

# **Кремниевые солнечные элементы: состояние и основные тенденции развития**

**Унтила Геннадий Григорьевич**

МГУ имени М.В. Ломоносова,  
НИИ ядерной физики имени Д.В. Скобельцына

## Использованы данные из источников:

1. International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV) 2018 Results. Tenth Edition, March 2019
2. Fraunhofer ISE: Photovoltaics Report. 14 March 2019
3. World silver survey 2018. Produced for The Silver Institute by the GFMS team at Thomson Reuters

## Используемые обозначения:

**PV** – photovoltaics (фотовольтаика)

**$W_p$**  – пиковый ватт

**Wh** – ватт·час

**СЭ** – солнечный элемент

# Цель фотофольтаики – стать способной вносить весомый вклад в обеспечение человечества электроэнергией

Для этого необходимо решить **две задачи**:

1. нарастить мощности PV систем до **тераваттного уровня**
2. цена kWh электроэнергии от PV систем должна быть снижена до конкурентного уровня

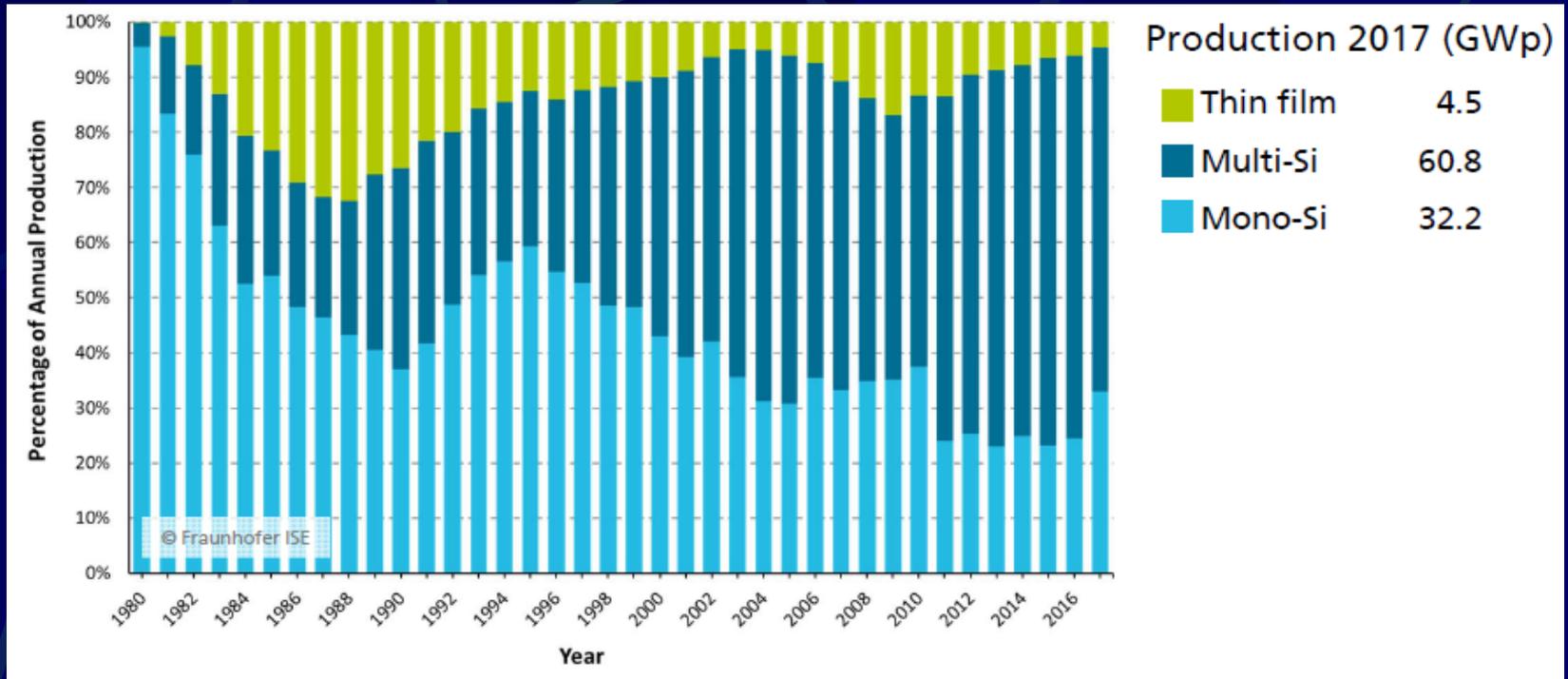
Справка:

К 2050 году потребности человечества в электроэнергии, по прогнозам, составят **~45 PWh\***.

В 2010 году в мире было установлено **4.8 TW<sub>p</sub>** энергетических мощностей, производство электроэнергии составило **~24 PWh**

# Солнечные элементы из c-Si -

были, есть и ... будут (?) локомотивом фотовольтаики



2017 год: доли рынка СЭ

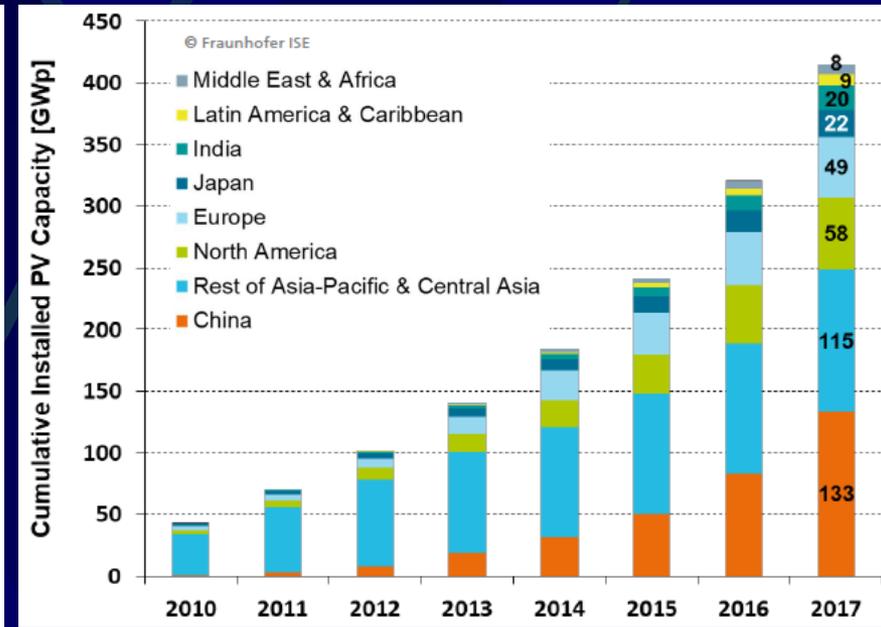
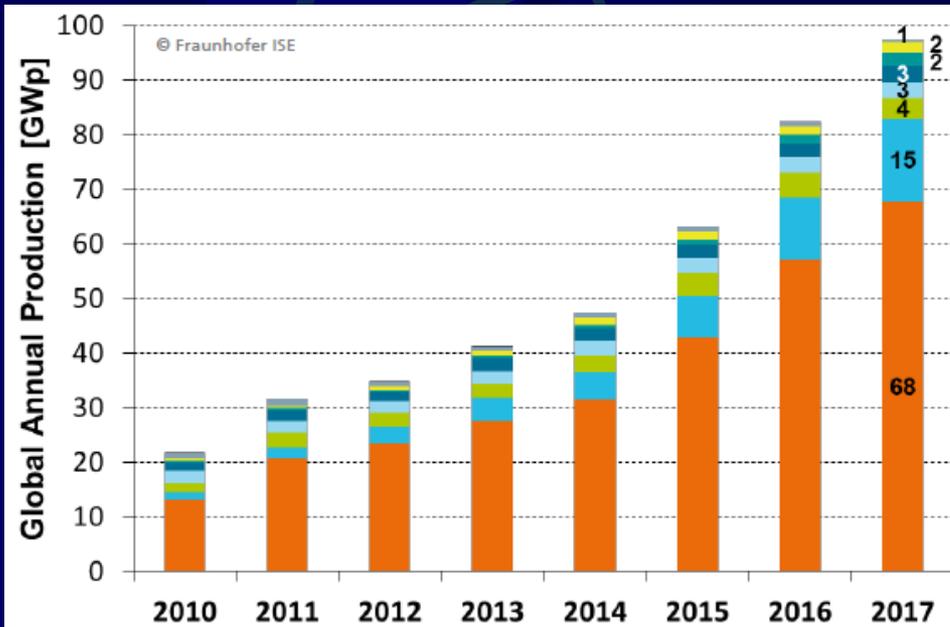
- из кристаллического Si (c-Si) – 93%

- из них, из мультикристаллического Si (multi--Si) – 60.8%

На рынке доминируют СЭ из кремния, причем, мультикристаллического. Далее приводятся прогнозы развития только для кремниевой фотовольтаики.

# Задача № 1: Тераваттный уровень PV:

## история



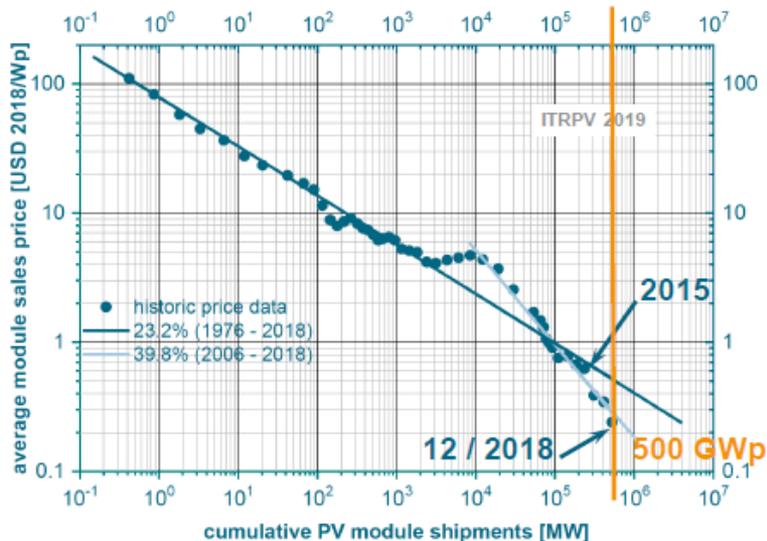
✓ в 2018г.:

продано PV модулей –  $>100 \text{ GW}_p$ , совокупный объем инсталляций –  $515 \text{ GW}_p$

✓ в период с 2010 по 2017 год совокупный среднегодовой темп роста PV систем составлял  $24\%/год$

# Задача № 2: Цена. Кривая обучения

Learning curve for module price as a function of cumulative shipments



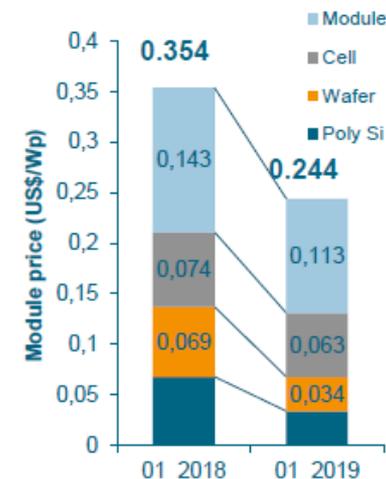
Shipments / avg. price at years end:

2017: 105 GWp / 0.35US\$/Wp  
 2018: 109 GWp / 0.24 US\$/Wp

o/a shipment:  $\approx 523$  GWp  
 o/a installation:  $\approx 504$  GWp

**0.5 TWp milestone passed!**

LR  $\approx 23\%$  (1976 .... 2018)  
 LR  $\approx 40\%$  (2006 .... 2018)



→ Stable volume shipped with huge price deterioration

В 2018г. цена  $W_p$  в модуле снизилась до **0.24 US\$/ $W_p$**

Около 50% от цены модуля приходится на солнечный элемент

# Доминирующие СЭ на рынке: тенденции развития

## Trend: share of cell technologies

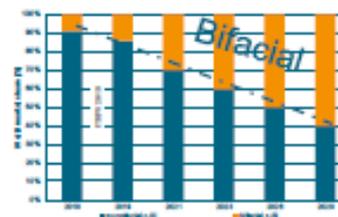


→ **PERx - technologies will dominate**  
(2018 ITRPV data are close to IHS Markit)

- **BSF**  
→ ≈40% share in 2019  
→ focus on mc-Si BSF  
→ will disappear after 2025
- **PERx (incl. passivated contacts)**  
→ >50% share in 2019  
→ market mainstream in coming years  
→ on p- and n- type
- **Si-heterojunction (SHJ)**  
→ ≈2% in 2018 → >15% in 2029  
→ on n-type only
- **Back contact concepts**  
→ ≈2 % in 2018 → 10% in 2029
- **Si-Tandem expected from 2023 onwards**

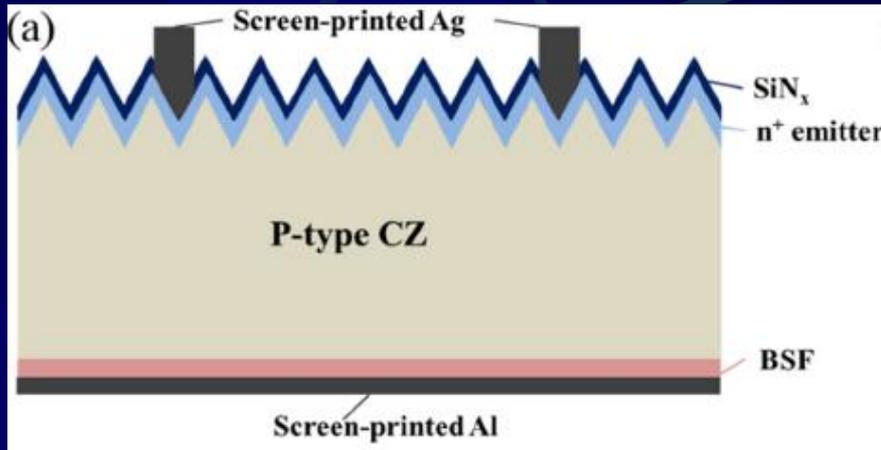
ITRPV

fit  
for  
Bifacial

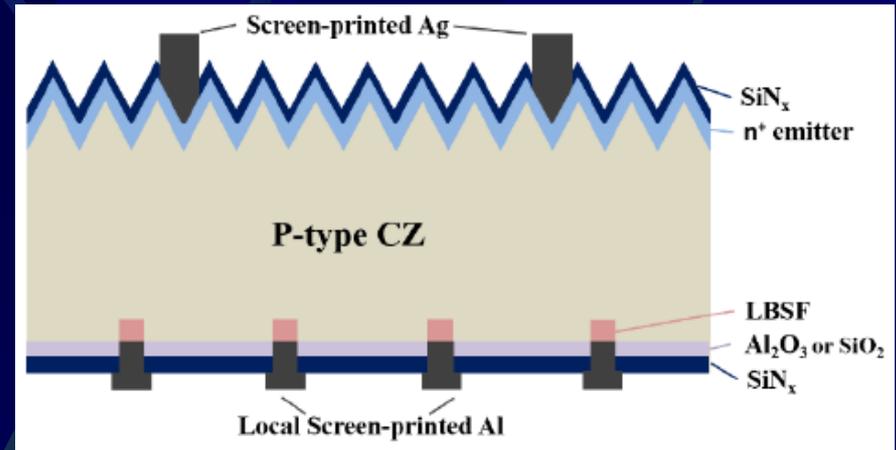


**Bifacial cells will gain share**  
→ ≈15% in 2019  
→ ≈60% in 2029

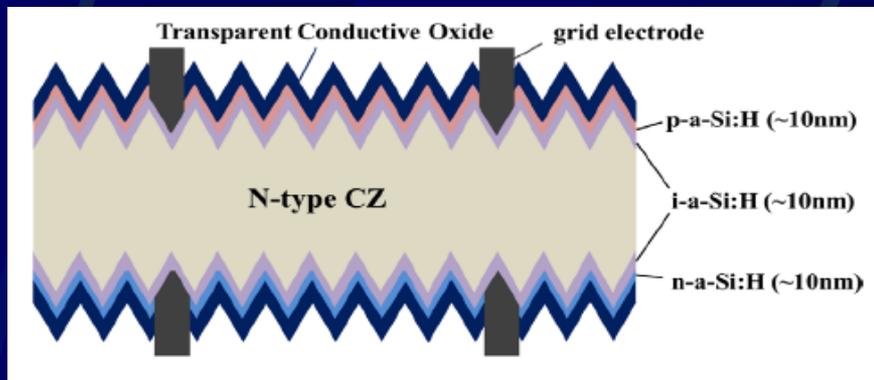
# Доминирующие на рынке конструкции СЭ



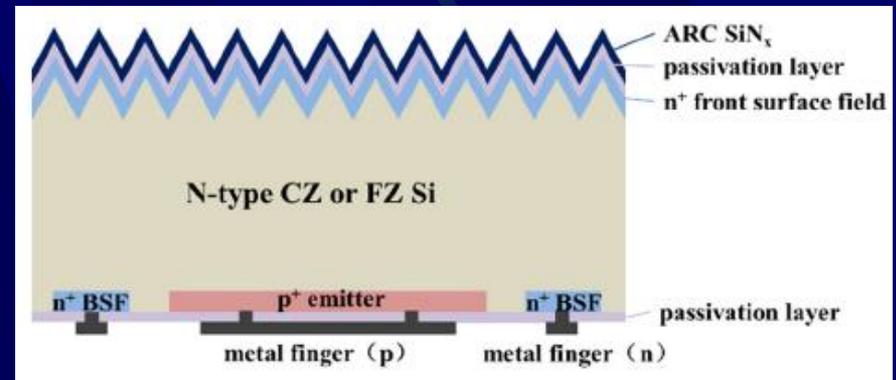
Al-Back-Surface-Field (Al-BSF)



Passivated Emitter & Rear Cell (PERC)



Silicon Heterojunction (SHJ)

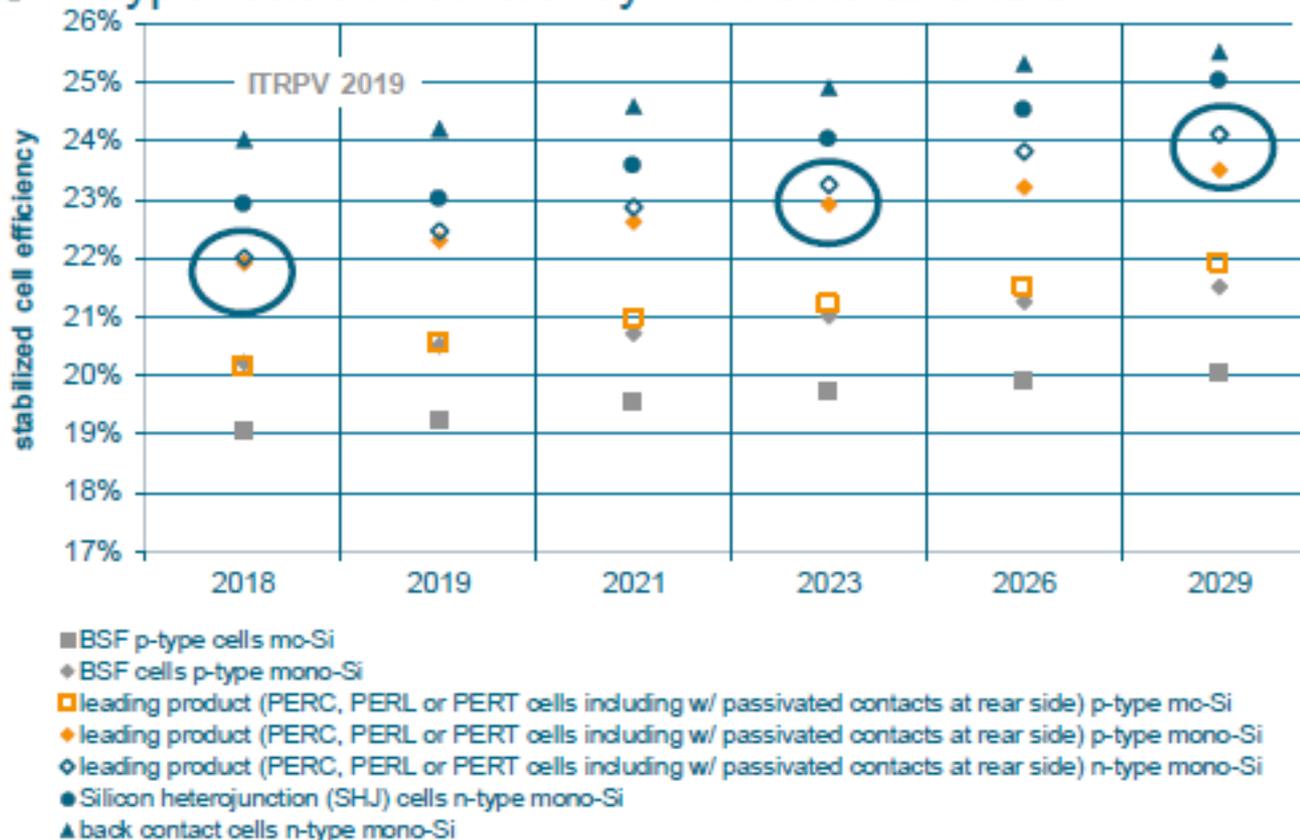


Interdigitated Back Contact (IBC)

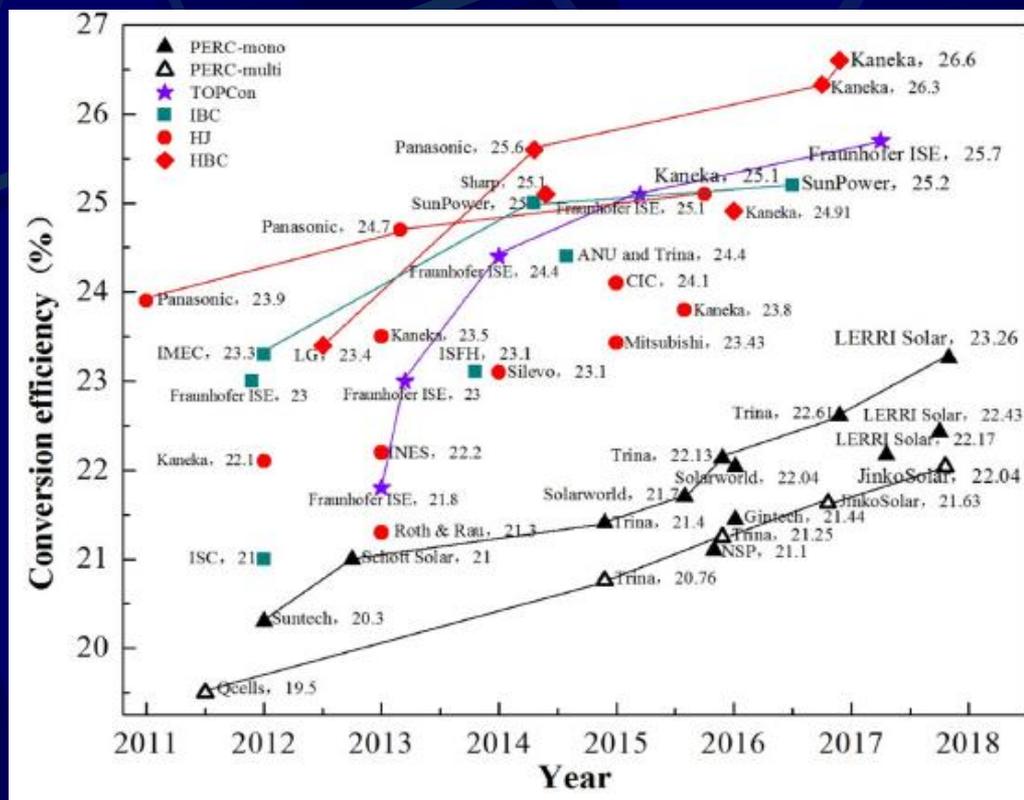
# Доминирующие СЭ на рынке: КПД в производстве, прогноз роста

## Trend: cell efficiency

→ n-type leads in efficiency with SHJ and IBC



# Рекордные КПД лабораторных СЭ

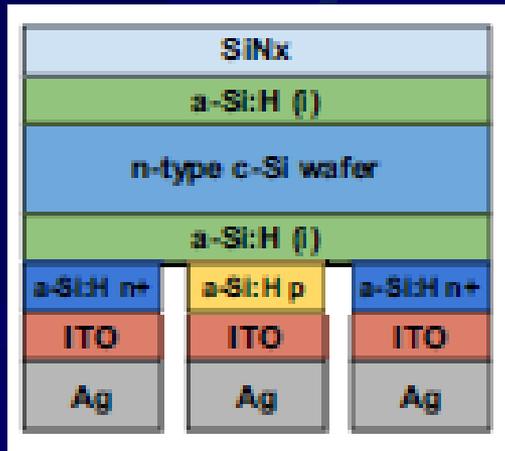


Дополнение. POLO-IBC: 26.1% (2018г., Institut für Solarenergieforschung Hameln (ISFH))

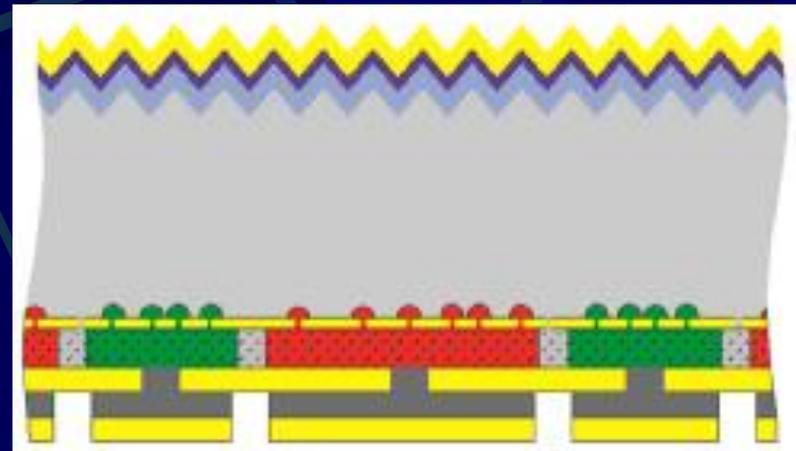
**ОТМЕТИМ!:** Прорыв 25%-го порога эффективности достигнут с помощью конструкций, основанных на «**селективных контактах**»

Поэтому в настоящее время именно подобные конструкции признаны наиболее перспективными для изготовления высокоэффективных СЭ.

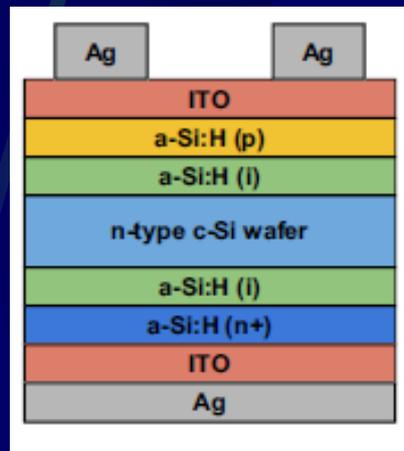
# Конструкции рекордных лабораторных СЭ



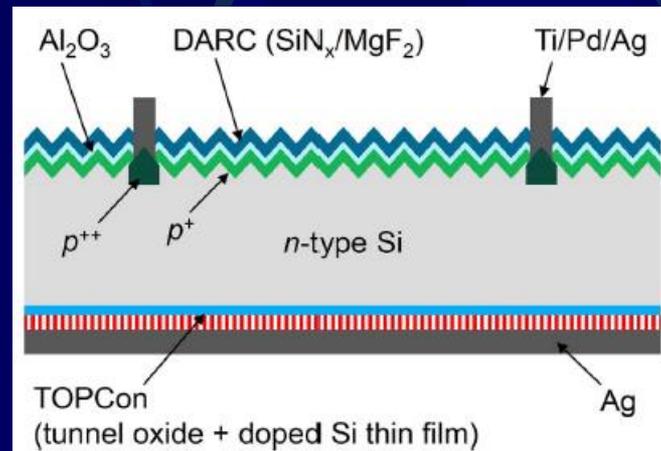
**SHG-IBC (HBC) 26.7%**



**POLO (polysilicon on oxide) 26.1%**

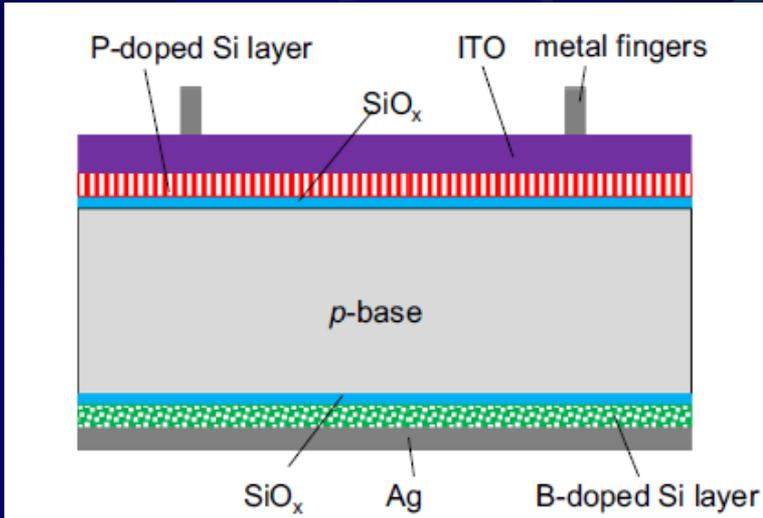


**SHG 25.1%**

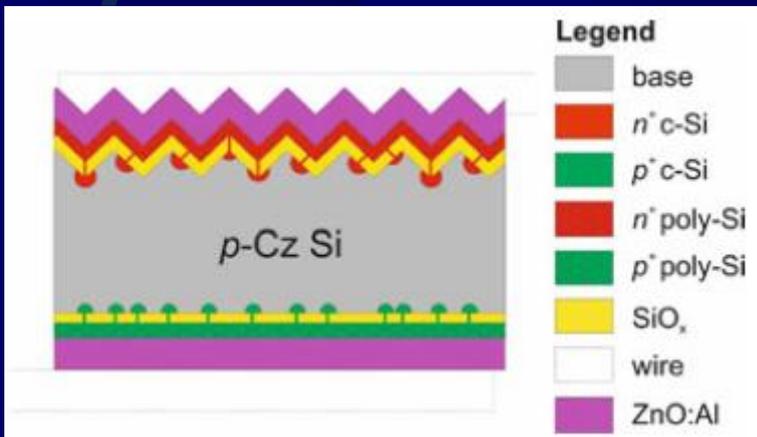
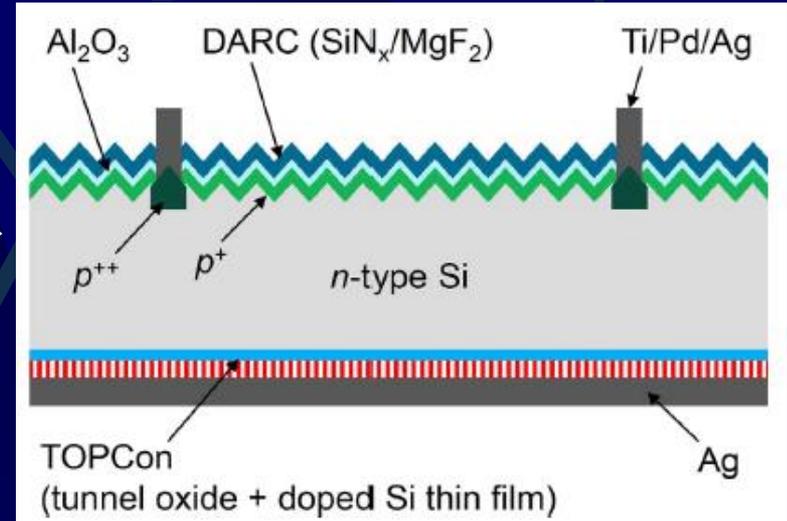


**TOPCon 25.8%**

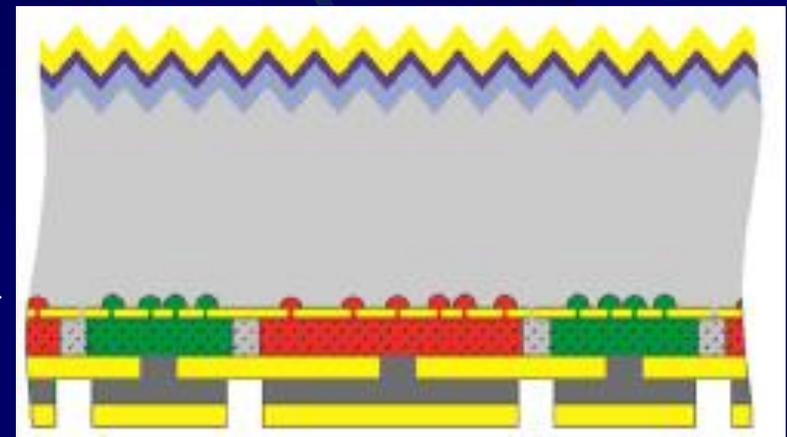
# Рекордные СЭ: мечты и реальность



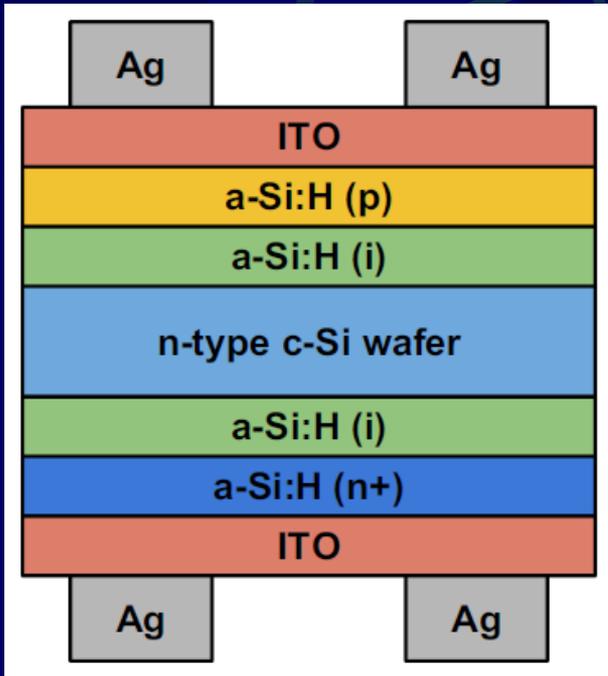
TOPCon



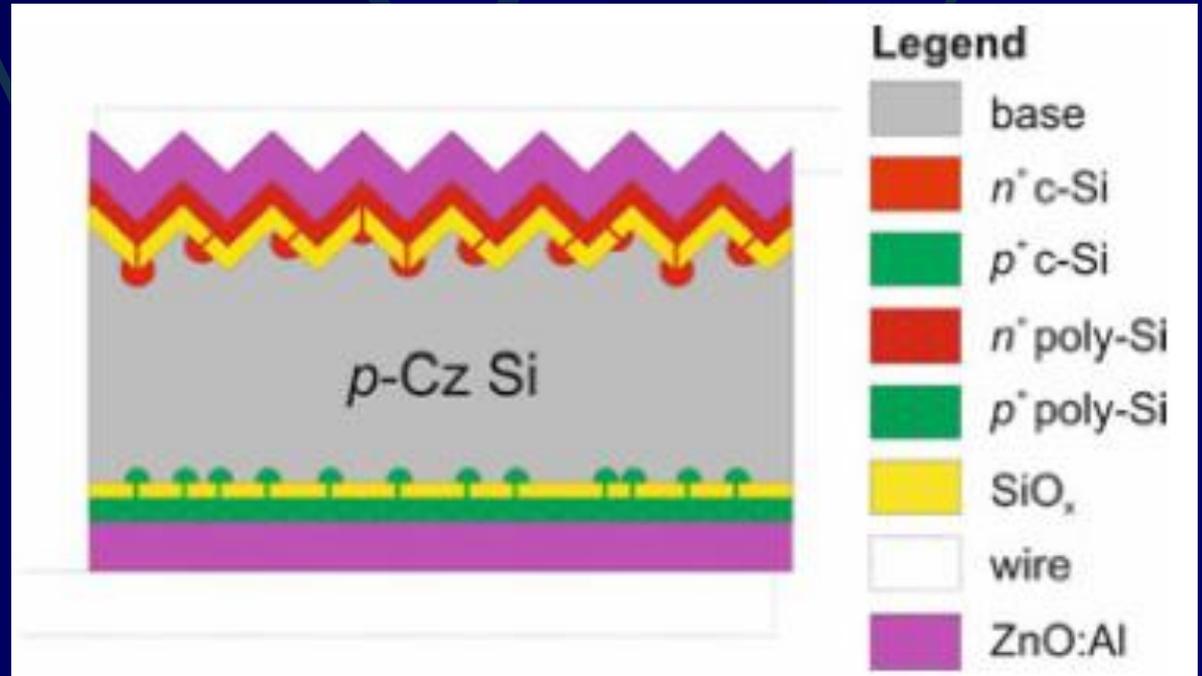
POLO



# SHJ vs. POLO

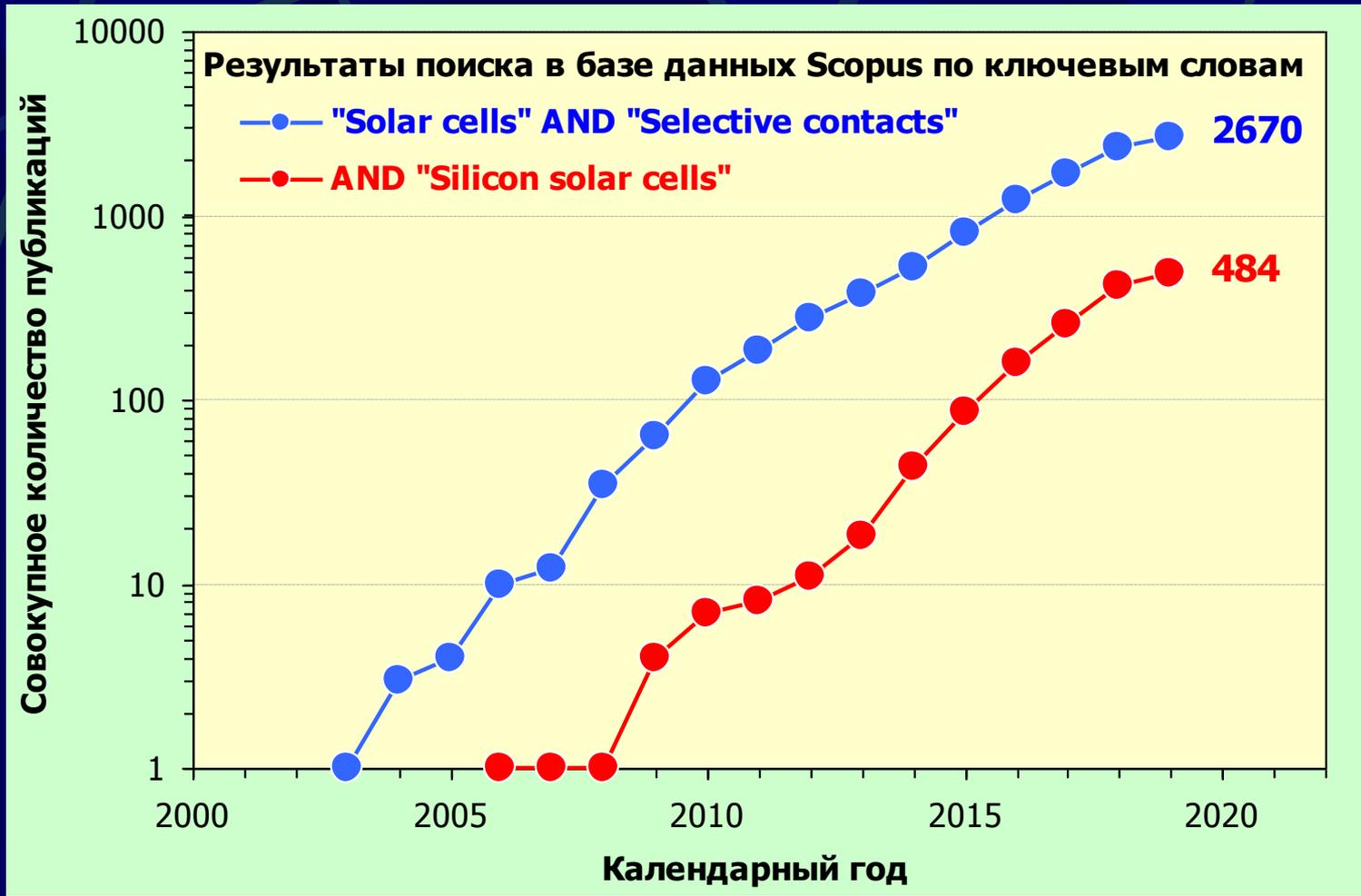


SHG

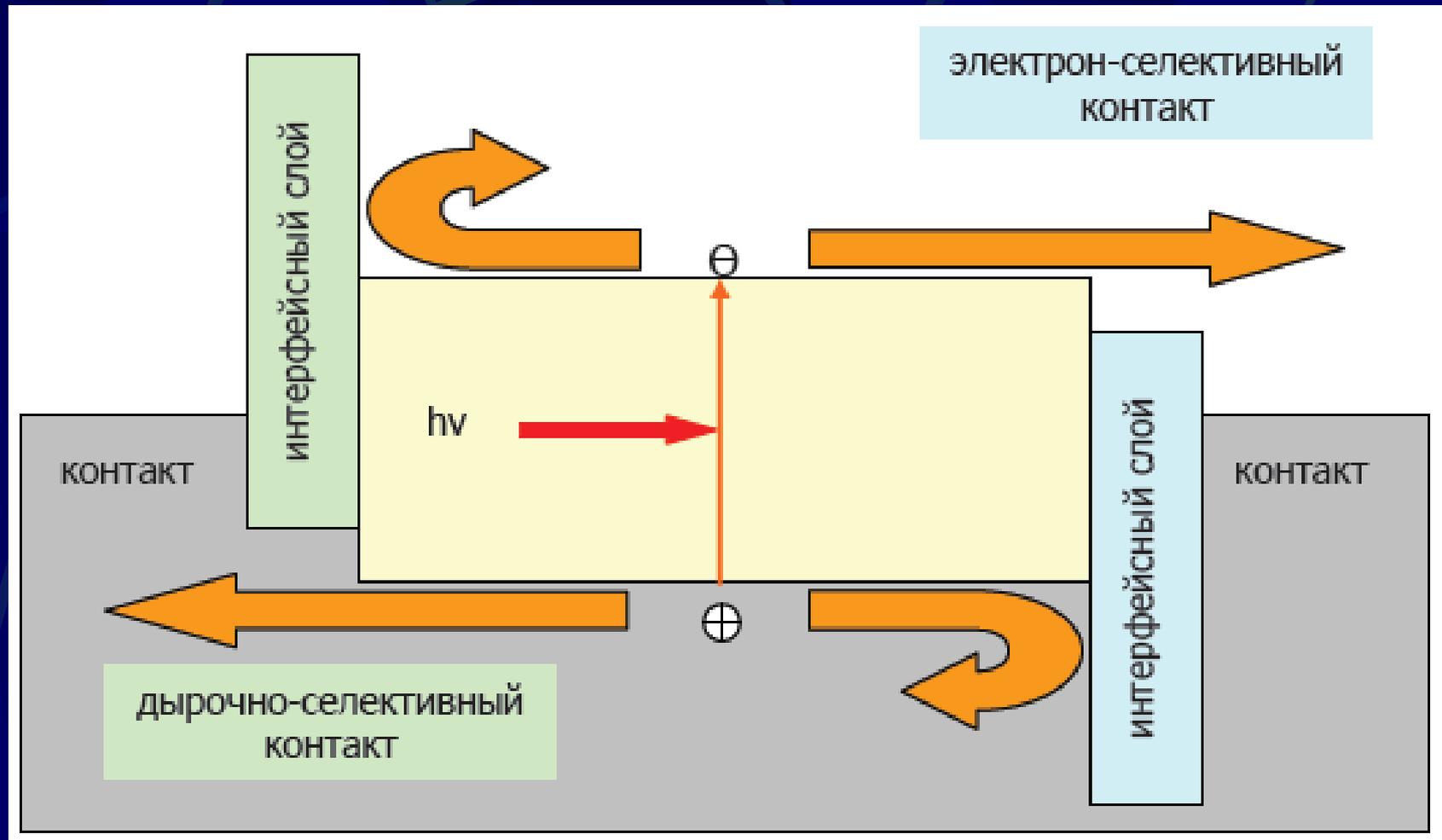


POLO

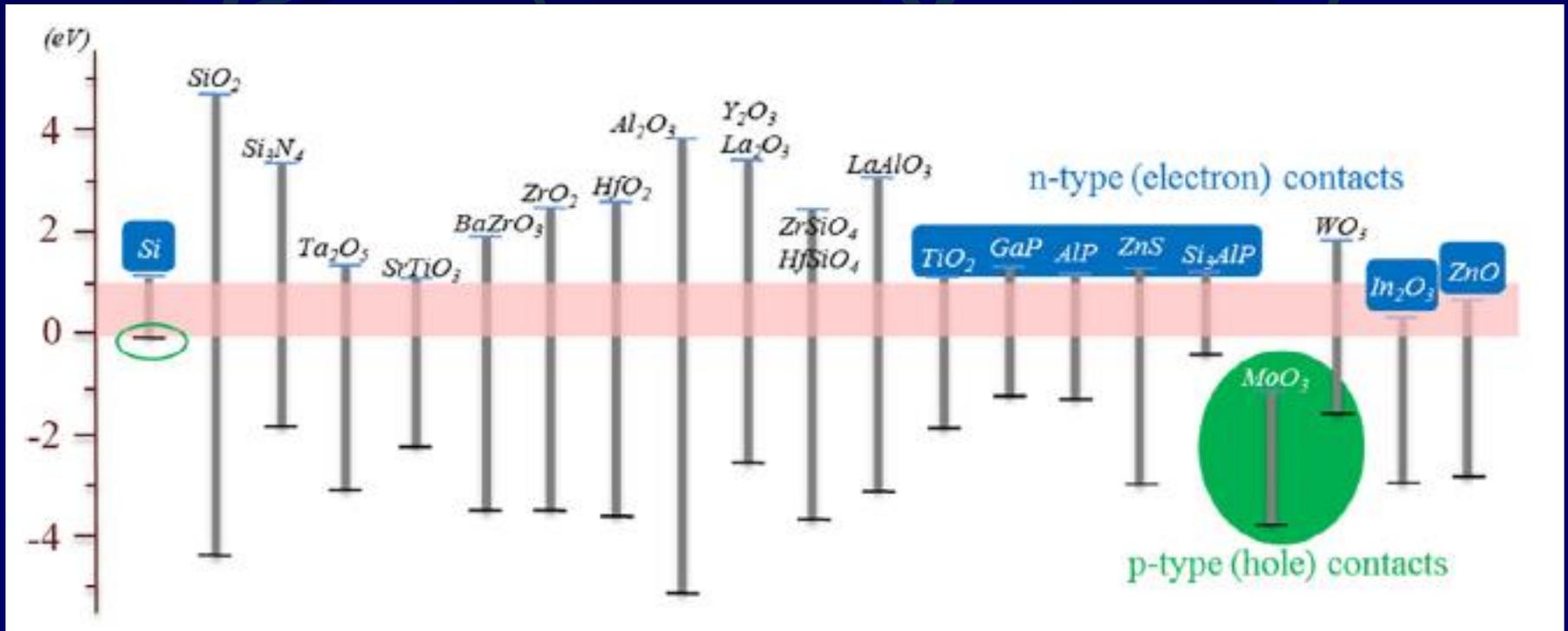
# Динамика развития разработок СЭ с селективными контактами



# Пример СЭ с селективными контактами

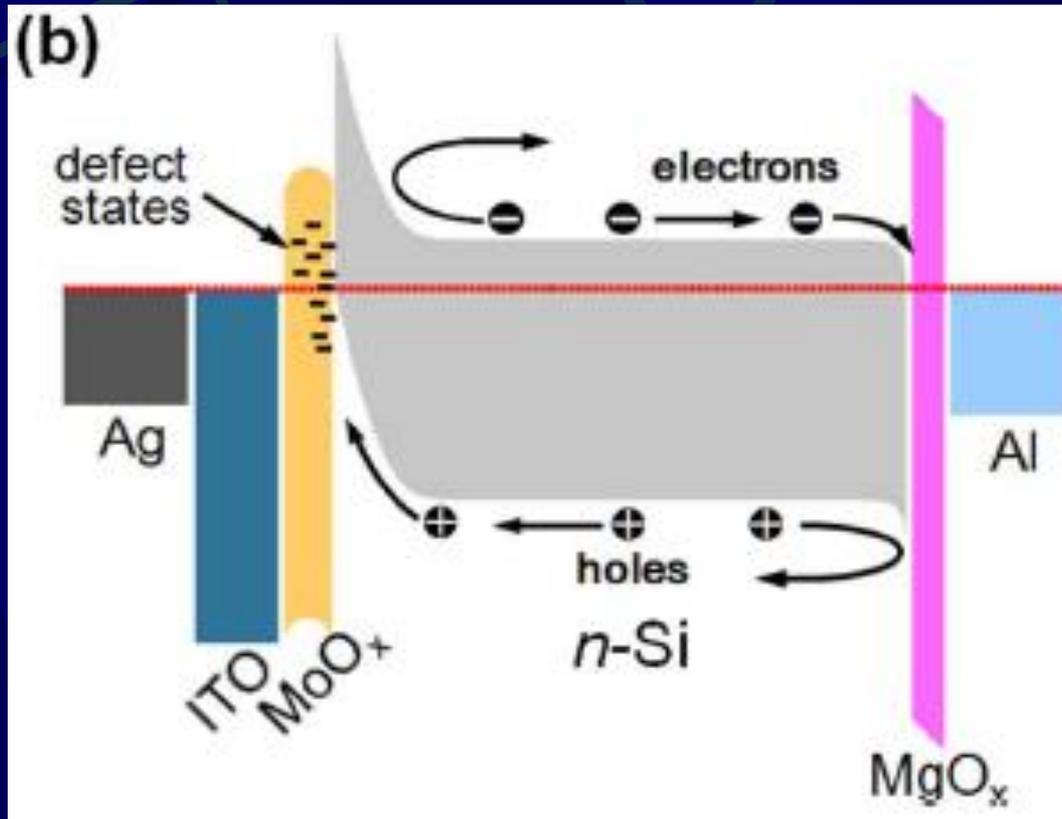


# Примеры материалов - потенциальных кандидатов для селективных контактов с Si



Rehman et al., 2018. Development and prospects of surface passivation schemes for high-efficiency c-Si solar cells. Solar Energy 166, 90–97

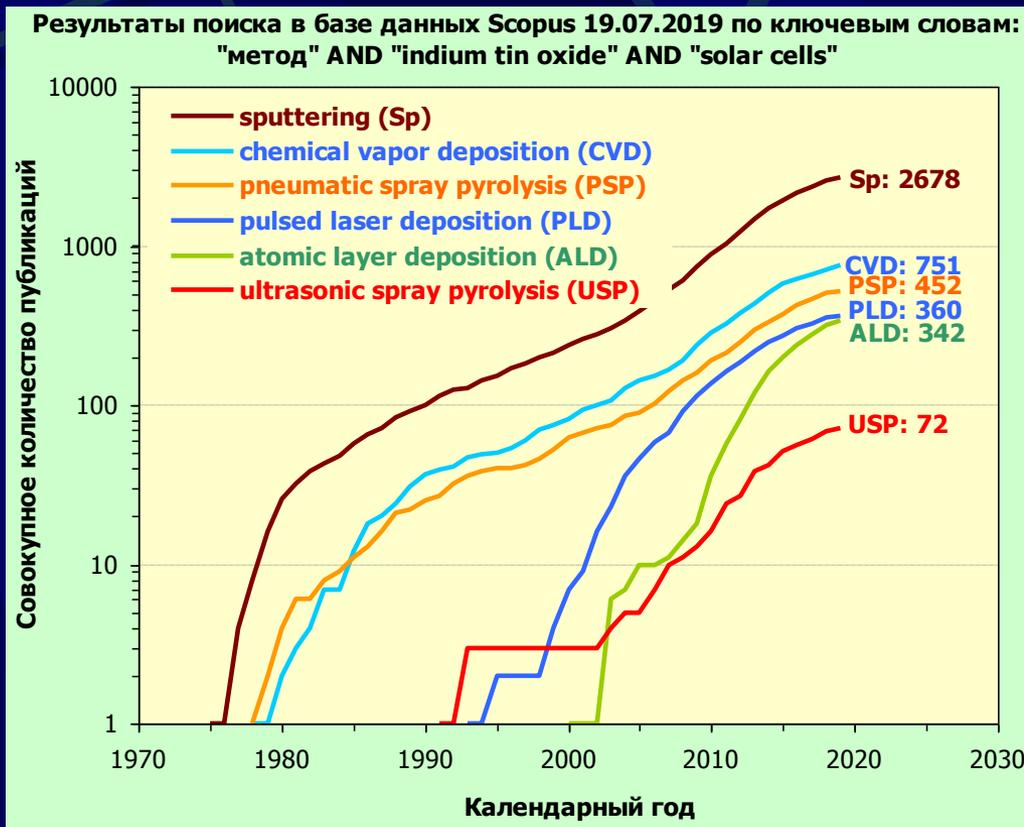
# Пример одной из конструкций СЭ с селективными контактами (КПД = 17.7%)



**СЭ с селективными контактами предполагают использование пленок TCO**

J. Yu et al., 2018. Heterojunction solar cells with asymmetrically carrier-selective contact structure of molybdenum-oxide/silicon/magnesium-oxide. Sol. Energy 159, 704–709

# Наиболее популярны пленки indium-tin-oxide (ITO), выращенные методом sputtering



Однако, Sp-метод повреждает поверхность. Это стимулировало волну работ по разработке неповреждающих методов выращивания ITO.

# Ультразвуковой спрей пиролиз (USP) - наиболее экономичный метод выращивания пленок TCO

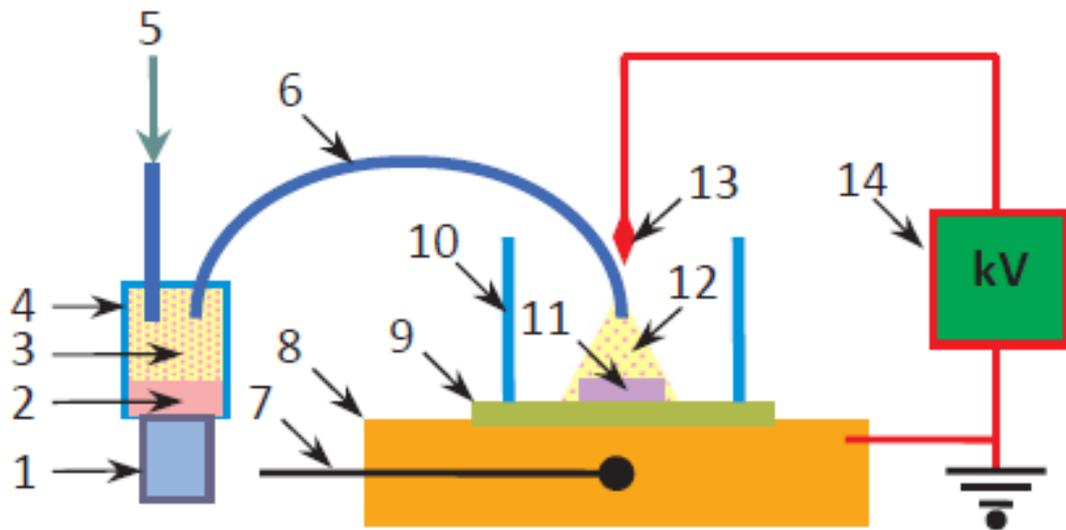


Fig. 1. Schematic of the home-made CDA-USP setup: (1) ultrasonic nebulizer, (2) film-forming solution, FFS, (3) FFS aerosol, (4) atomization chamber, (5) carrier-gas inlet, (6) aerosol guide tube, (7) thermocouple, (8) massive hot plate, (9) stage (Si wafer), (10) quartz cylinder, (11) substrate, (12) spray, (13) pointed electrode, (14) high-voltage source.

Corona-discharge-assisted ultrasonic spray pyrolysis (CDA-USP) – недавно разработанная в НИИЯФ МГУ усовершенствованная версия метода USP

# Некоторые результаты для гетеропереходных СЭ TCO/SiO<sub>x</sub>/c-Si с пленками TCO на основе In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и ZnO.

Year reference	Cell structure	Method <sup>1</sup>	J <sub>sc</sub> (mA/cm <sup>2</sup> )	V <sub>oc</sub> (mV)	FF (%)	η (%)
1976, DuBow [49]	ITO/SiO <sub>x</sub> /p-Si	IBS	32	510	70.0	12.4
1977, Manificier [50]	ITO/SiO <sub>x</sub> /n-Si	PSP	32	500	63.8	10.2
1980, Shewchun [51]	ITO/SiO <sub>x</sub> /p-Si	IBS	32.2	581	74.5	14.0
1991, Kobayashi [52]	ITO/SiO <sub>x</sub> /n-Si	PSP	42.5	460	66.5	13.0
1993, Kobayashi [53]	ITO/SiO <sub>x</sub> /n-Si	PSP	39	540	71.2	15.0
2006, Kobayashi [54]	ITO/SiO <sub>x</sub> /n-Si	PSP	>40	~575	<70.0	16.2
2008, Malik [55]	ITO/SiO <sub>x</sub> /n-Si	PSP		~540	69.0	12.2
2009, Bruk [56]	ITO/SiO <sub>x</sub> /n-Si	PSP	25.1	540	71.2	9.6
2013, Untila [57]	IFO/SiO <sub>x</sub> /p-Si	USP	37.7	618	76.3	17.8
2015, Du [58]	ITO/SiO <sub>x</sub> /n-Si	Sp	24.3	510	71.1	8.8
2015, Du [59]	ITO/SiO <sub>x</sub> /n-Si	Sp	25.5	500	72.75	9.27
2016, Simashkevich [60]	ITO/SiO <sub>x</sub> /n-Si	PSP	40.6	507	76.5	15.8 (monofacial)
			34.3	461	75.0	11.9 (bifacial, front)
			25.6	458	76.9	9.0 (bifacial, rear)
2016, Simashkevich [61]	ITO/SiO <sub>x</sub> /n-Si	PSP	38.9	561	73.0	15.93
2017, Du [62]	ITO/SiO <sub>x</sub> /n-Si	Sp	34.2	480	70.0	11.5
2017, Untila [63]	ITO/SiO <sub>x</sub> /n-Si	USP	38.3	560	76.4	16.4 (bifacial, front)
			34.3	558	76.6	14.6 (bifacial, rear)
2018, Song [64]	ITO/n-Si	Sp	30.5	540	74.2	12.2
1984, Tomar [65]	ZnO/SiO <sub>x</sub> /p-Si	PSP	9.2	350		<2
1995, Kobayashi [66]	IZO/SiO <sub>x</sub> /n-Si	PSP	30.1	410	56	6.9
1999, Baik [67]	AZO/SiO <sub>x</sub> /n-Si	Sol-Gel	23.5	372	60.6	5.3
2006, Ibrahim [68]	AZO/SiO <sub>x</sub> /p-Si	PSP	10	520	63	6.6
2009, Lupan [69]	AZO/SiO <sub>x</sub> /p-Si	SCSD	28	335	72.1	6.8
2010, Shen [70]	AZO/SiO <sub>x</sub> /p-Si	Sp	17.3	400	16.5	1.14
2012, Hsu [71]	AZO/SiO <sub>x</sub> /n-Si	PLD	31.5	240	51	3.9
2013, Fang [72]	IZO/SiO <sub>x</sub> /n-Si	PLD	28.6	350	34.3	3.4
2013, Yun [73]	AZO/SiO <sub>x</sub> /n-Si	Sp	5.47	113	25	4.8
2014, Fang [74]	IZO/SiO <sub>x</sub> /n-Si	PLD	35.6	380	49.7	6.7
2014, Djessas [75]	IZO/SiO <sub>x</sub> /p-Si	Sp	25	480	50	6.0
2014, Pietruszka [76]	AZO/SiO <sub>x</sub> /p-Si	ALD	33	300	43	4.4
2014, Pietruszka [77]	AZO/ZnO/SiO <sub>x</sub> /p-Si	ALD	34	270	50	5.0
2015, Talkenberg [78]	AZO/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /n-Si	ALD	20.0	340	26.5	1.8
2015, Pietruszka [79]	AZO/ZnO/ZnO <sub>Ni</sub> /p-Si	ALD+HTM	29.9	435	71.0	9.2
2016, Untila [80]	AZO/SiO <sub>x</sub> /n-Si	USP	36.2	400	57.3	8.3 (bifacial, front)
			22.4	390	61.6	5.4 (bifacial, rear)
2016, Pietruszka [81]	AZO/Zn <sub>(1-x)</sub> Mg <sub>x</sub> O/p-Si	ALD	34.0	320	66.0	7.1
2017, Chabane [82]	ZnO/p-Si	Sp	1.7	450	-	2
2017, Chen [83]	BZO/ZnO/p-Si	MOCVD	26.1	294	36.7	2.8
2017, Pietruszka [84]	AZO/ZnMgO/ZnO/p-Si	ALD+HTM	28.1	520	71	10.4
2019, Untila [85]	FZO/SiO <sub>x</sub> /p-Si	CDA-USP	35.9	528	60.4	10.5
2019, Untila [86]	FZO/SiO <sub>x</sub> /p-Si	CDA-USP	35.3	542	61.1	11.7

<http://photo.rmc.ru>



Если на первый взгляд идея не кажется абсурдной,  
у нее нет будущего

© А. Эйнштейн

# Спасибо за внимание!



Алла Чеботарева    Геннадий Унтила    Татьяна Кост