МЕТРОЛОГИЯ В СОЛНЕЧНОЙ ФОТОЭНЕРГЕТИКЕ

М.З.Шварц

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

ФТИ им. А.Ф.Иоффе

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 излучения на имитаторах излучения
- Требования к точности моделирования характеристик излучения
- Методики контроля, настройки и корректировки характеристик излучения солнечных имитаторов

Внеатмосферное солнечное излучение





Закон Планка E_{C_λ} = C₁ · λ⁻⁵ / exp(C₂ / λ · T_C)−1 C1, C2 − постоянная Планка, C1 = 3,742 10-16 Втм2; C2 = 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 (%) = $\pm \frac{Mакс. освещ. - Мин. освещ.}{Mакс. освещ. + Мин. освещ.} \times 100$

• Долговременная стабильность энергетической освещенности

Нестабильность (%) = $\pm \frac{Mакс. освещ. - Мин. освещ.}{Maкc. освещ. + Мин. освещ.} \times 100$

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 (%) = $\pm \frac{Mакс. освещ. - Мин. освещ.}{Mакс. освещ. + Мин. освещ.} \times 100$

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 (%) = $\pm \frac{Maкс. oсвещ. - Muн. oсвещ.}{Maкc. oсвещ. + Muн. oсвещ.} \times 100$

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





Спектральное распределение интенсивности излучения в стандартном спектре AM 1,5 D (черная кривая) и распределение, получаемое путем оптимальной фильтровки четырех ксеноновых ламп

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 элементов.

Градуировка и поверка эталонных солнечных элементов.

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:

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

 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:

- с-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

Особенности формообразования вольт-амперных характеристик (ВАХ) многопереходных СЭ при измерении спектральных зависимостей внешнего квантового выхода фотоответа.

Методы и средства исследования спектральных зависимостей внешнего квантового выхода фотоответа, спектральные зависимости коэффициентов отражения и пропускания.

Экспериментальные установки для исследования спектральных характеристик солнечных элементов.

□ ВАХ солнечных элементов и их измерение.

Влияние спектрального состава излучения на КПД СЭ.

Требования к экспериментальному оборудованию для измерения ВАХ СЭ различных конструкций.

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





Спектральные зависимости для СЭ:

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

$$Q_{\rm BHEWH}(\lambda) = \frac{I_{ph}(\lambda)}{qN_{tot}(\lambda)}$$

Коэффициента отражения *R*(λ) лицевой (а иногда лицевой и тыльной) поверхности СЭ, включая затенение контактной структурой

Κοэффициента пропускания *T* **(λ)** полупроводникового материала

Внутренней квантовой эффективности Q_{внутр}(λ), 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.

$$Q_{{}_{GHYMp}}(\lambda) = \frac{Q_{{}_{GHEWH}}(\lambda)}{(1 - S_{\kappa}/S_{CP})(1 - R(\lambda))}$$

Процессы переизлучения в многопереходных фотоэлектрических преобразователях (МП СЭ)



1 – солнечное (широкополосное) излучение 2 – люминесценция GaInP \rightarrow GaAs 3 – люминесценция GaInP \rightarrow Ge 4 – люминесценция GaAs \rightarrow Ge 5 – рециклируемое люминесцентное излучение 6 – ИК отражение от БО

Фотоэлектрические характеристики МПСЭ



условия сильного токового рассогласования

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:

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

Коэффициент токового рассогласования:

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



Preamplifier

Lock-in amplifier









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.



Пиранометр Янишевского





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





Трехдиапазонный пиргелиометр

Источники актинометрических данных Radiometer Calibrations



World Radiometric Reference



NREL Transfer Standards



NPC At SRRL



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)





