

Научно-технические достижения и перспективы
коммерциализации технологий производства
фотоэлектрических преобразователей на основе
перовскитов

Гудилин Евгений Алексеевич

МГУ им. М.В. Ломоносова

goodilin@yandex.ru

Москва

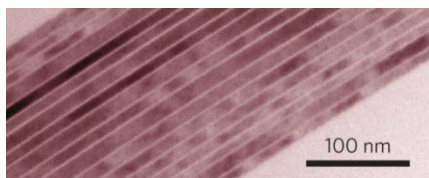
2018



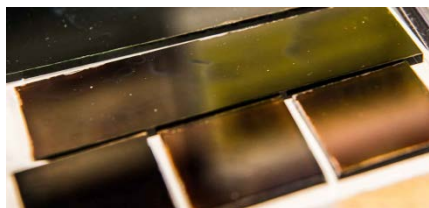
Гибридные перовскиты – новые перспективные материалы для оптоэлектроники и фотовольтаики



0D: квантовые точки



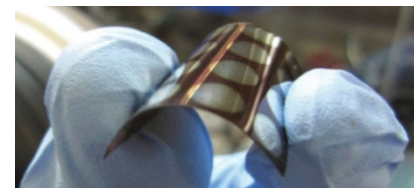
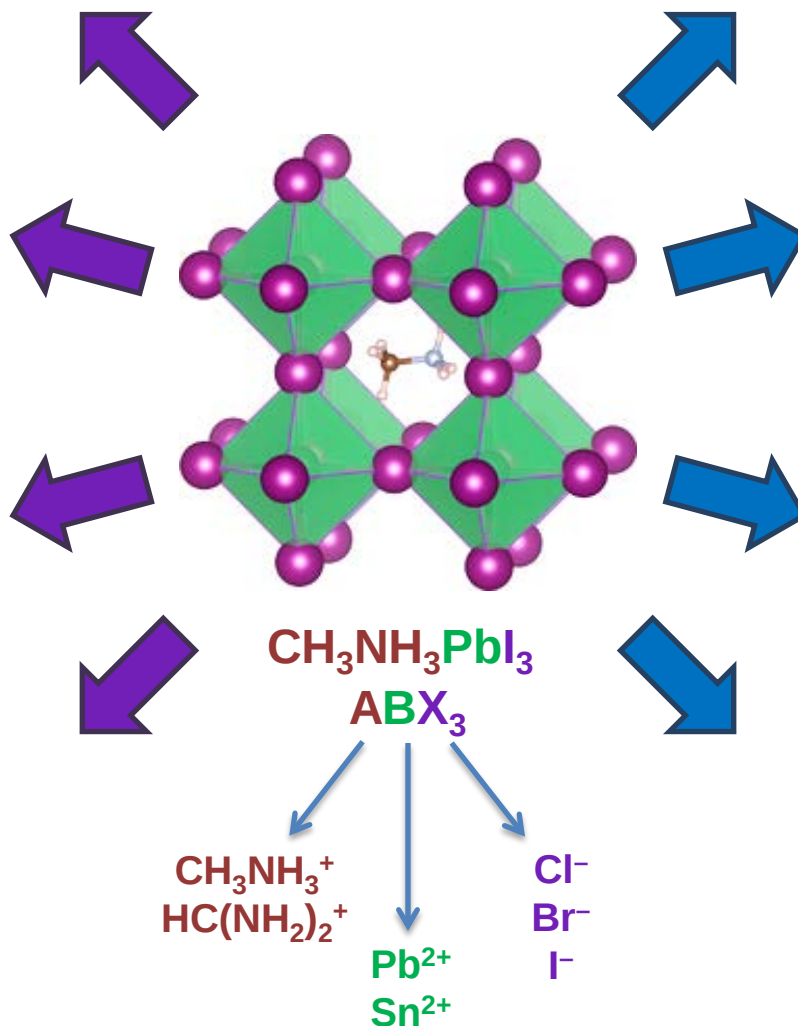
1D: нанонити



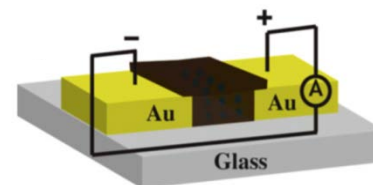
2D: плёнки



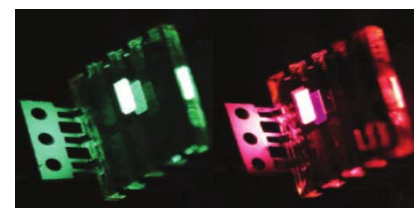
3D: монокристаллы



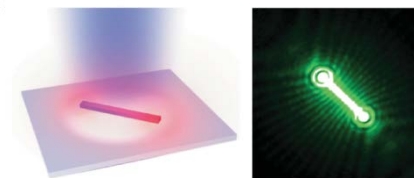
Солнечные ячейки



Фотодетекторы



Светодиоды



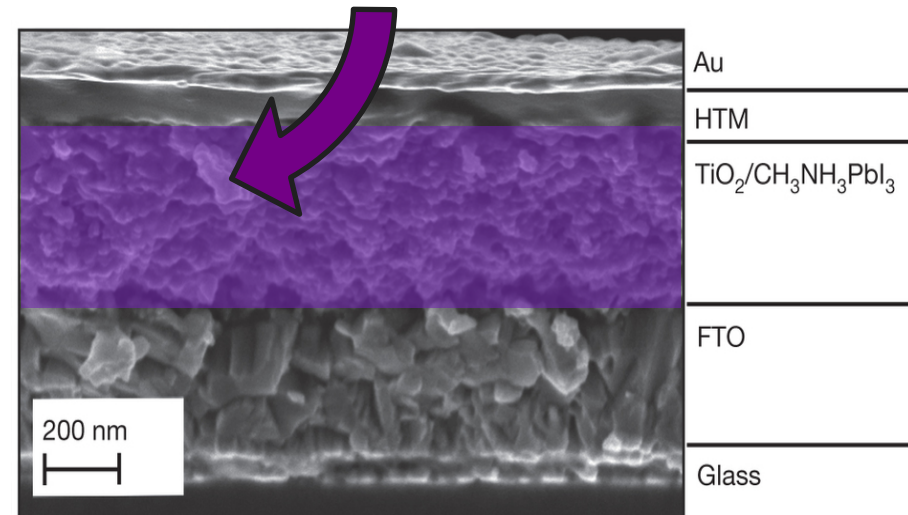
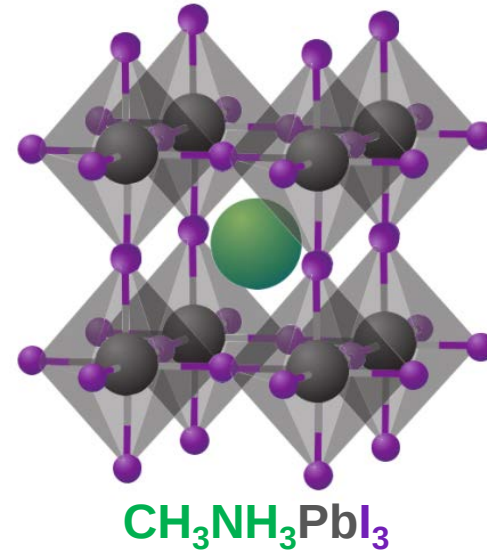
Лазеры



Перовскитные солнечные элементы – тонкопленочные устройства, толщина всех активных слоев составляет не более 2 микрометров



- ✓ КПД > 23%
- ✓ простота получения
- ✓ низкая стоимость реагентов
- ✓ полупрозрачность
- ✓ возможность гибких носителей

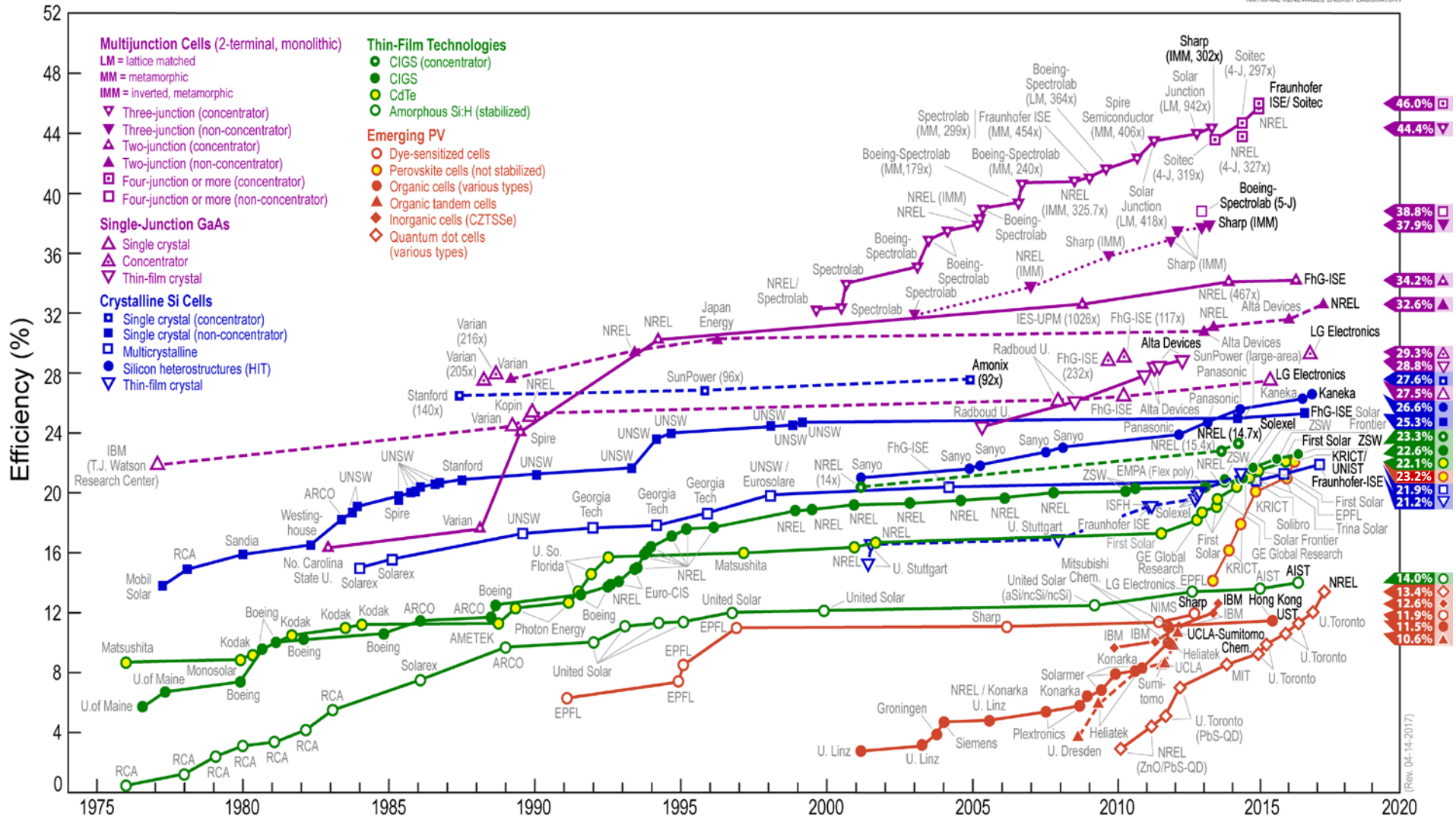




Перовскитные солнечные элементы – самая быстроразвивающаяся область фотовольтаики



Best Research-Cell Efficiencies



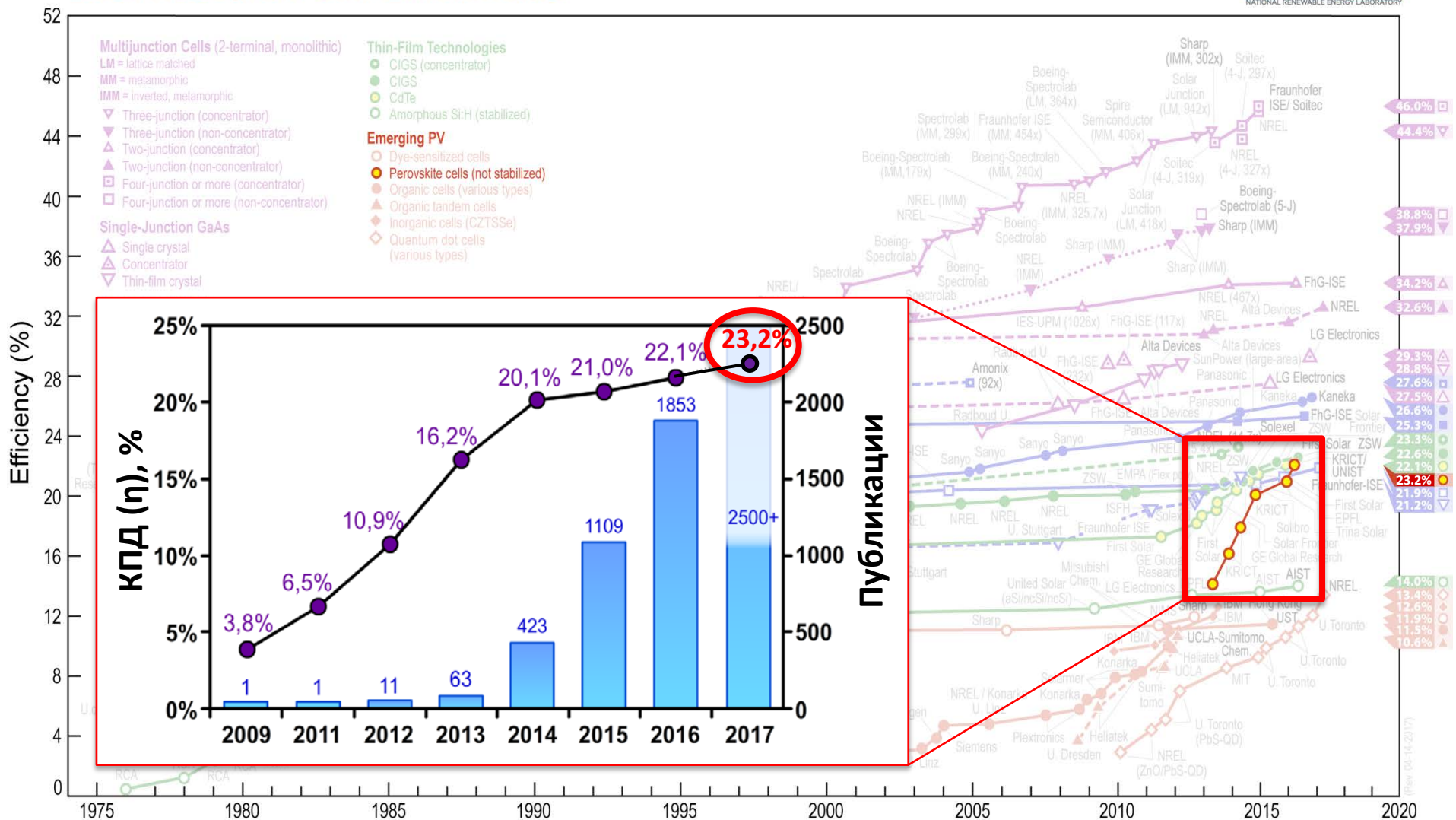
<https://www.nrel.gov/pv/>



Перовскитные солнечные элементы – самая быстроразвивающаяся область фотовольтаики

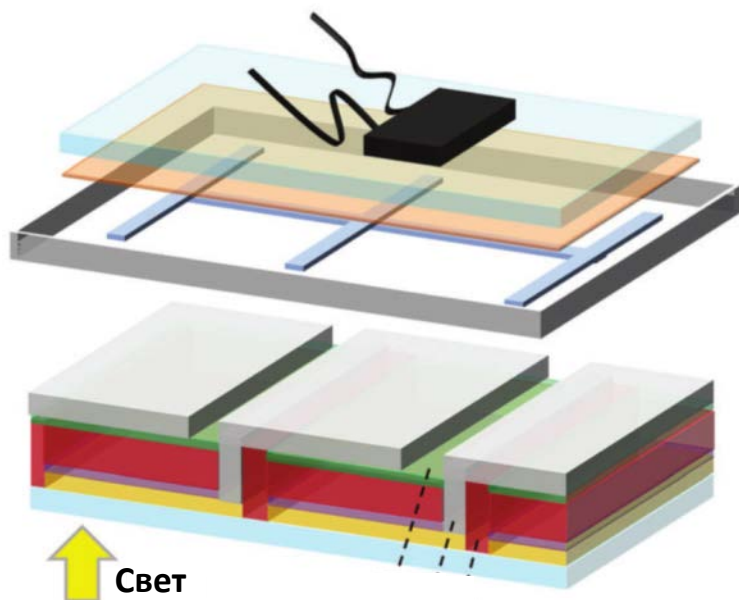


Best Research-Cell Efficiencies





Солнечный элемент составляет всего 6,5% от стоимости перовскитного солнечного модуля



Структура монолитного перовскитного солнечного модуля

шинопроводы
заднее стекло
ламинирующая плёнка
контакты
инкапсулирующая рама

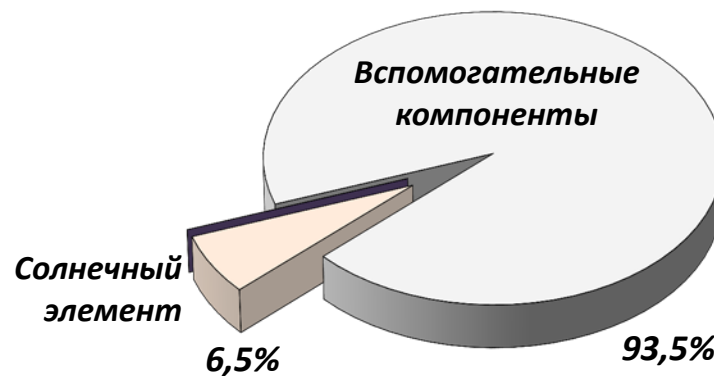
вспомогательные компоненты
защита, контакты

Al (100 нм)
ZnO (70 нм)
CH₃NH₃PbI₃ (350 нм)
NiO (80 нм)
ITO (200 нм)

Солнечный элемент
свет → электрический ток

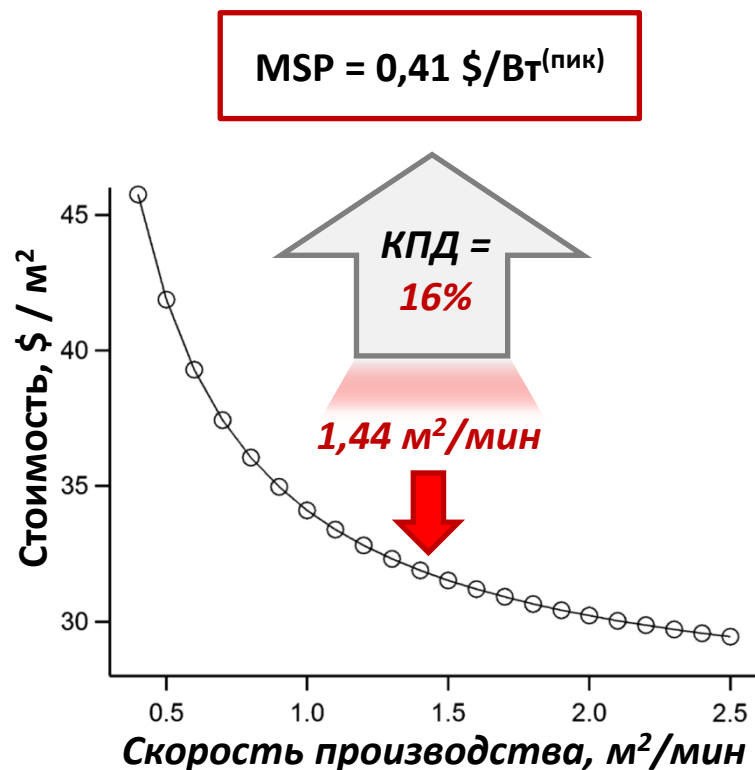
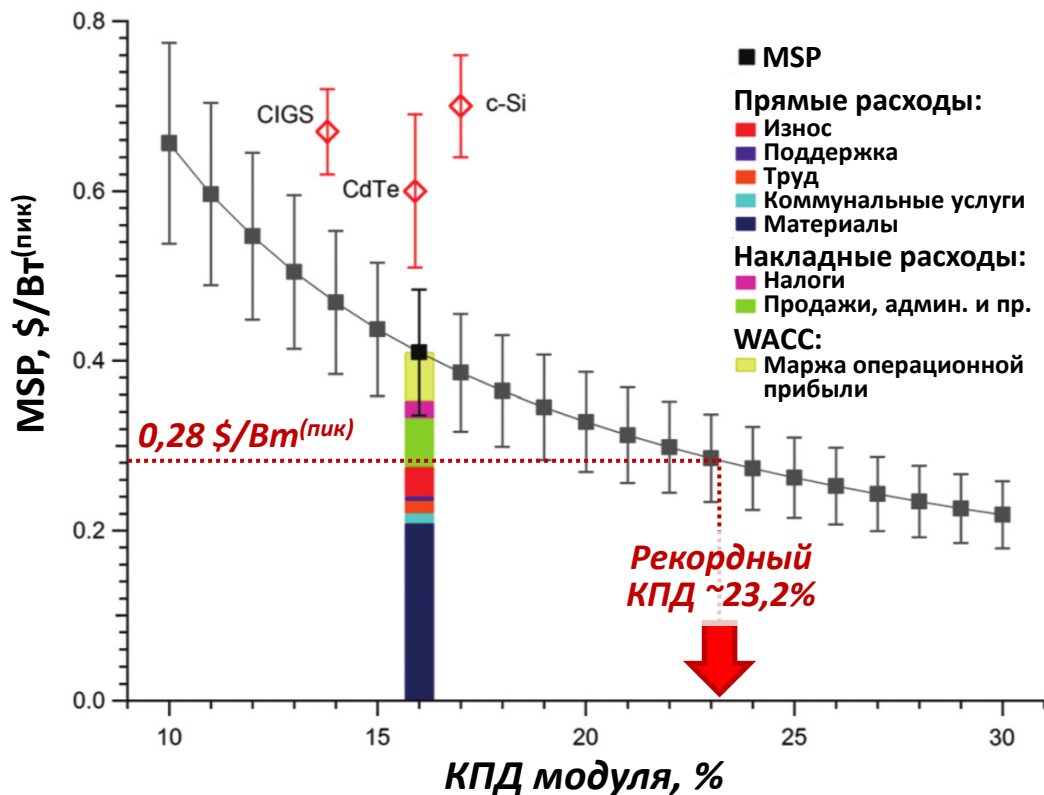
Вспомогательные компоненты применяются при производстве коммерческих солнечных элементов CdTe и CIGS:

- ✓ технология оптимизирована
- ✓ фиксированная цена





Минимальная устойчивая цена (MSP) производства модулей с КПД = 16% со скоростью 1,44 м²/мин составит 0,41 \$/Вт^(пик)



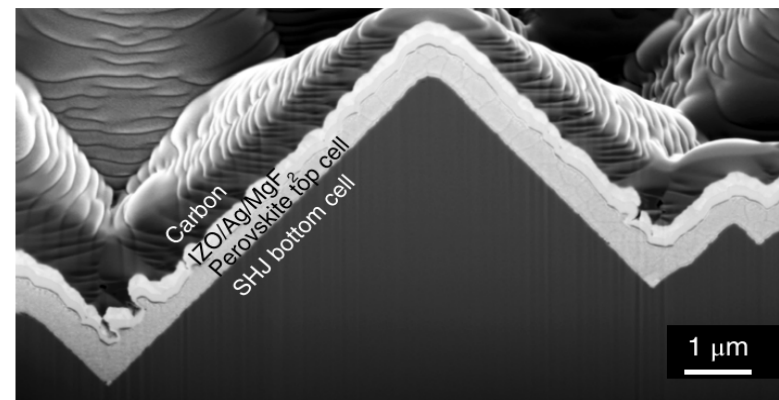
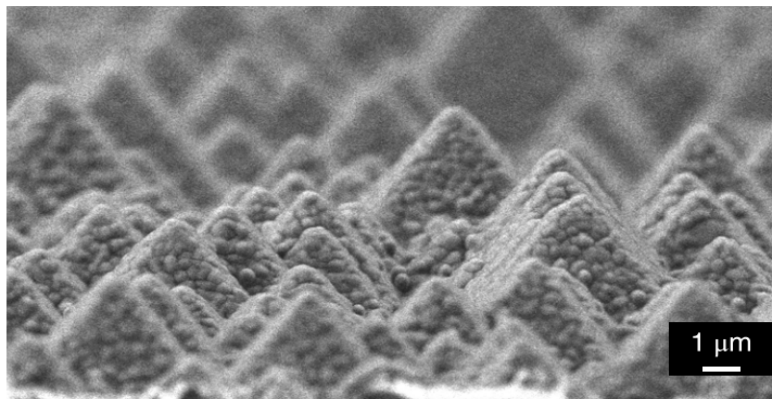
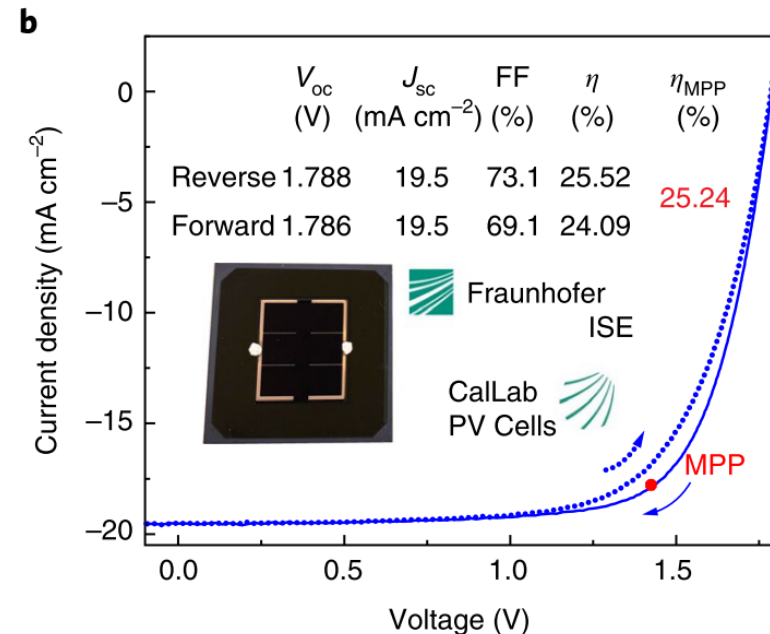
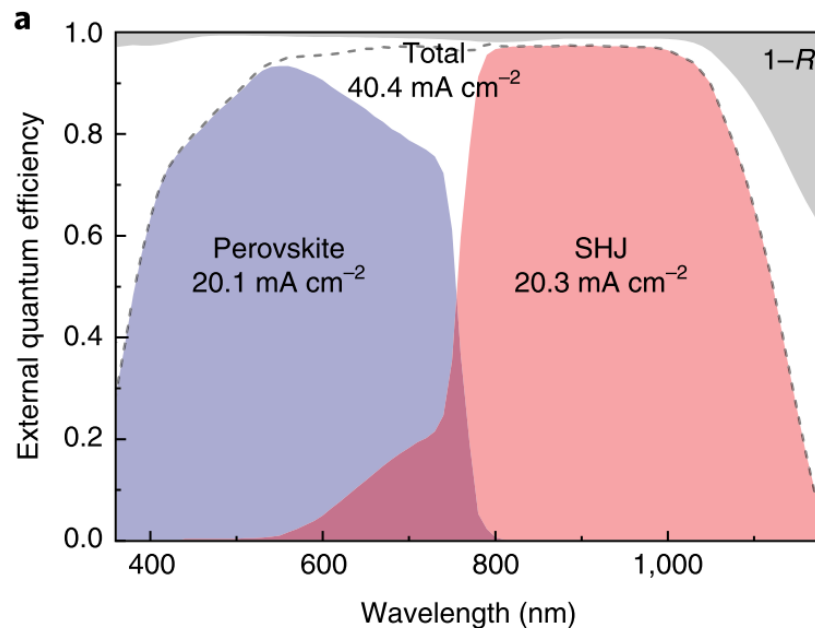
- ✓ MSP перовскитных модулей (0,41 \$/Вт) значительно ниже, чем CdTe (0,60 \$/Вт), CIGS (0,67 \$/Вт) и кремниевых (0,64 – 0,76 \$/Вт)
- ✓ Низкая стоимость обусловлена дешёвыми материалами, а также низким энергопотреблением и высокой скоростью производства

* Song Z. et al. A technoeconomic analysis of perovskite solar module manufacturing with low-cost materials and techniques // Energy Environ. Sci., 2017. Vol. 10, № 6. P. 1297–1305.

(University of Toledo, Wright Center for Photovoltaics Innovation and Commercialization, USA)



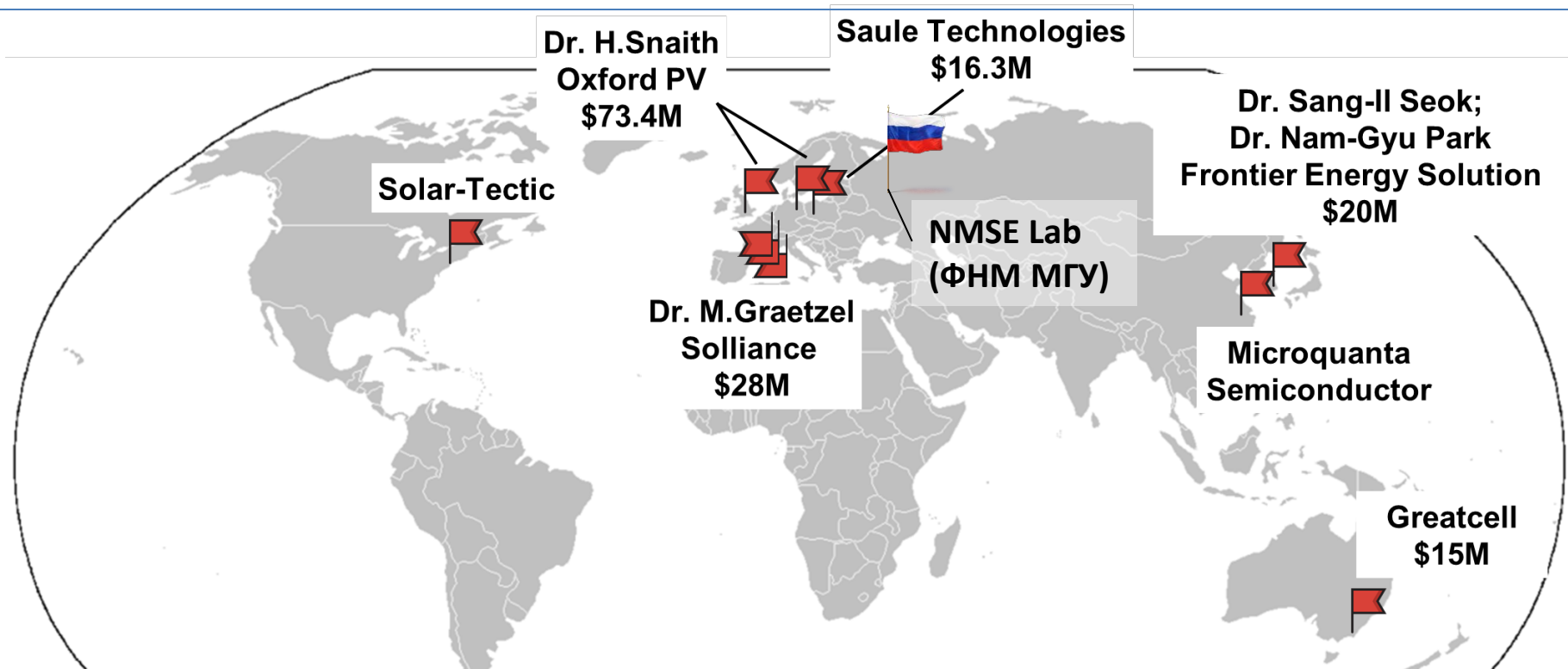
Перспективной является разработка тандемных солнечных элементов перовскит/Si, демонстрирующих КПД > 27%



Sahli, F. *et al.* Fully textured monolithic perovskite/silicon tandem solar cells with 25.2% power conversion efficiency. // *Nature Materials*, 17, 820–826 (2018).



Перовскитными элементами занимается более 10 000 человек,
7 компаний планируют коммерциализацию в ближайшие 5 лет



Пример коммерциализации:



исследования в
области перовскитов
2014-2018

Dr. Henry Snaith
(University of Oxford)

Трансфер
созданных
технологий



- Внешние инвестиции на \$ 68 М
- В 2019 г вывод на рынок гибридных Si/перовскитных модулей



В России исследованиями гибридных перовскитов занимаются всего несколько групп



- Инновационные безрастворные методы получения плёнок гибридных перовскитов
- Масштабирование производства перовскитных солнечных элементов
- Фундаментальные исследования химии перовскитов
- Поиск новых стабильных гибридных перовскитов



УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

- Перовскитные светодиоды
- Применение гибридных перовскитов в фотонике

Skoltech

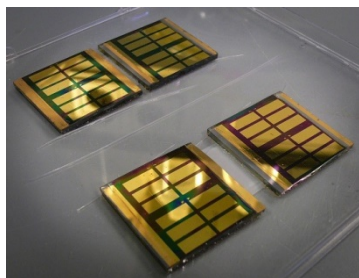
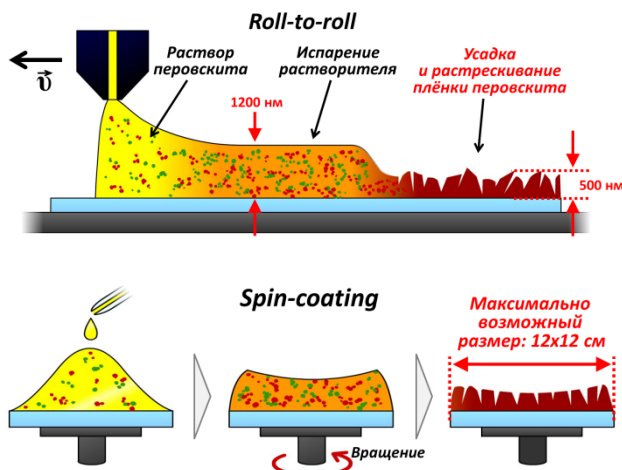
- Поиск безсвинцовых светопоглощающих материалов
- Исследование стабильности гибридных перовскитов



- Создание перовскитных солнечных элементов растворными методами

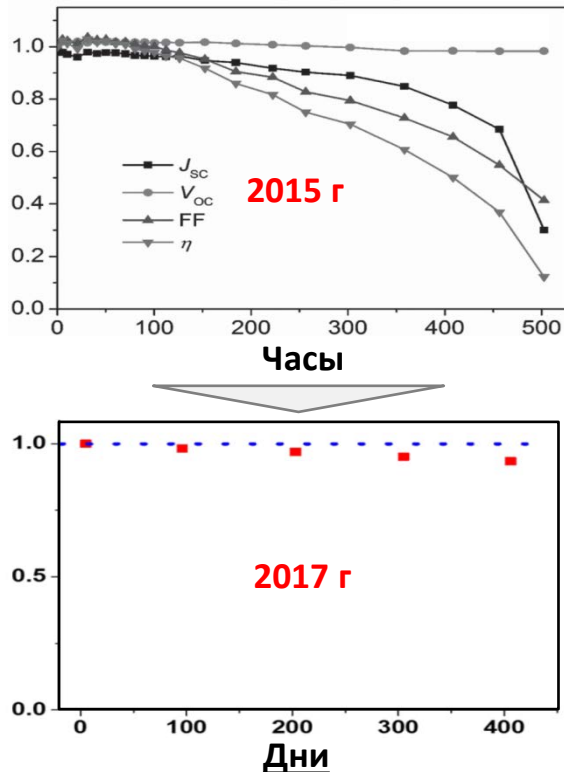
Масштабируемость

Ни одна из известных технологий получения тонких плёнок не применима к перовскитам большой площади:



2x2 см

Стабильность



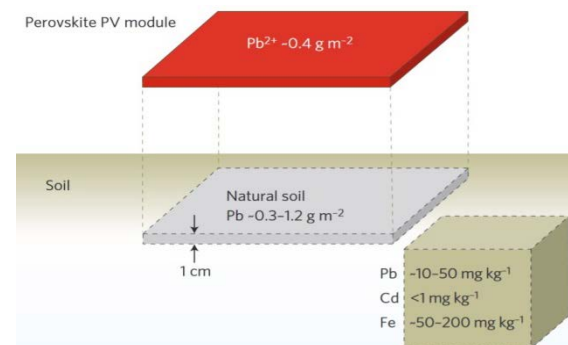
Последние публикации подтверждают возможность повышения стабильности перовскитных солнечных элементов

Токсичность

В одном автомобильном аккумуляторе содержится столько же Pb, сколько в солнечных модулях площадью ~2000 м²

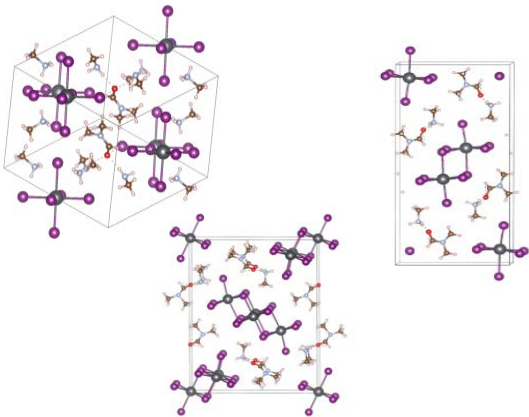


Слой почвы толщиной 1 см содержит столько же свинца, сколько модуль, равный ему по площади



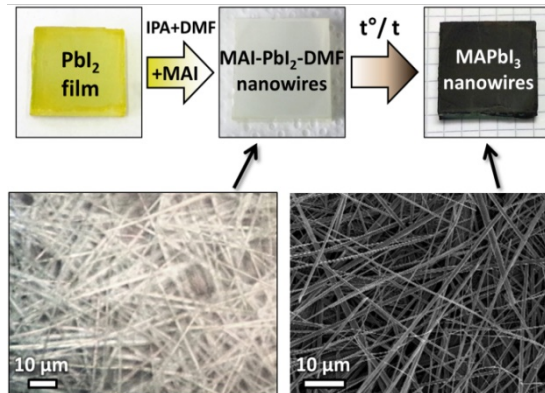
✓ Инкапсуляция позволяет защитить элемент от внешних воздействий и избежать попадания Pb в окружающую среду

Исследование кристаллизации перовскитов из ДМФА



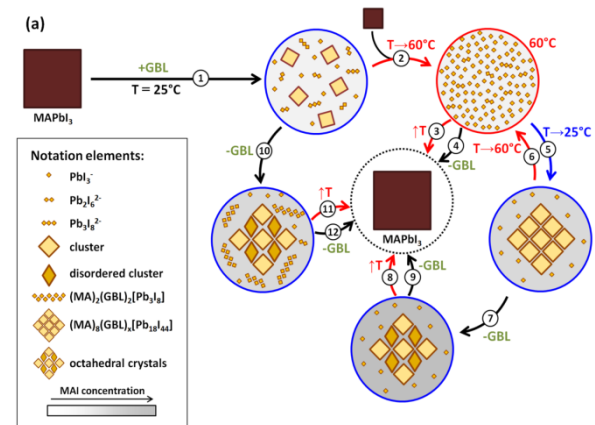
- Открыты новые аддукты перовскитов с ДМФА
- Объяснён эффект влияния соотношения прекурсоров на морфологию перовскита

Получение нанонитей перовскита



- Разработан новый метод получения нанонитей перовскита
- Установлен механизм формирования нанонитей перовскита
- Получены нанонити перовскита различного состава

Исследование кристаллизации перовскитов из ГБЛ



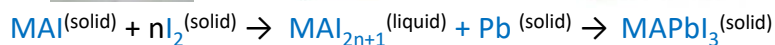
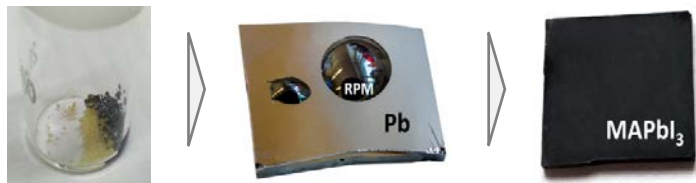
- Установлены пути кристаллизации перовскита из различных растворителей
- Предложен метод улучшения морфологии плёнок перовскита

[1] Fateev S.A., Petrov A.A., Goodilin E.A., Tarasov A.B., et al. Solution processing of methylammonium lead iodide perovskite from gamma-butyrolactone: crystallization mediated by solvation equilibrium // **Chemistry of Materials**, 2018, 30, pp. 5237-5244.

[2] Petrov A.A., Pellet N., Seo J.-Y., Belich N.A., Kovalev D.Y. Shevelkov A.V., Goodilin E.A., Zakeeruddin S.M., Tarasov A.B., Graetzel M. New insight into the formation of hybrid perovskite nanowires via structure directing adducts // **Chemistry of Materials**, 2017, 29, №2, pp 587–594.

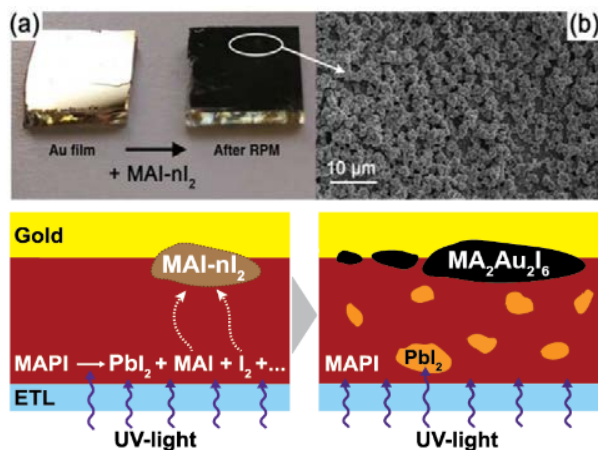
[3] Petrov A.A., Sokolova I.P., Belich N.A., Graetzel M., Goodilin E.A., Tarasov A.B. Crystal Structure of DMF-Intermediate Phases Uncovers the Link Between CH₃NH₃PbI₃ Morphology and Precursor's Stoichiometry // **Journal of Physical Chemistry**, 2017, 121, pp. 20739-20743.

Открыт новый класс прекурсоров перовскита: реакционные расплавы полииодидов (РРП):



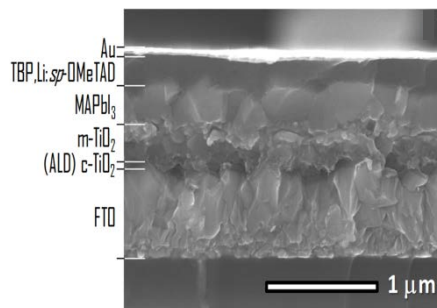
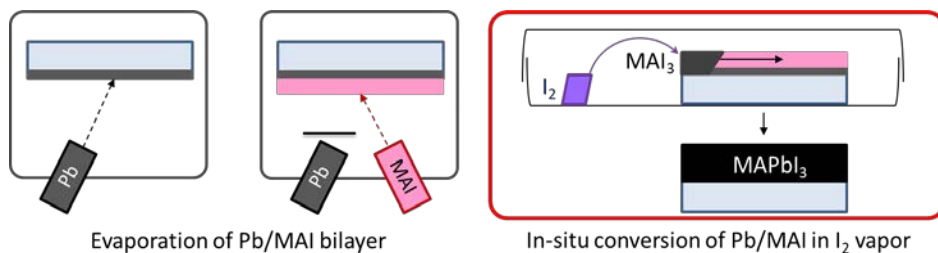
A.A. Petrov, N.A. Belich, A.Yu. Grishko, E.A. Goodilin, A.B. Tarasov, et al. // *Mater. Horiz.*, 2017. Vol. 4, № 4. P. 625–632.

Объяснён механизм деградации перовскитных солнечных элементов:

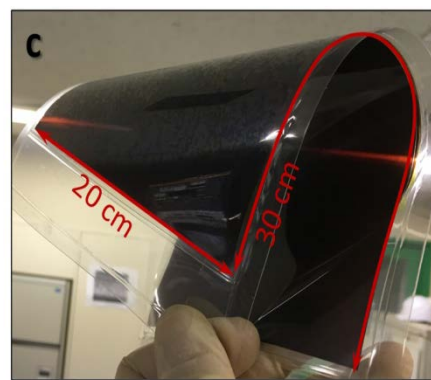


N.N. Shlenskaya, N.A. Belich, M. Grätzel, E.A. Goodilin, and A. B. Tarasov. // *Journal of Materials Chemistry A*, 2018, 6, pp. 1780-1786

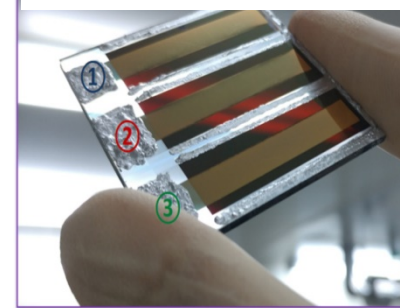
Разработан масштабируемый способ получения перовскитных солнечных элементов на основе РРП:



КПД = 17,2%



35x7мм: КПД = 14,3%



I. Turkevych, S.Kazaoui, N.A. Belich, A.Y. Grishko, S.A. Fateev, A.A. Petrov, E.A. Goodilin, A.B. Tarasov, et al. // *Nature Nanotechnology*, 2018. DOI: 10.1038/s41565-018-0304-y



- фундаментальные исследования в области поиска и разработки принципиально новых химических систем для создания светопоглощающего слоя (в том числе новых фаз, способов легирования, «низкоразмерных перовскитов») с улучшенными характеристиками конечных материалов,
- разработка новых подходов к повышению химической, термической и фотохимической (операционной) стабильности светопоглощающего слоя и солнечного элемента в целом,
- разработка новых материалов – компонентов солнечных элементов с высокой электронной, дырочной проводимостью, решение проблемы совместимости компонентов солнечной ячейки в форматах полностью твердотельного элемента и гибких панелей (в том числе в рамках аддитивных технологий),
- физико – химическая и инженерная проработка возможных технологий масштабируемого нанесения светопоглощающего слоя, в том числе с использованием реакционных расплавов полииодидов как представителей нового семейства «расплавных» (безрастворных) технологий,
- инженерные разработки в области создания tandemных солнечных элементов с учетом возможных достижений в области химии гибридных материалов для солнечных элементов,
- исследования и инженерные разработки в области использования гибридных материалов для светоизлучающих устройств и устройств отображения информации.



Лаборатори новых материалов для солнечной энергетики



Наши партнёры:



Prof. M. Graetzel
EPFL, Switzerland



Prof. Aldo di Carlo
Uni Tor Vergata, Italy



Dr. Ivan Turkevych
CERBA, Japan



Prof. Yasuhiro Shirai
NIMS, Japan



Prof. Henk Bolink
Uni Valencia, Spain



Prof. Chen Qi
BIT, China

Последние публикации:

- Strategic advantages of reactive polyiodide melts for scalable perovskite photovoltaics. // **Nature Nanotechnology**, 2018. DOI: 10.1038/s41565-018-0304-y
- Solution processing of methylammonium lead iodide perovskite from gamma-butyrolactone // **Chemistry of Materials**, 2018, 30, pp. 5237-5244.
- Light-induced reactivity of gold and hybrid perovskite as a new possible degradation mechanism in perovskite solar cells // **J. Mat. Chem. A**, 2018., 6, P. 1780-1786.
- New formation strategy of hybrid perovskites via room temperature reactive polyiodide melts // **Materials Horizons**, 2017, 4, pp. 625-632.

За 2 года работы:

- **18 статей** (суммарный IF > 100)
- **8 патентов** (РФ и РСТ)
- **4 международных стажировки студентов** (Швейцария, Япония)