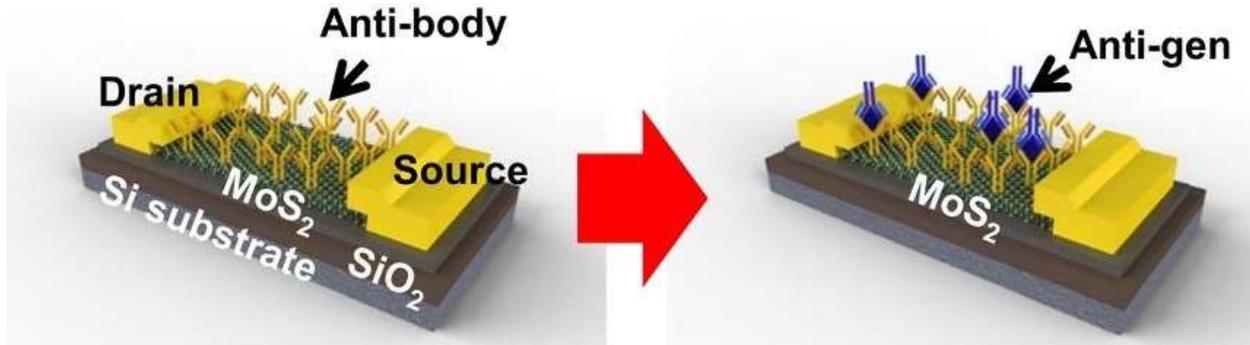


H. Jang *et al*, *Adv. Mater.* 2020

- Сделаны из MoS₂ ПТ с нижним затвором и устойчивой фотопроводимостью
- Наноразмерные ПТ с фторид/2D позволят увеличить разрешение в 1000 раз

Альтернативное применение: сенсоры

Сенсоры биоматериалов (пример: детектирование маркеров ПСА)



J. Li *et al*, Sci. Rep. 2015
A. Bolotsky *et al*, ACS Nano 2019

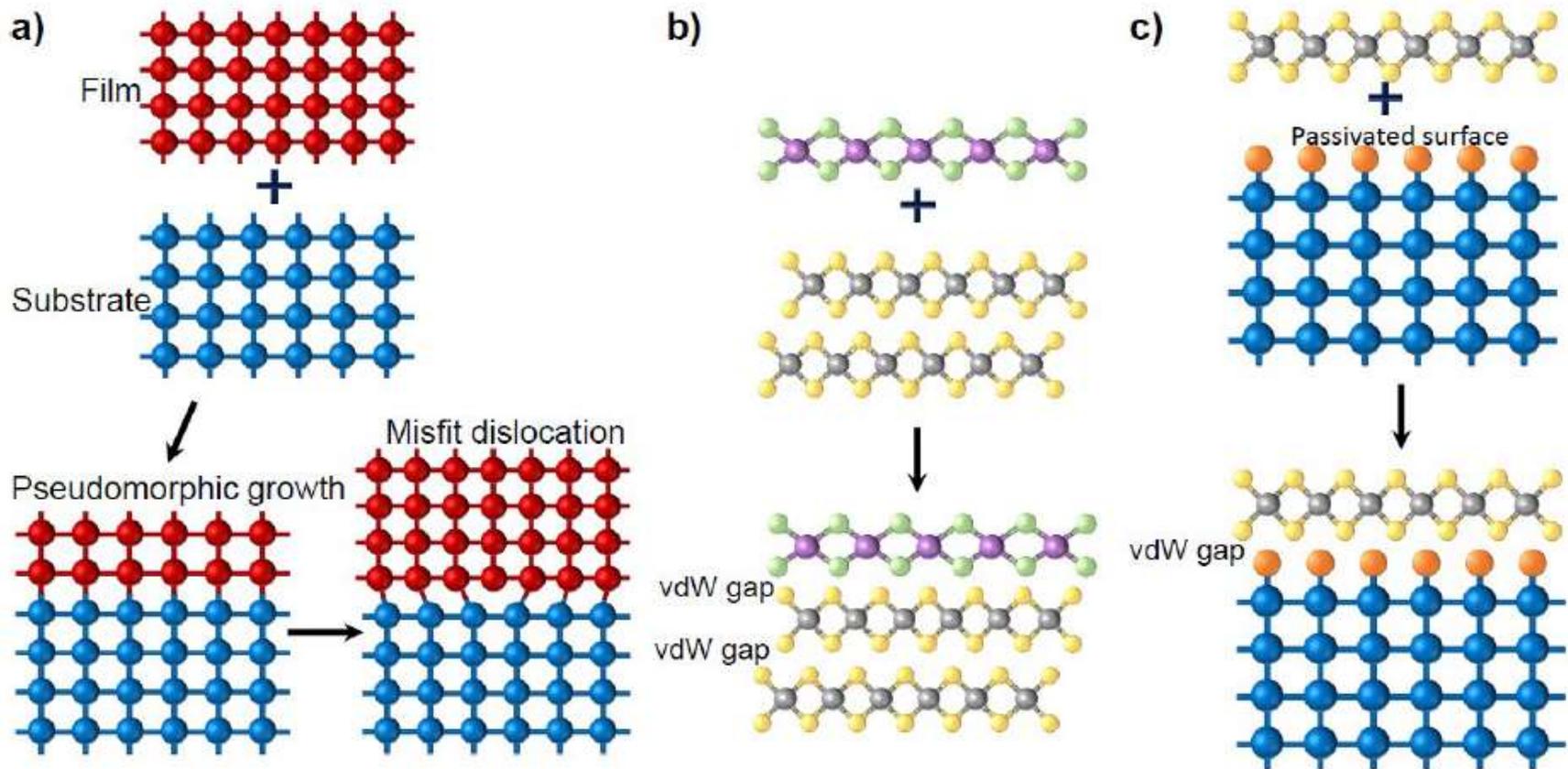
- Замена SiO_2 на CaF_2 позволит улучшить надежность и чувствительность, а также уменьшить рабочее напряжение

Заключение

- Фториды удовлетворяют основным требованиям для использования в качестве диэлектриков в 2D электронике
- Налаженный в ФТИ эпитаксиальный рост позволяет получать тонкие пленки CaF_2 приборного качества
- Первые приборы с CaF_2 и каналами из MoS_2 и графена имеют лучшие характеристики по сравнению с другими прототипами
- CaF_2 и другие фториды представляют интерес в качестве универсальной платформы для развития электроники More Moore и More than Moore на основе 2D материалов

Дополнительные слайды

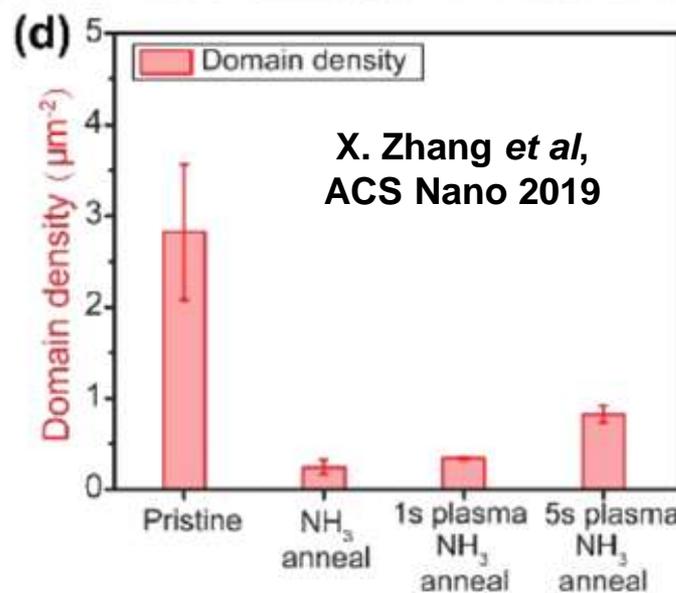
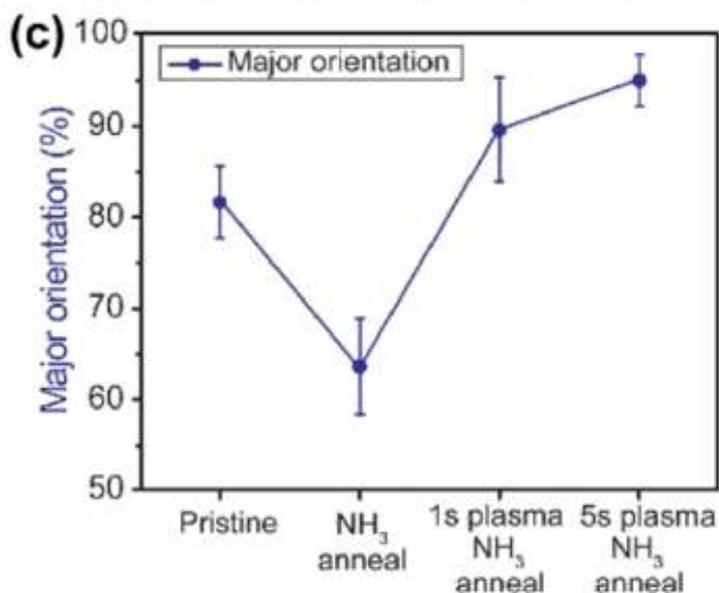
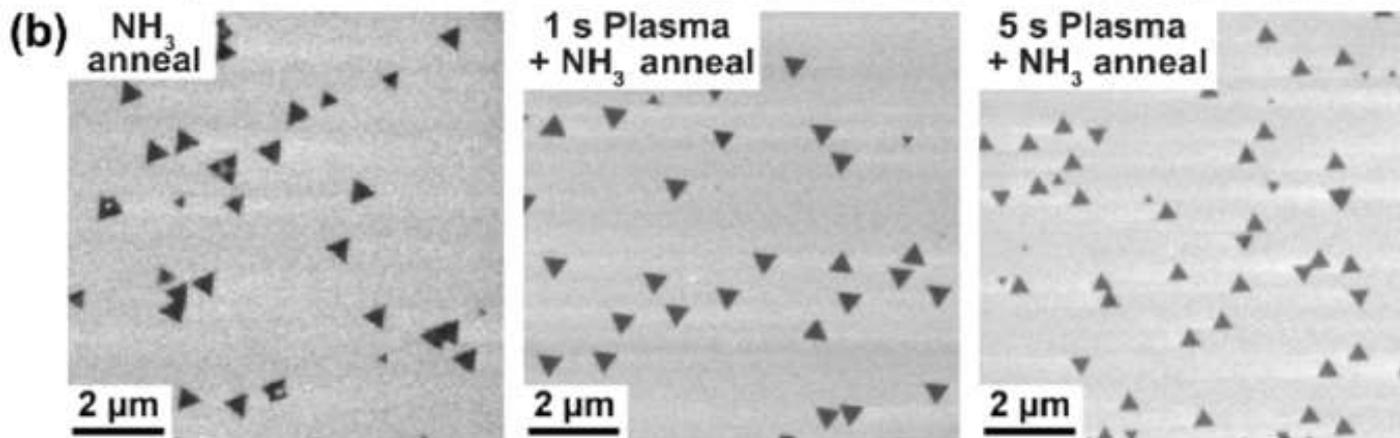
Разновидности эпитаксиального роста



T.H. Choudhury *et al*, Ann. Rev. of Mater. Research 2020

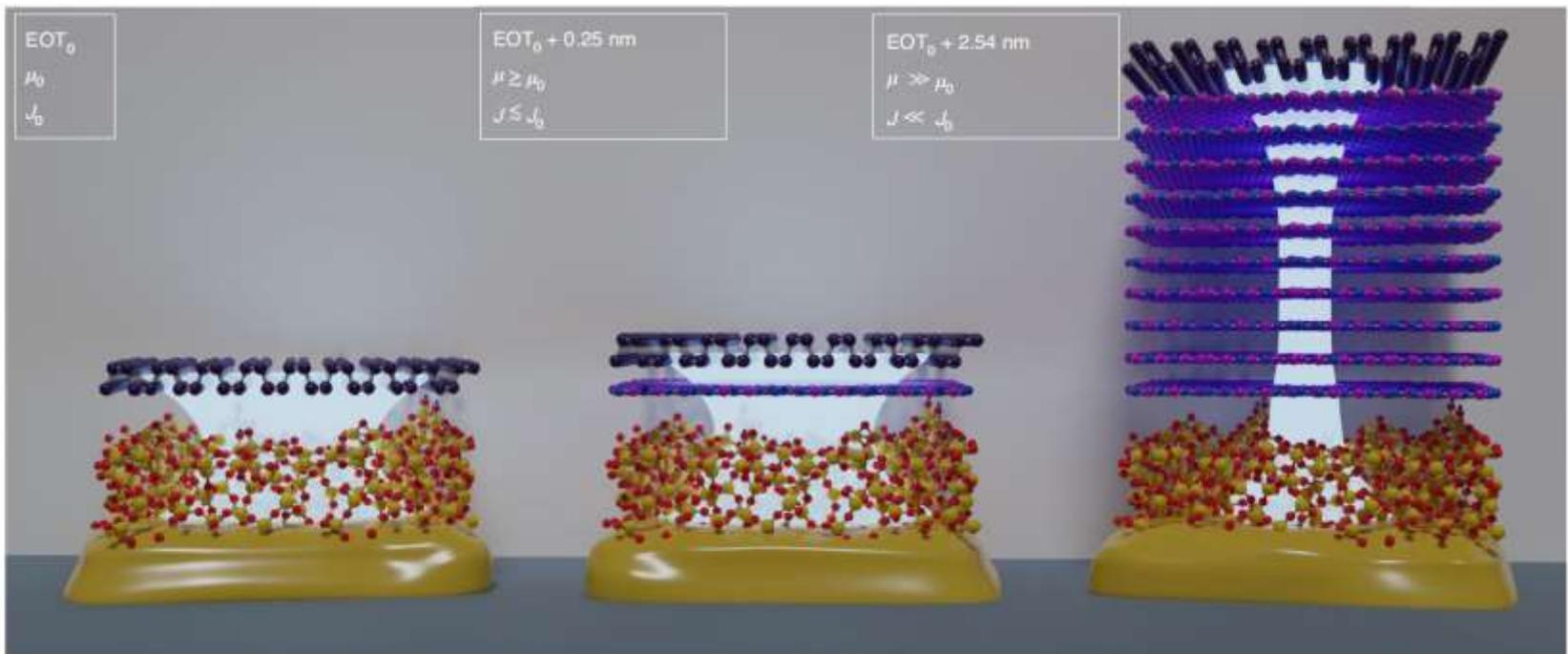
- По аналогии с ростом одного 2D материала на поверхности другого, возможен рост 2D материалов на пассивированных поверхностях (пример: $\text{CaF}_2(111)$)

Рост двумерных материалов на поверхности hBN



- Контроль ориентации доменов WSe₂ путем отжига поверхности hBN в NH₃

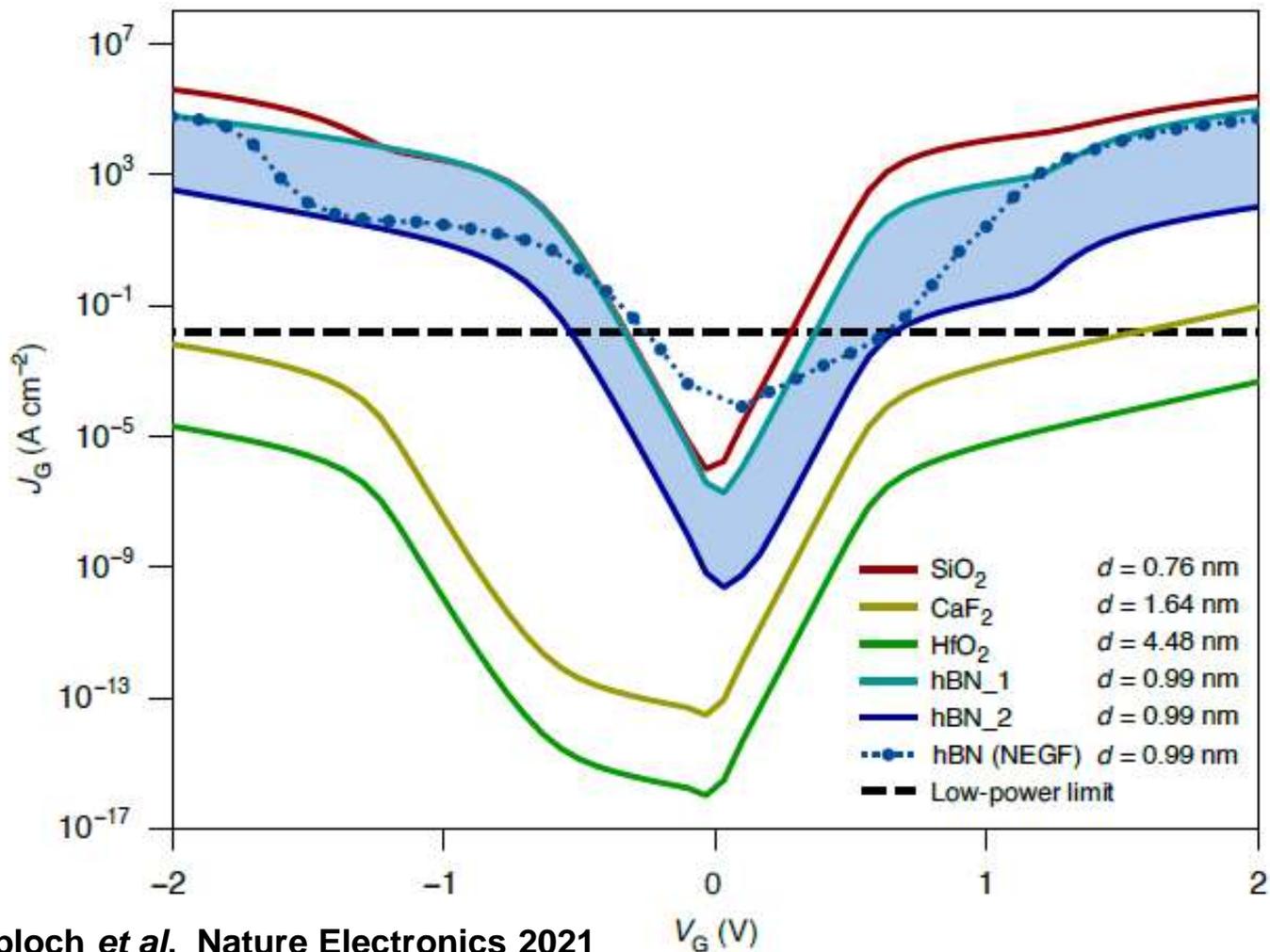
Невозможность использования hBN в ПТ



T. Knobloch *et al*, Nature Electronics 2021

- Существенный выигрыш в подвижности только при большой толщине hBN

Невозможность использования hBN в ПТ



T. Knobloch *et al*, Nature Electronics 2021

- Высокие туннельные утечки при малых толщинах