

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

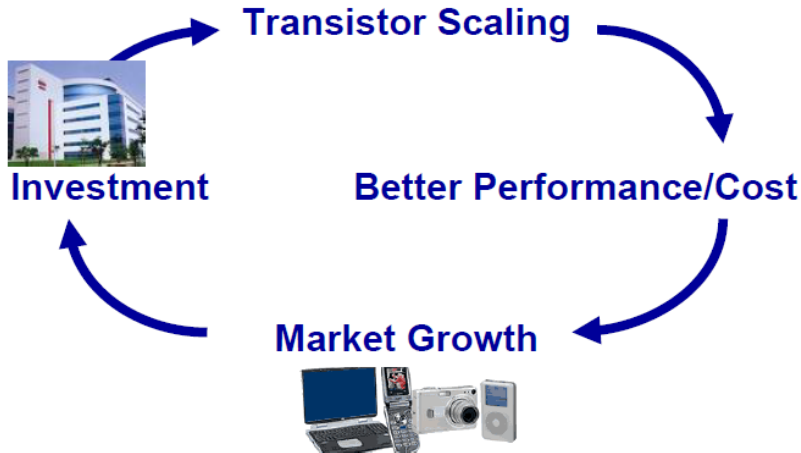
**А.Г. Банщиков, М.И. Векслер, С.М. Сутурин, В.В. Федоров, Н.С. Соколов
T. Knobloch, D.K. Polyushkin, S. Wachter, T. Mueller, T. Grasser**

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, ...



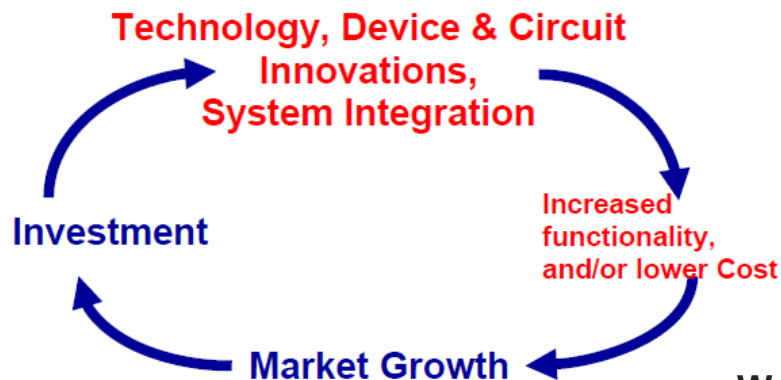
Миниатюризация:

Снижение стоимости

+

повышение производительности

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



Новые материалы и гетероструктуры:

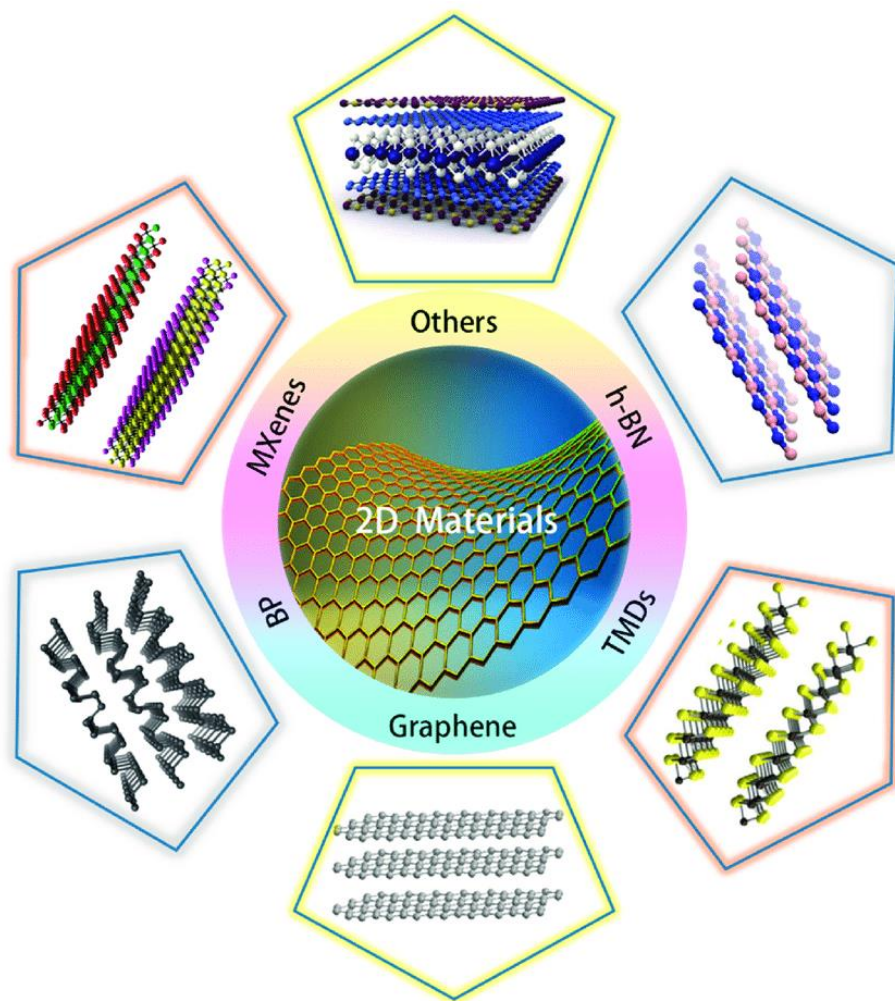
Снижение стоимости

+

повышение производительности

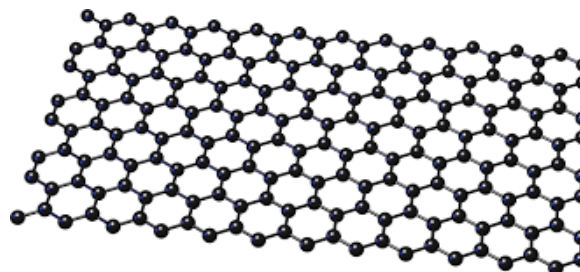
W. Arden et al, More-than-Moore white paper, *Version*, 2010

Огромный выбор двумерных материалов

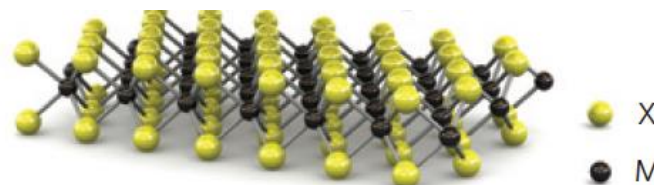


Z. Dong et al, *Molecules*, 2019

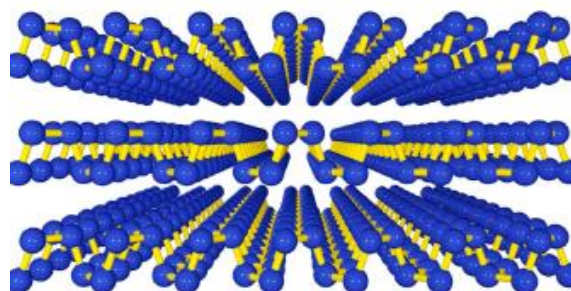
Графен (с 2004)



MoS_2 , MoSe_2 , WS_2 , ... (с 2011)



Черный фосфор (с 2014)

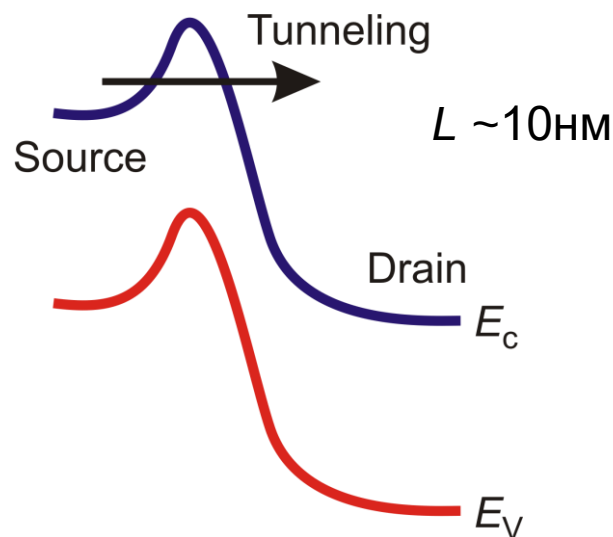
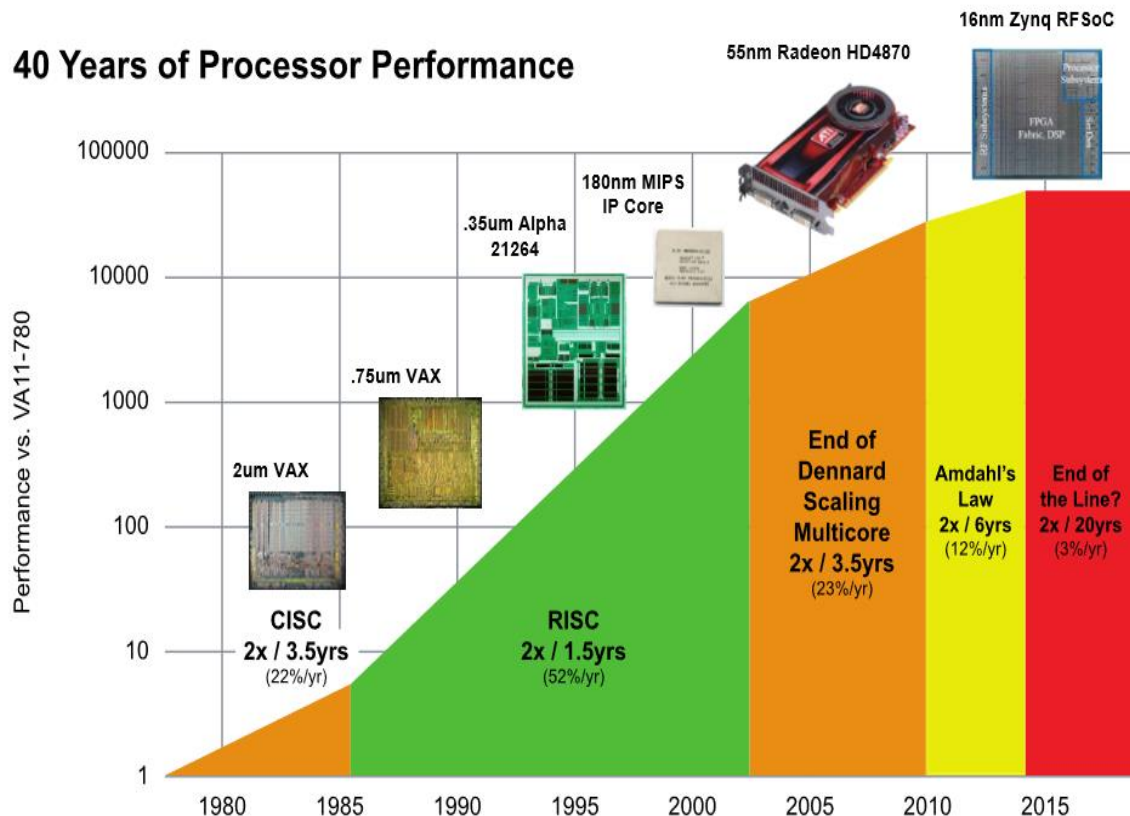


Широкие возможности применения в электронике нового поколения

Двумерные материалы для More Moore

Закон Мура: Число транзисторов на микросхемах удваивается каждые 1.5 года

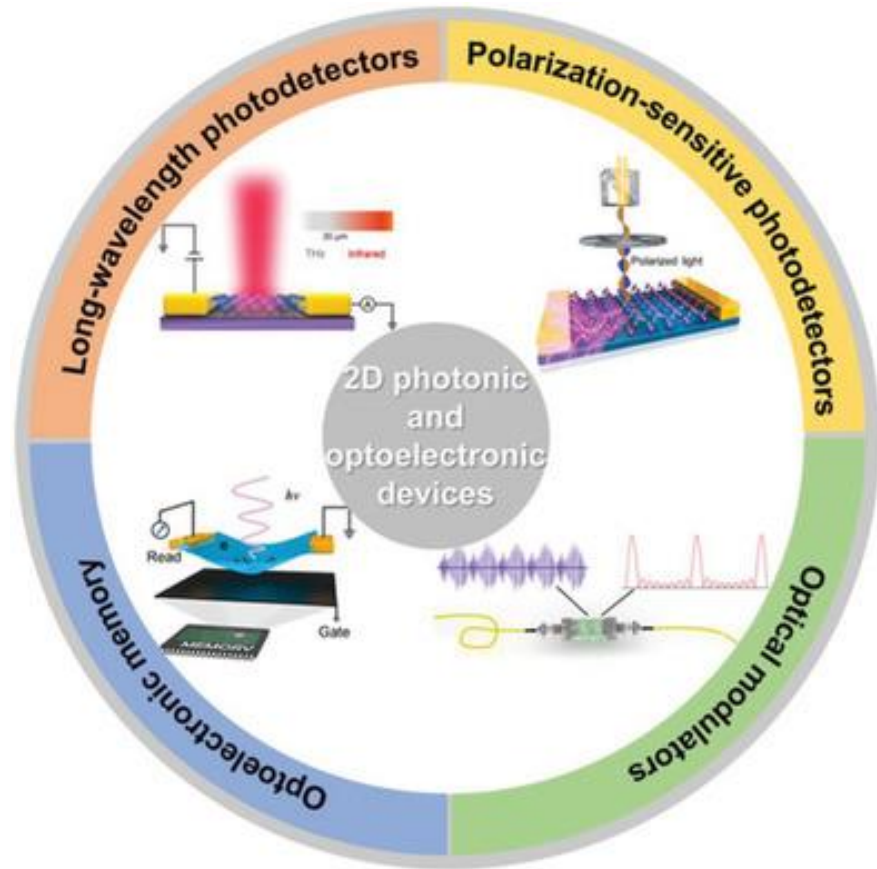
40 Years of Processor Performance



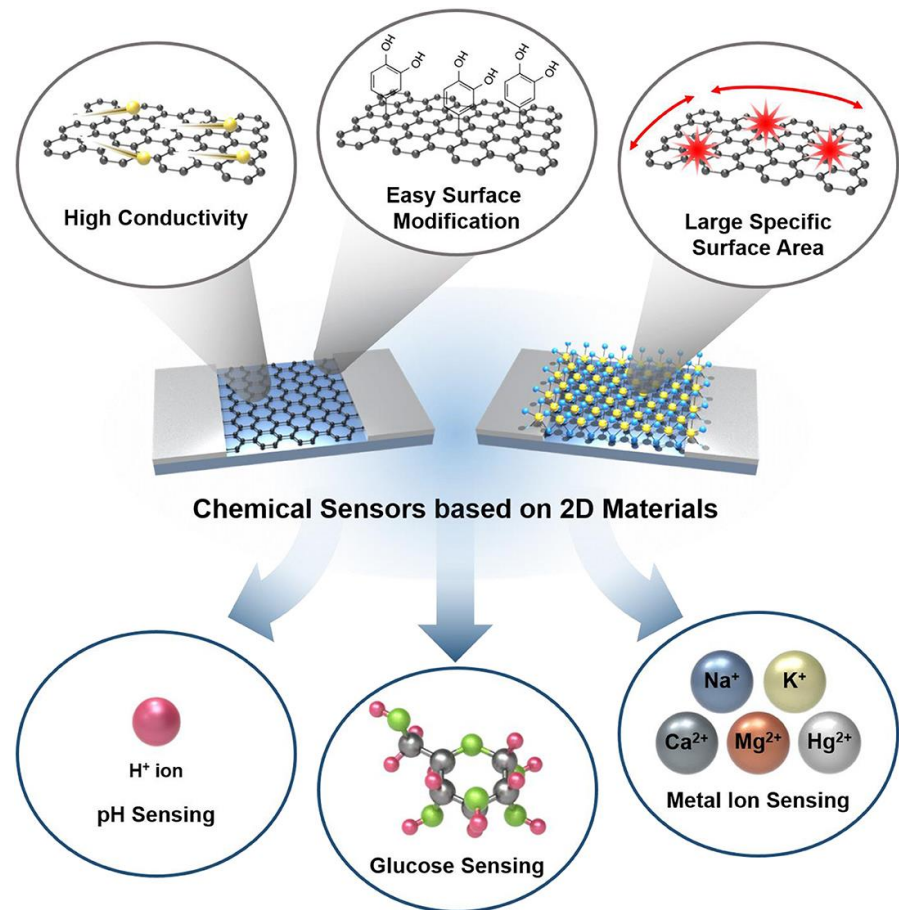
Слоистые 2D материалы позволят продолжить действие закона Мура

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

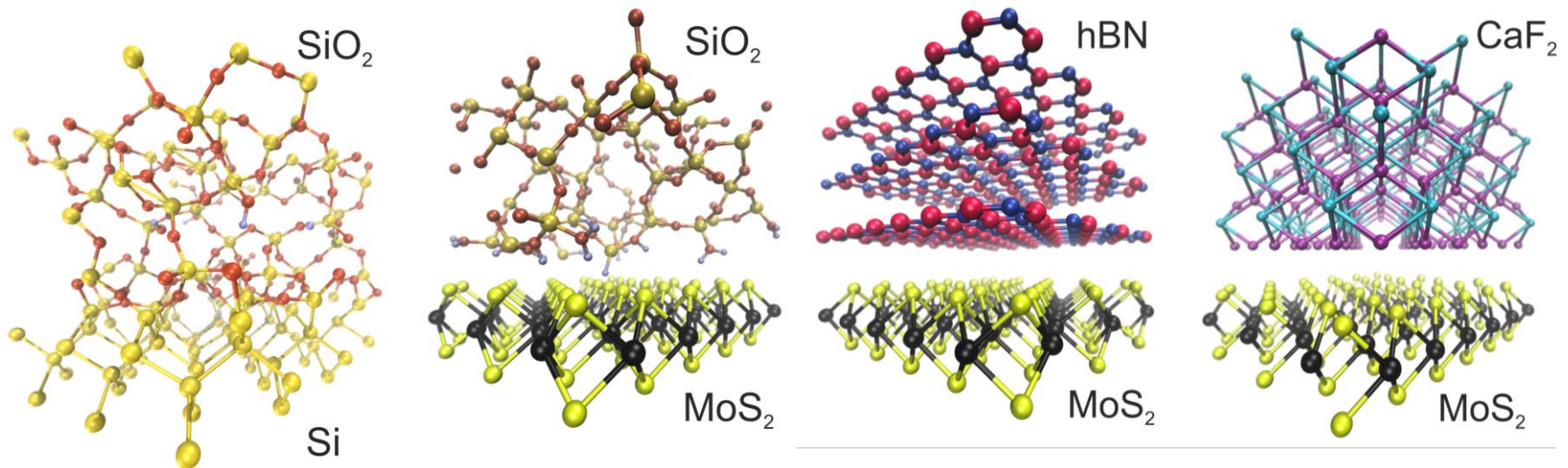
2D материалы и гетероструктуры на их основе имеют ряд новых свойств

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



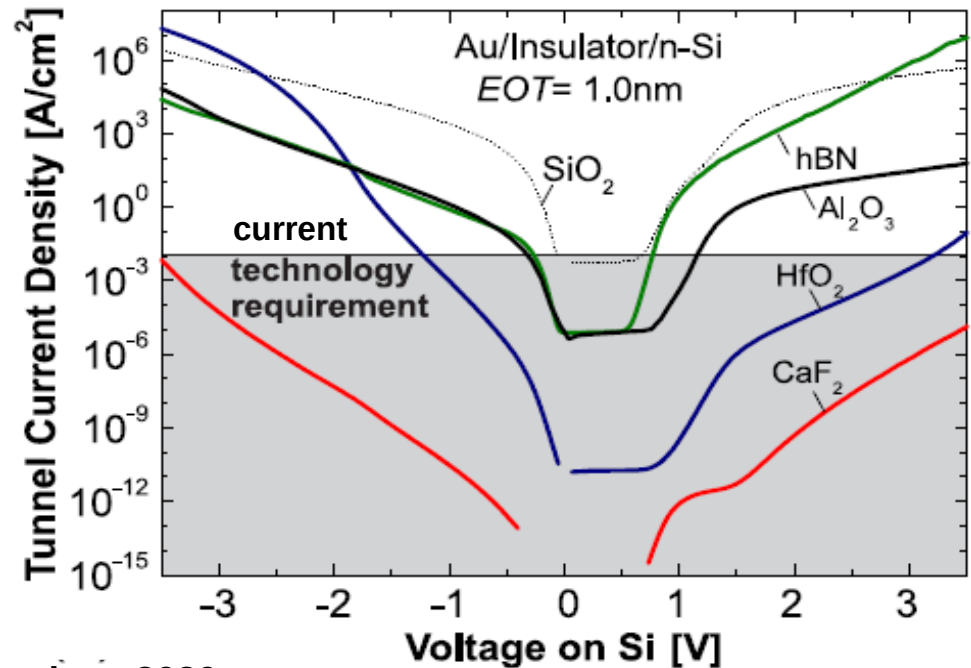
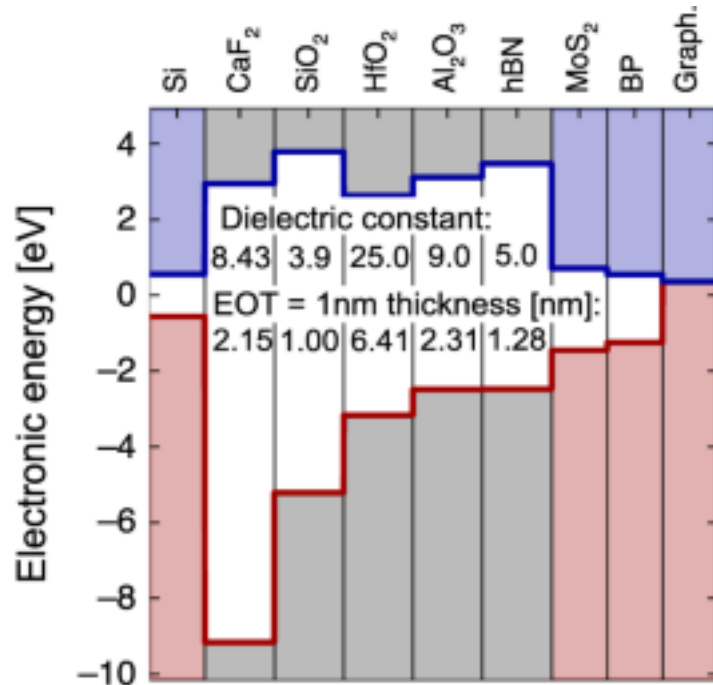
Yu.Yu. Illarionov *et al*, Nature Communications 2020

- 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



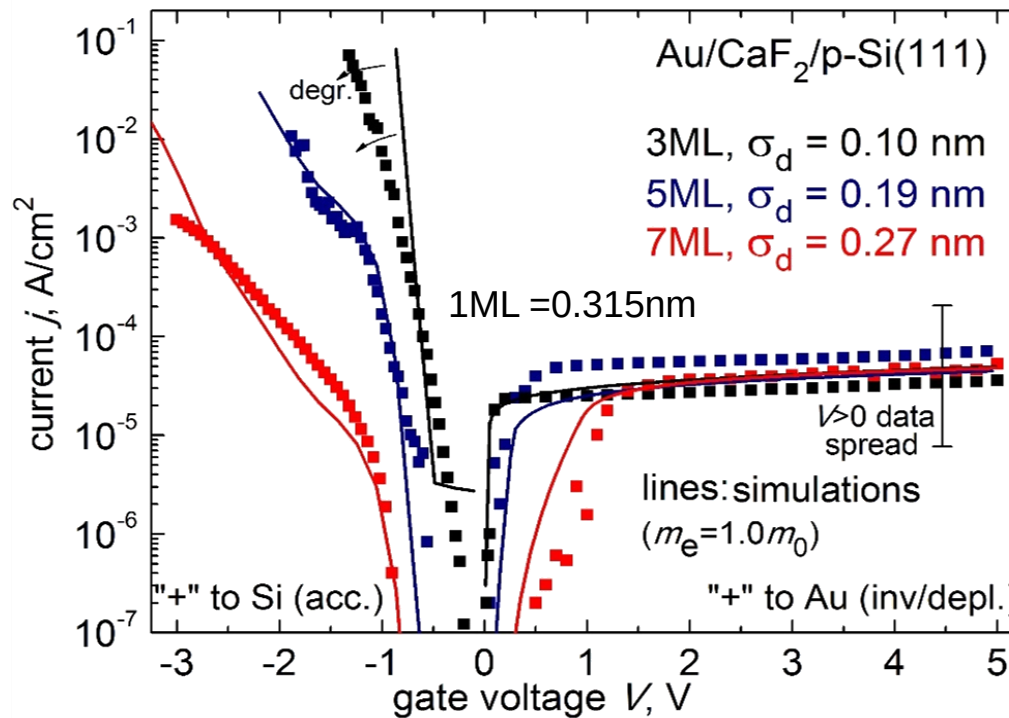
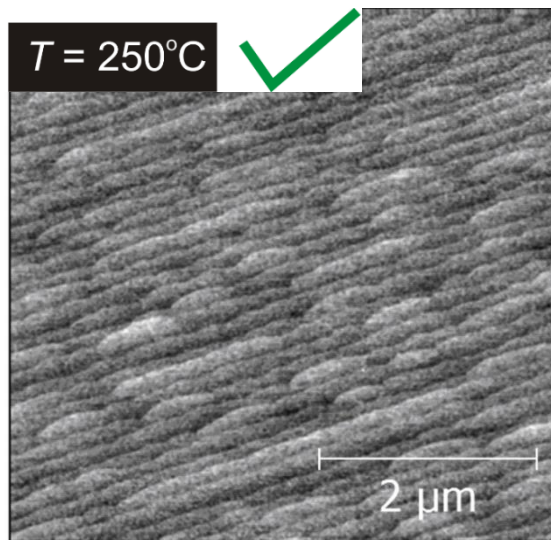
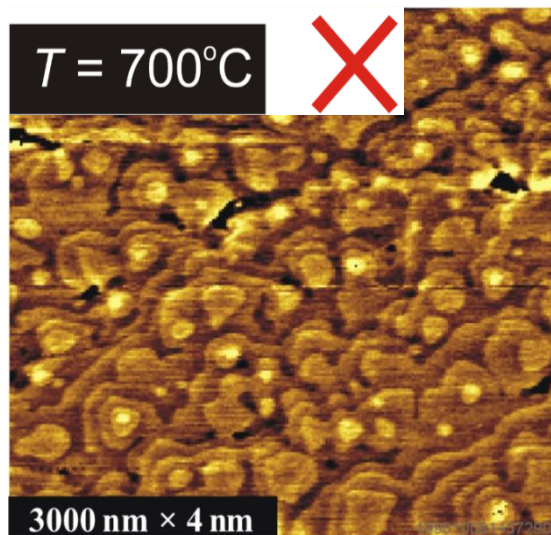
Yu.Yu. Illarionov et al, Nature Communications 2020

- 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 1nm

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

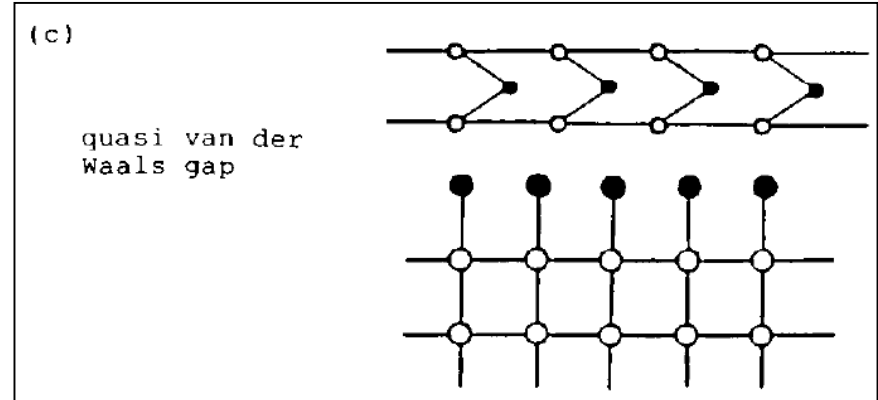
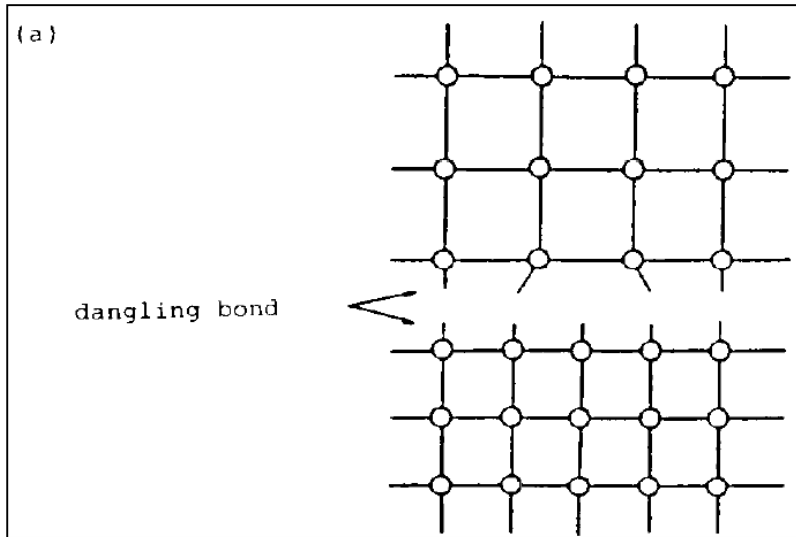
M.I. Vexler *et al*, Solid-State Electronics, 2011

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

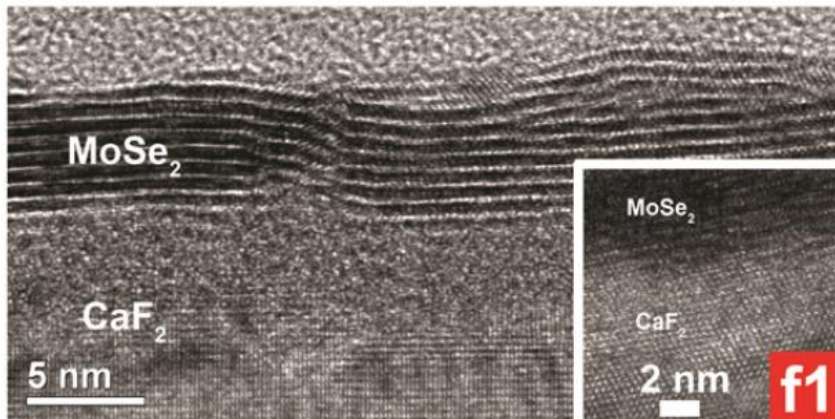
M.I. Vexler *et al*, Journal of Applied Physics, 2009

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

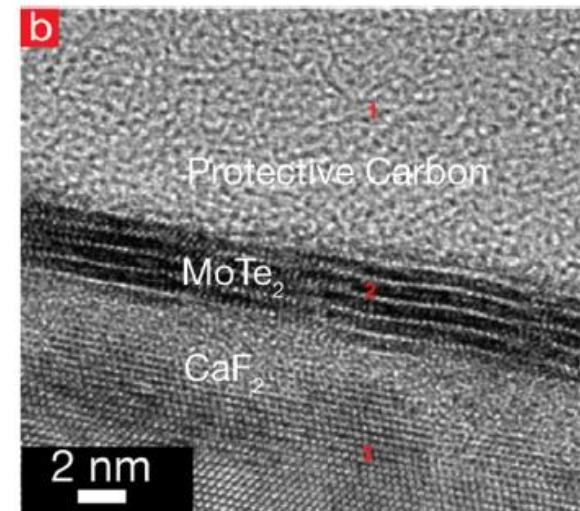
Возможности роста 2D материалов на CaF_2



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

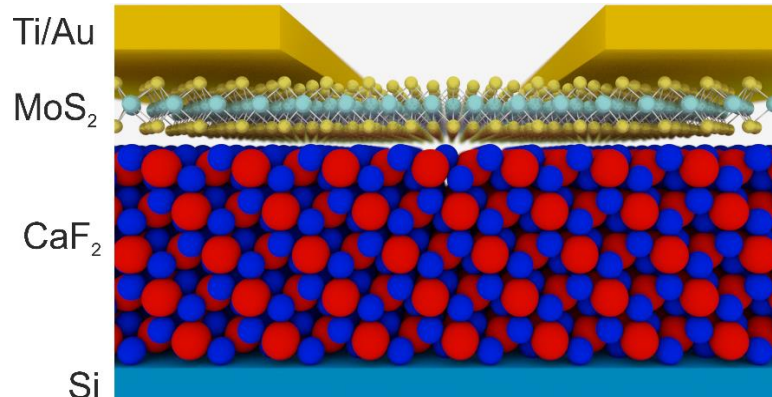
ARTICLES

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

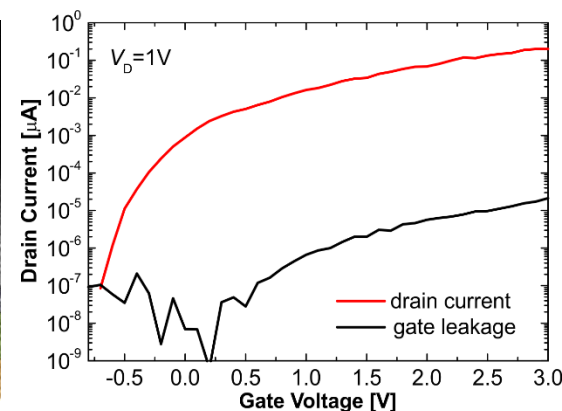
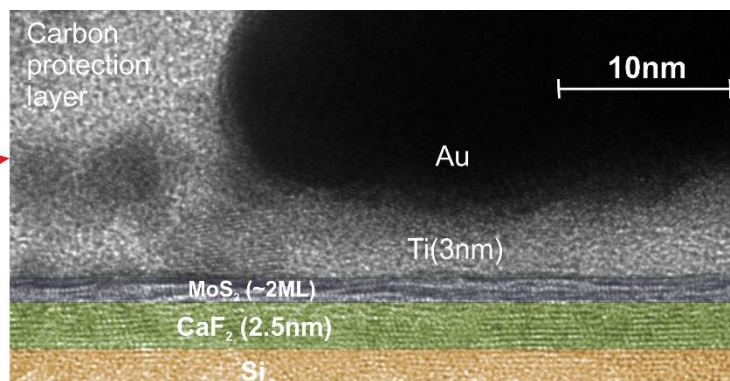
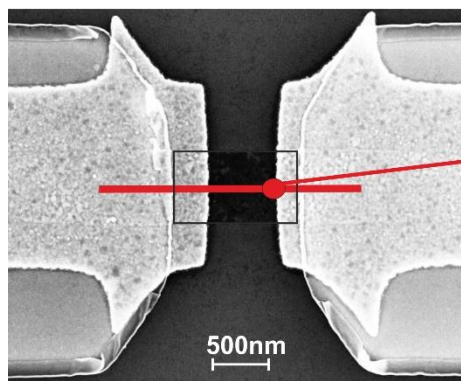
nature
electronics

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*}



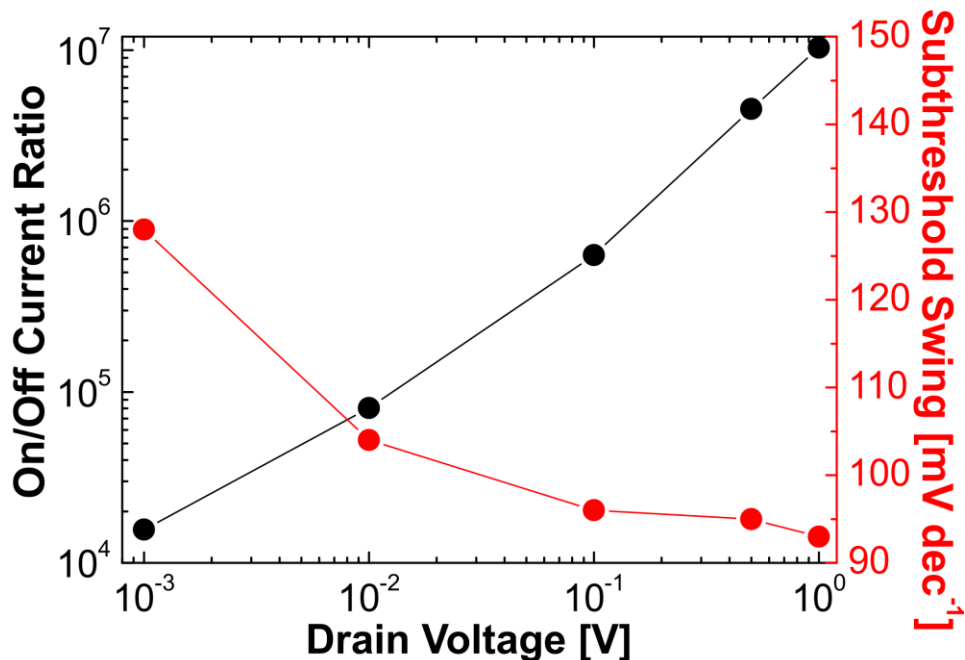
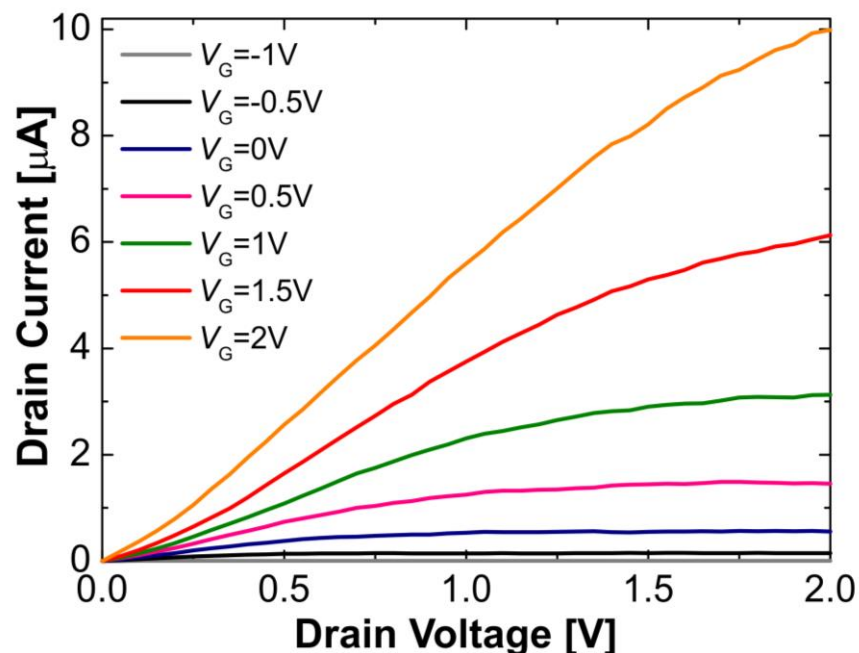
“Calcium fluoride could provide *ultra-scaled dielectric layers* for the development of *next-generation 2D nanoelectronics*.” (Illarionov et al, Nature Electronics 2019)



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

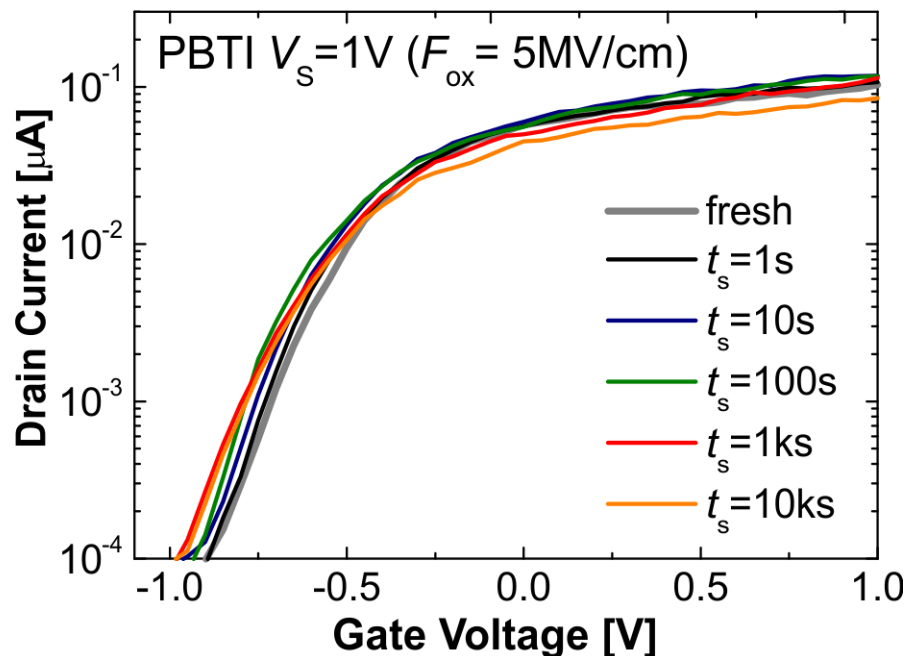
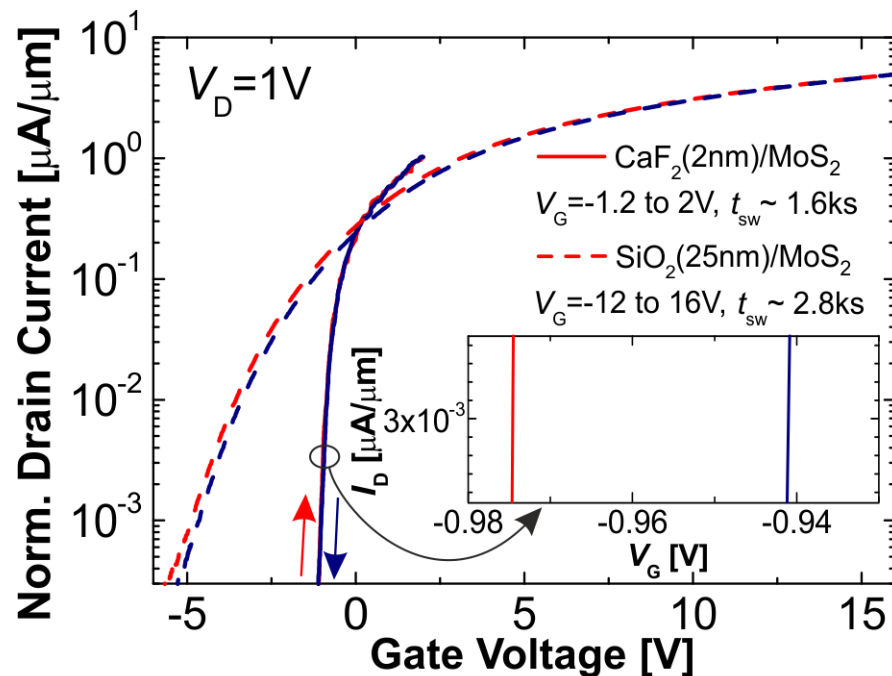


Yu.Yu. Illarionov *et al*, Nature Electronics 2019

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

Длинноканальные ПТ с MoS_2 и 2нм CaF_2

Надежность при длительной работе

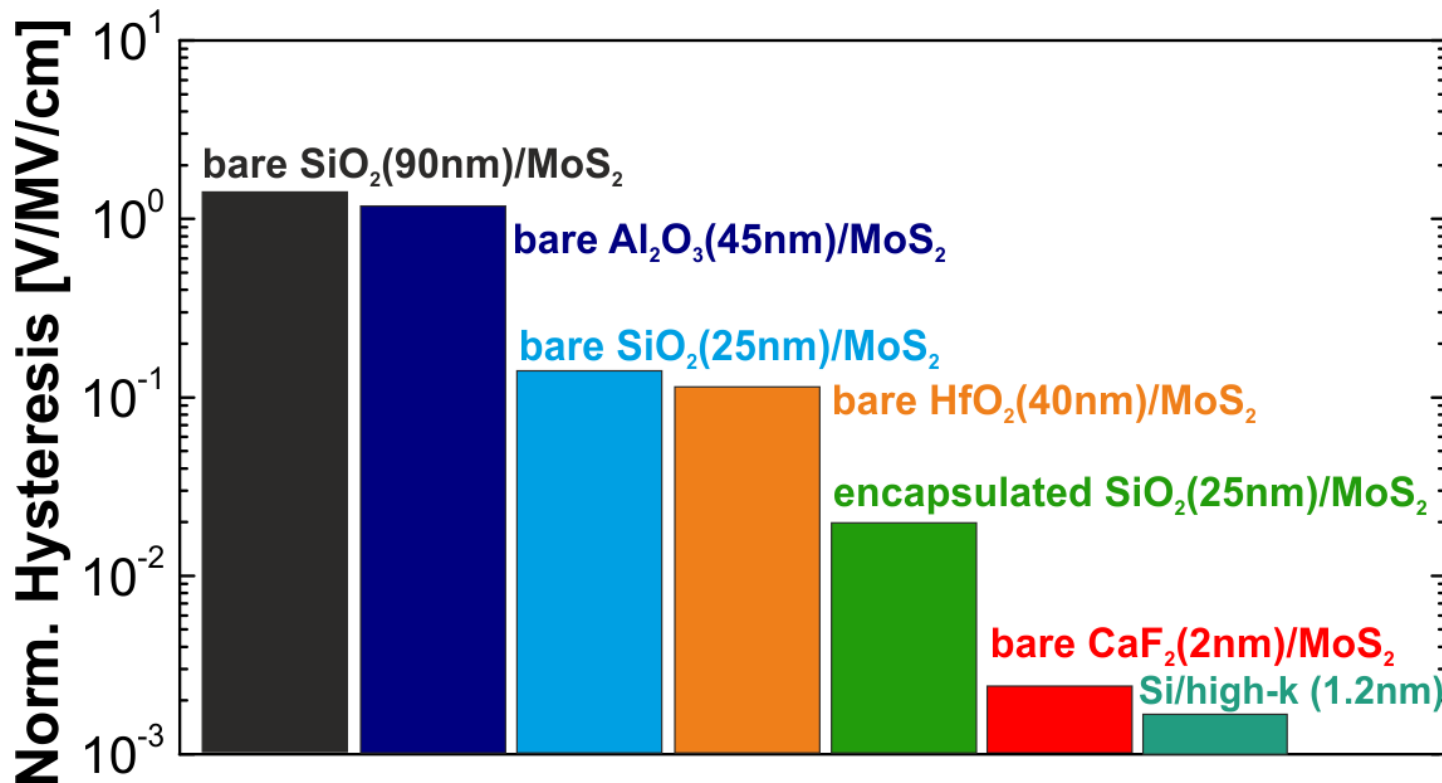


Yu.Yu. Illarionov et al, Nature Electronics, 2019; 2D Materials, 2019

- Показана стабильность работы транзисторов с CaF_2
- Возможно применение структур $\text{CaF}_2/\text{MoS}_2$ в сенсорах и фотодетекторах

Длинноканальные ПТ с MoS_2 и 2нм CaF_2

Сравнение с другими приборами

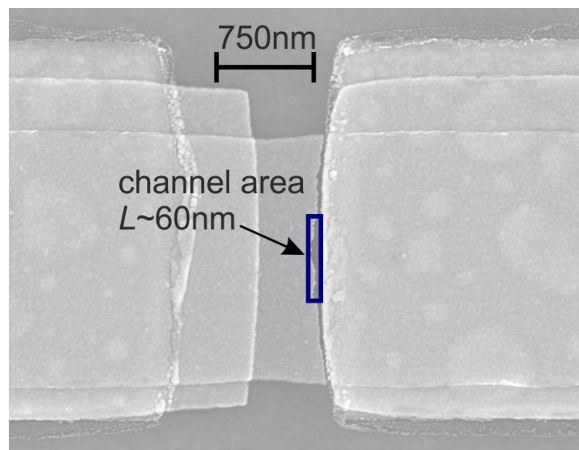


Yu.Yu. Illarionov *et al*, Nature Electronics, 2019; 2D Materials, 2019

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

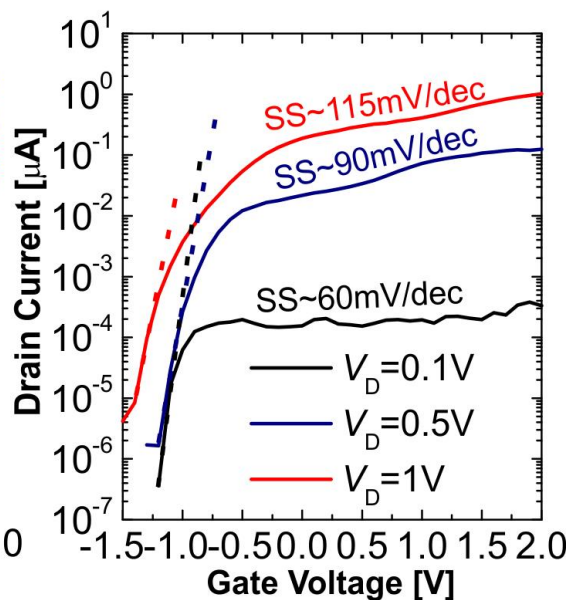
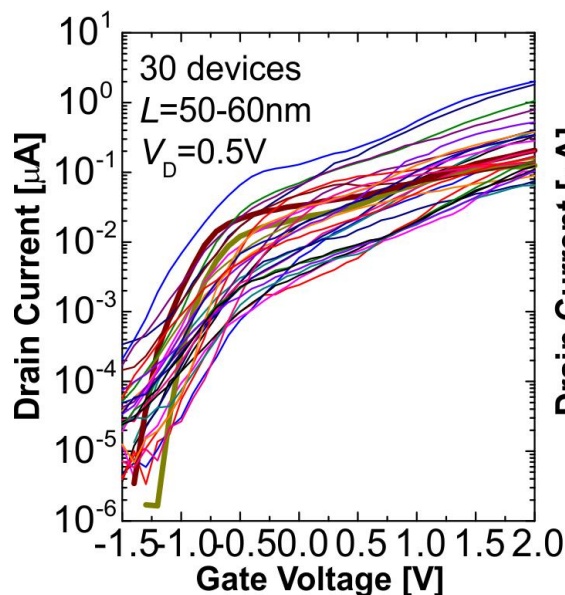
Короткоканальные ПТ с MoS_2 и 2нм CaF_2

Первые 2D транзисторы с 2нм CaF_2 и наноразмерными каналами

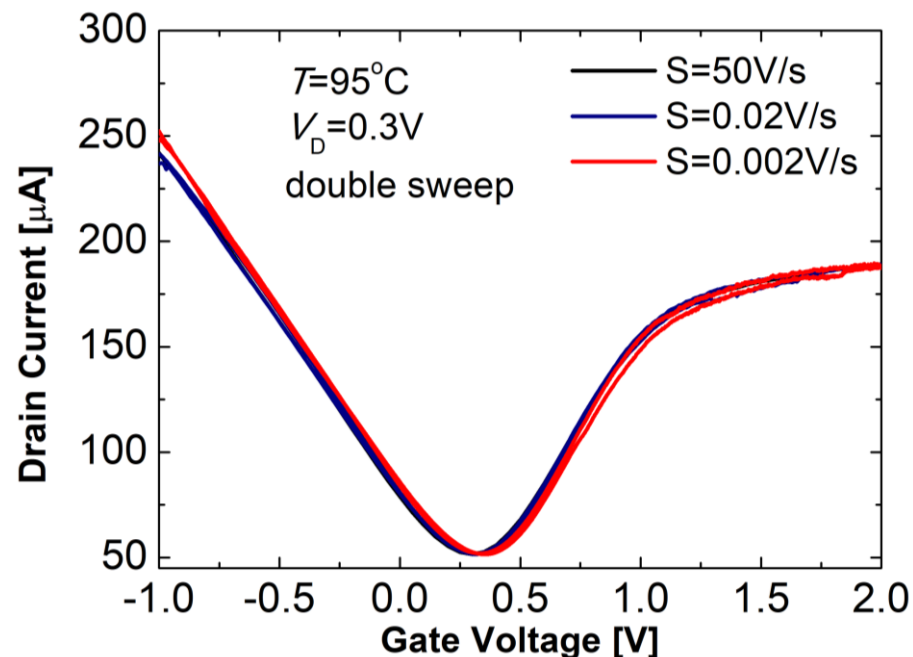
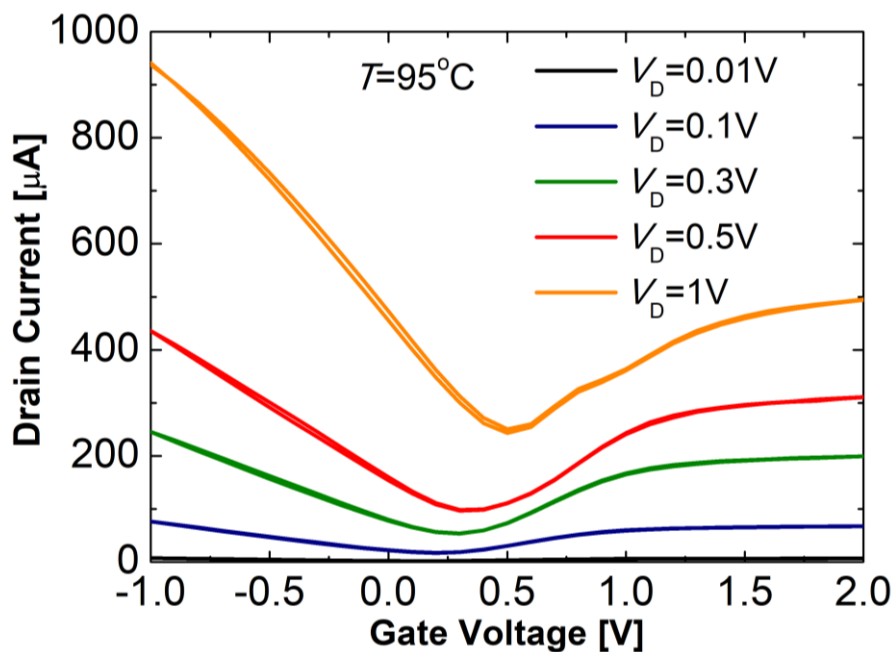
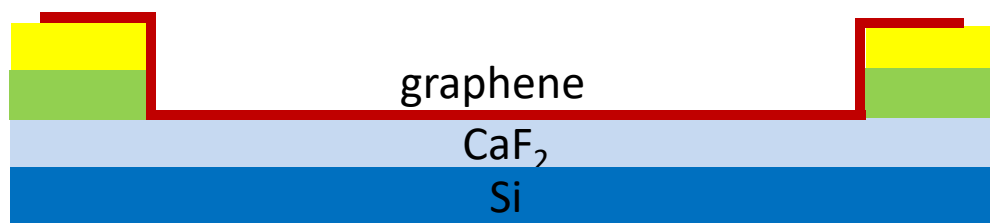


- Структуры $\text{CaF}_2/\text{MoS}_2$
- $L=50\text{-}60\text{nm}$
- SS до 60мВ/дек

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

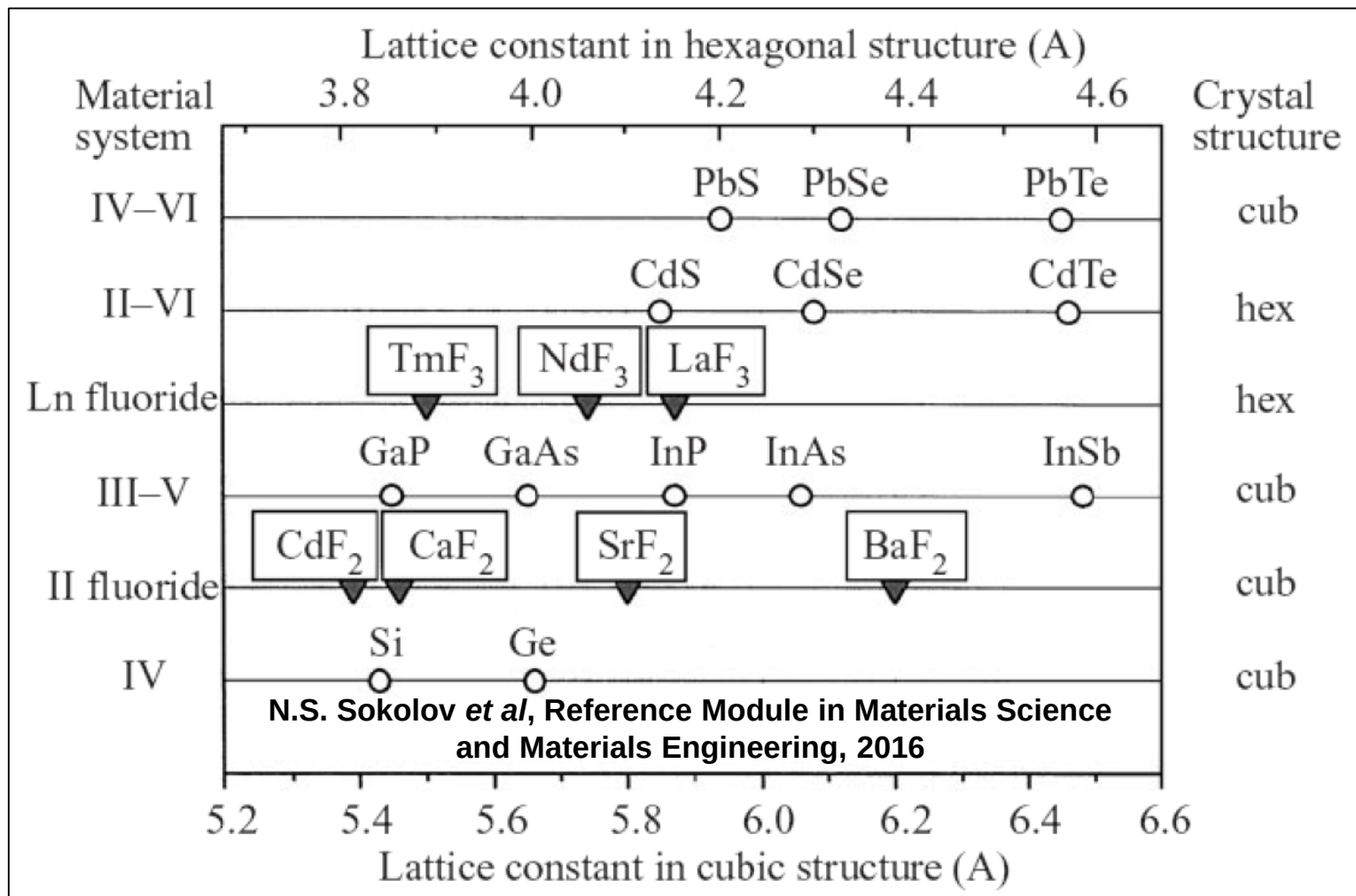
Сенсоры Холла, фотодетекторы, ...

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

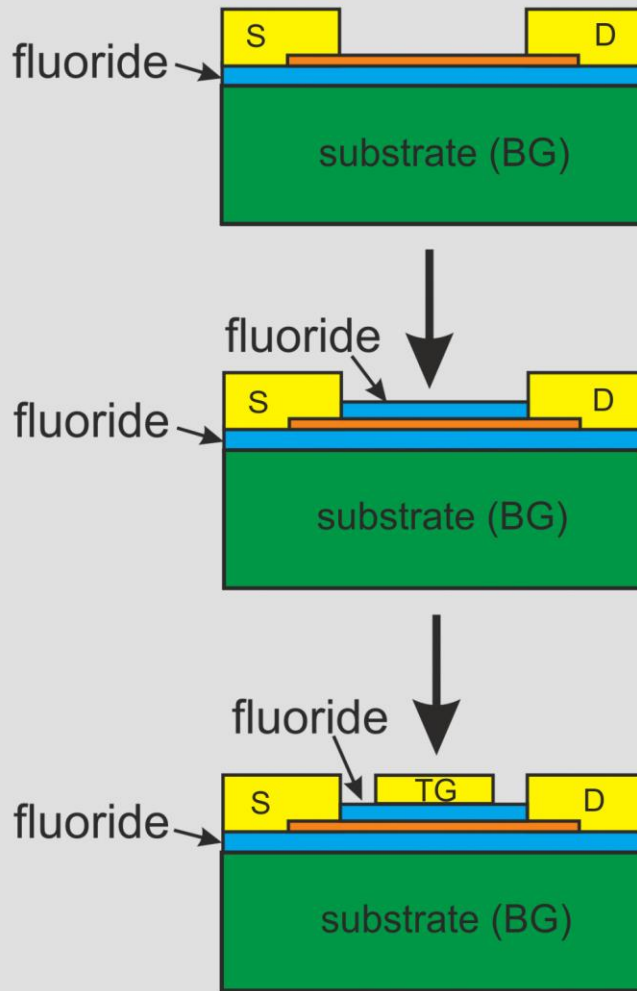


- Возможен подбор оптимальных подложек для роста других фторидов

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

ПТ с верхним затвором: рост фторидов на 2D

Основной процесс: эпитаксия гетероструктур фторид/2D/фторид



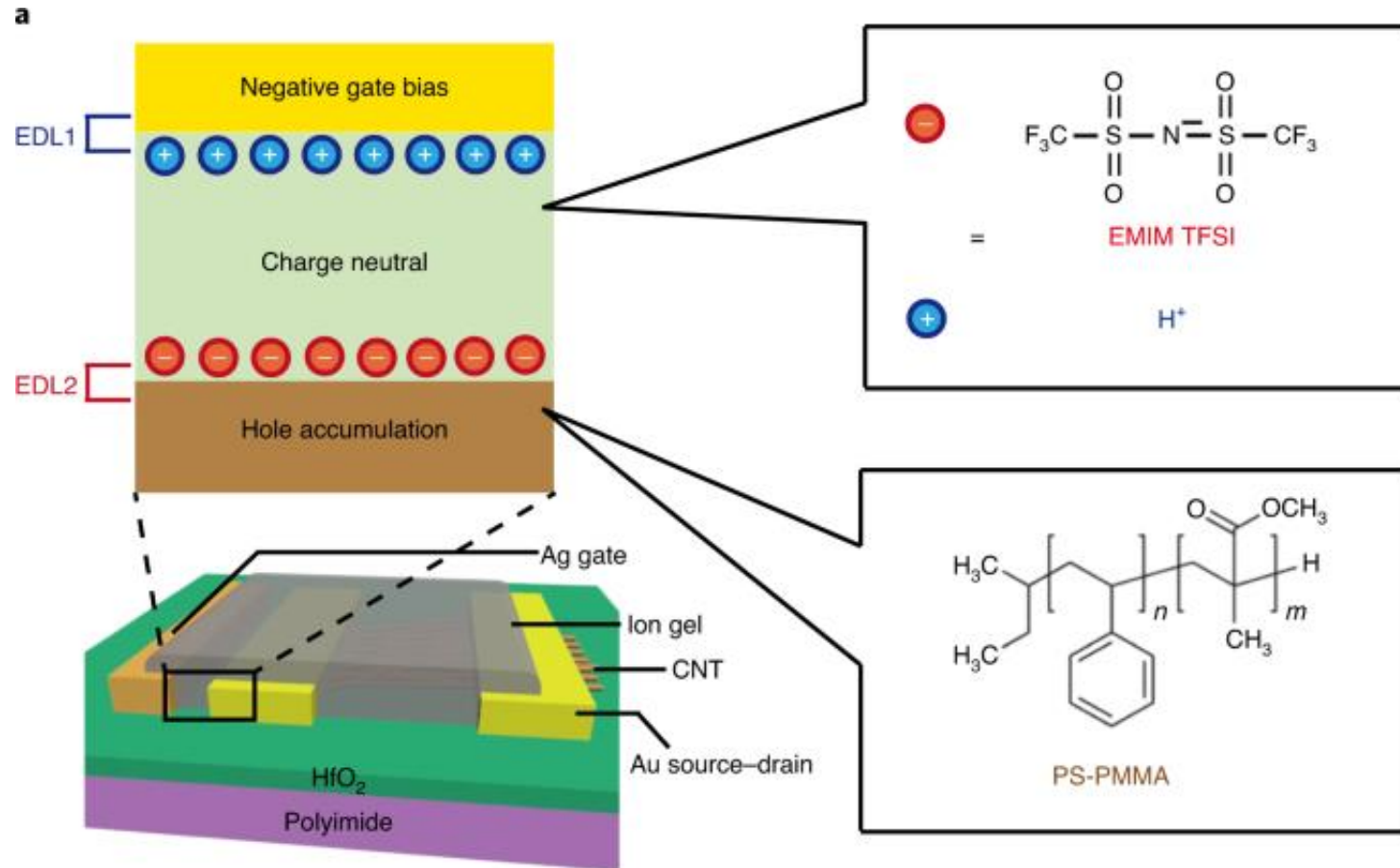
ПТ с нижним затвором

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

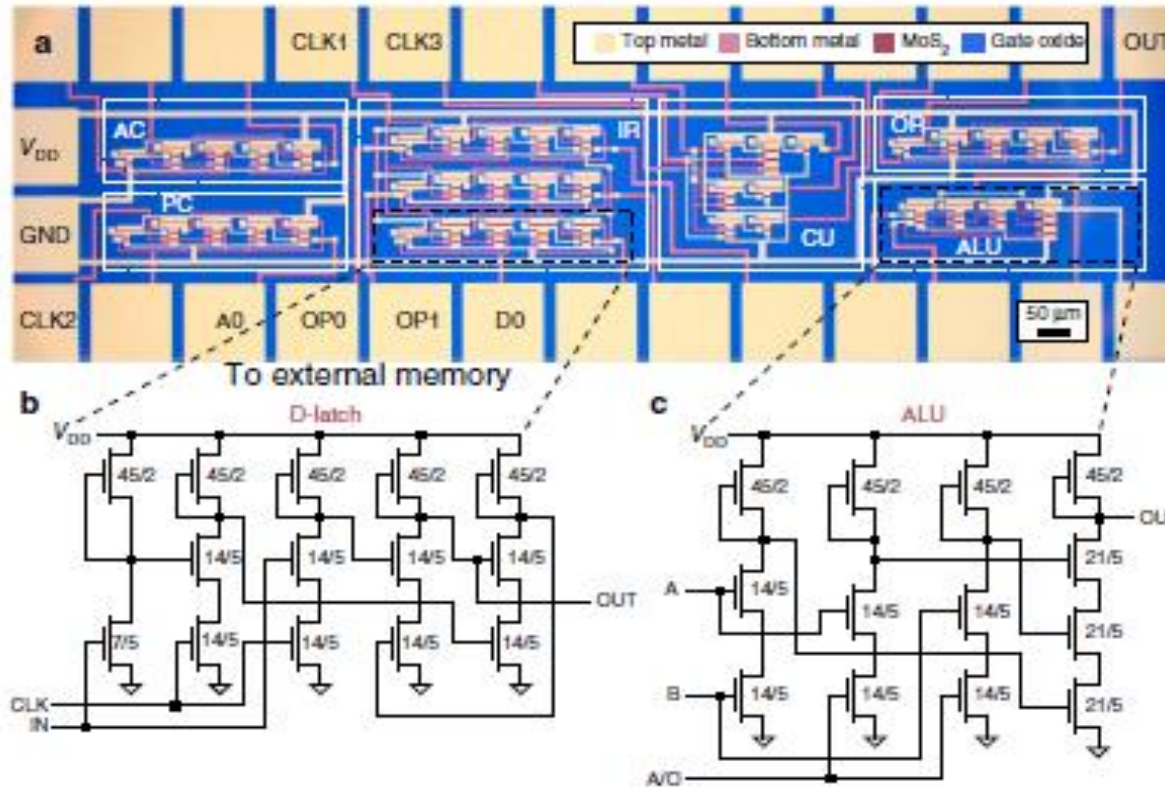


M. Zhu *et al*, Nature Electronics 2020

Может быть альтернативным решением для верхнего затвора в ПТ с CaF₂/2D

Цель: микросхемная интеграция фторид/2D ПТ

Первые микропроцессоры из ПТ с MoS₂



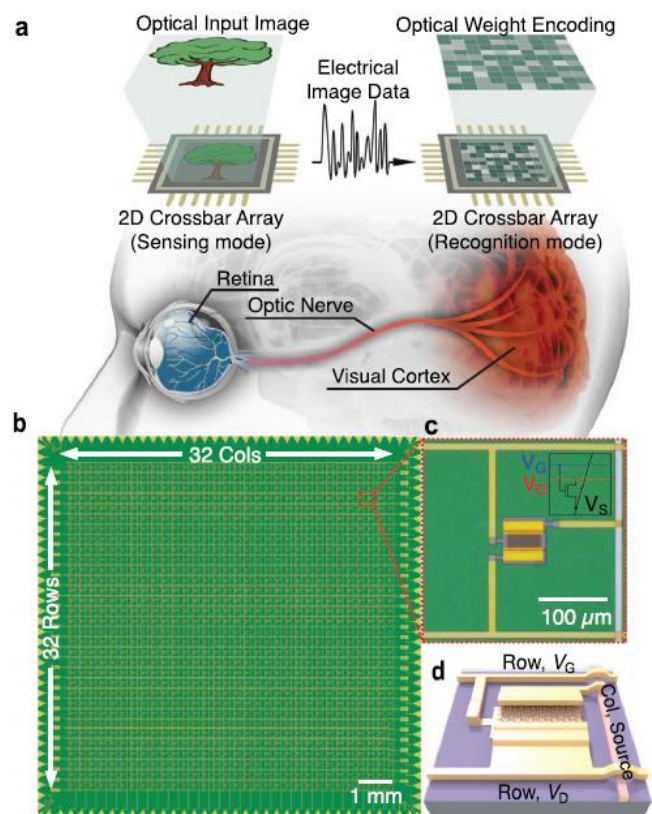
S. Wachter *et al*,
Nature Communications 2017

- 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



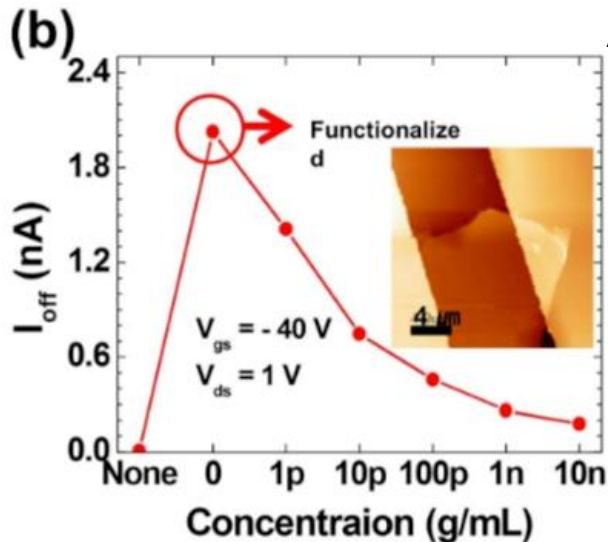
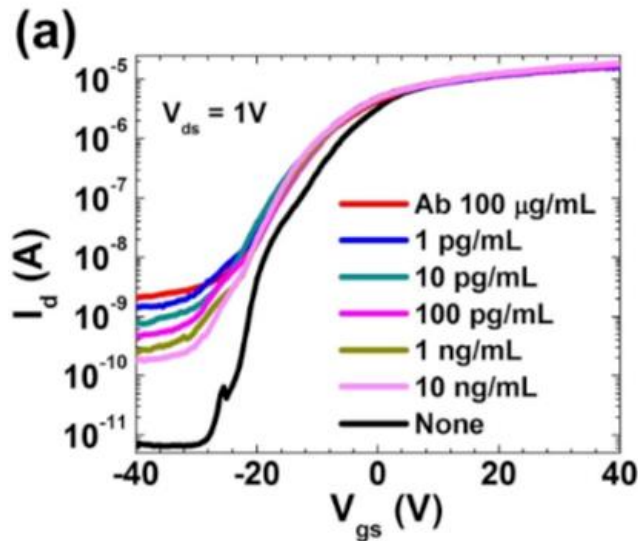
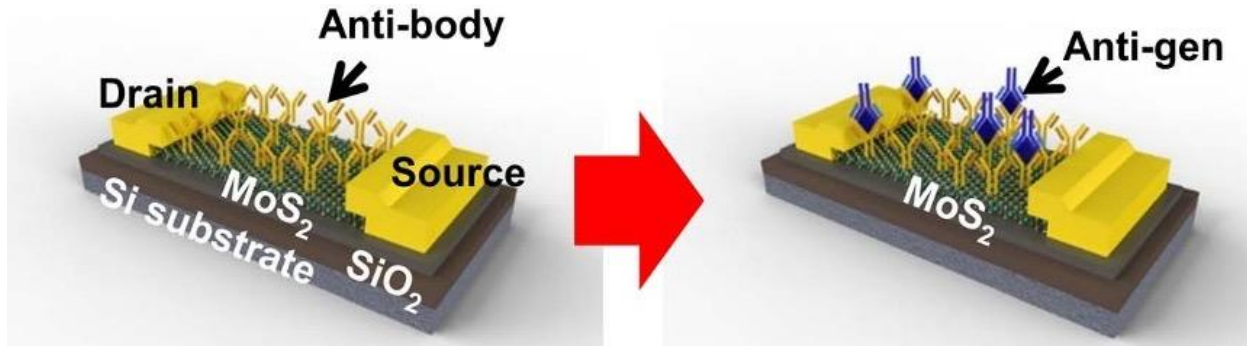
H. Jang *et al*, Adv. Mater. 2020



- Сделаны из MoS_2 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

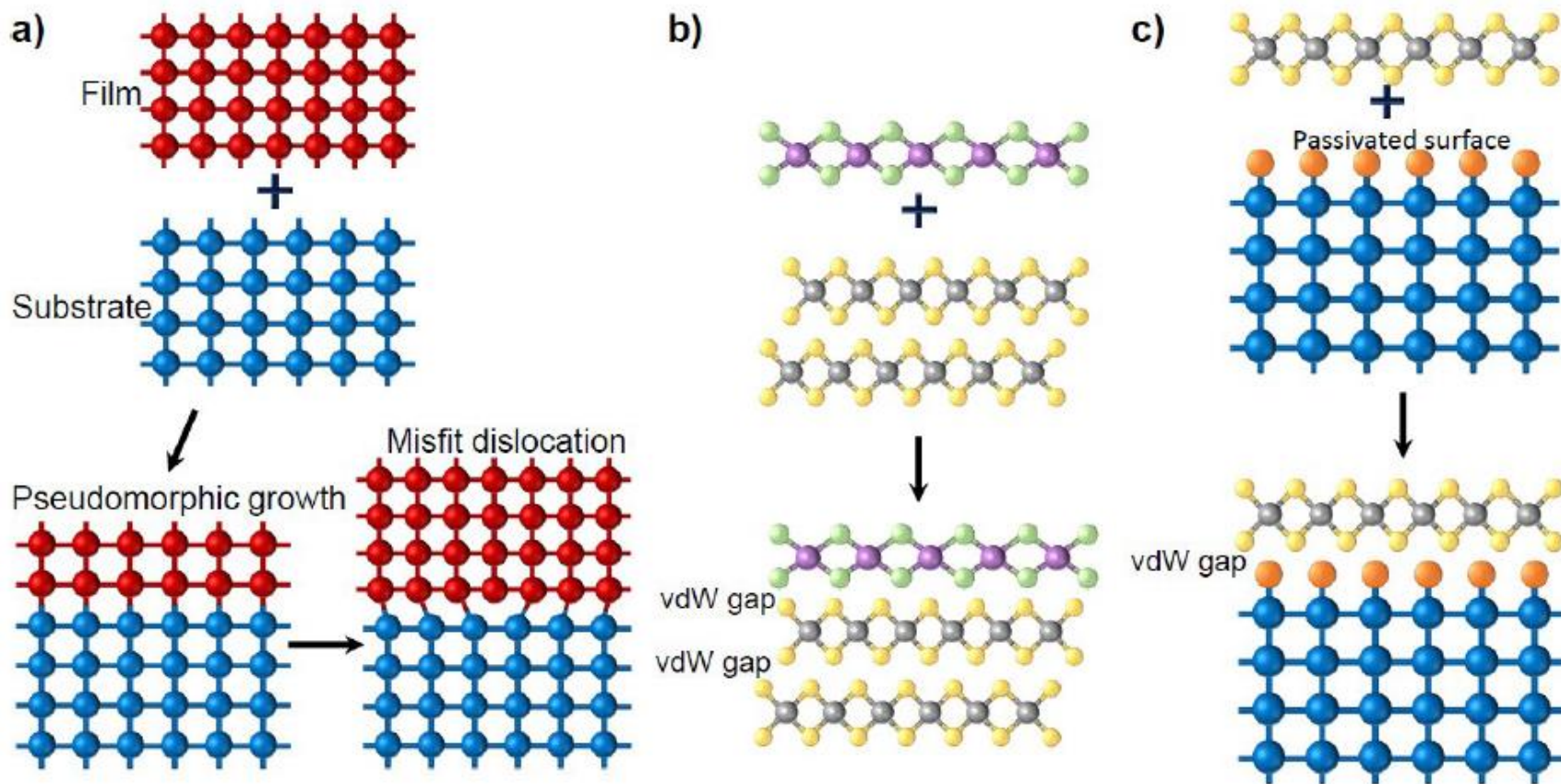
- Замена SiO_2 на CaF_2 позволит улучшить надежность и чувствительность, а также уменьшить рабочее напряжение

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

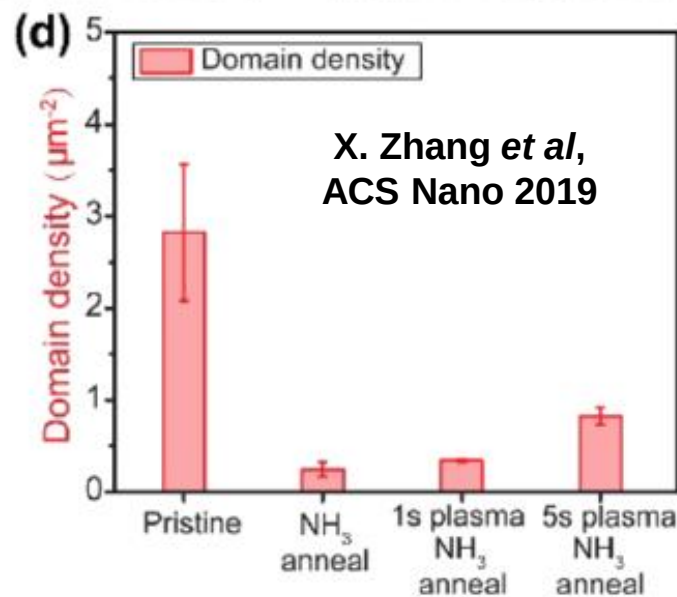
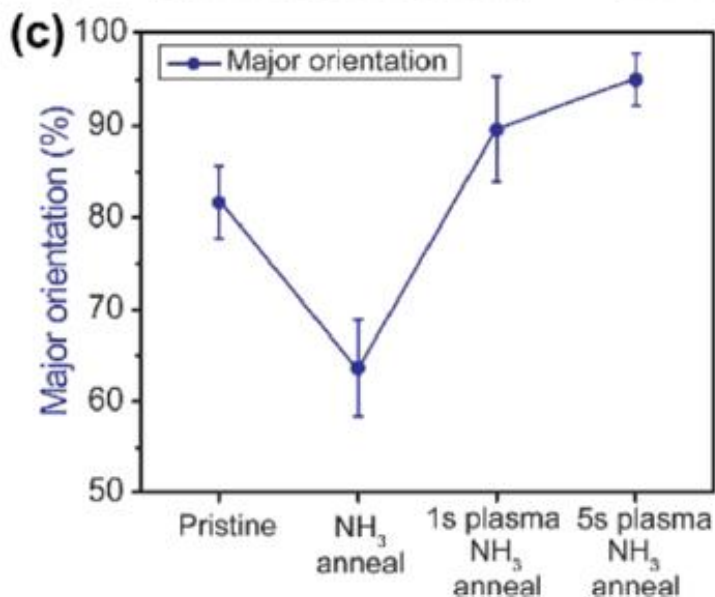
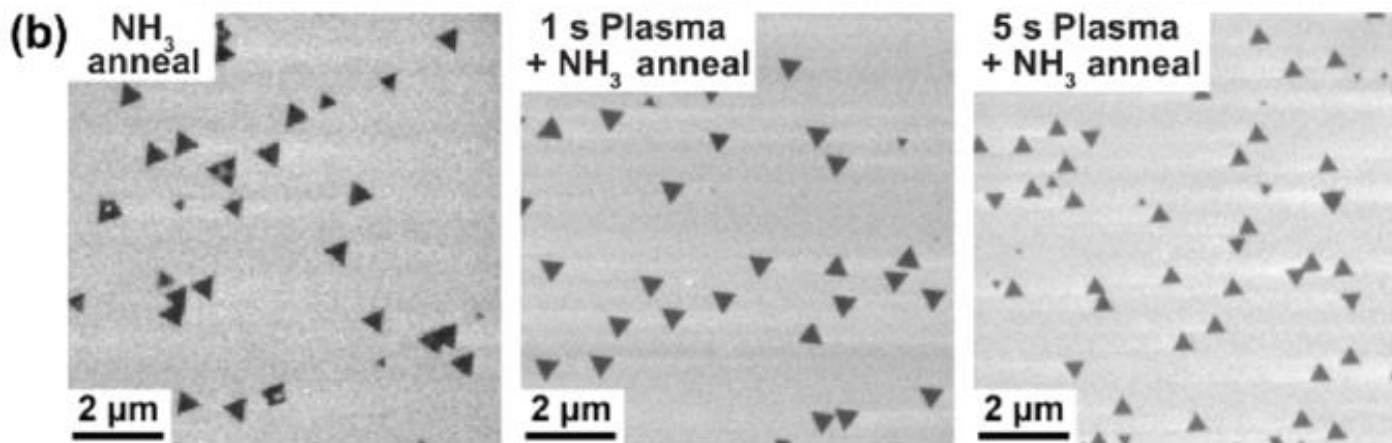
Разновидности эпитаксиального роста



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

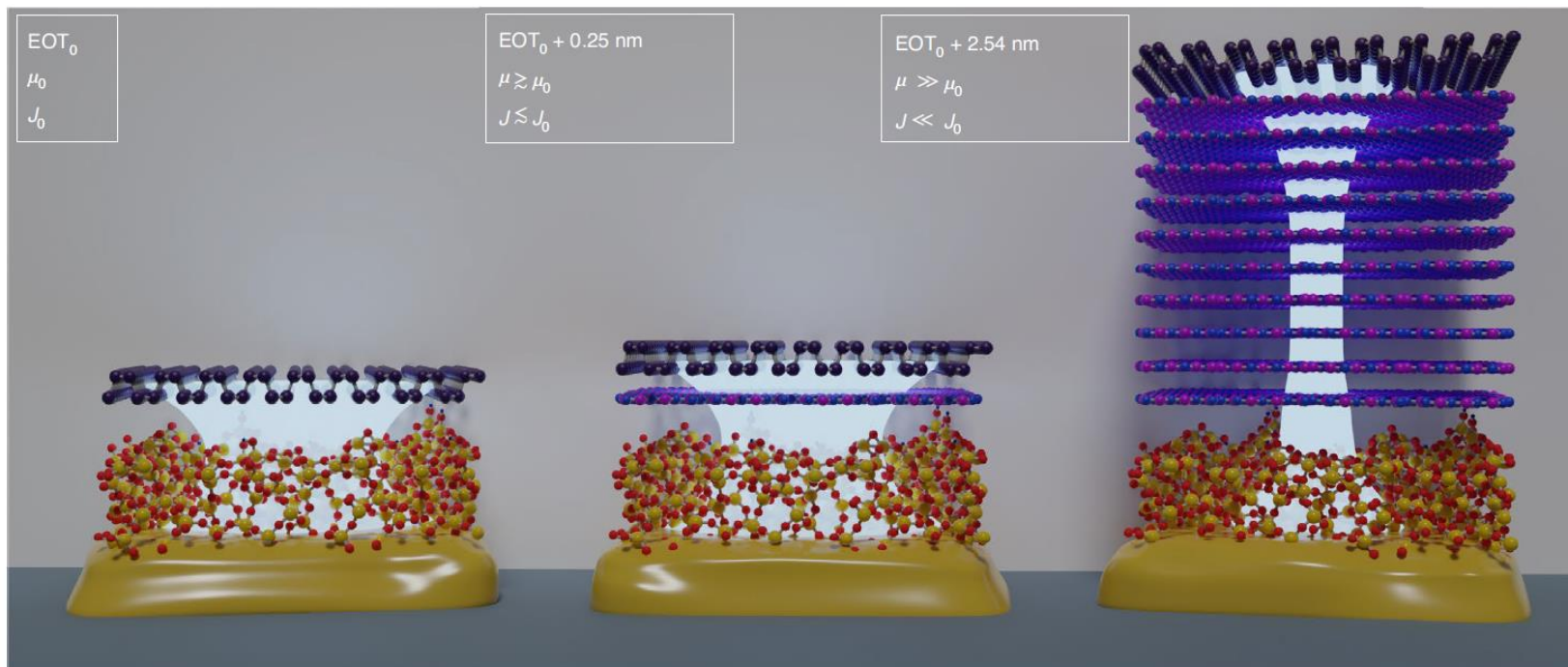
- По аналогии с ростом одного 2D материала на поверхности другого, возможен рост 2D материалов на пассивированных поверхностях (пример: $\text{CaF}_2(111)$)

Рост двумерных материалов на поверхности hBN



- Контроль ориентации доменов WSe₂ путем отжига поверхности hBN в NH₃

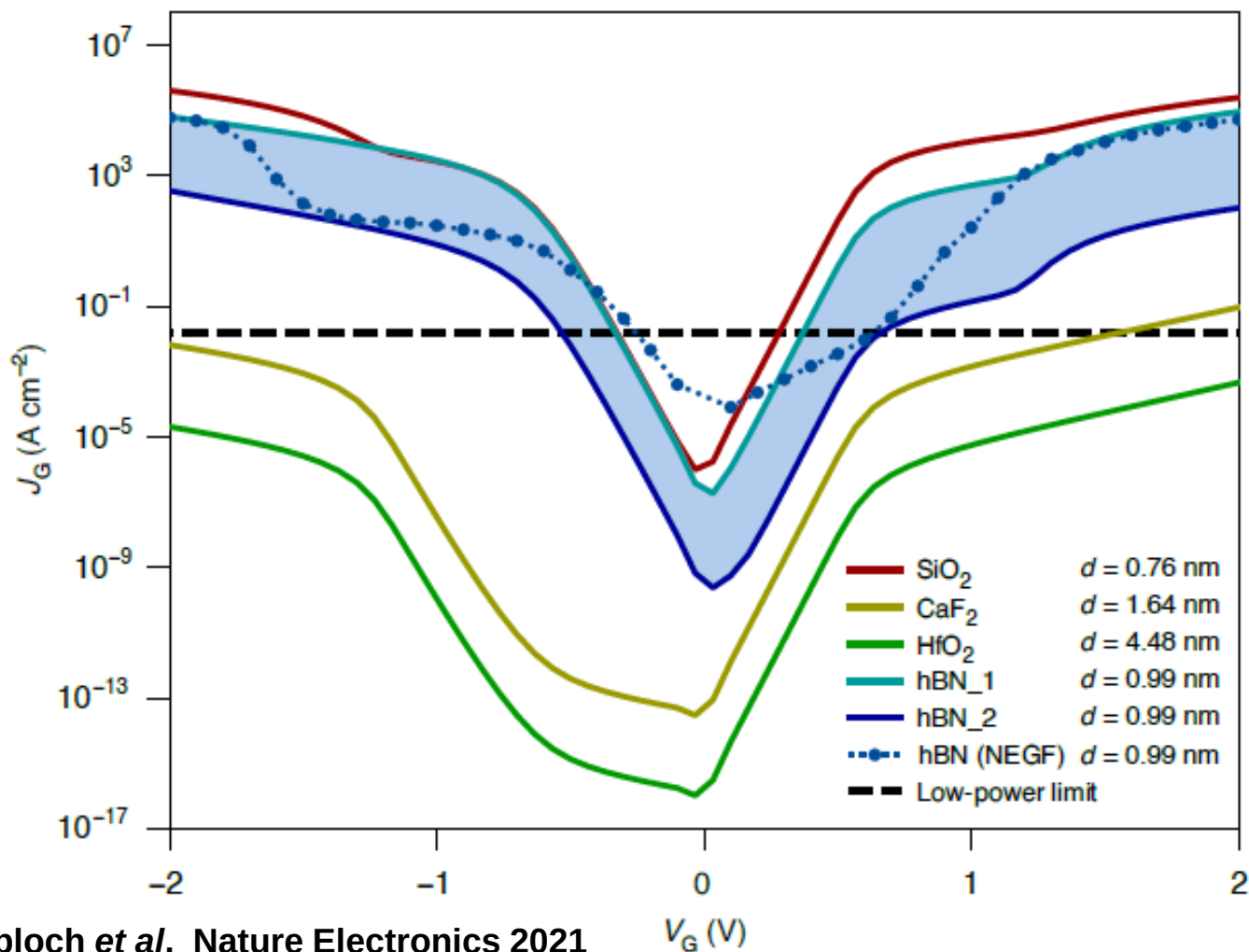
Невозможность использования hBN в ПТ



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