

# “Немного о глобальном потеплении и солнечной энергетике.”

**КВЕДЕР Виталий Владимирович**

[kveder@issp.ac.ru](mailto:kveder@issp.ac.ru)

**Институт физики твердого тела РАН (ИФТТ РАН),  
142532, Черноголовка, Московской обл., Россия  
(база Кафедры физики твердого тела МФТИ)**



# Мне предложили прочесть лекцию, имеющую отношение к работам Института Физики Твёрдого Тела РАН. Но о чем?

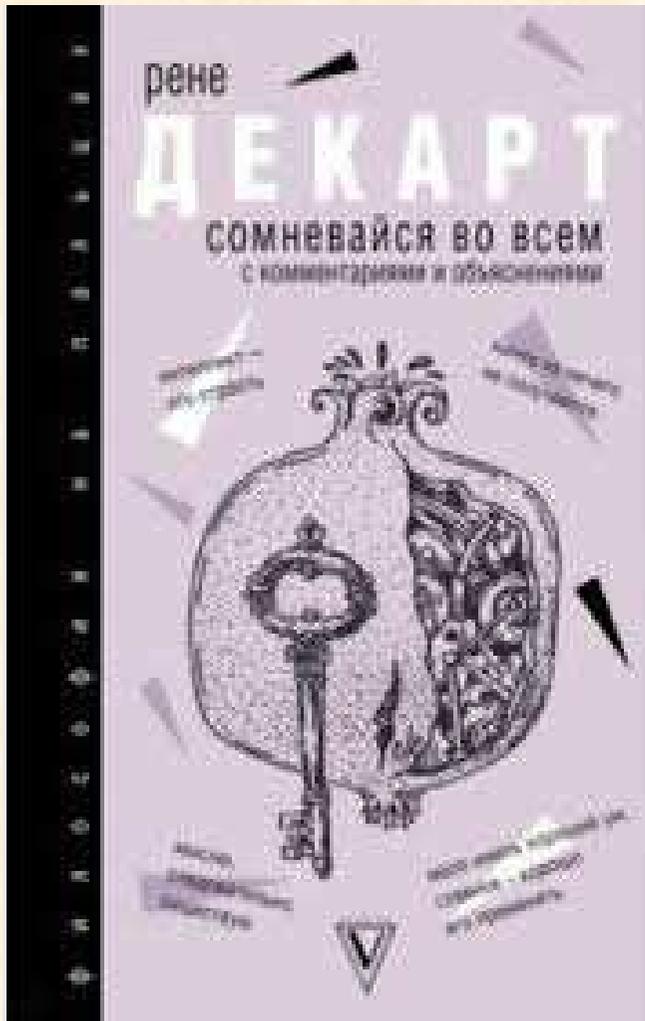
В **ИФТТ РАН** ведутся исследования почти по всем направлениям современной физики конденсированного состояния (ФКС).

Вся физика конденсированного состояния (condensed matter) основана на квантовой механике. Это квантовая наука!

ФКС необходима для создания новых функциональных материалов и различных твердотельных устройств на их основе.

В ИФТТ ведутся все эти исследования, включая: сверхпроводимость и сверхпроводящие q-биты, нанофотоника, спинтроника, полупроводниковые нано-структуры, Бозе-конденсация экситонов, суперионика, мемристоры, жидкие кристаллы, функциональные материалы, элементы микроэлектроники и нанофотоники, сенсоры, солнечные и топливных элементов и т.д.

**В Физике конденсированного состояния путь от фундаментальных исследований до практического использования довольно короткий!**



**"Мы стремимся к приобретению полезных знаний ради житейских удобств, либо ради удовольствия созерцания истины, доставляющего почти единственное в этой жизни не омрачимое никакими печальями блаженство."**

*Рене Декарт*

**Занятия физикой твердого тела доставляют оба эти эти удовольствия!**

# Но сейчас мы поговорим лишь о Глобальном потеплении и Альтернативной энергетике

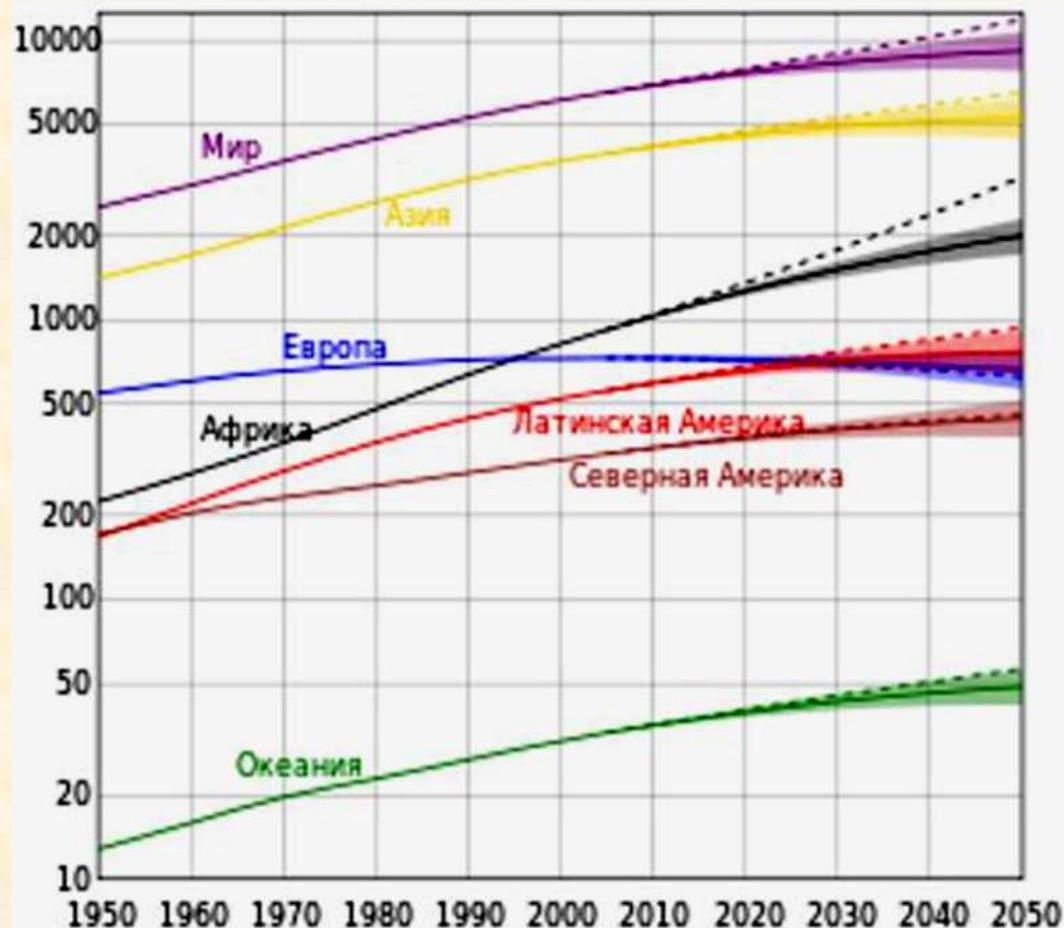
## План лекции:

- проблема глобального потепления
- перспективы развития солнечной энергетики
- принцип работы солнечного элемента
- кремниевые солнечные элементы
- основные пути развития и инженерия дефектов
- тонкопленочные солнечные элементы
- топливные элементы и водородная энергетика



В 2015 г. подписано Парижское соглашение – нужно удержать повышение среднемировой температуры  $< 2^{\circ}\text{C}$  по сравнению с доиндустриальными показателями! Человечество наконец осознало всю опасность Глобального потепления и важность борьбы с выбросом в атмосферу  $\text{CO}_2$  ! Оно готово принять **решительные меры!**

# Население Земли растет и средний расход энергии на одного человека тоже растет!



Когда я учился в школе, людей на Земле было 2.5 млрд. Сейчас на Земле 7.5 миллиардов человек (в 3 раза больше), а живут относительно хорошо около 1.5 млрд.,

Через 30 лет на Земле будет около 10 млрд. человек, и все будут требовать жить не хуже других!

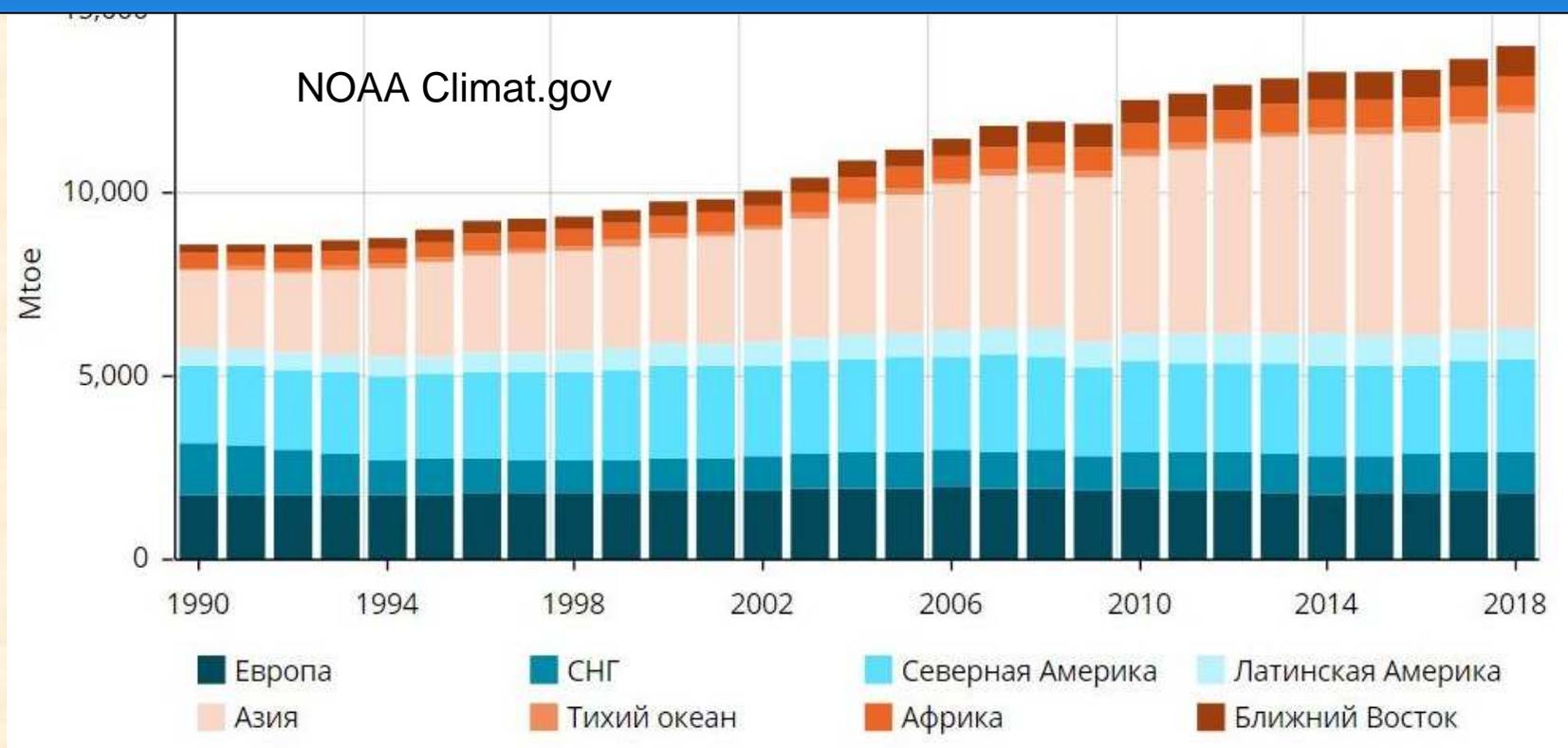
Если ничего не менять, то ресурсов и сырья на всех не хватит!

Надо:

1. Поменять источники энергии
2. Перейти на ресурсо- и энерго сберегающие технологии и re-cycling
3. Забота об экологии - «зеленые технологии», прекратить загрязнять Землю.
4. Поменять стиль жизни на менее расточительный.

# Расход энергии (в Мт усл. топлива) и выбросы CO<sub>2</sub>

**Проблемы: исчерпание ресурсов + дестабилизация климата!**



**За 20 лет потребление энергии выросло в 1.6 раза! И так же выросли выбросы углекислого газа!**

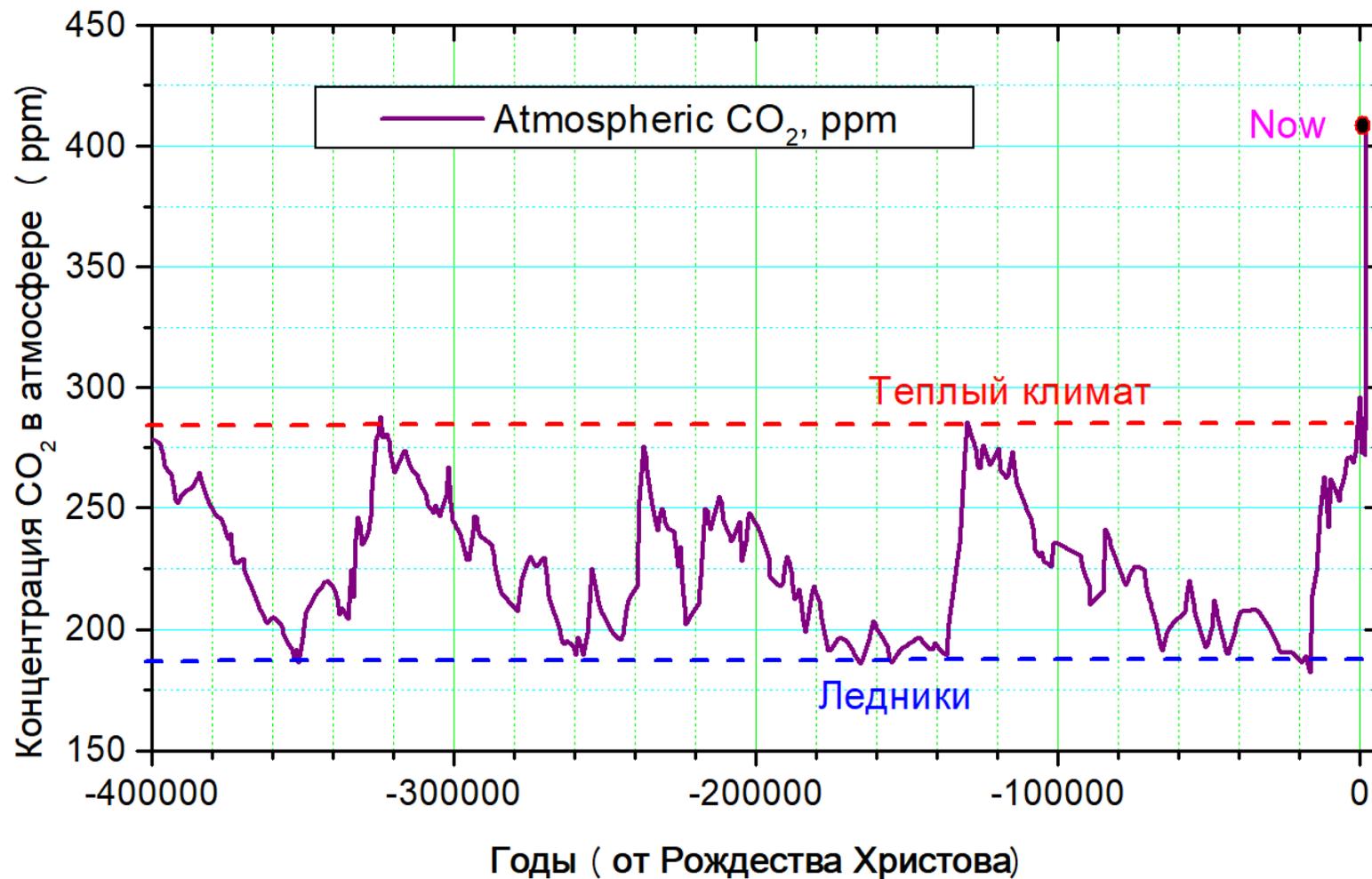
**Ученые начали бить тревогу по этому поводу уже 30 лет назад!**

## Среднегодовой энергетический баланс Земли – «Парниковый эффект»



«Парниковые газы» – прозрачны в видимом диапазоне, но поглощают в ИК диапазоне ( $\lambda > 7$  мкм) –  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ .. Их концентрация сильно влияет на тепловой баланс и среднюю температуру... Сейчас Земля поглощает больше энергии, чем излучает! Она греется! ( [http://www.ecoinv.by/images/novosti/Yulkin1\\_Vpdf.pdf](http://www.ecoinv.by/images/novosti/Yulkin1_Vpdf.pdf) )

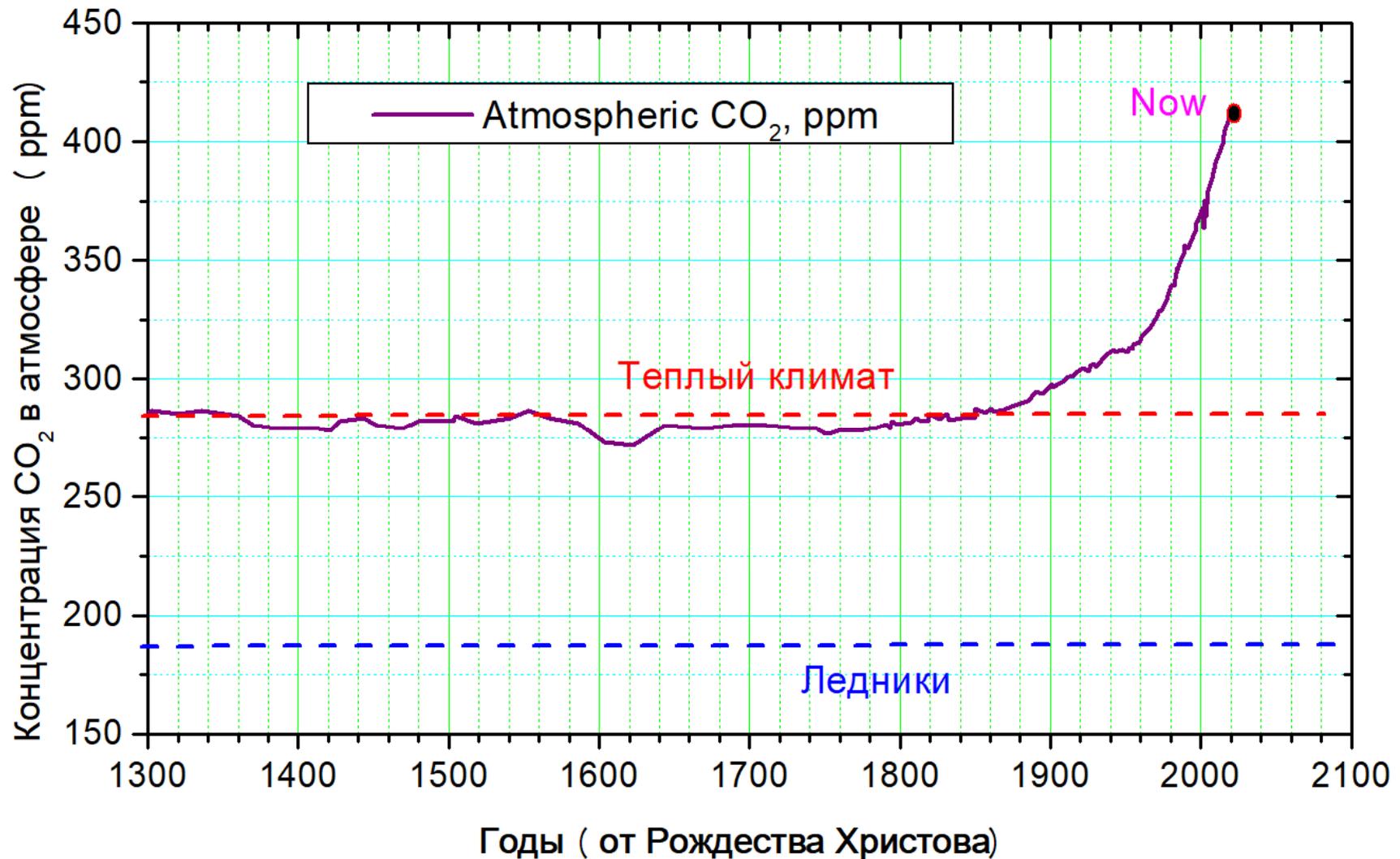
# Эволюция концентрации углекислого газа в атмосфере за предыдущие 400 тыс. лет (измерено по кернам льда в Антарктиде и Гренландии)



(Lüthi, D., et al., 2008) provided by NOAA NCEI Paleoclimatology Program.

Система с положительной обратной связью и осциллирует.

# Концентрация CO<sub>2</sub> за недавние 700 лет



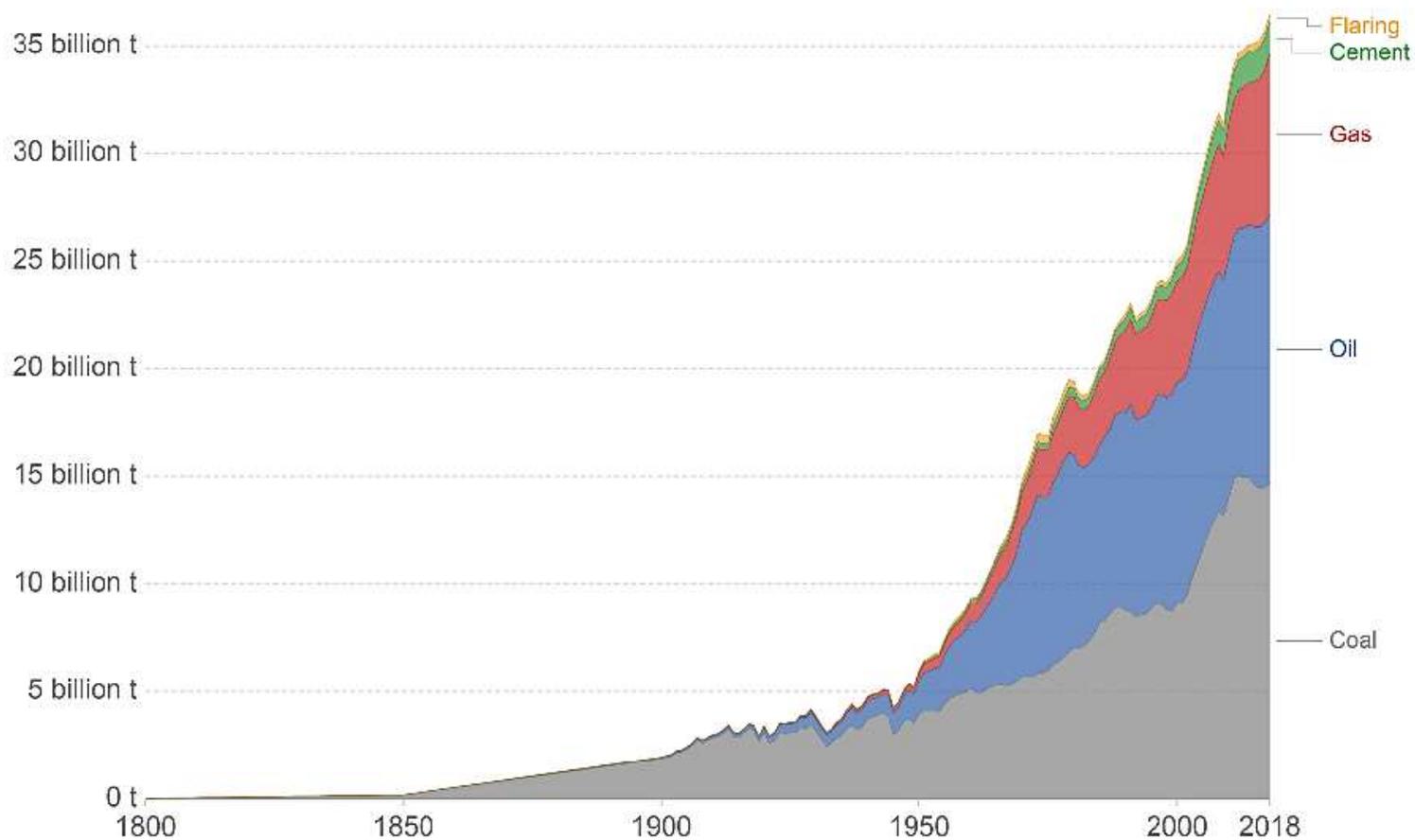
(Lüthi, D., et al., 2008) provided by NOAA NCEI Paleoclimatology Program.

# Антропогенные выбросы CO<sub>2</sub>

## Выбросы CO<sub>2</sub> в динамике по видам топлива

### CO<sub>2</sub> emissions by fuel type, World

Annual carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emissions from different fuel types, measured in tonnes per year.



Source: Global Carbon Project (GCP); CDIAC

OurWorldInData.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions/ • CC BY

# Рост CO<sub>2</sub> вызван людьми! Что делать ??

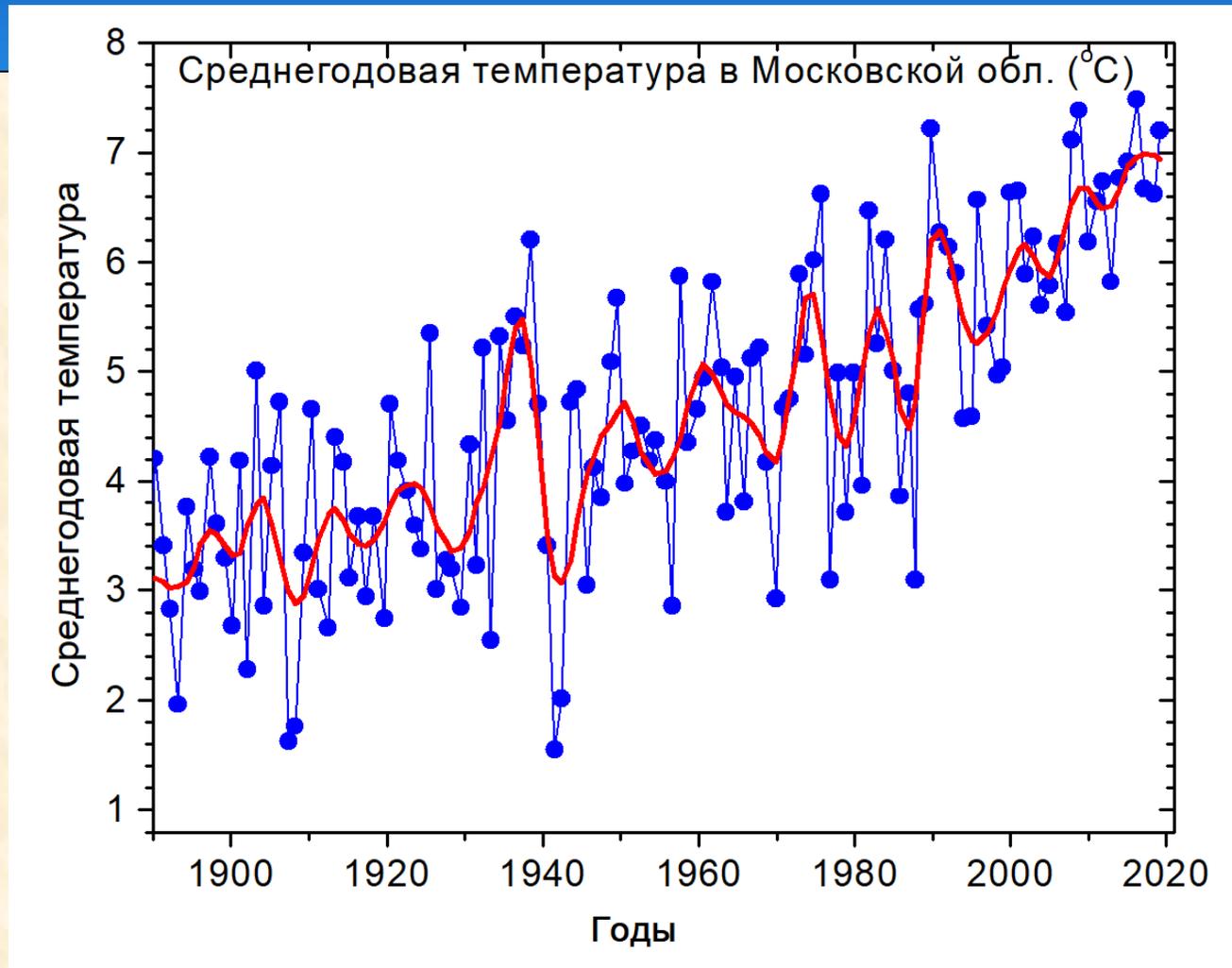


Рисковать нельзя! Надо срочно:

1. Переходить на «зеленую энергетику»
2. Расходовать энергию эффективнее и экономнее!

Через 10 лет, с 2032г. – планируется прекратить выпуск автомобилей с д.в.с.

## Среднегодовая температура в Московской обл.

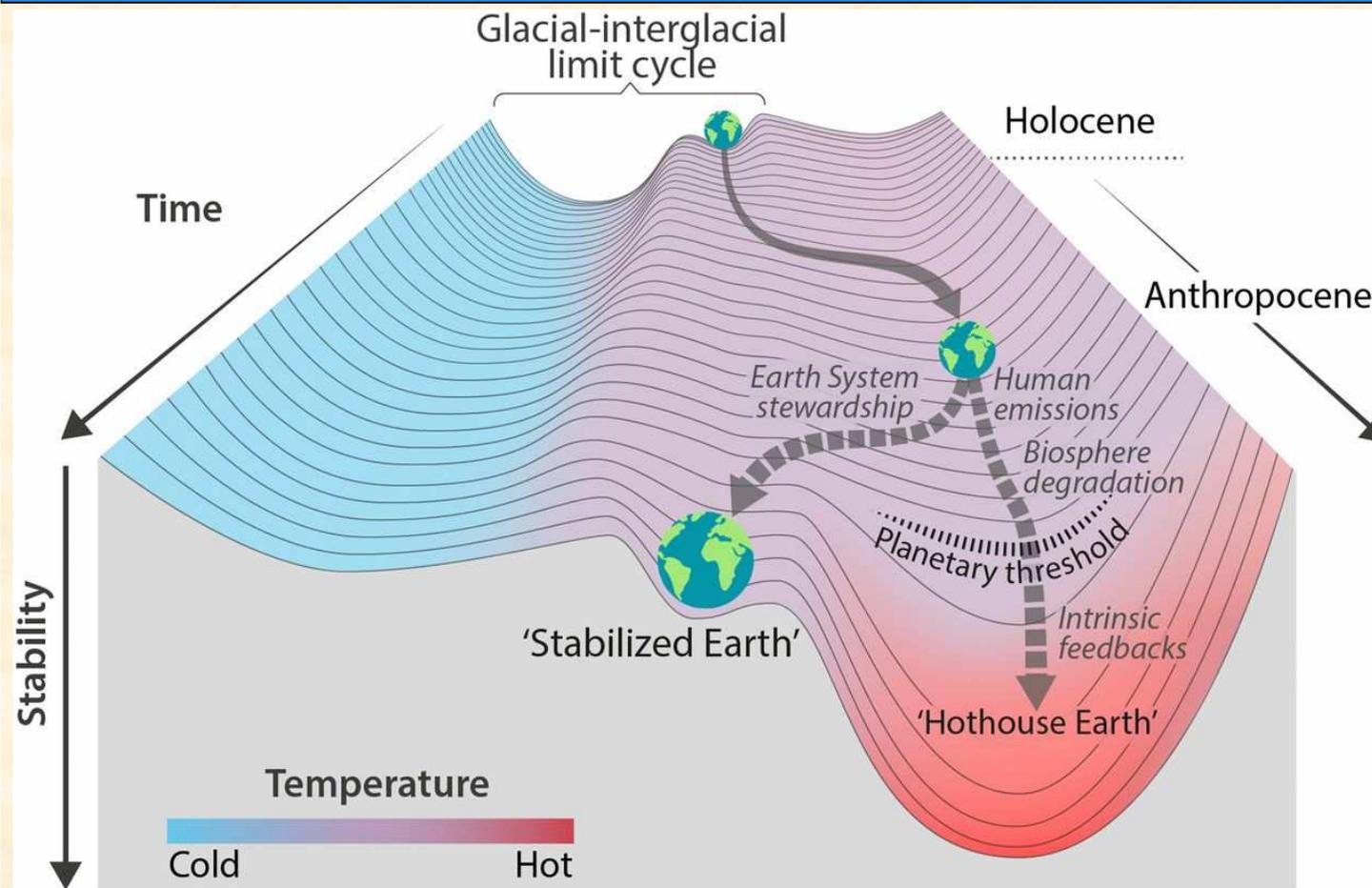


На первый взгляд, для нас это даже хорошо, но все не так просто!

**Положительная обратная связь: рост температуры => таяние вечной мерзлоты  
=> выделение метана и рост влажности => рост парникового эффекта!**

На пути из голоцена к нынешнему теплomu антропоцену. Точный расчет пока невозможен – сильно нелинейная система!

Но рисковать очень опасно!



**Важно не  
проскочить  
«точку  
невозврата» !**

## Trajectories of the Earth System in the Anthropocene

Will Steffen<sup>a,b,1</sup>, Johan Rockström<sup>a</sup>, Katherine Richardson<sup>c</sup>, Timothy M. Lenton<sup>d</sup>, Carl Folke<sup>a,e</sup>, Diana Liverman<sup>f</sup>, Colin P. Summerhayes<sup>g</sup>, Anthony D. Barnosky<sup>h</sup>, Sarah E. Comell<sup>i</sup>, Michel Crucifix<sup>j,k</sup>, Jonathan F. Donges<sup>a,k</sup>, Ingo Fetzer<sup>a</sup>, Steven J. Lade<sup>a,b</sup>, Marten Scheffer<sup>l</sup>, Ricarda Winkelmann<sup>k,m</sup>, and Hans Joachim Schellnhuber<sup>a,k,m,1</sup>

Edited by William C. Clark, Harvard University, Cambridge, MA, and approved July 6, 2018 (received for review June 19, 2018)

<https://doi.org/10.1073/PNAS.1810141115>

# Глобальное потепление => Глобальная дестабилизация климата!



Процесс сопровождается увеличением нелинейности системы, что приводит к хаотизации климата и росту турбулентных явлений (ураганов и т.д.)

# Какой вариант «зеленой энергетики» лучше?

- Биомасса
- Солнечная энергия
- Ветер
- Геотермальная
- Атомная (не совсем зеленая)
- Гидро – реки, морские волны
- Закачивать  $\text{CO}_2$  в землю...
- И т.д.

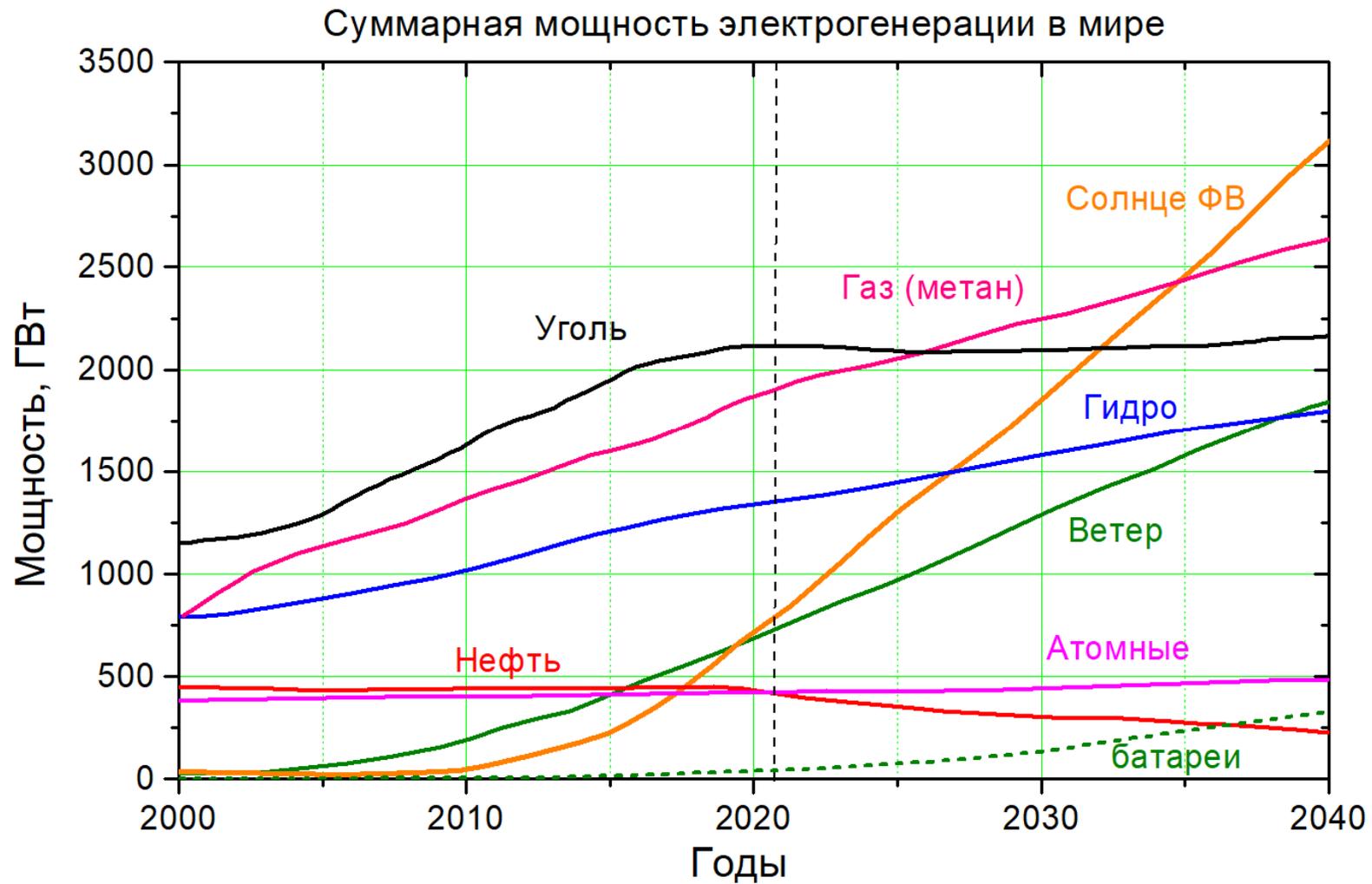


«Биомасса» это не только дрова, но и “био-этанол” и “био-дизель”. Однако, доминировать будет фото-вольтаика!



Бразилия, Сан-Пауло, 10.11.2017

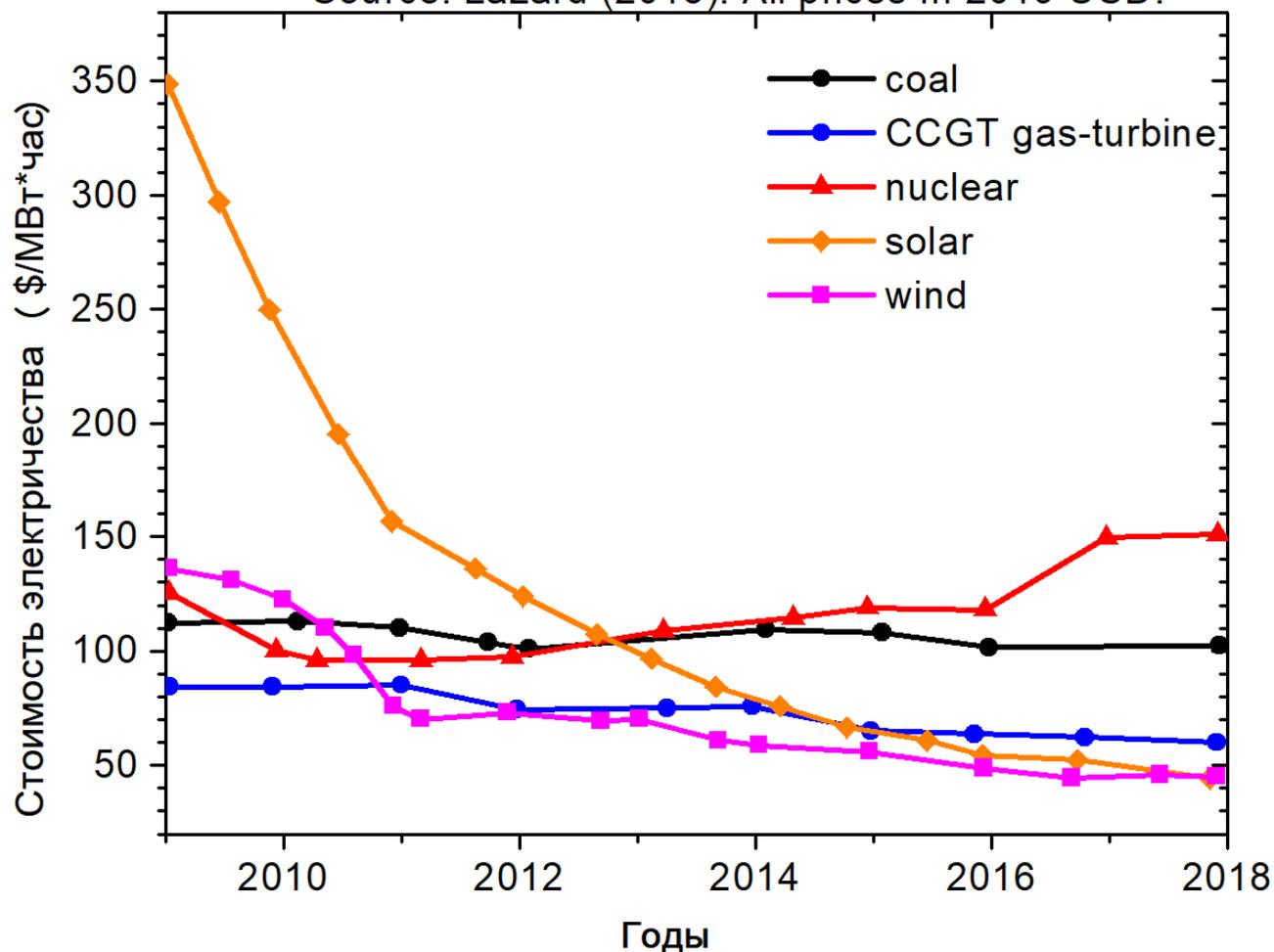
# Современный прогноз развития энергетики на 20лет (от 2020г. до 2040г.)



(Использованы данные International Energy Agency).

Главный перелом уже произошел - солнечное электричество стало дешевле остальных источников!  
Экономика – самый сильный аргумент !

Source: Lazard (2018). All prices In 2019 USD.



Combined cycle gas turbine (CCGT) – тандем из газовой и паровой турбин - строительство дешевле, быстрее, а КПД=48-60%, самое дешевое электричество из всех ТЭЦ.  
Но солнечное электричество уже дешевле!

$$LCOE = \frac{\text{Lifecycle cost of solar project}}{\text{Lifetime energy production of solar project}}$$

## В России есть много районов где солнца много. В частности, в Сибири!

Уровень инсоляции  
Квтч/м<sup>2</sup>/сутки

до 3  
3 - 3,5  
3,5 - 4  
4 - 4,5  
4,5 - 5

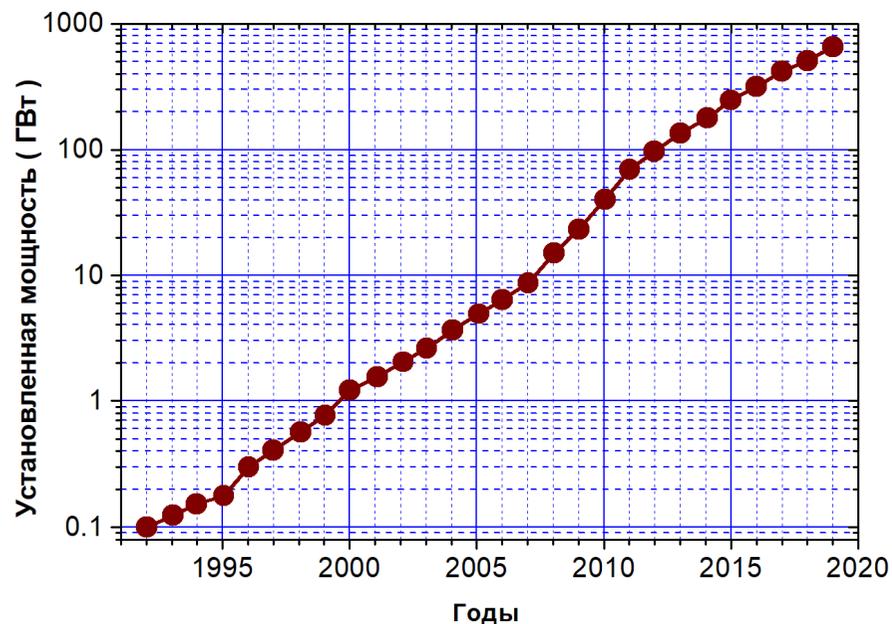


15 миллионов людей в Сибири сейчас используют дизельные генераторы с себестоимостью энергии 15 - 20 Руб/кВт\*ч.

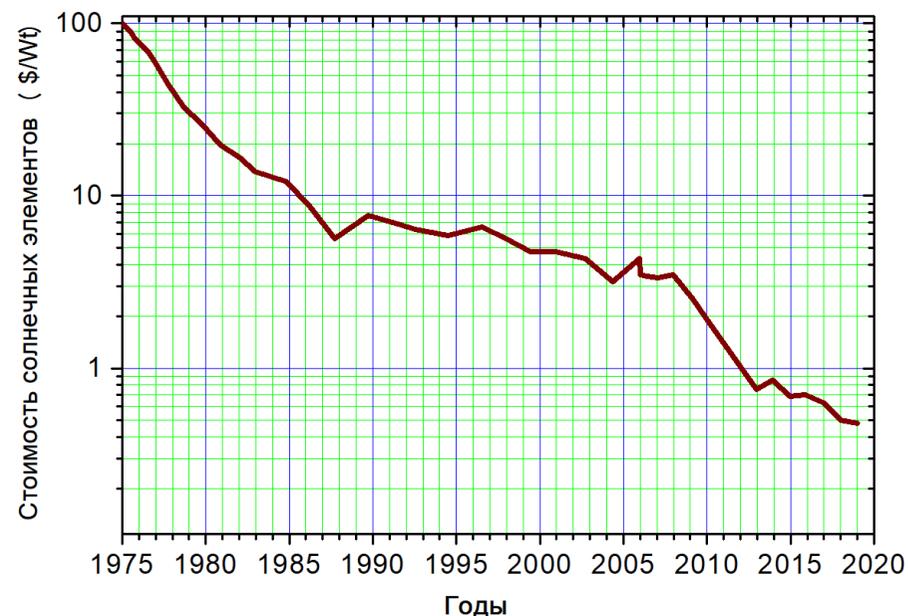
Установка там солнечных батарей при нынешних ценах окупается за 2-3 года.



## Солнечная энергетика активно развивается уже 25 лет! Просто раньше это не бросалось в глаза.



Рост мощности установленных солнечных модулей (в ГВт) по годам.



Падение стоимости солнечных элементов за Ватт мощности по годам.

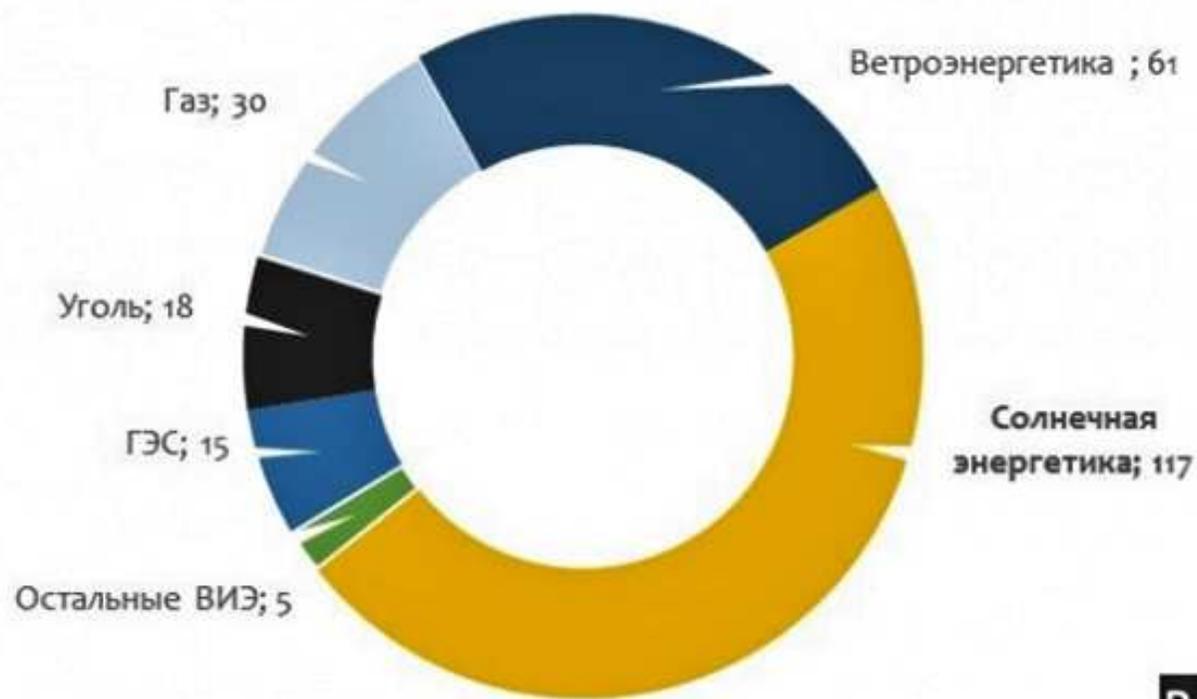
Быстрое снижение себестоимости солнечных элементов за счет **активных научных исследований**, приводит к росту рынка и производства !

Полная мощность солнечных модулей уже 25 лет растет экспоненциально, удваиваясь каждые 2 года !

Основной параметр солнечных элементов: цена за 1 Ватт и срок службы!  
(Для космоса – вес за 1 Ватт).

## Новые электростанции, запущенные в 2020г.

Чистый прирост мощностей электроэнергетики в мире в 2020 году  
(ГВт)



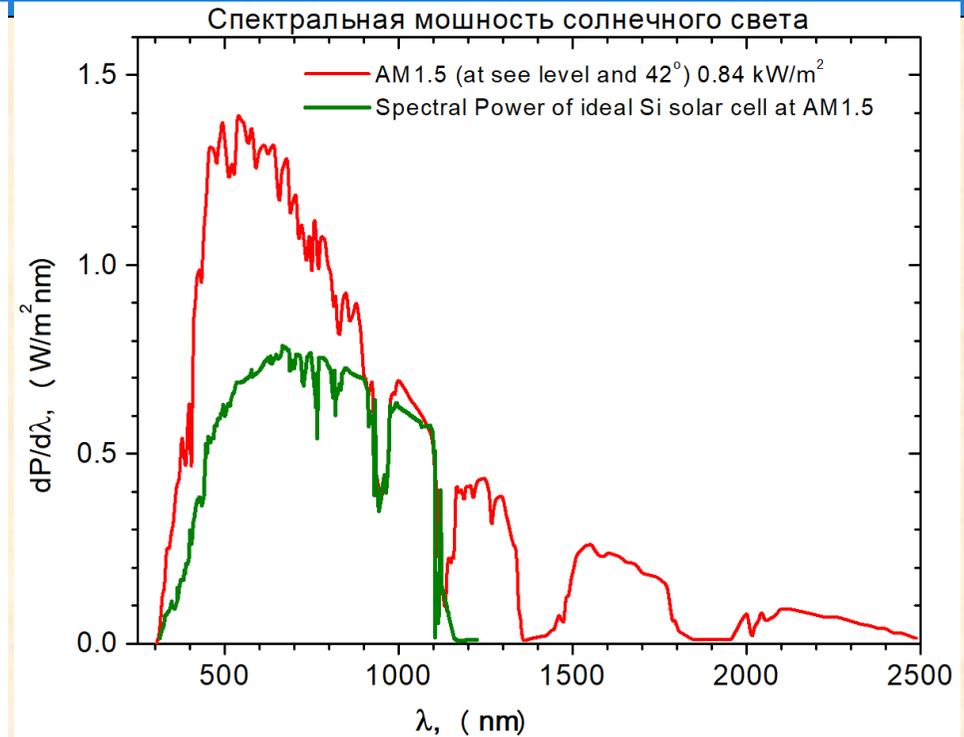
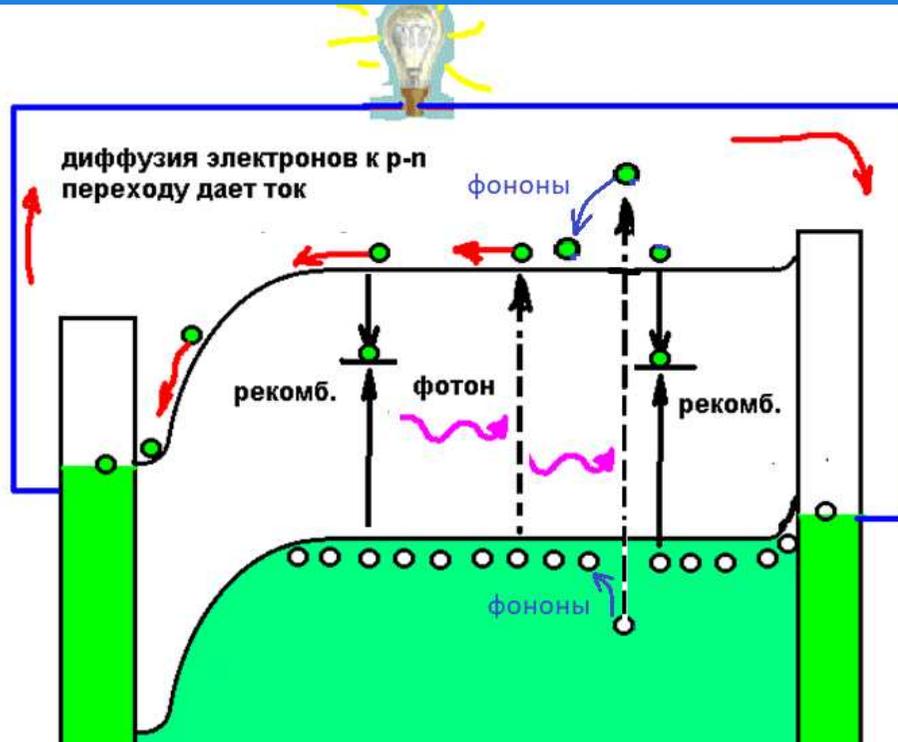
Источник: SolarPower Europe 2020

Re

В 2020 году в мире прирост мощностей **СОЛНЕЧНЫХ** элементов был в **2,5** раза выше, чем угольных и газовых вместе взятых.

Доля солнечных элементов в выработке мировой электроэнергии сегодня около 4%, а к 2050 г. она по планам составит от 25 % до 50% . *За 15 лет стоимость солнечных батарей за единицу мощности упала в 10 раз!*

# Принцип работы solar-cel на полупроводнике с запрещенной зоной $E_g$ ...

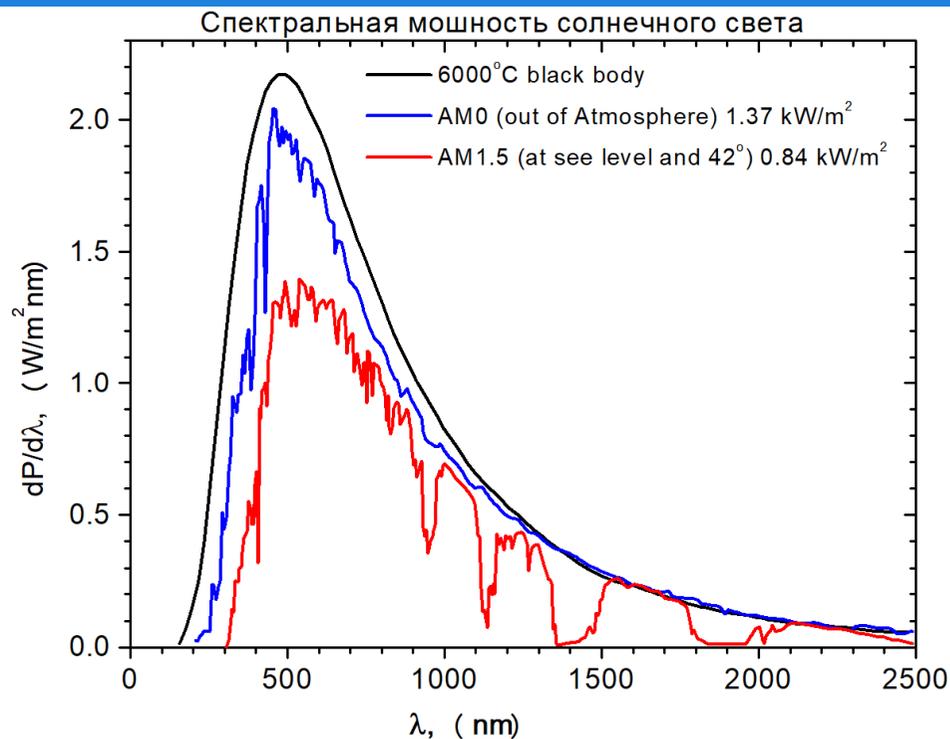
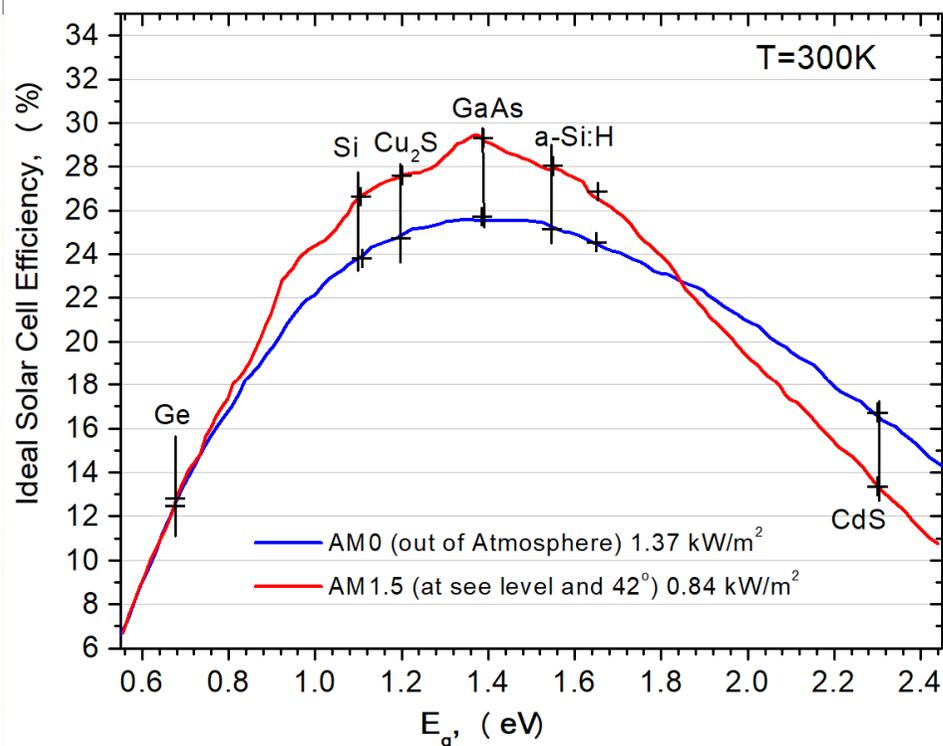


Структура типа **M-(n<sup>+</sup>-p-p<sup>+</sup>)-M** или **M-(n<sup>+</sup>-n-p<sup>+</sup>)-M**.

Для фотонов с энергией  $h\omega \approx E_g$  КПД хорошего солнечного элемента выше 90%. Фотоны с  $h\omega < E_g$  не дают вклад в генерируемую мощность  $P=I \cdot U$ , а для фотонов с  $h\omega > E_g$  используется только часть их энергии порядка  $(E_g/h\omega)$ .

Ясно, что для солнечного спектра есть оптимальная величина  $E_g$  для максимального КПД однопереходного солнечного элемента.

Ясно, что для солнечного спектра есть оптимальная величина  $E_g$  для максимального КПД однопереходного солнечного элемента.

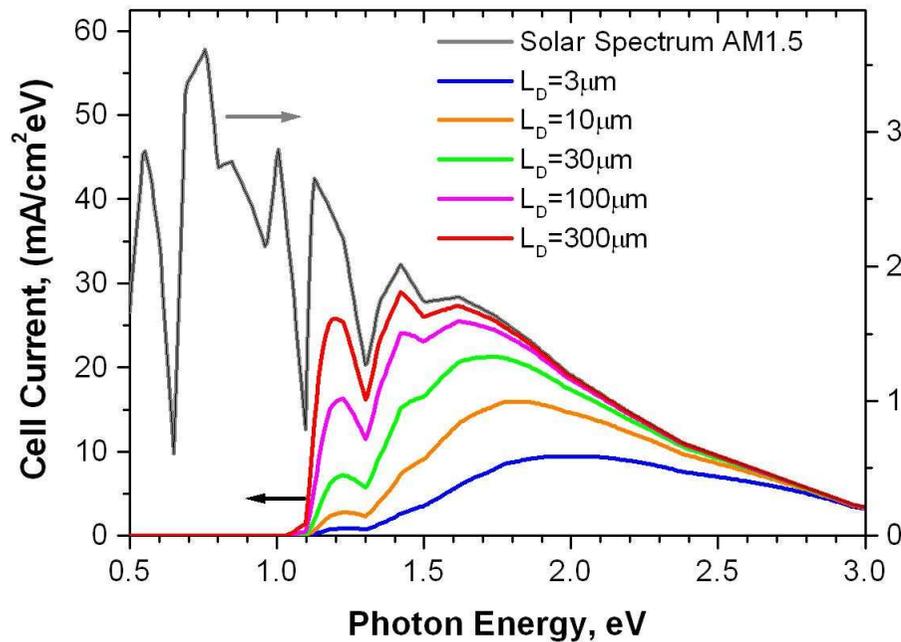
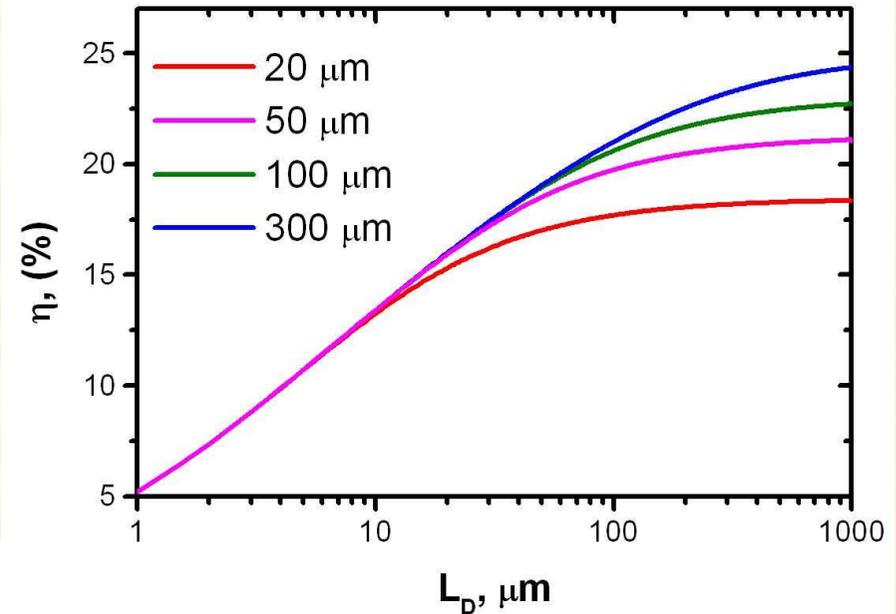
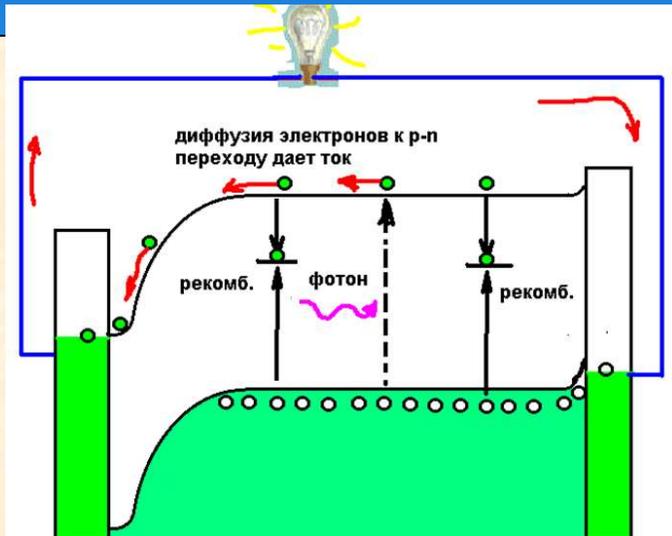


У кремния ширина запрещенной зоны близка к оптимальной, его очень много в природе, он нетоксичен, дешев, позволяет производить солнечные батареи с **КПД 25%** и с большим (>50 лет) сроком службы (гарантийный срок службы 25-40 лет).

Сейчас **93%** солнечных батарей делают из Si.

Основная проблема – максимально снизить **цену за 1 Ватт мощности!** (Для космоса – **вес за 1 Ватт**).

Проблема: Чтобы иметь высокий кпд, длина диффузии фото-возбужденных электронов и дырок в нем должна быть велика.

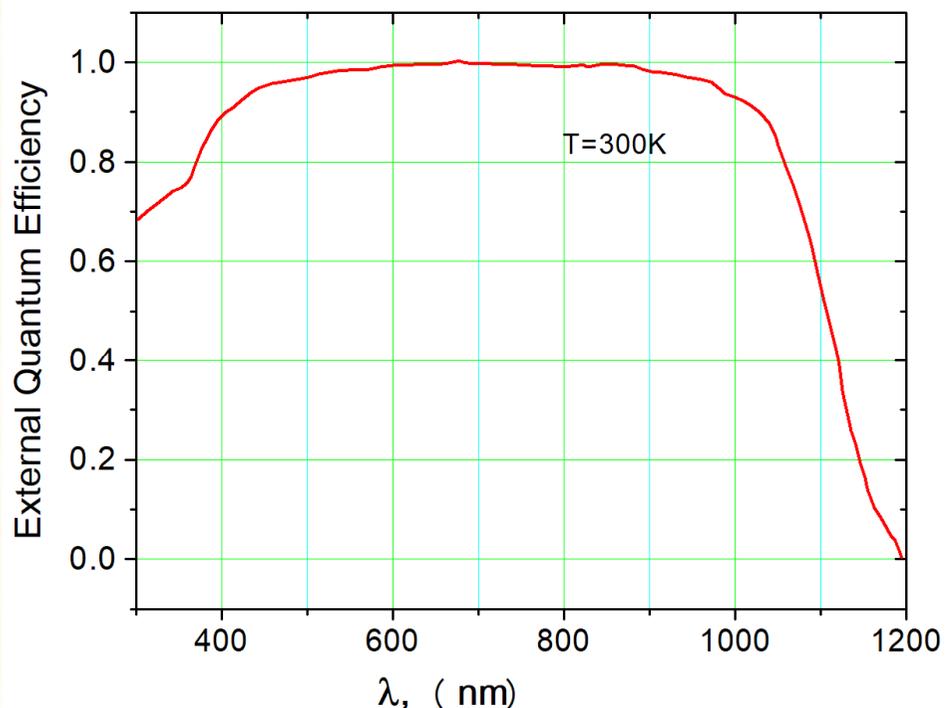


Solar Photon Flux, ( $\times 10^{17} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ )

Зависимости кпд от  $L_D$  при разных  $d$   
 Для кпд 20% нужно слой Si  $d > 70 \mu\text{м}$  и  
 длина диффузии электронов  $L_D > 70 \mu\text{м}$ .

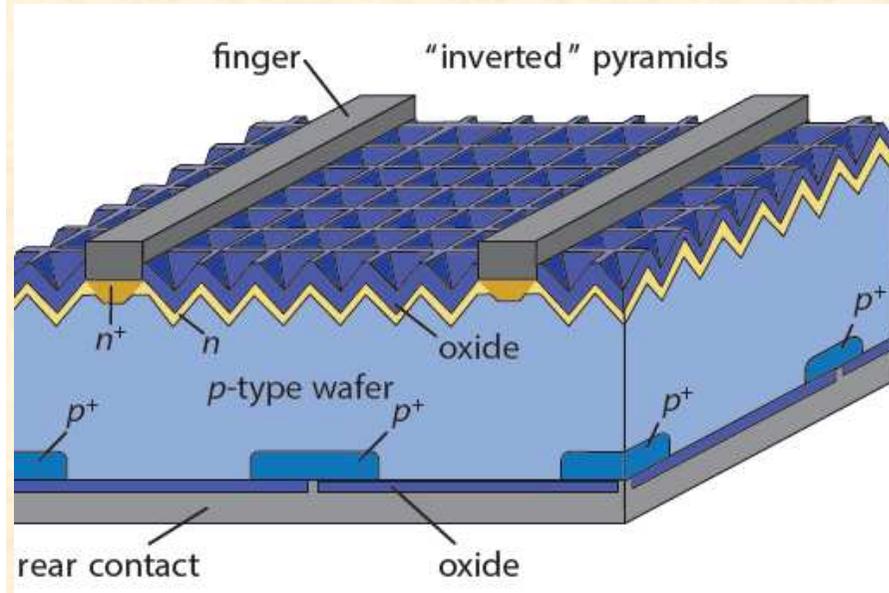
Спектры тока p-Si solar cell толщиной  $d=200 \mu\text{м}$  на уровне моря (AM1.5), для разных значений длины диффузии электронов  $L_D=(D_e \cdot \tau_e)^{1/2}$   
 Оптимально, когда  $L_D > 2d$

Si солнечные элементы сейчас очень совершенны!  
Но их пока приходится делать из довольно чистого кремния!



Внешняя квантовая эффективность современного Si солнечного элемента при освещении AM1.5

$$EQE(\lambda_0) = \frac{\bar{J}_{sc}(\lambda_0)}{e \Phi_{ph}(\lambda_0)}$$



Современная технология PERC (Passivated Emitter Rear Totally Diffused) довольно дешевая, годится для любых ваферов (моно и поли), но использует высокие температуры (800-900°C)

**Кпд обычно порядка 22% для AM1.5**  
Нанесение антиотражающего  $Si_3N_4$  слоя методом плазма-CVD одновременно дает **водородную пассивацию**.

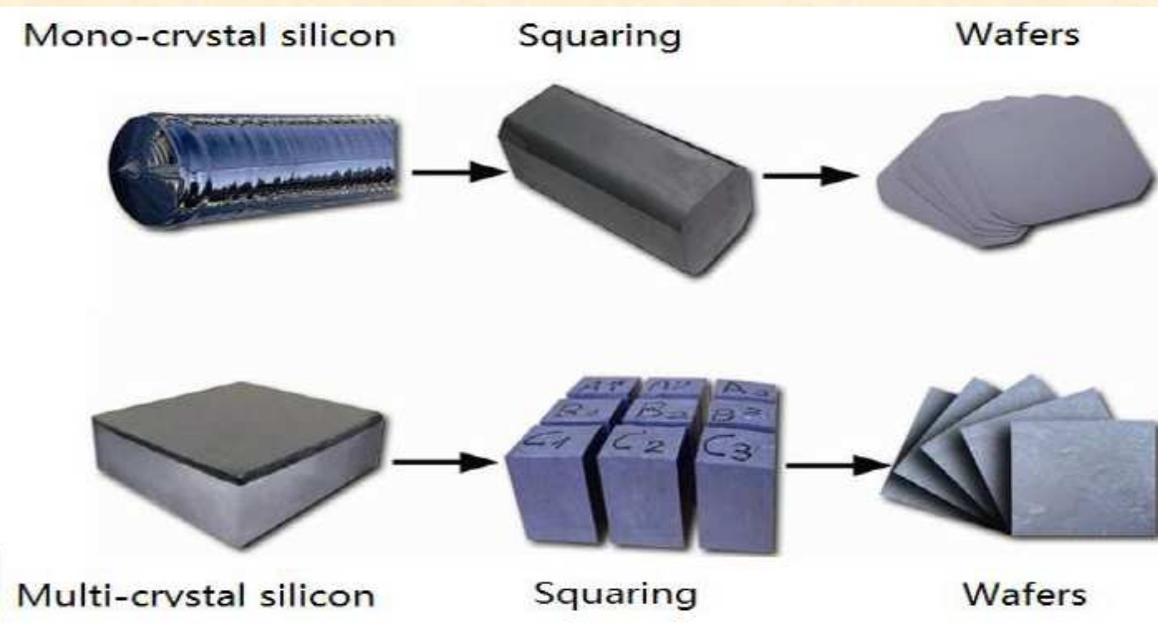
## В чем проблема дальнейшего удешевления Si solar cell ?:

### 1. Приготовление ваферов – резка слитков приводит к большим потерям кремния...

Сейчас почти в равных долях используется две технологии приготовления Si слитков:

1. «Скоростной» (1.5мм/мин, диаметр 220мм) рост монокристаллов по Чохральскому (с-Si). Нет дислокаций и границ зерен, но, больше кислорода и немного дороже...

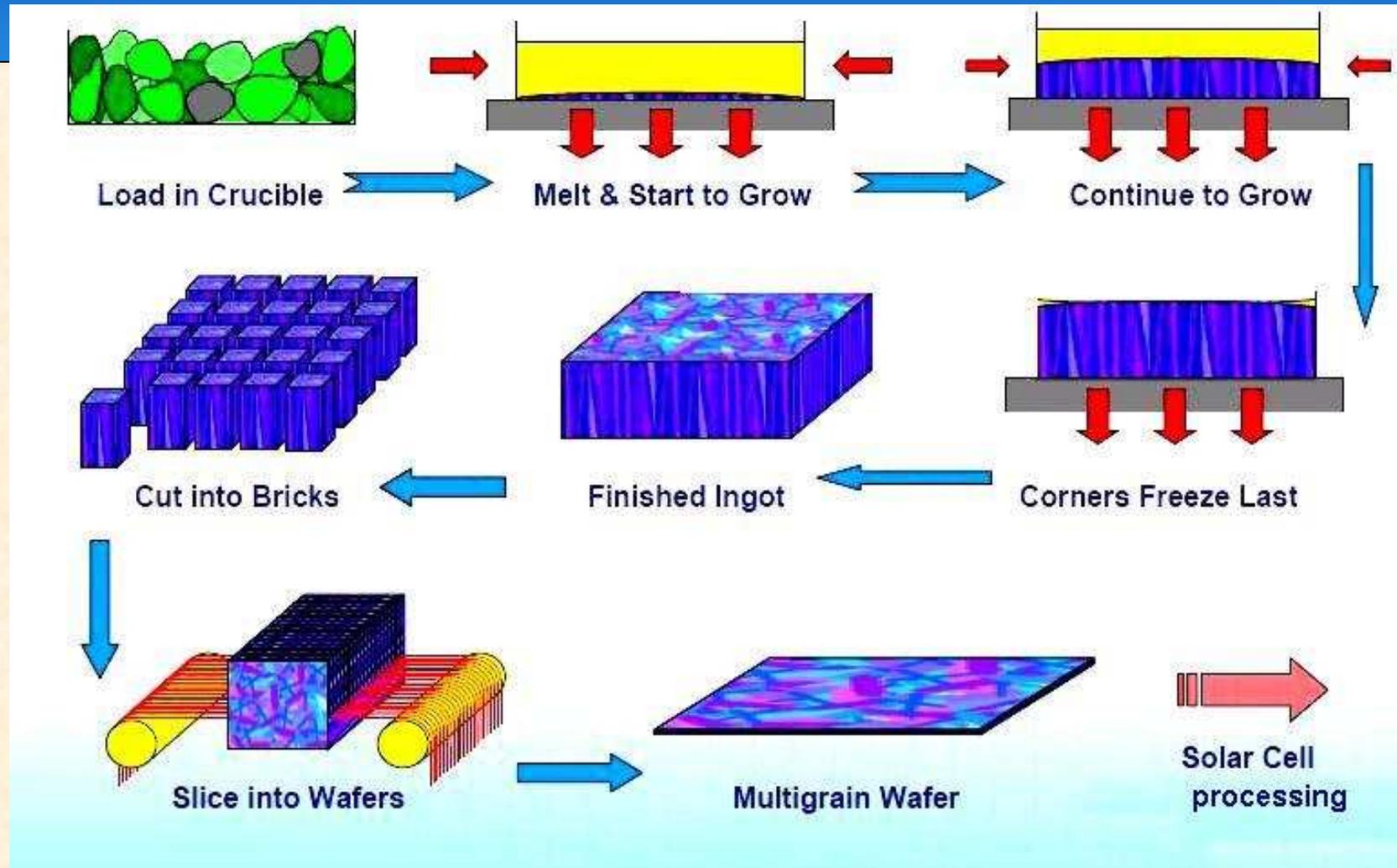
2. «Литой» мульти-кристаллический mc-Si. Дешевле и меньше кислорода, но много дислокаций и границ зерен...



Вафер 200 мм стоит US \$0.60-0.70

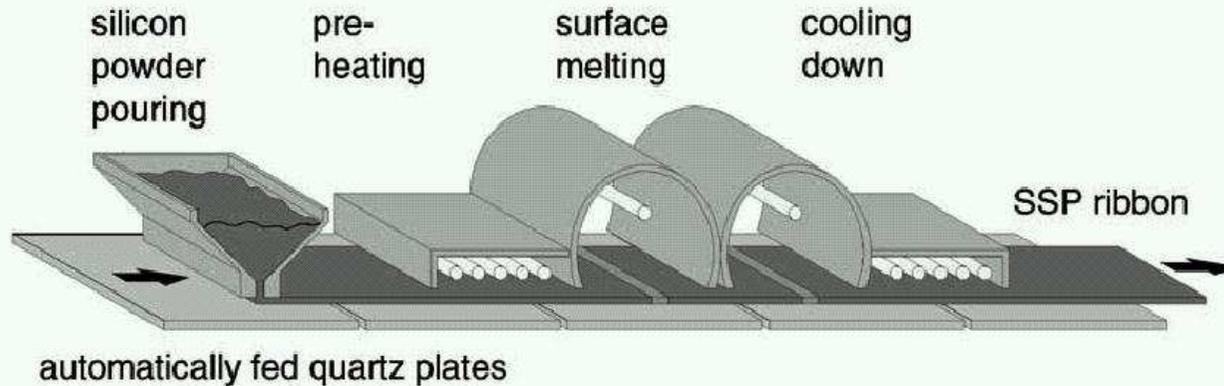
Solar-cell из одного вафера дает ~ 5 - 6 watts of power.<sup>26</sup>

# Резка на пластины – большие потери кремния!



Толщина мультикристаллического вафера ~180 $\mu$ m, толщина проволоки ~150 $\mu$ m **50% кремния – в отходы.**

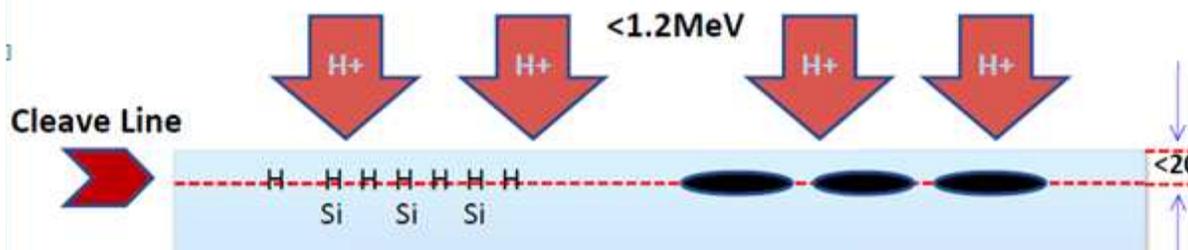
# Продолжаются разработки технологий производства пластин без потерь кремния...



Можно наращивать слои поли-Si на многоразовые или одноразовые подложки:

- из расплава,
- методом CVD,
- \* наносить порошок и проплавливать,

## Smart-cut монокристаллов (SiGen's PolyMax)

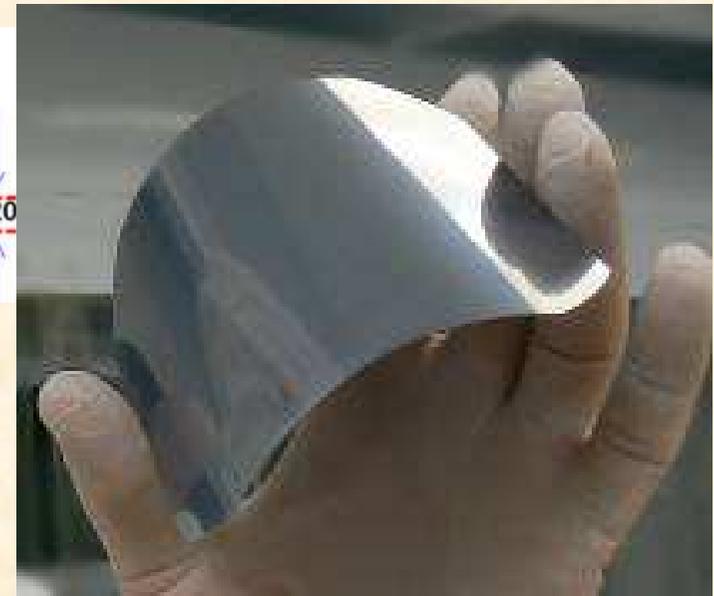


Proton implantation => Bubble formation => Crack propagation (beam-induced cleaving)

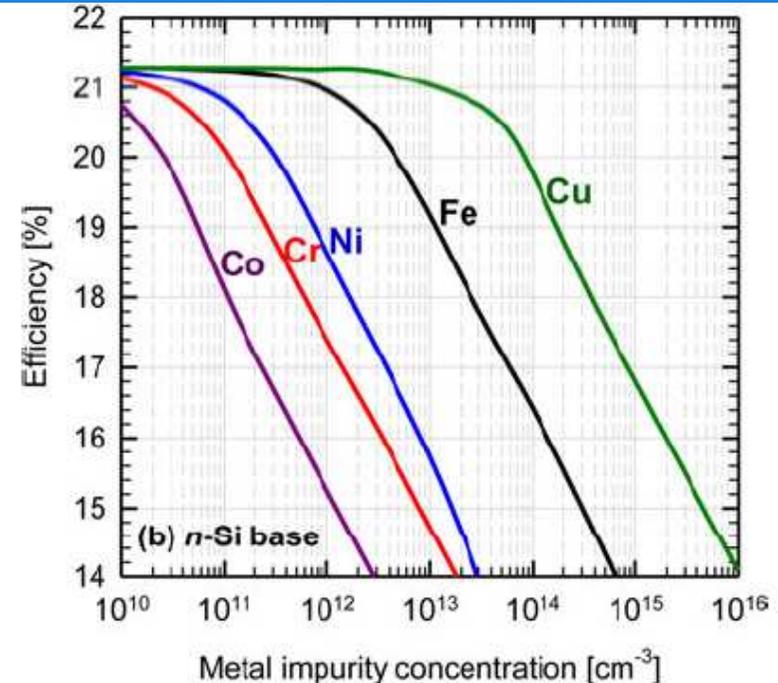
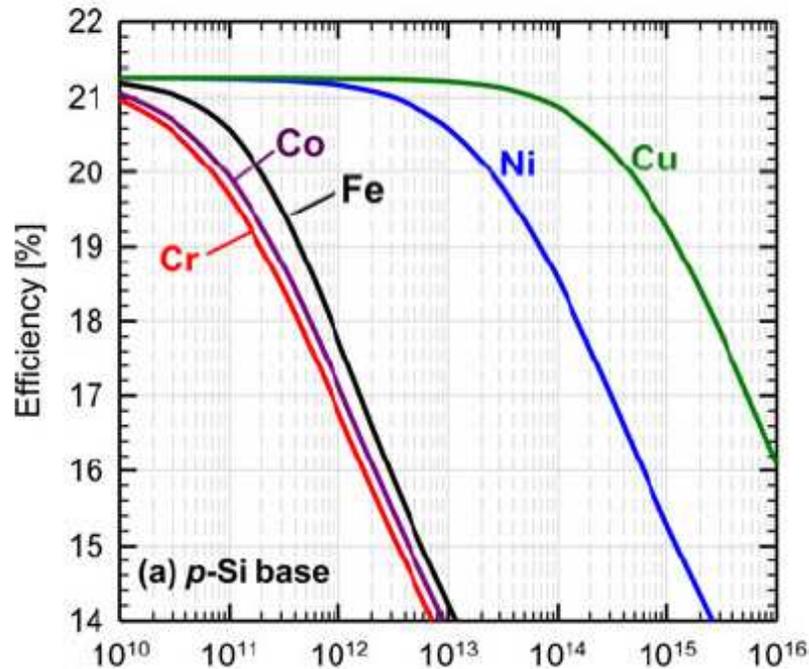
Time < 10 seconds per wafer

Crystal Orientation (111)

- 4 MeV maximum energy для 150  $\mu\text{m}$  Si depth.



## В чем проблема дальнейшего удешевления Si solar cell ? 2) Дефекты и примеси с глубокими уровнями очень активны в e-h рекомбинации!

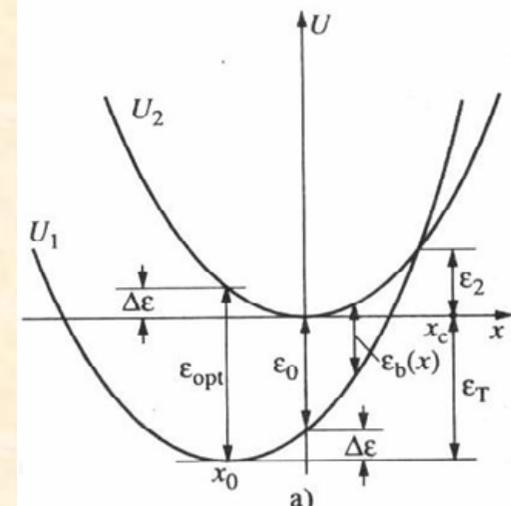


$L_D = (D_e \tau)^{1/2}$ . Чтобы иметь  $L_D > 170 \mu\text{m}$  (20% efficiency) надо иметь время жизни  $\tau > 30 \mu\text{s}$ .

Т.е. концентрация растворенных атомов переходных металлов должна быть  $N_t < 10^{11} - 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ !

Но это все в c-Si (без дислокаций и границ зерен)

А что будет в mc-Si (где много дислокаций и границ зерен) ??



# «Инженерии дефектов» при изготовления солнечных элементов

Основная стратегия – использовать дешевый (но более грязный) кремний и дешевые технологии производства ваферов, обеспечивая высокий КПД за счет «инженерии дефектов», основанной на глубоких фундаментальных исследованиях свойств дефектов.

## 1. «Геттерирование» - собирание опасных атомов переходных металлов в специально созданных местах где они не опасны...

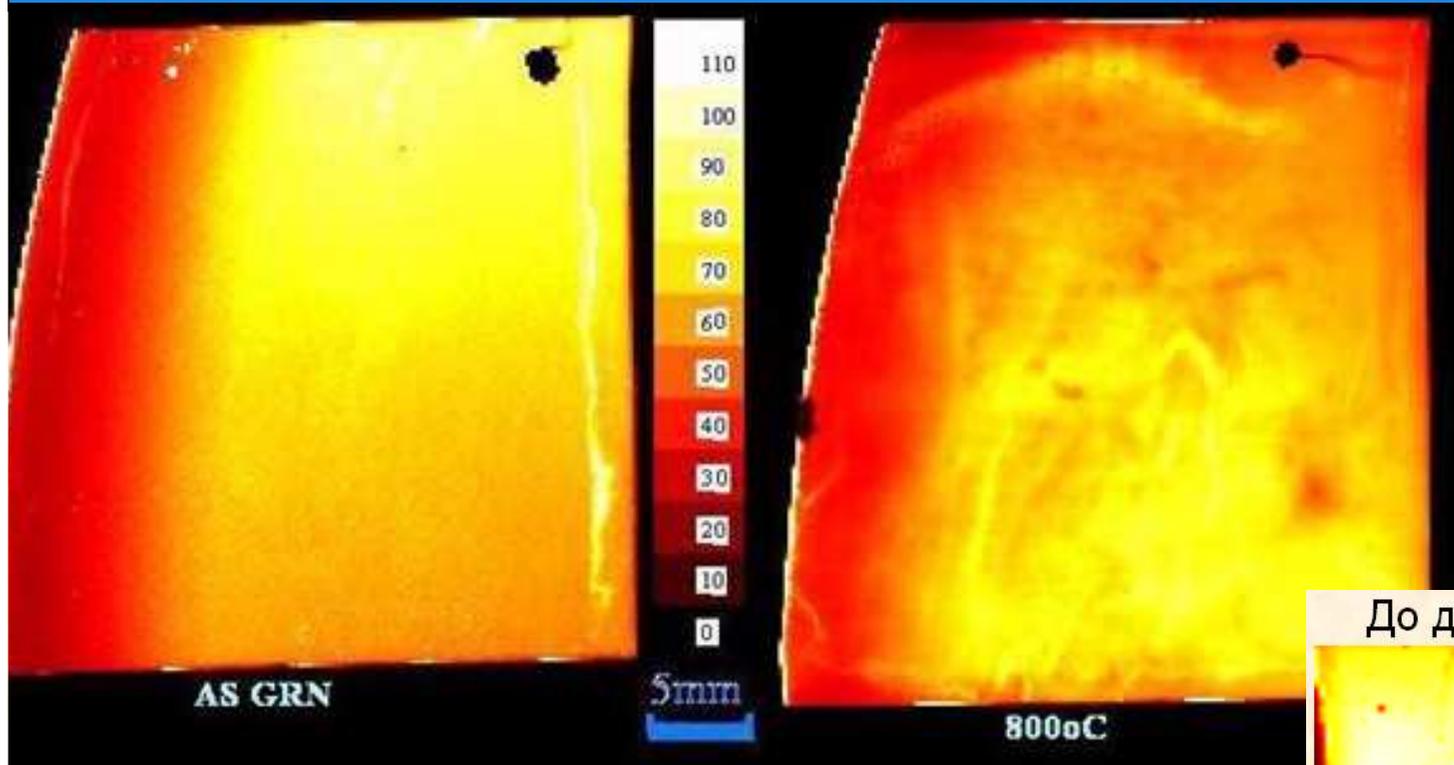
- «segregation gettering» - за счет большей растворимости примеси в геттере. Не требует пересыщения объема вафера примесью. (PDG при формировании p-n-перехода и AIQ при формировании обратного p-p+ контакта)

- «precipitation gettering» - при охлаждении концентрация атомов примеси становится выше предела растворимости и они выпадают в преципитаты в области геттера (на дислокациях или существующих преципитатах).

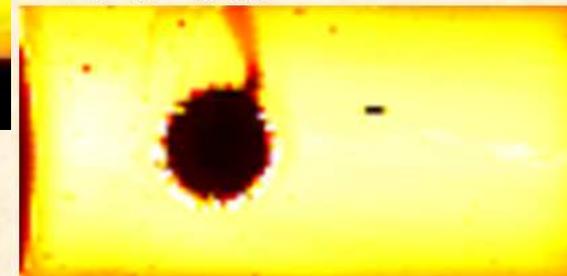
## 2. «Пассивация» - превращение электрически активных примесей в электрически неактивные комплексы за счет их реакции с другими дефектами (например, с водородом)

# Реакции дефектов между собой - существенная часть «инженерии дефектов»

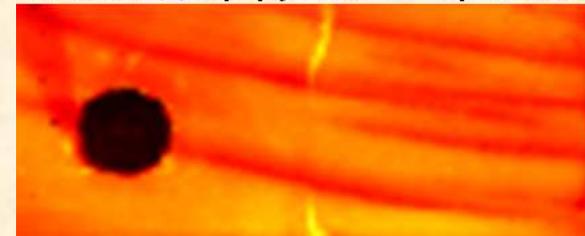
Пример: карты  $L_D=(D*\tau)^{1/2}$  в c-Si – реакции с ростовыми дефектами .....



До диффузии Ni



После диффузии Ni при 600C



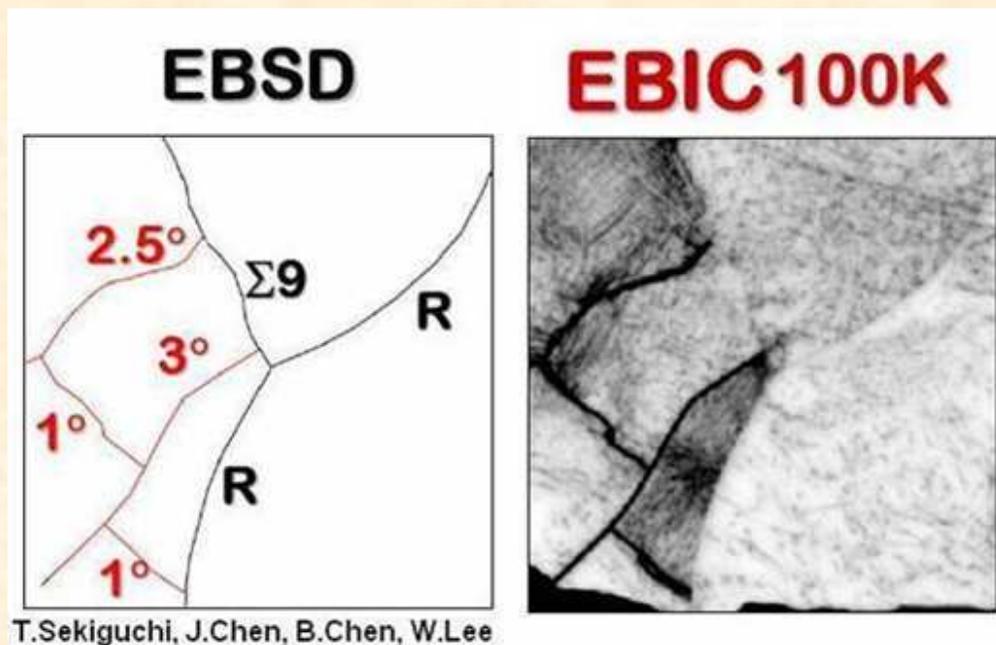
Пример: карты  $L_D$  в **mono-Cz-Si** «солнечного качества» до и после нагрева и относительно быстрого охлаждения – взаимодействие примесей с ростовыми вакансионными дефектами.



# Основная разница между c-Si и mc-Si – наличие дислокаций и границ зерен.

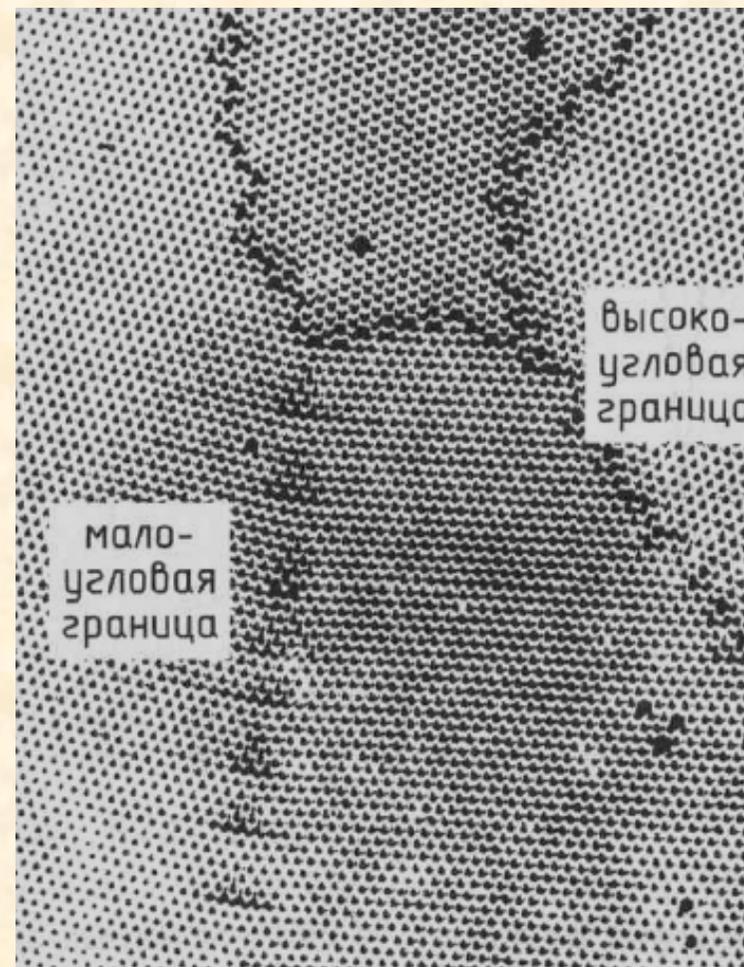
Дислокации и границы зерен служат как::

- Места электрон-дырочной рекомбинации
- Сток для точечных дефектов и примесей
- Зародыши роста преципитатов
- Движение дислокаций при  $T < 800^\circ\text{C}$  может приводить к генерации вакансионных дефектов.

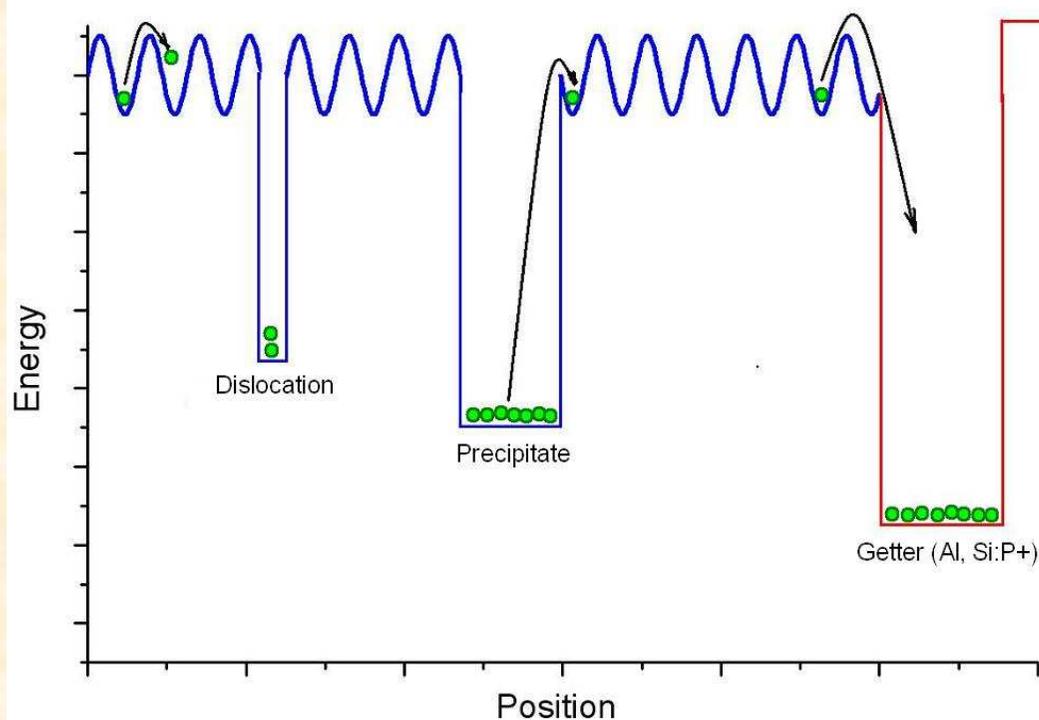


T.Sekiguchi, J.Chen, B.Chen, W.Lee

**В рекомбинации активны малоугловые границы, содержащие дислокации**



# Гетерирование: Оптимизации процессов гетерирования требует серьезных исследований !

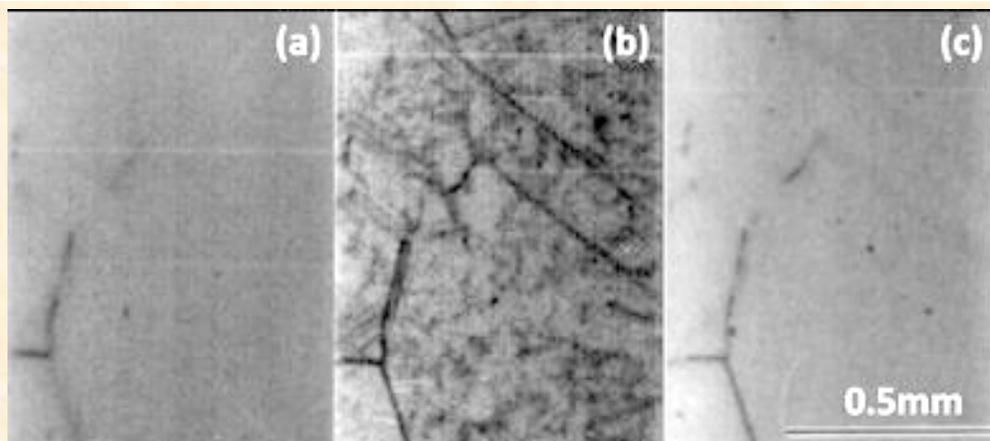


## Примитивный подход:

1. Создать «геттеры» (места где примесям хорошо и они не мешают работе прибора)
2. Нагреть до очень высокой  $T$  чтобы развалит комплексы и «испарить» примеси с дислокаций и преципитатов.
3. Охладить очень медленно чтобы примеси успели продиффундировать в место с минимальной энергией (геттер)

**Но это слишком дорого !**

**Нужен computer Gettering simulator**



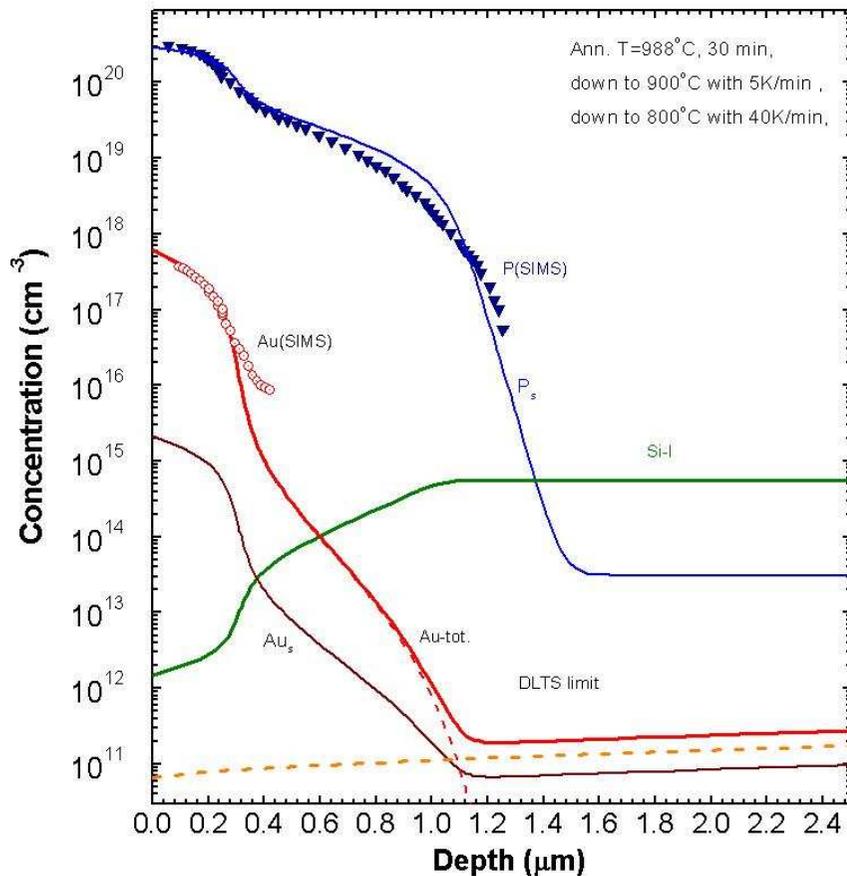
**Карты  $L_D$  одной части mc-Si вафера:**

(a)- as-grown

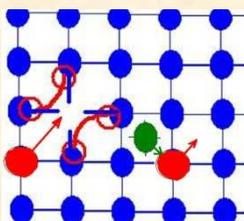
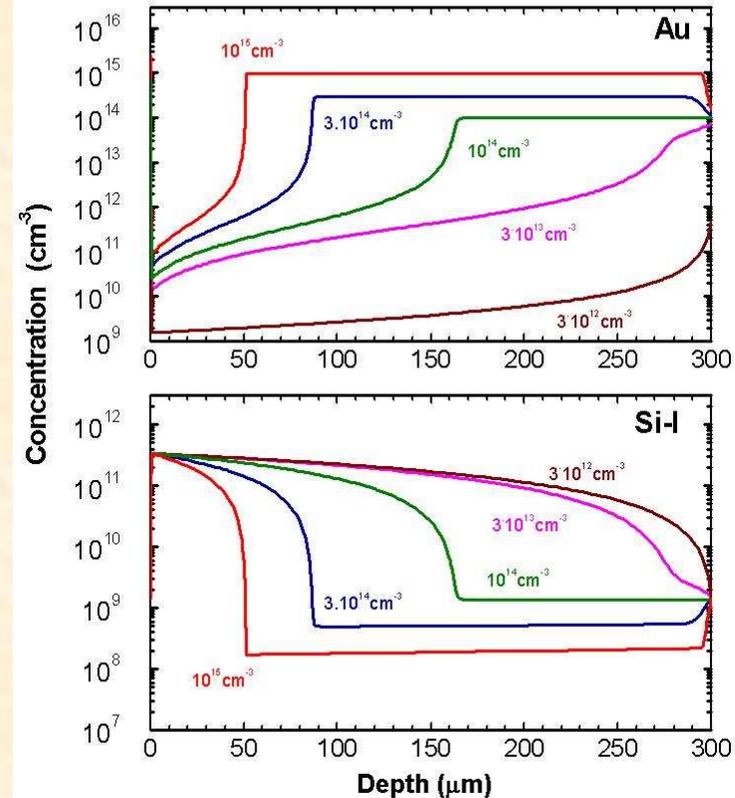
(b)- annealed at 1100°C and quenched

(c)- annealed and slow cooled (10K/min)

# Для c-Si многое уже удалось довольно хорошо понять и создать соответствующие компьютерные симуляторы.



PDG of Au from the front side depending on  $[Au]_{initial}$   
 $[P]_{surface} = 3.5 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ , 850C, 1.5h, fast cooling

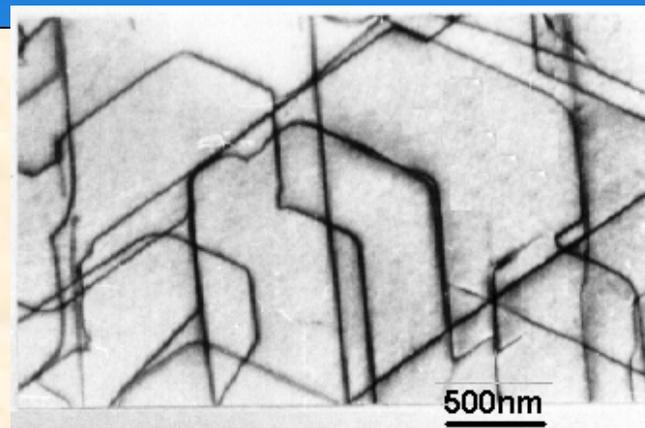
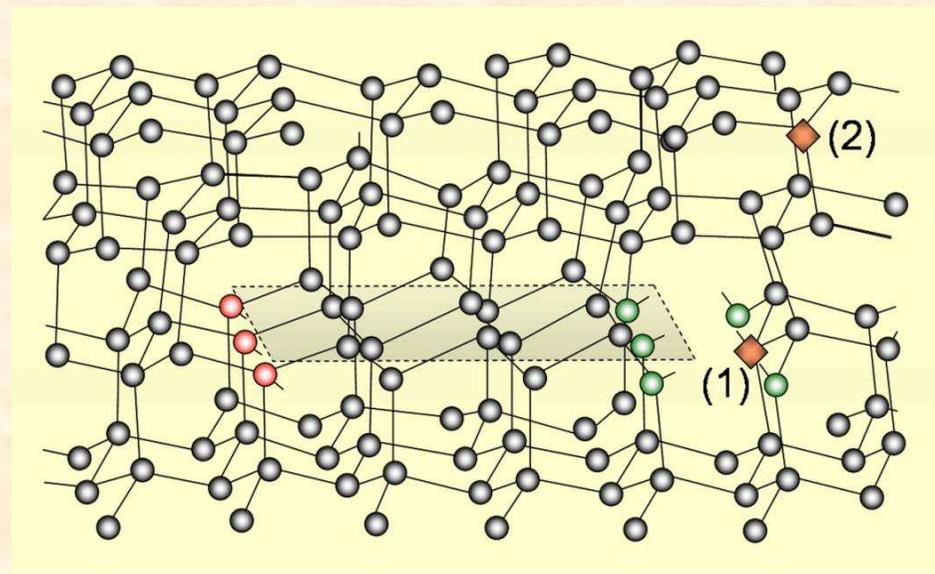


При PDG геттерирование происходит, в основном, за счет образования комплексов атом металла-фосфор...

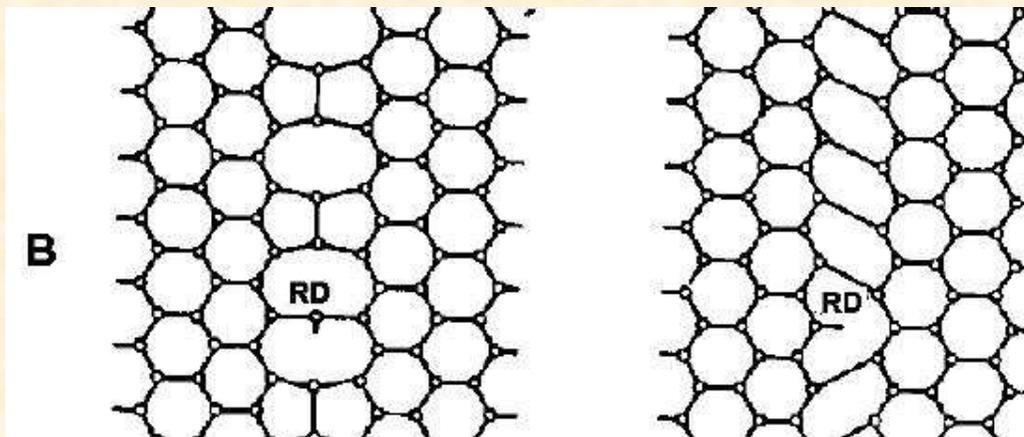
Пересыщение образца Si-I приводит к ускоренной диффузии substitutional атомов примеси, в ряде случаев, к ускорению «испарения» преципитатов и к увеличению эффективного segregation factor  $S_{eff}$ ...

# Наличие дислокаций в $\pi$ -Si делает жизнь ученых интереснее!

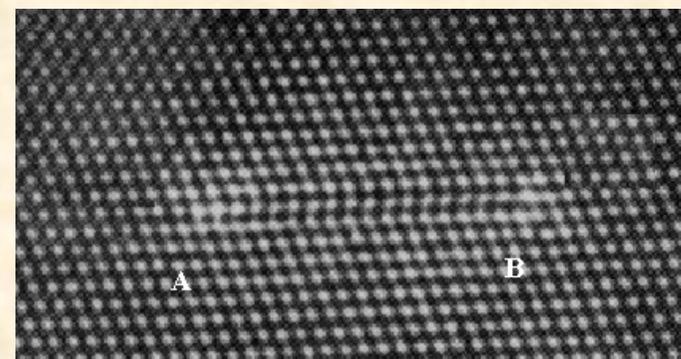
## Структура дислокаций в кремнии.



ТЕМ снимок дислокаций в плоскости их скольжения (111) в Si

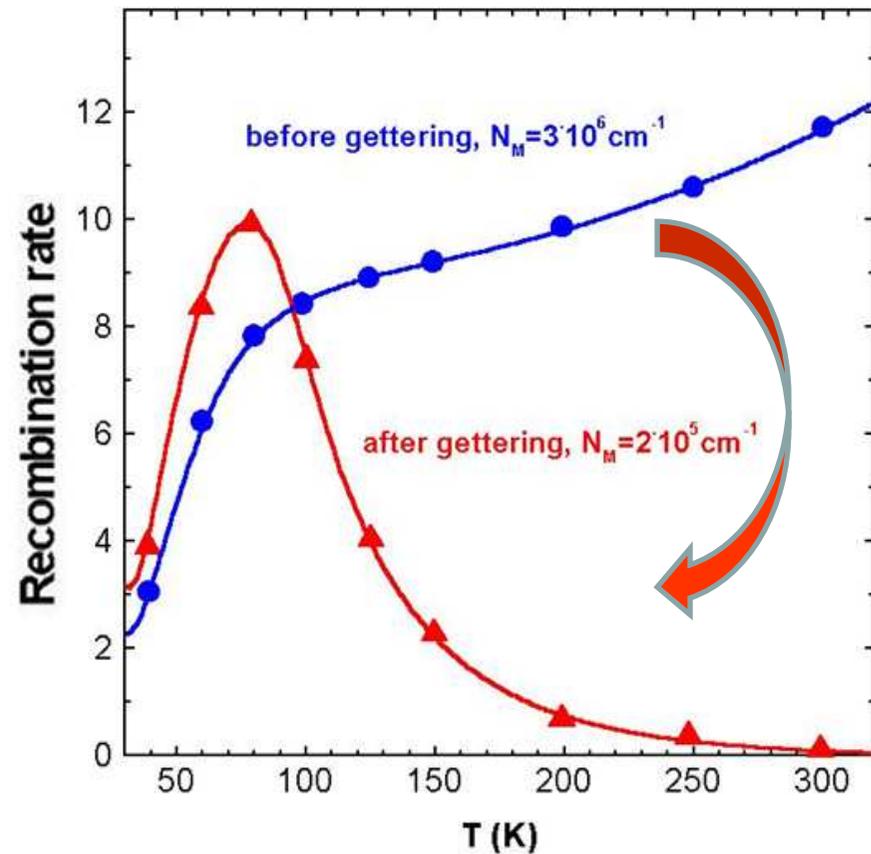
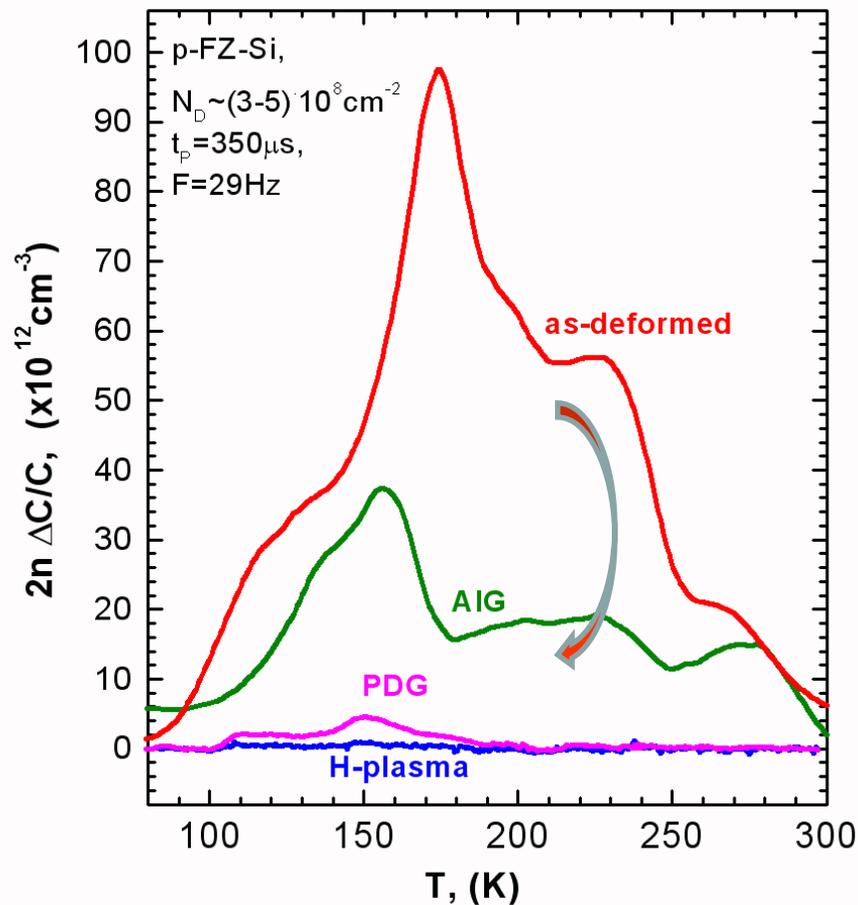


Попарное замыкание оборванных связей (Reconstruction) дает выигрыш 0.5 eV на связь.



НРЕМ снимок с атомным разрешением ядра  $60^\circ$  дислокации вдоль ее направления [110]. Частичные  $30^\circ$  и  $90^\circ$  дислокации Shockley соединены лентой дефекта упаковки.

# Можно ли очистить дислокации стандартными методами «инженерии дефектов» – гетерированием и водородной пассивацией? – **Можно!**



Gettering reduces dramatically the concentration of harmful impurities at dislocations thus reducing e-h recombination at dislocations

**Чтобы учесть дислокации в компьютерных симуляторах  
требуется фундаментальные исследования примесей на  
дислокациях...**

**1) реакций примесей с дислокациями,**

**Дальнодействующее взаимодействие атомов примеси с упругим полем ( $E_B \sim 0.4-0.8\text{eV}$ ,  $R \sim 1-2\text{ nm}$ ) + Химические связи с ядром дислокации ( $E_B$  up to  $2-3\text{eV}$  !,  $R < 0.5\text{nm}$ )**

**Энергию зарождения преципитатов примесей на дислокациях много меньше, чем в объеме.**

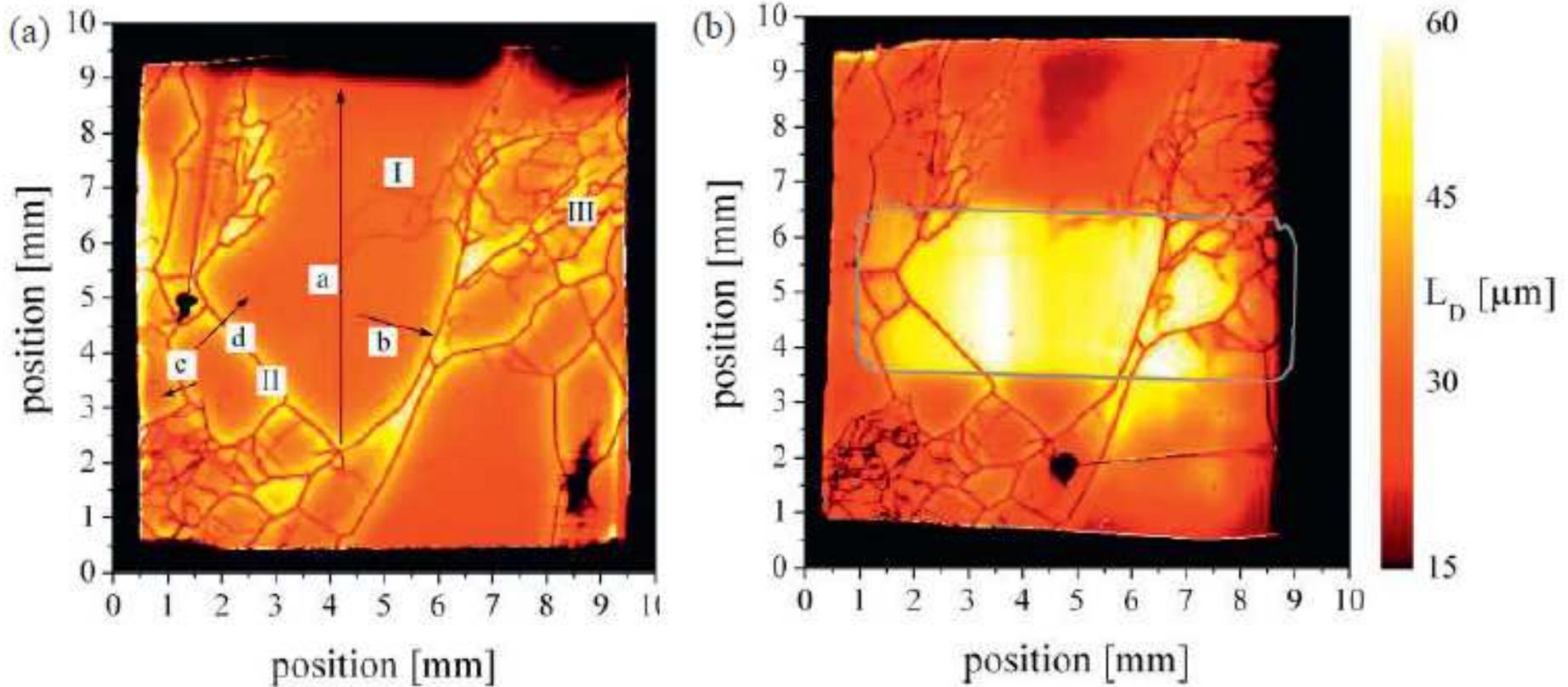
**2) электронных свойств примесей на дислокациях,**

**Электронные свойства примесей в ядрах дислокаций могут радикально отличаться от их свойств вдали от дислокаций.**

**3) генерации дефектов дислокациями при их движении и свойств этих дефектов (“trail defects” )...**

**Что сейчас и делается...**

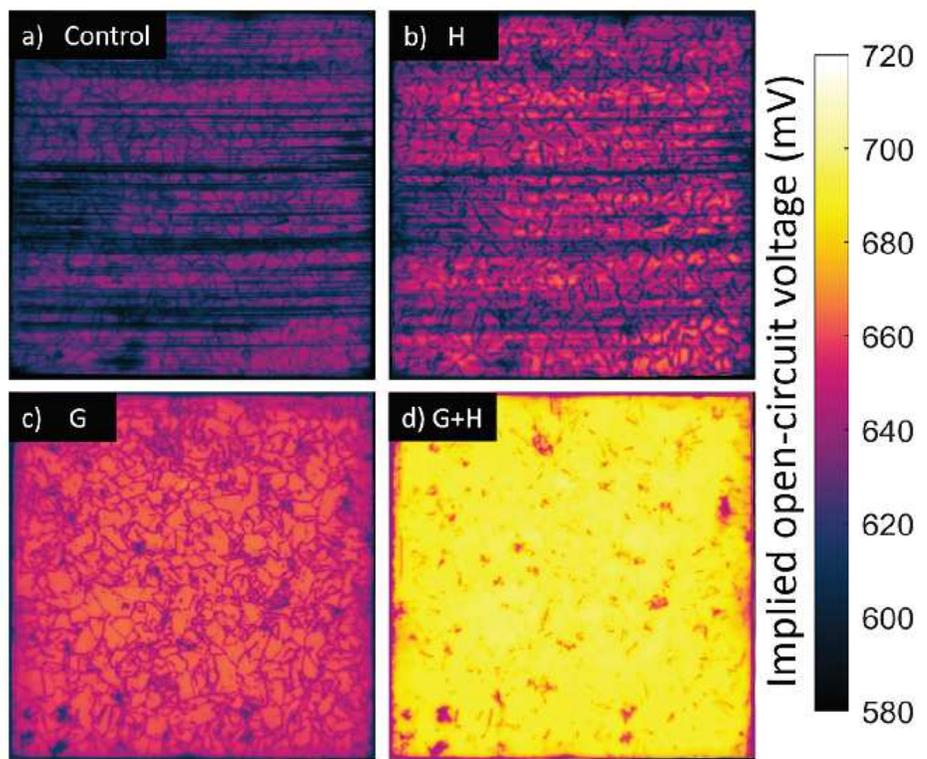
Полученные знания вкладываются в компьютерные симуляторы, которые затем проверяются на натуральных экспериментах.



Пример: Эксперименты с AlG в mc-Si со специально внесенной известной концентрацией железа.  $L_D$  до и после отжига 50 мин при 950C с напыленной полосой алюминия (толщина 250нм).

[P.Krenkel, F.Saring, M.Falkenberg, V.Kveder, M,Seibt: Energy Procedia 38, 582-588 (2013)]

В итоге, КПД солнечных элементов из mc-Si мало отличаются от Cz-c-Si. Требования к чистоте кремния постепенно снижаются!



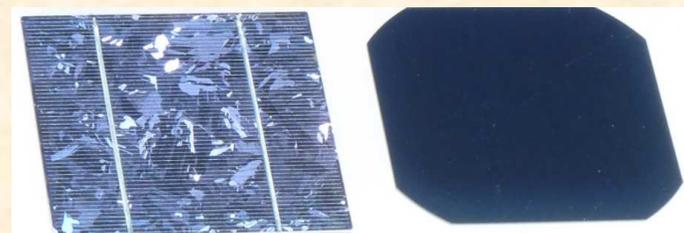
Карты  $V_{OC}$  солнечных элементов из mc-Si без инженерии дефектов (a), только пассивации водородом (b), только P-гетерирования (c), P-гетерирования и водородной пассивации (d)

[Daniel Chen et al, "Defect engineering of p-type silicon heterojunction solar cells fabricated using commercial-grade low-lifetime silicon wafers", DOI: 10.1002/pip.3230]

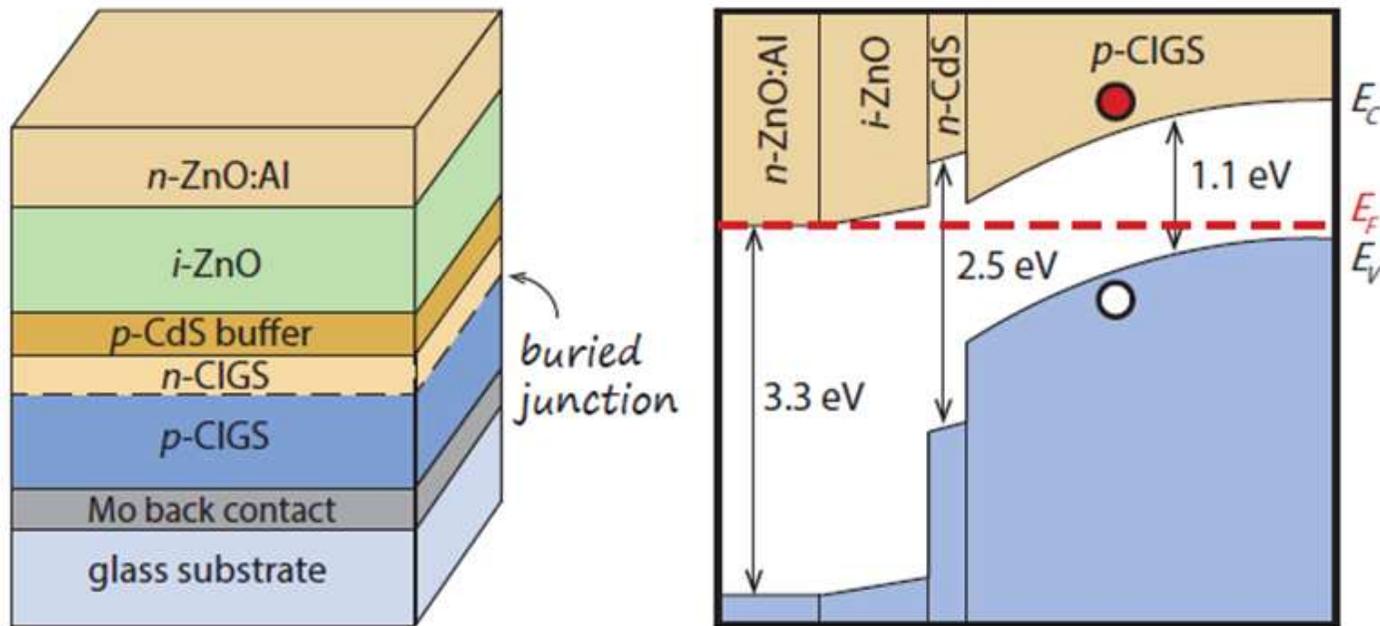
Цена солнечных батарей из моно Cz-c-Si на \$0.05 за Ватт выше, чем для mc-Si.

КПД Cz-c-Si тоже немного выше, чем у mc-Si.

Но, с учетом заполнения площади модуля, мощность модуля из mc-Si больше чем у Cz-c-Si модуля!!



## 2. Copper indium gallium selenide solar cell (or CIGS cell) [ $\text{Cu}(\text{In}_x\text{Ga}_{1-x})\text{Se}_2$ , where $x$ can vary between 0 and 1. (2% рынка)]



Однако, галлия и индия очень мало и они дороги!

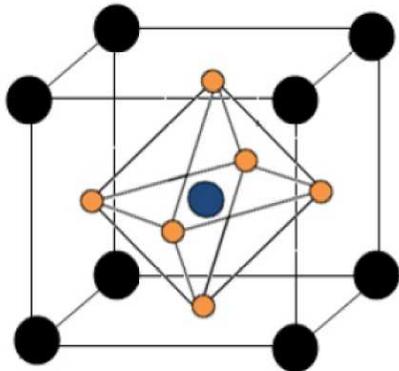
Обычно - вакуумное совместное напыление Cu, Ga и In при комнатной температуре, а затем отжиг в парах селена.

Рекордный КПД 20.4% на маленьких опытных образцах.

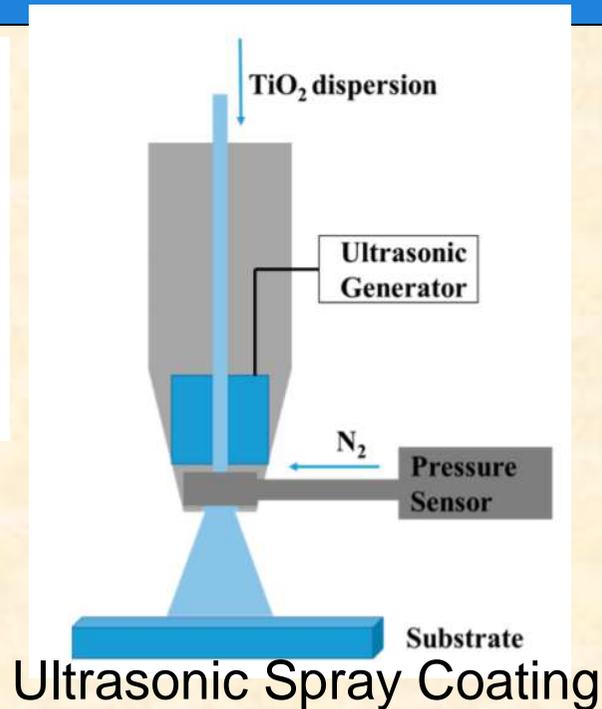
КПД промышленных CIGS модулей 14-15%



### 3. Organolead halide perovskite - solar cell, пока не производится, в стадии экспериментов



A=CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub><sup>+</sup>,  
M=Pb, X=Cl<sup>-</sup> or I<sup>-</sup>



Perovskite CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub>

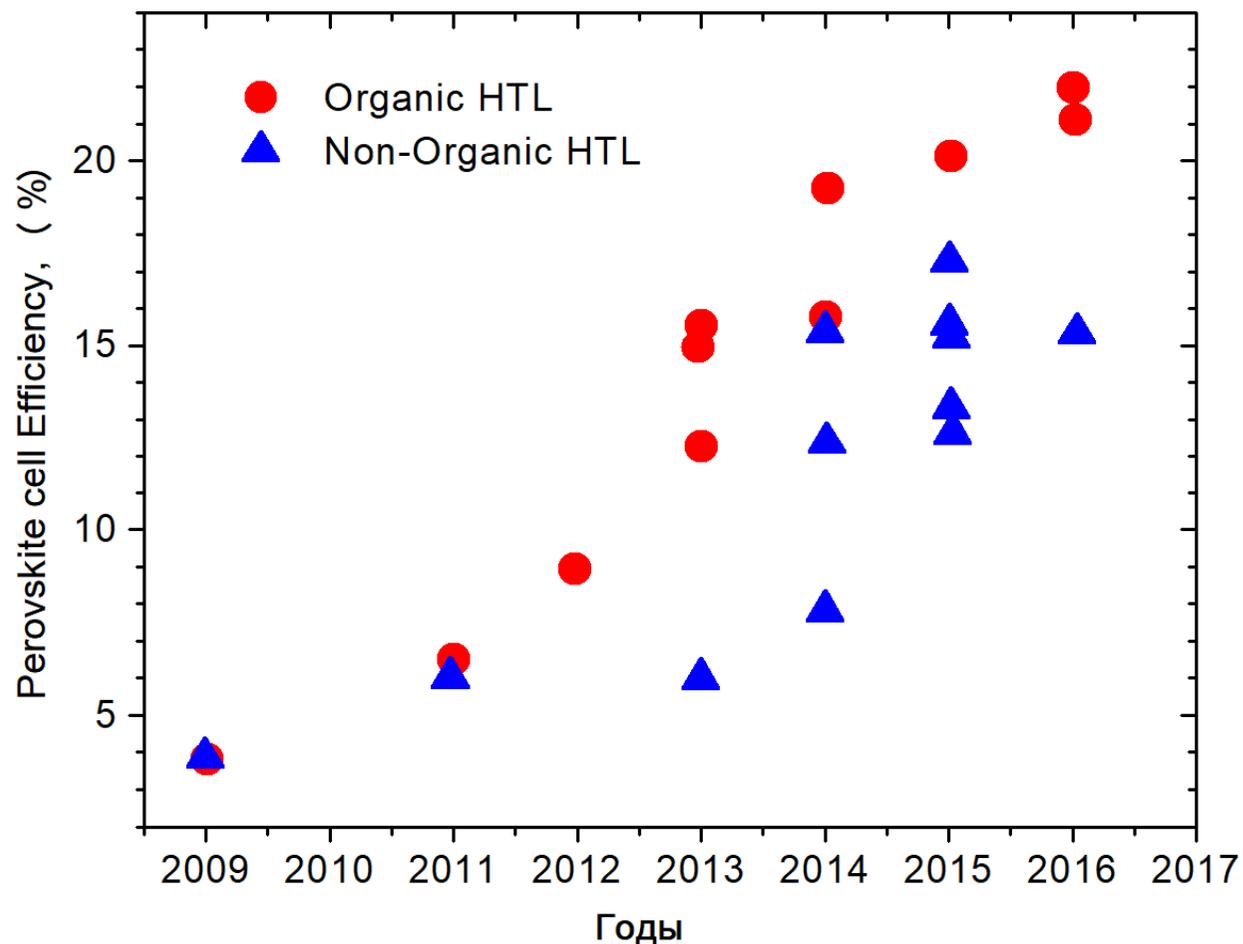
ETL-electron transport layer: doped TiO<sub>2</sub>, C60,

HTL-hole transport layer (material) (organic Spiro-OMeTAD - is very expensive, CuI, CuSCN, NiOx, CuSCN, Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> (CZTS))

For example: ITO / CZTS / CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub> / PCBM / Ag

Максимальная эффективность лабораторных образцов достигла  
20% (с органикой)

Но пока они дороги, недостаточно хороши и быстро деградируют.



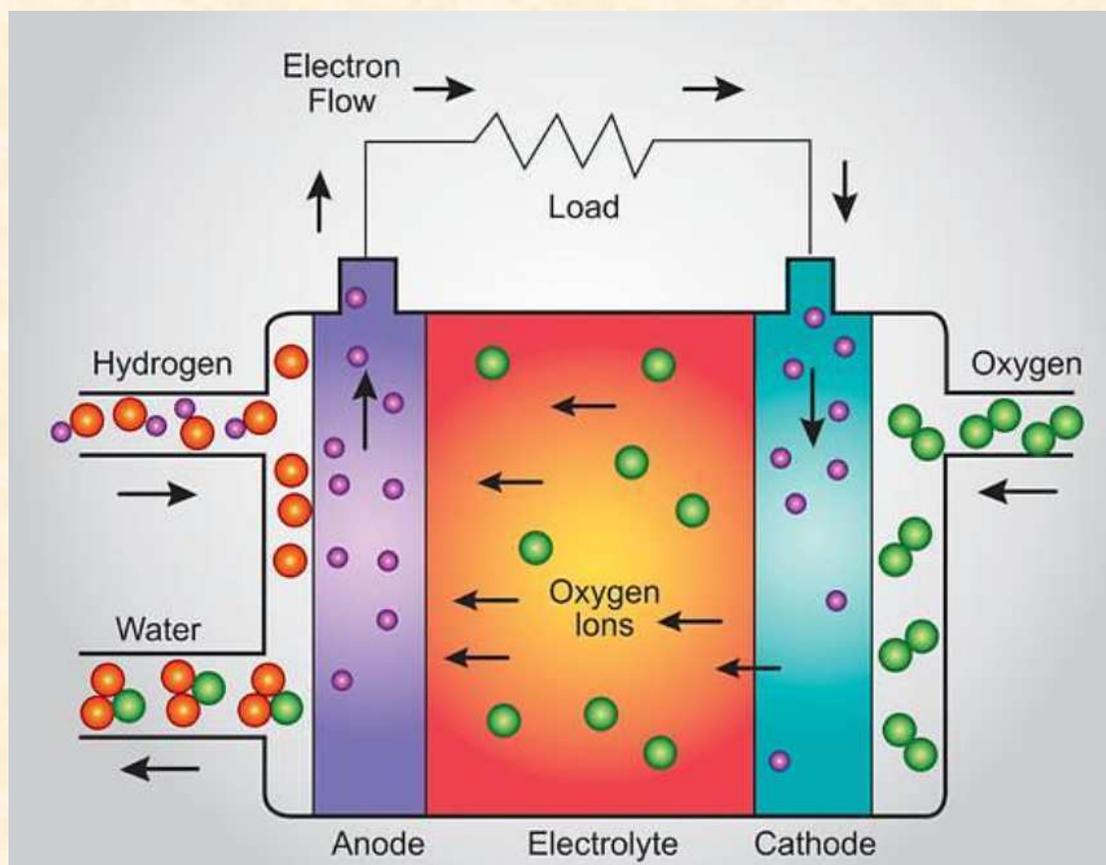
Исследования продолжаются. Возможно что то хорошее получится....

**Массовое (>40%) использование солнечных батарей и ветрогенераторов неизбежно потребует емких и дешевых аккумуляторов энергии.**

Один из методов аккумулирования энергии – получение водорода электролизом, а затем получение электричества из водорода («водородная энергетика»)

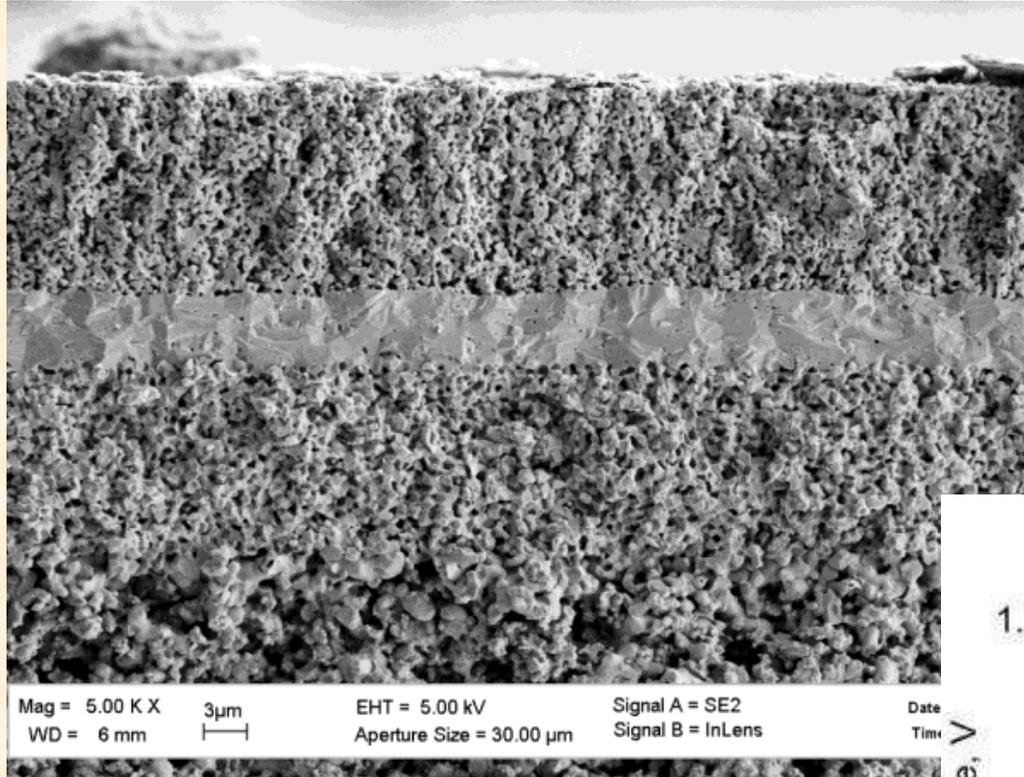
Выгодно использовать Топливные Элементы. Их кпд>60%

ИФТТ РАН совместно с Инжиниринговым центром МФТИ «Автономная энергетика» занимаются Твердо-Оксидными Топливными Элементами (ТОТЭ).

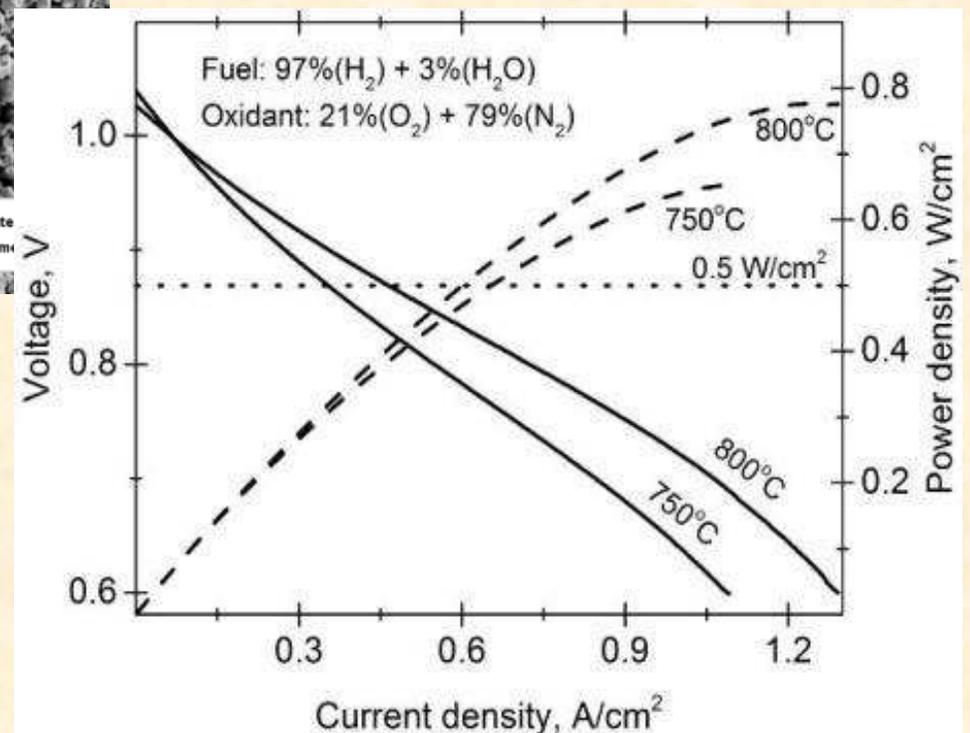


19 – 23 сентября 2021  
Черноголовка

# Пример мембраны ТОТЭ



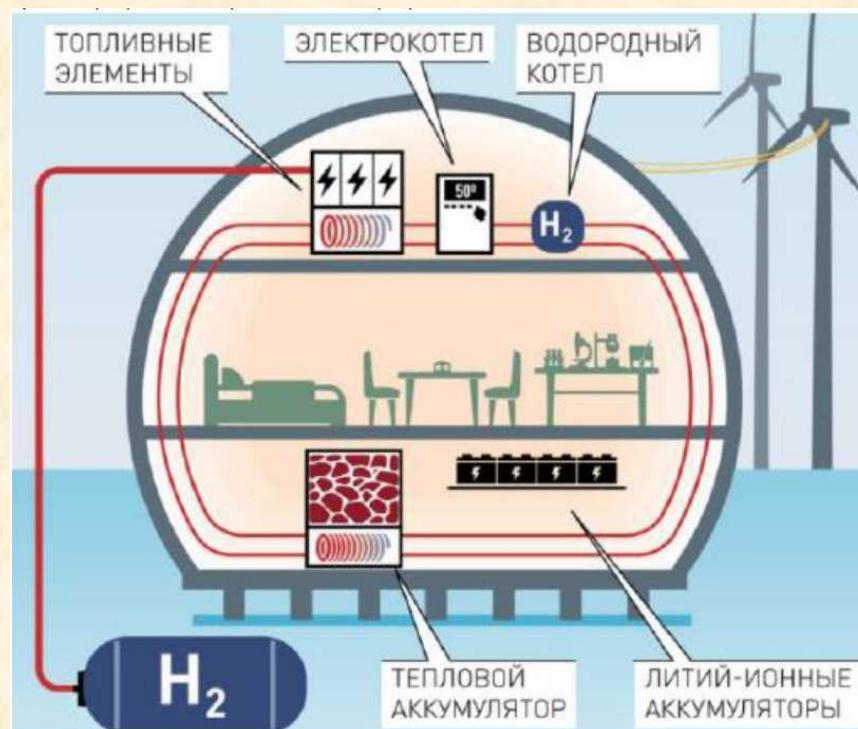
Электронно-микроскопическое изображение поперечного сечения ТОТЭ с тонкопленочным электролитом и защитным GDC подслоем, изготовленными методом холодного аэрозольного осаждения в вакууме, и композиционным катодом



## ИФТТ+МФТИ – станция «Снежинка» с аккумуляторами на ТОТЭ



Сейчас строится станция «Снежинка» на Ямале – первый в мире круглогодичный и полностью автономный комплекс на базе водородной энергетики и ВИЭ (ветер+солнце) без дизельного топлива.



# Спасибо за внимание !



«Владиславовка» - солнечная электростанция, расположенная возле села Владиславовка в Республике Крым с мощностью 110 МВт

**Спасибо за внимание !**

