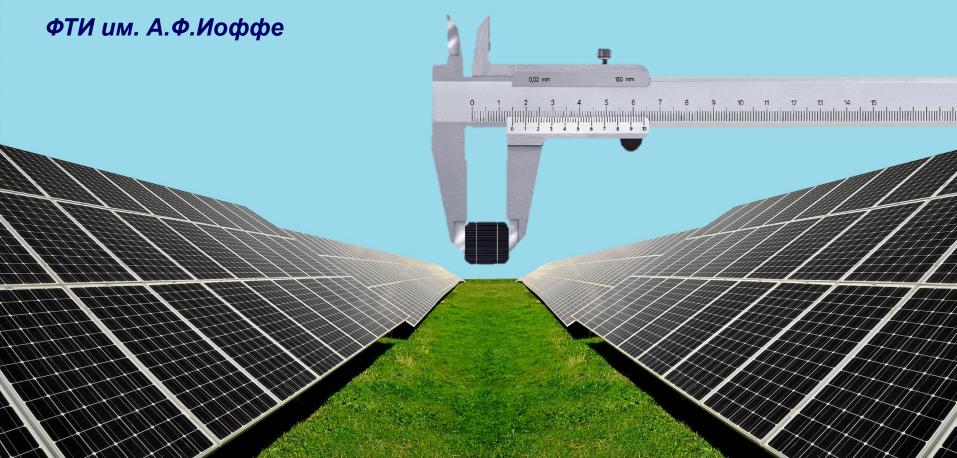
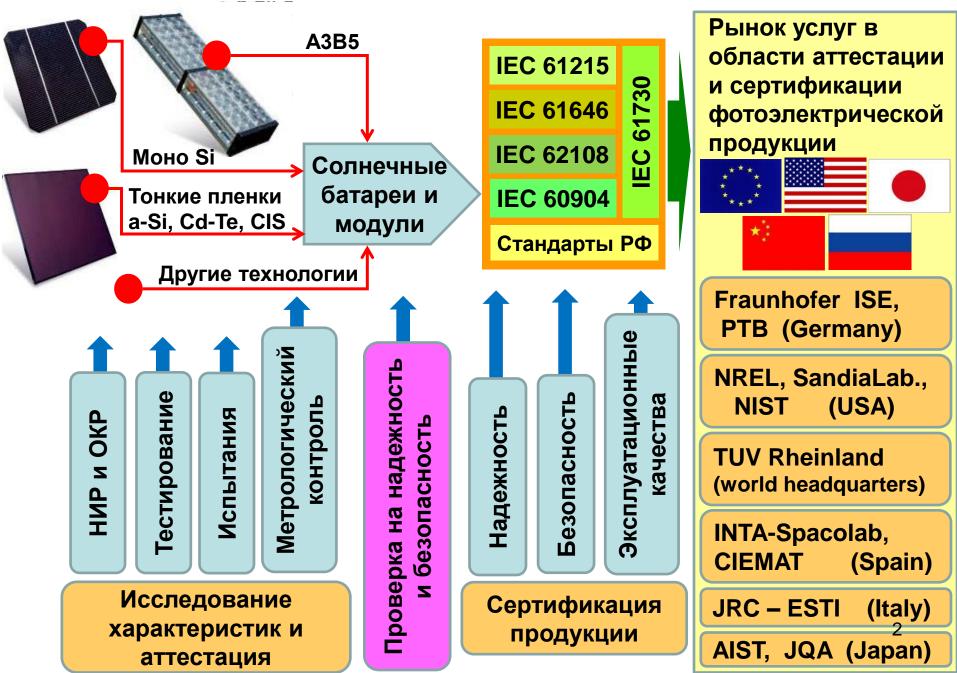
МЕТРОЛОГИЯ В СОЛНЕЧНОЙ ФОТОЭНЕРГЕТИКЕ

М.З.Шварц

к.ф.-м.н., С.н.с. лаборатории фотоэлектрических преобразователей



Контроль фотоэлектрической продукции



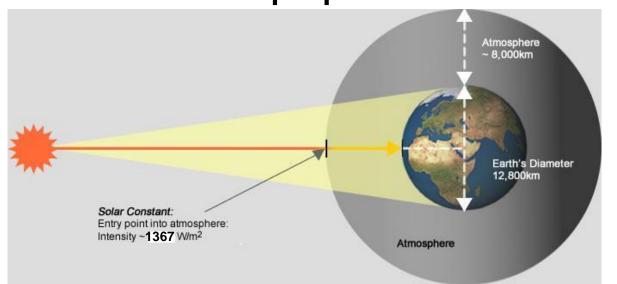
План лекции

- 1. Солнечное излучение и его характеристики. Моделирование характеристик солнечного излучения.
- 2. Эталонные солнечные элементы.
- 3. Спектральные и вольт-амперные характеристики СЭ и фотоэлектрических модулей.
- 4. Измерения на натурном Солнце.
- 5. Источники неопределенности результатов измерений.

1. Солнечное излучение и его характеристики

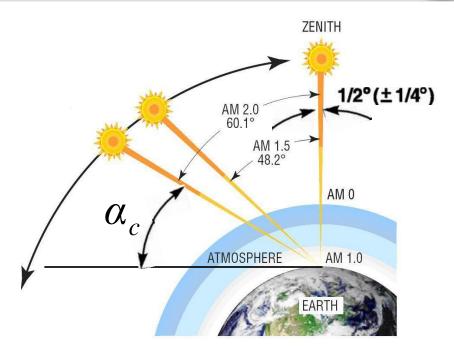
Внеатмосферное солнечное излучение
Наземное солнечное излучение
Моделирование характеристик солнечного лучения на имитаторах излучения
Требования к точности моделирования рактеристик излучения
Методики контроля, настройки и корректировки рактеристик излучения солнечных имитаторов

Внеатмосферное солнечное излучение



Закон Планка

$${
m E_{C_{\lambda}}} = {
m C_1} \cdot {\lambda}^{-5} / exp(\,{
m C_2}/{\lambda} \cdot {
m T_C}\,) - 1$$
 С1, С2 – постоянная Планка, С1 = 3,742 10-16 Втм2; С2 = 1,438 10-2 мК; λ – длина волны, м; Тс – температура АЧТ (Солнца) – 5800 К.

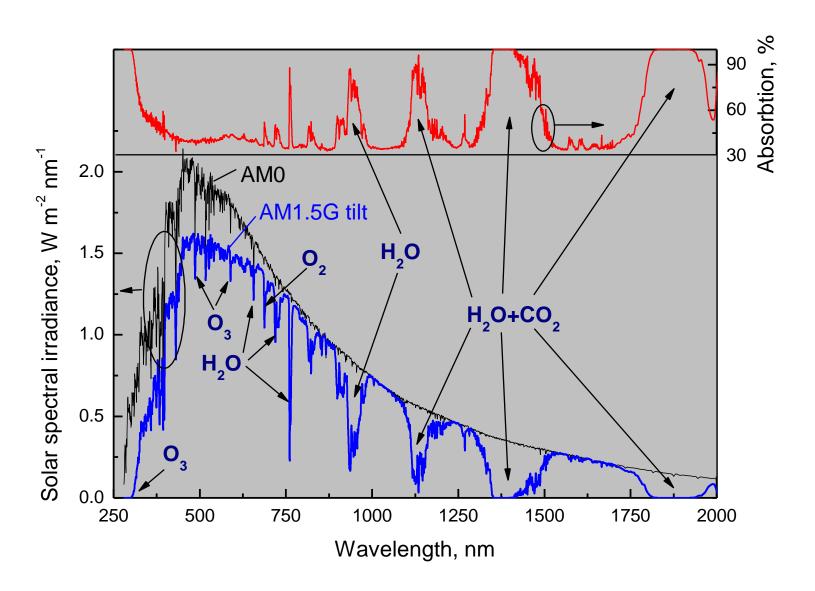


 Θz — зенитный угол Солнца;

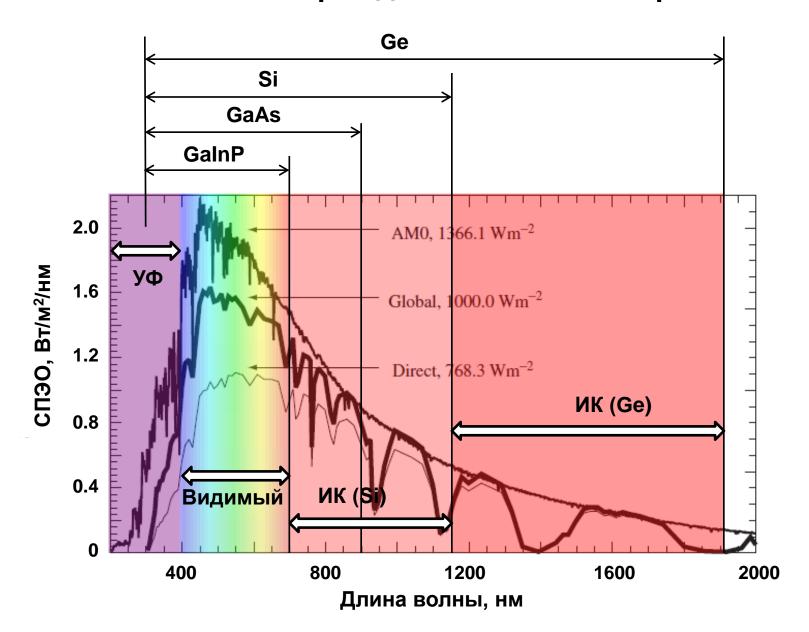
AM — атмосферная масса - путь, пройденный солнечными лучами в атмосфере:

$$AM = \frac{1}{\cos \Theta_Z} = \frac{1}{\sin \alpha_c}$$

Изменение спектрального состава солнечного излучения при прохождении через атмосферу



Спектральная область солнечного излучения, представляющая наибольший интерес для солнечной энергетики



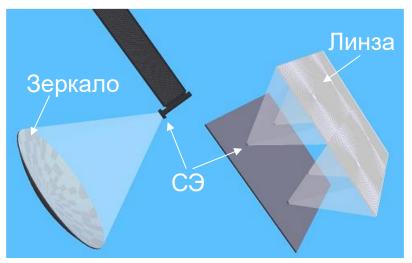
«Солнечная ферма»: территория, покрытая полупроводниковыми фотопреобразователями







«Солнечный лес»: излучение перехватывается недорогими линзовыми концентраторами





Использование концентраторов излучения позволяет:

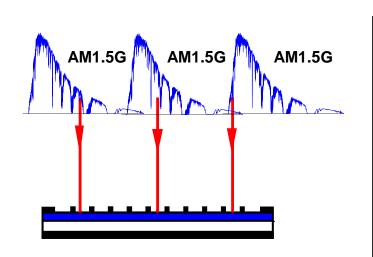
- -увеличить КПД фотопреобразователей за счет увеличения плотности тока;
- -сделать экономически оправданным применение высокоэффективных, но дорогих фотопреобразователей в наземной электроэнергетике.

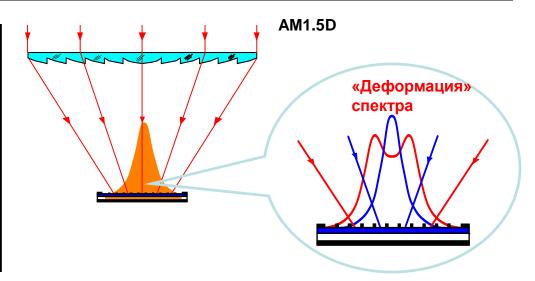
Преобразование солнечного излучения

Неконцентрированное

Концентрированное

Энергетическая освещенность (ЭО) и спектральная плотность ЭО на СЭ





Требования по моделированию параметров излучения

Возможны значительные отклонения по ЭО и СПЭО

Требования по качеству воспроизведения ЭО И СПЭО (AM1.5D Low AOD, 1000 W/m²)

Расходимость излучения в световом потоке

2.5 угл . град.

32 угл. мин.

Требования при моделировании солнечного излучения:

- **Энергетическая освещенность** (плотность потока излучения) 1366,1 Вт/м² (АМО) или **1000** Вт/м² (АМ1.5)
- Спектральная плотность энергетической освещенности (спектр излучения)
- Угловая расходимость излучения в световом потоке
 - до 2.5 угл. град. для планарных СЭ и ФЭМ;
 - 32 угл. мин. для ФЭМ с концентраторами излучения
- Однородность освещенности в плоскости испытаний

Неоднородность (%) =
$$\pm \frac{\mathit{Макс. ocseщ.-Muh. ocseщ.}}{\mathit{Makc. ocseщ.+Muh. ocseщ.}} \times 100$$

• Долговременная стабильность энергетической освещенности

Нестабильность (%) =
$$\pm \frac{\mathit{Макс. ocseи.-Muh. ocseи.}}{\mathit{Макс. ocseи.+Muh. ocseи.}} \times 100$$

где *макс*. и *мин*. уровни освещённости, измеряемые детектором на назначенной площади испытаний с учётом нестабильности энергетической освещенности (светового потока) по времени или в течение времени приёма данных;

Основные требования при моделировании солнечного излучения (продолжение):

• Однородность – освещенность в плоскости испытаний на всей назначенной для испытаний площади, которая измеряется соответствующим детектором, должна быть однородной в степени, установленной для соответствующего класса имитатора

Неоднородность (%) =
$$\pm \frac{\mathit{Макс. ocseи}, -\mathit{Muh. ocseи},}{\mathit{Makc. ocseu}, +\mathit{Muh. ocseu},} \times 100$$

где *макс*. и *мин*. уровни освещённости, измеряемые детектором на назначенной площади испытаний с учётом нестабильности энергетической освещенности (светового потока) по времени;

• Долговременная стабильность энергетической освещенности — в течение времени приёма данных уровень энергетической освещенности должен быть стабилен и не превышать, установленных для соответствующего класса имитатора, допустимых отклонений:

Нестабильность (%) =
$$\pm \frac{\mathit{Макс. ocseи}_{..} - \mathit{Muh. ocseu}_{..}}{\mathit{Makc. ocseu}_{..} + \mathit{Muh. ocseu}_{..}} \times 100$$

где *макс*. и *мин*. уровни освещённости, измеряемые детектором на назначенной площади испытаний в течение времени приёма данных.

Моделирование характеристик солнечного излучения на имитаторах излучения

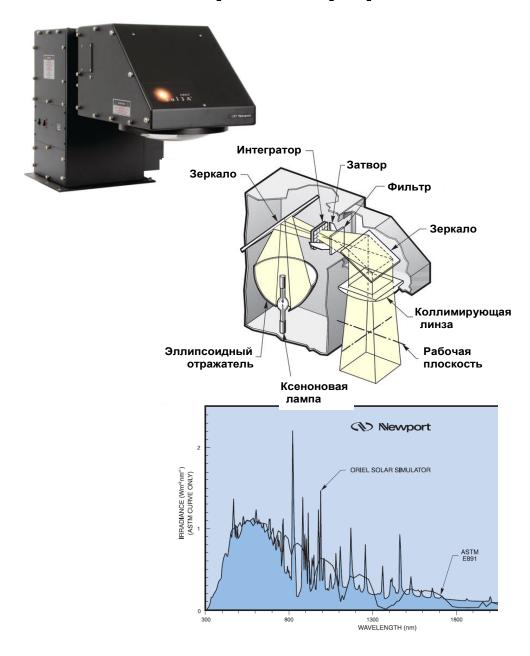
• Имитаторы постоянного горения

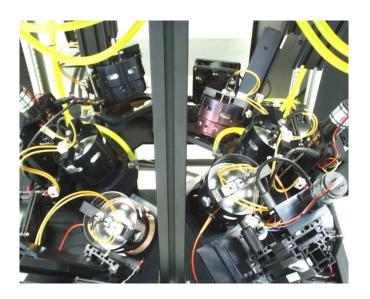
Неконцентрированное излучение (до 10 солнц) Малые площади (до 20х20 см²)

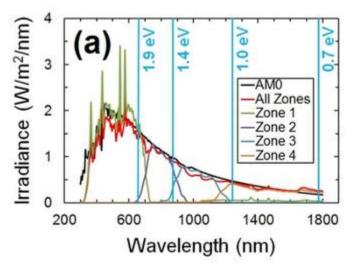
• Импульсные имитаторы

Концентрированное излучение до 5 000 солнц Большие площади (характеризация модулей)

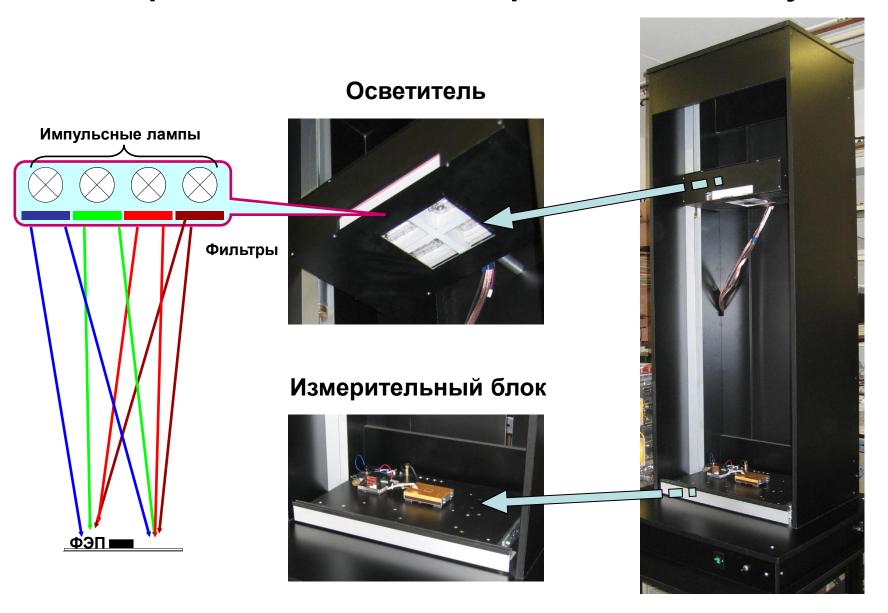
Имитаторы непрерывного солнечного излучения



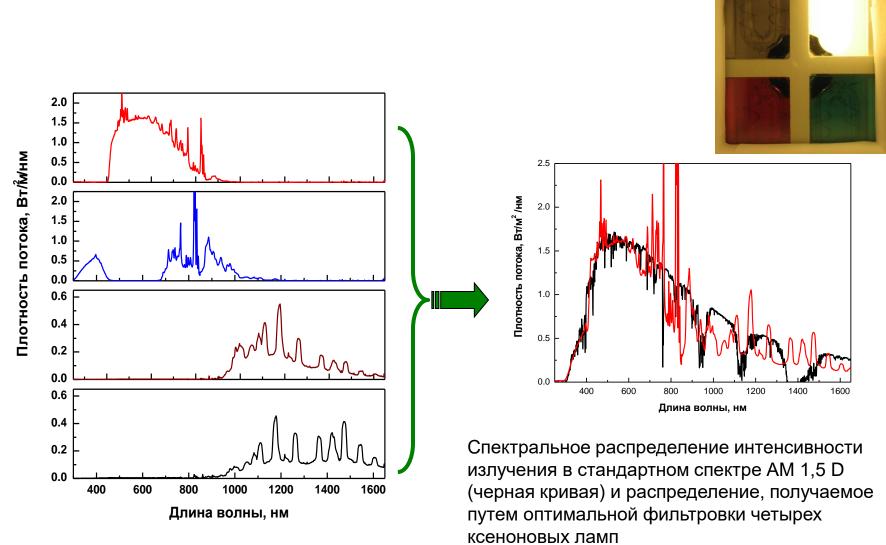




Четырехламповый имитатор солнечного излучения

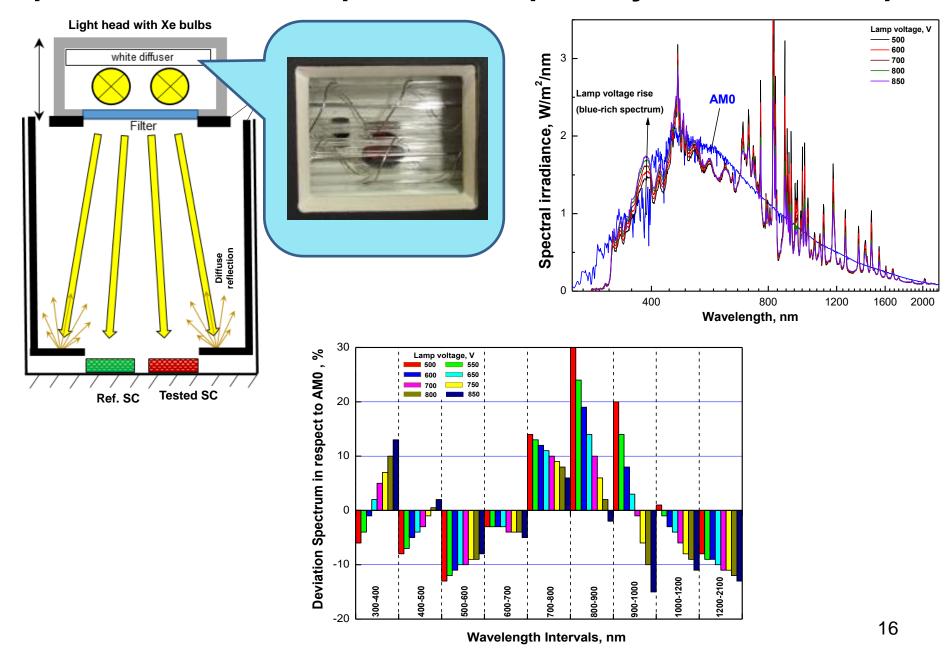


Четырехламповый имитатор солнечного излучения: пример построения спектра

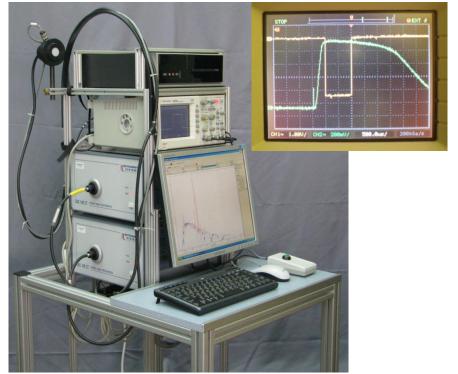


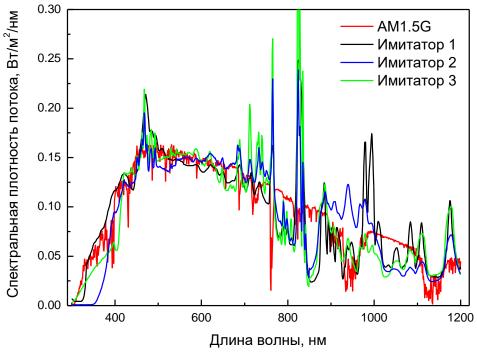
Спектральные распределения плотности потока световых каналов в имитаторе солнечного излучения

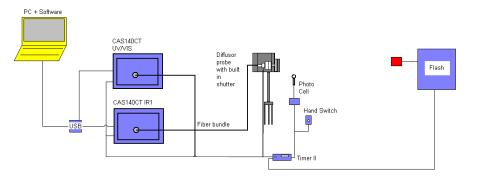
Прецизионная подстройка спектра излучения имитатора



Спектрорадиометр для исследования спектров излучения импульсных имитаторов







Спектральные распределения плотности потока имитаторов солнечного излучения в сравнении со стандартным солнечным спектром AM 1.5 G (красная линия):

Имитатор 1 – имитатор солнечного излучения постоянного горения SS-80AA;

Имитатор 2 – двухламповый импульсный;

Имитатор 3 – четырехламповый импульсный.

2. Эталонные солнечные элементы

Эталонные солнечные элементы и их конструкция.
Подбор СЭ для создания эталонов.
Стабильность характеристик эталонных солнечных ементов.
Градуировка и поверка эталонных солнечных ементов.

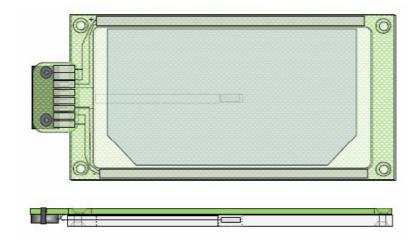
2. Эталонные солнечные элементы

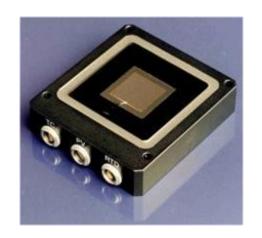
Необходимы для настройки энергетической освещенности в рабочей области имитатора солнечного излучения или ее оценке при натурных исследованиях

В зависимости от области применения эталонные солнечные элементы могут иметь следующие варианты исполнения:

1. Элементы для калибровки в условиях космического солнечного излучения (AM0). Требования к вариантам корпусирования и коммутации однопереходных СЯ устанавливаются стандартом ISO/DIS 15387. Элементы могут иметь размеры 2х2 см², 4х8 см², 8х8 см².

2. Элементы для калибровки в условиях наземного солнечного излучения (AM1.5G или AM1.5D). Требования к характеристикам однопереходных СЭ устанавливаются стандартами IEC 60904-2. Варианты исполнения должны соответствовать требованиям международной фотоэлектрической градуировочной схемы.

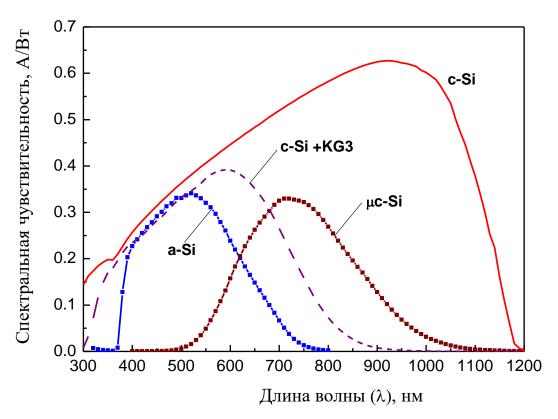




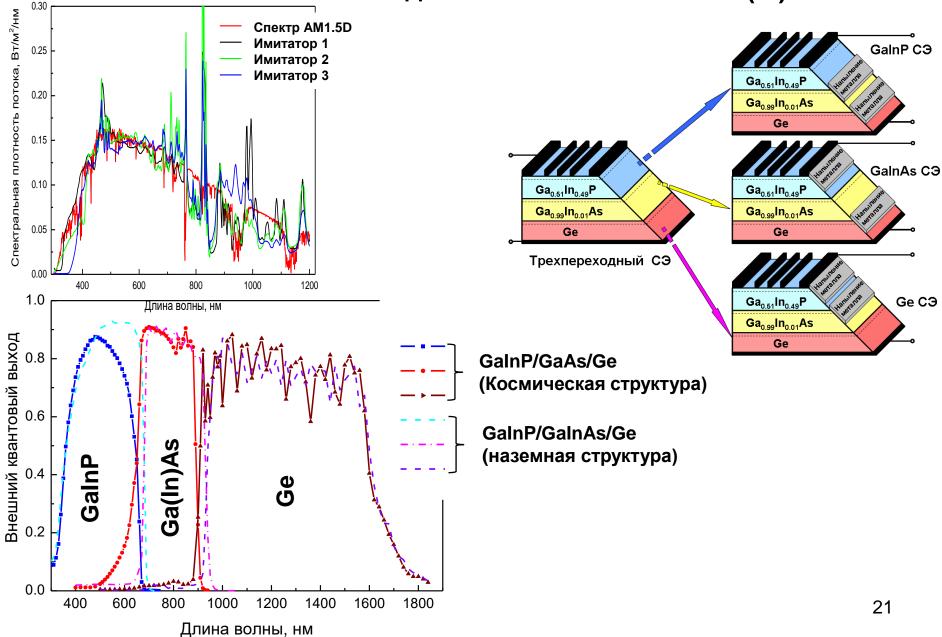
Практически используемые эталонные солнечные элементы

Наиболее широкое распространение к настоящему времени получила пара эталонных СЭ:

- c-Si элемент с диапазоном спектральной чувствительности 300 1200 нм;
- с-Si элемент с фильтром типа KG3 на диапазон спектральной чувствительности 300 900 нм.



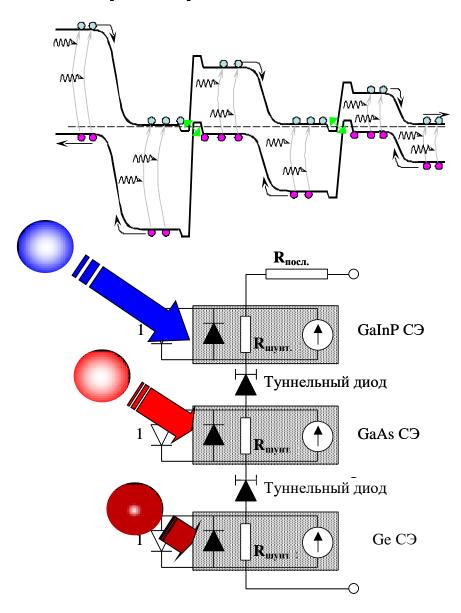
Принцип формирования комплекта эталонных солнечных элементов на основе соединений A3B5 – GaInP-Ga(In)As-Ge

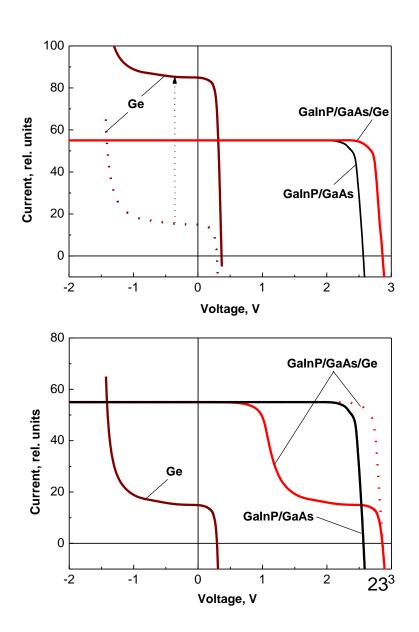


3. Спектральные и вольт-амперные характеристики СЭ
--

	Оптические и рекомбинационные потери в СЭ
СП	Особенности формообразования вольт-амперных рактеристик (ВАХ) многопереходных СЭ при измерении ектральных зависимостей внешнего квантового выхода отоответа.
вн	Методы и средства исследования спектральных зависимостей ешнего квантового выхода фотоответа, спектральные висимости коэффициентов отражения и пропускания.
□ сп	Экспериментальные установки для исследования ектральных характеристик солнечных элементов.
	ВАХ солнечных элементов и их измерение.
	Влияние спектрального состава излучения на КПД СЭ.
ПЗІ	Требования к экспериментальному оборудованию для мерения ВАХ СЭ различных конструкций.

Эквивалентная схема и принцип формообразования ВАХ трехпереходного GaInP/GaAs/Ge солнечного элемента.





Спектральные зависимости для СЭ:

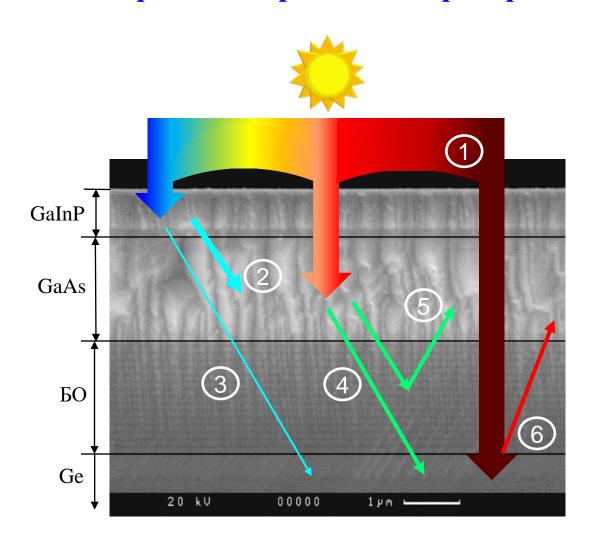
Внешней квантовой эффективности $Q_{\text{внешн}}$ (λ), которая представляет собой отношение числа электронно-дырочных пар, разделенных р-п переходом, к числу фотонов излучения определенной длины волны, поступивших на поверхность СЭ, и совокупно характеризует оптические и рекомбинационные потери

$$Q_{\text{внешн}}(\lambda) = \frac{I_{ph}(\lambda)}{qN_{tot}(\lambda)}$$

- **СОЗИВ** Коэффициента отражения *R*(λ) лицевой (а иногда лицевой и тыльной) поверхности СЭ, включая затенение контактной структурой
- Коэффициента пропускания T (λ) полупроводникового материала
- **Внутренней квантовой эффективности** $Q_{eнуmp}(\lambda)$, которая определяется отношением разделенных p-n переходом электронно-дырочных пар к числу фотонов излучения определенной длины волны, поглощенных в полупроводниковом материале, и характеризует рекомбинационные потери при условии, что квантовый выход внутреннего фотоэффекта близок к единице.

$$Q_{\text{внут}p}(\lambda) = \frac{Q_{\text{внеш}H}(\lambda)}{(1 - S_{\kappa}/S_{C})(1 - R(\lambda))}$$

Процессы переизлучения в многопереходных фотоэлектрических преобразователях (МП СЭ)



1 — солнечное (широкополосное) излучение

2 – люминесценция

GaInP→GaAs

3 – люминесценция

 $GaInP \rightarrow Ge$

4 – люминесценция

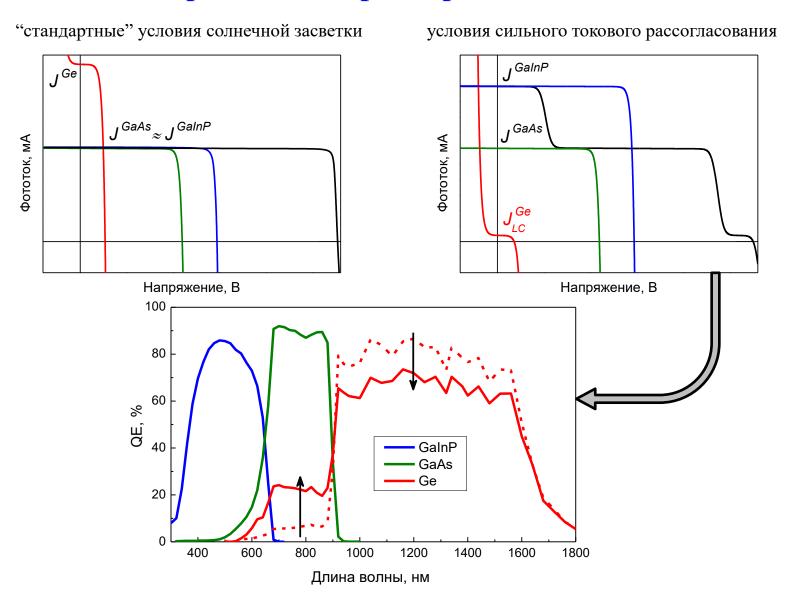
 $GaAs \rightarrow Ge$

5 – рециклируемое

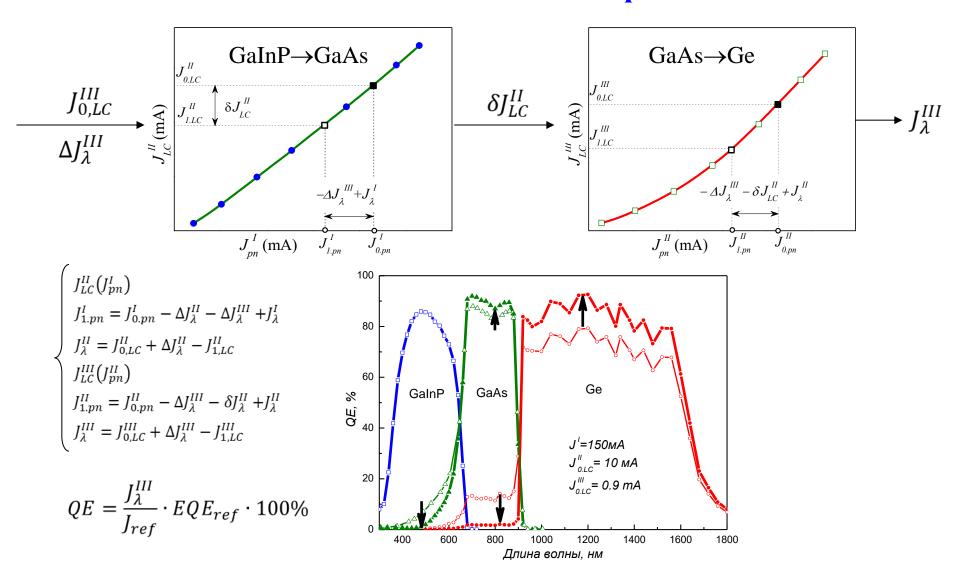
люминесцентное излучение

6 – ИК отражение от БО

Фотоэлектрические характеристики МП СЭ



Методика определения спектральной зависимости внешнего квантового выхода фотоответа



Настройка уровня облученности в рабочей зоне имитатора солнечного излучения по калиброванному фотоприемнику

Плотность фототока для заданной спектральной плотности энергетической освещённости $E(\lambda)$ рассчитывается по формуле:

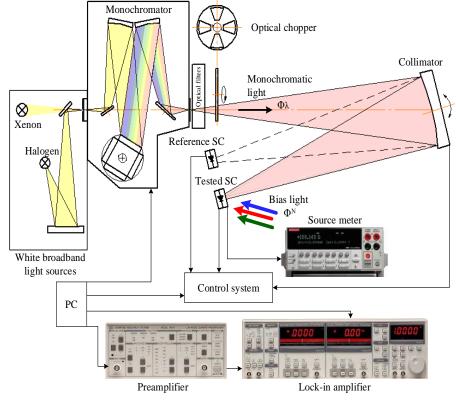
$$J_{SC} = \frac{q}{hc} \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} E(\lambda) \cdot QE(\lambda) \cdot \lambda \ d\lambda$$

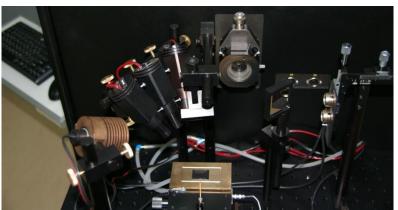
Коэффициент токового рассогласования:

$$M = \frac{\int\limits_{\lambda_{2}}^{\lambda_{1}} E_{AM1.5G}(\lambda) \cdot SR_{\Im manoh}(\lambda) \cdot d\lambda}{\int\limits_{\lambda_{2}}^{\lambda_{1}} E_{LM}(\lambda) \cdot SR_{C9}(\lambda) \cdot d\lambda} = \frac{\int\limits_{AM1.5G}^{\Im manoh} \cdot J_{LM}^{C9}}{\int\limits_{AM1.5G}^{C9} \cdot J_{LM}^{\Im manoh}} = \frac{\int\limits_{AM1.5G}^{\Im manoh} \cdot J_{LM}^{C9}}{\int\limits_{AM1.5G}^{C9} \cdot J_{LM}^{\Im manoh}}$$

$$[M-1]<1\% \qquad \Longrightarrow \qquad E_{UM} \sim I_{UM}^{\mathfrak{I}manoh} = \frac{I_{AM1.5G}^{\mathfrak{I}manoh}}{M}$$

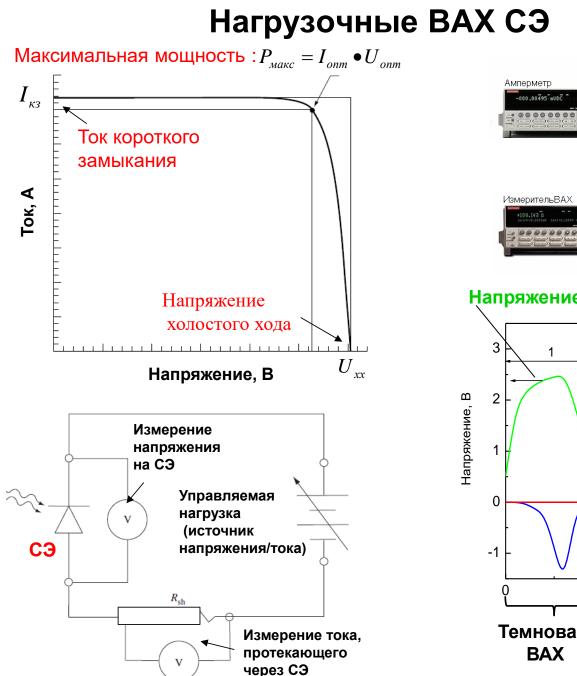
Комплекс для исследования спектральных характеристик многопереходных солнечных элементов (ФТИ им. А.Ф.Иоффе)

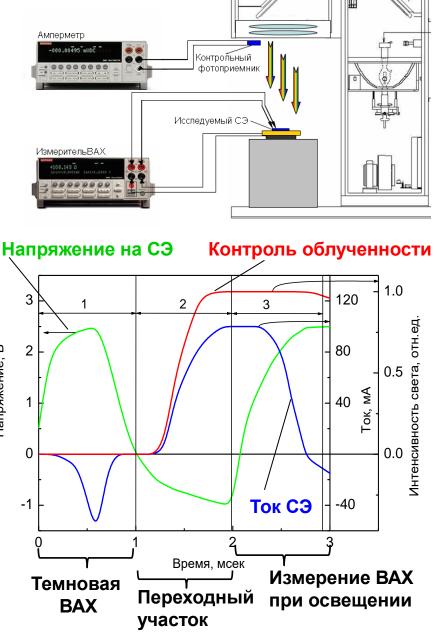












Имитатор солнечного излучения

4. Измерения на натурном Солнце

Измерение характеристик солнечных элементов и батарей на натурном Солнце.

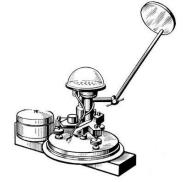
Актинометрия и спектрорадиометрия при исследованиях на натурном Солнце.

Контроль температуры при натурных исследованиях, погрешности результатов измерений и их корректировка



Приборы для измерения солнечного излучения

Пиранометр - абсолютный прибор для измерений энергетической освещенности от солнечного излучения, исходящего со всей верхней полусферы.

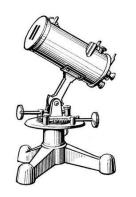








Пиргелиометр - абсолютный прибор для измерений прямой солнечной радиации, поступающей на перпендикулярную к солнечным лучам поверхность.



Актинометр AT-50



Современный пиргелиометр СНР1



Трехдиапазонный пиргелиометр

Источники актинометрических данных

Radiometer Calibrations



World Radiometric Reference



NREL Transfer Standards







ПРОСЛЕЖИВАЕМОСТЬ И СТРУКТУРНАЯ СХЕМА ПРОЦЕДУРЫ ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Государственный Радиометрический Эталон ГЭТ 86-89



Эталонные Фотоприемники



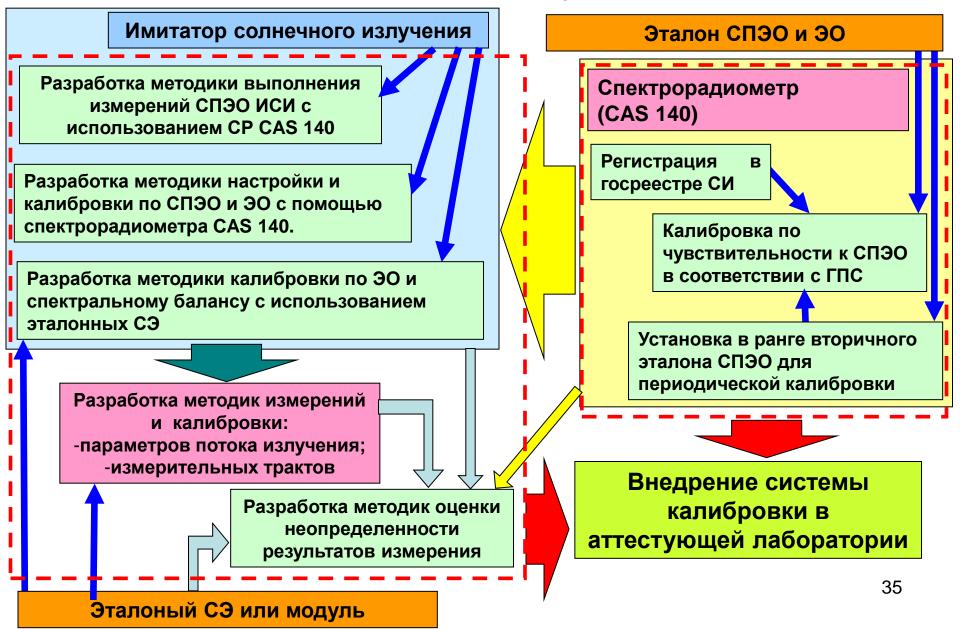
Установка для измерения параметров солнечных элементов





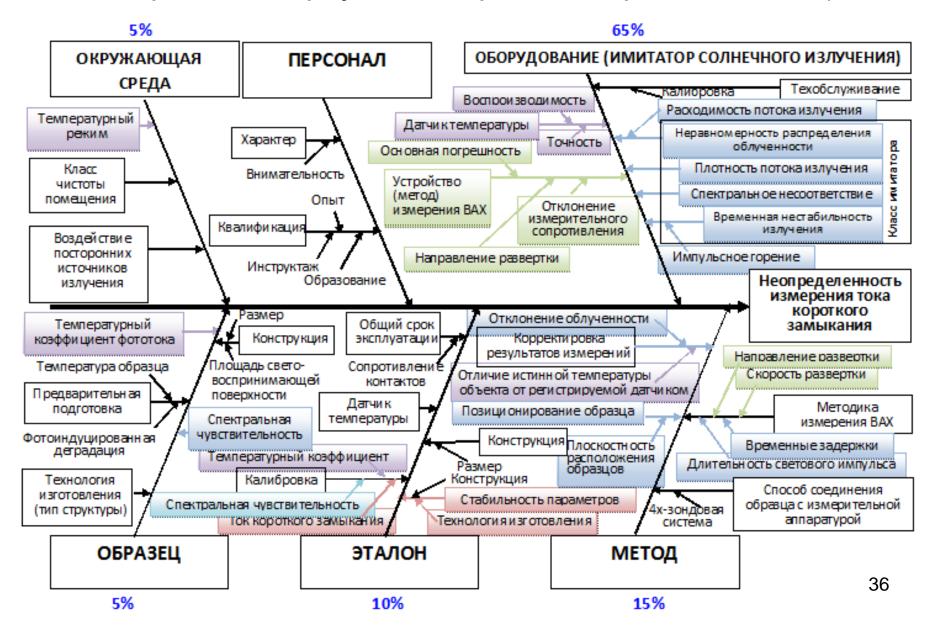
Ref.: материалы предоставлены **Всероссийским научно-исследовательским институтом оптико-физических измерений** (ВНИИОФИ).

Взаимосвязь процедур настройки и калибровки/поверки с привязкой к Государственной поверочной схеме средств измерений СПЭО и ЭО и источники неопределенностей результатов измерений



Источники неопределенности результатов измерений

(Причинно-следственная диаграмма для анализа неопределенности результата измерения тока короткого замыкания)



Спасибо за внимание!

