

УДК 621.383

МЕТРОЛОГИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ

В.Б. Залесский¹, В.С. Калиновский², А.А. Ходин¹

¹ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника», Национальная академия наук Беларуси

²Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Российская академия наук, Санкт-Петербург

SEMICONDUCTOR PHOTOELECTRIC SOLAR ENERGY CONVERTERS METROLOGY

V.B. Zalessky¹, V.S. Kalinovsky², A.A. Khodin¹

¹“Optics, Optoelectronics and Laser Techniques” SSPA, National Academy of Sciences of Belarus

²Ioffe Physical-Technical Institute, Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg

Рассмотрены основные характеристики солнечного излучения для преобразования в электрическую энергию с помощью полупроводниковых фотоэлектрических преобразователей (ФЭП), в том числе в условиях Республики Беларусь. Приведена нормативная база для подготовки и проведения испытаний ФЭП. Представлены принцип работы и основные характеристики аппаратно-измерительного комплекса для испытаний ФЭП в импульсном режиме.

Ключевые слова: фотоэлектрический преобразователь, метрология, имитатор солнечного излучения, AM1.5.

The main characteristics of solar radiation for conversion into electrical energy using semiconductor photoelectric converters (PEC), including the conditions of the Republic of Belarus, are considered. The regulatory framework for preparation and testing of PEC is presented. The principle of operation and the main characteristics of a hardware-measuring complex for testing PEC in a pulse mode are presented.

Keywords: photoelectric converter, metrology, solar simulator, AM1.5.

Введение

Развитие возобновляемых источников энергии в Республике Беларусь, в частности, фотоэлектрических преобразователей солнечной энергии (ФЭП), требует осуществления процедур испытания и сертификации разрабатываемых, приобретаемых, производимых и эксплуатируемых предприятиями и организациями устройств на специализированном измерительном комплексе для выработки оптимальных инженерных, маркетинговых и финансовых решений в данной области.

В настоящее время подобный измерительный комплекс в Беларуси отсутствует. Проводимые исследования и испытания ФЭП в Национальной академии наук, университетах и на предприятиях проводятся с помощью измерительных установок лабораторного типа, которые не в полной мере отвечают требованиям достоверного измерения выходных параметров ФЭП – эффективности, рабочего тока и напряжения в стандартных условиях засветки, соответствующих спектру и энергетическим характеристикам солнечного излучения от наземных условий (спектр AM1, AM1.5, AM2) до открытого космоса (AM0), в том числе концентрированного излучения. Как правило, используются имеющиеся в Российской Федерации испытательные стенды, в частности, в ОАО «Сатурн» и Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе РАН.

Однако, они имеют специфическое назначение для ограниченного круга задач.

При исследованиях, разработке и производстве новых материалов и новых конструкций ФЭП необходимо проводить измерения их выходных параметров и сертификацию в варьируемых спектральных и температурных режимах, для чего необходимо наличие соответствующего измерительного комплекса и методик испытаний и сертификации. Необходимый специализированный измерительный комплекс, включающий имитатор солнечного излучения, должен быть универсальным для широкого круга задач и типов ФЭП.

1 Характеристики солнечного излучения

Широкополосное электромагнитное излучение Солнца взаимодействует с собственным электромагнитным полем Земли и её атмосферой, что приводит к большим вариациям величины солнечного потока, доступного для фотоэлектрического преобразования. В зависимости от относительной величины воздушной массы m , сквозь которую проходит солнечное излучение, изменяется как спектральное распределение, так и интегральная интенсивность падающего на ФЭП светового потока (рисунок 1.1) [1].

На практике для контроля ФЭП применяются несколько международных стандартов:

1. Энергетический спектр солнечного излучения за пределами атмосферы (AM0, $m = 0$) описывается в международном стандарте ASTM E-490 с интегральной плотностью мощности излучения $1366,1 \text{ Вт/м}^2$ [2].

2. Для солнечного излучения на уровне поверхности Земли используются два основных стандарта. Спектр AM1.5 Global применяется для плоских панелей солнечных батарей при интегральной плотности мощности 1000 Вт/м^2 . Для солнечных батарей с концентраторами излучения используется стандарт AM1.5 Direct, включающий прямое излучение Солнца и гало вокруг солнечного диска (*circumsolar*) в диске диаметром $2,5$ угловых градуса с интегральной плотностью мощности 900 Вт/м^2 [3].

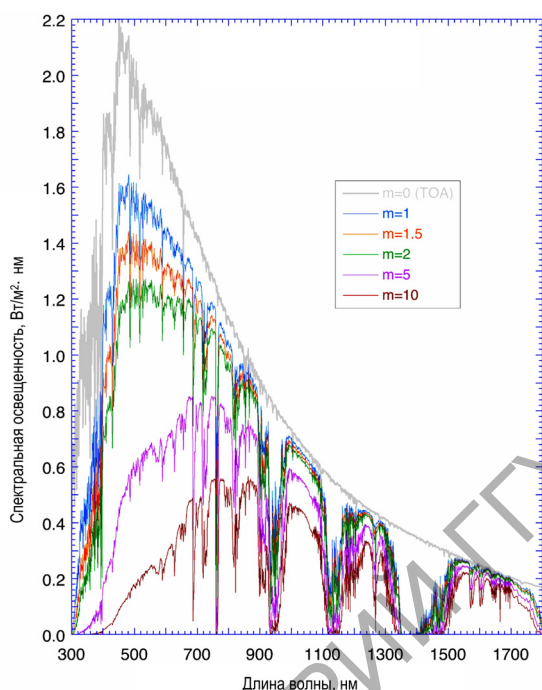


Рисунок 1.1 – Спектры прямого солнечного излучения для нормального падения излучения при относительной атмосферной массе $m = 0 \dots 10$ [1]

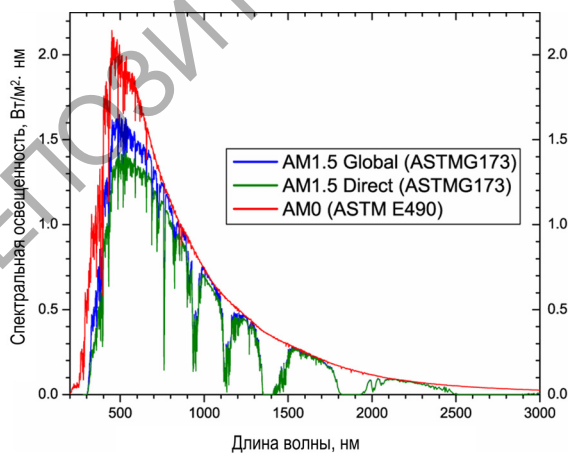


Рисунок 1.2 – Стандартные спектры AM0, AM1.5 Global, AM1.5 Direct [2], [3]

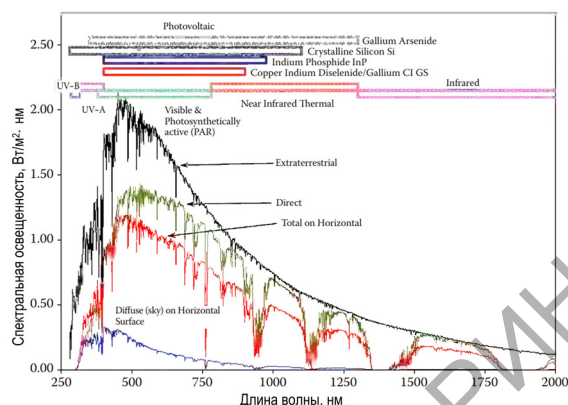


Рисунок 1.3 – Спектральное распределение мощности солнечного излучения за пределами атмосферы (первая кривая сверху), прямого излучения у поверхности Земли (вторая кривая), суммарного излучения на горизонтальной площадке (третья кривая) и рассеянного атмосферой (четвертая кривая). Для сравнения приведены диапазоны фотоэлектрической чувствительности различных полупроводников, используемых в фотовольтаике [1]

Спектры солнечного излучения согласно ASTM G-173-03 (международный стандарт ISO 9845-1 1992 года) и ASTM E490 приведены на рисунке 1.2. На рисунке 1.3 спектры солнечного излучения приведены в сравнении с диапазонами фотоэлектрической чувствительности некоторых широко используемых в фотовольтаике полупроводников.

Полное солнечное излучение (Total Solar Irradiance, TSI) варьируется в пределах 11-летнего солнечного цикла магнитной активности с амплитудой около $0,1\%$ около средней величины $1361,5 \text{ Вт/м}^2$ (т.н. «солнечная постоянная»).

В реальности «солнечная постоянная» не является константой [4], [5]. Особенно сильно влияние такого цикла сказывается в УФ-области спектра, где амплитуда максимум/минимум может достигать $0,6\text{--}4\%$ в зависимости от участка УФ-спектра ($120\text{--}240 \text{ нм}$ и $240\text{--}400 \text{ нм}$). При этом УФ часть спектра солнечного излучения дает около 60% всей вариативности потока солнечного излучения [6].

Численное моделирование эталонных спектров наземного солнечного излучения в диапазоне спектра $280\text{--}4000 \text{ нм}$ во многих случаях осуществляется с использованием приложения SMARTS (Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine), разработанного Dr. Christian Gueymard, Solar Consulting Services (NREL) для целей стандартизации метрологии солнечных элементов и батарей, включая стандарты ASTM G173 (*Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances: Direct Normal and Hemispherical on 37° Tilted Surface*), ASTM G177

(Standard Tables for Reference Solar Ultraviolet Spectral Distributions: Hemispherical on 37° Tilted Surface), ASTM G197 (Standard Table for Reference Solar Spectral Distributions: Direct and Diffuse on 20° Tilted and Vertical Surfaces). Точность модельных спектров определяется такими параметрами атмосферы, как оптическая глубина аэрозоля, осаждаемая вода, содержание озона и др. Последняя версия программы 2018 года – SMARTS 2.9.8 [7].

Для испытаний модулей ФЭП разработан международный стандарт IEC 60904-9 (Photovoltaic devices – Part 3: Measurement principles for terrestrial photovoltaic (PV) solar devices with reference spectral irradiance data), в котором даются определения параметрам модулей и средствам для их измерения, а также изложены требования к имитаторам излучения относительно спектрального распределения, допустимой пространственной неоднородности и временной стабильности интенсивности. При разработке концентраторных ФЭП и модулей на их основе возникают дополнительные требования, сформулированные в специализированном стандарте IEC 62670-3 (Photovoltaic concentrators (CPV) – Performance testing – Part 3: Performance measurements and power rating). Соответствие солнечному излучению при испытаниях концентраторных каскадных ФЭП должно быть более точным при разложении по определенным спектральным интервалам, поскольку недостаток фотонов при генерации фототока в одном из каскадов ограничивает ток во всех остальных каскадах ФЭП.

2 Спектрально-энергетические характеристики солнечного излучения в Беларуси

По данным Белгидромета, число пасмурных дней (при общей облачности) в Беларуси составляет от 175 на северо-западе до 135 на юго-востоке, ясных дней – на северо-западе 30–35 за год, на юго-востоке до 40–42 (рисунки 2.1, 2.2). Беларусь по общему количеству падающей на ее территорию солнечной энергии превосходит такую страну, как Германия, которая является лидером среди европейских стран по объемам использования солнечной энергии. В Германии и ряде других стран появился новый вид промышленности, обеспечивающий с одной стороны создание новых рабочих мест, с другой – создание нового продукта, конкурентноспособного как на внутреннем, так и на зарубежных рынках, с третьей – обеспечение страны собственными возобновляемыми энергоносителями.

При среднем по Беларуси потоке падающего солнечного излучения $1100 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$ в год и средней эффективности солнечных модулей 15% выработка «солнечной» электроэнергии P за год работы составит:

$$P = 1100 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2 \times 0,15 = 165 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2.$$

Суммарная площадь солнечных батарей для обеспечения полной потребности Беларуси в энергии может составить:

$$36,6 \text{ млрд кВт}\cdot\text{ч} / 165 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2 = \\ = 2,2 \times 10^8 \text{ м}^2 \text{ или } 220 \text{ км}^2 = 14,8 \times 14,8 \text{ км}^2,$$

что меньше площади Минска (350 км^2). При этом стоимость электроэнергии, получаемой на солнечных фотоэлектрических установках при цене $\sim 4000 \text{ \$} / \text{кВт}$ (в зависимости от вида СЭ) и сроке службы 20 лет, составит менее 10 центов/кВт·час.

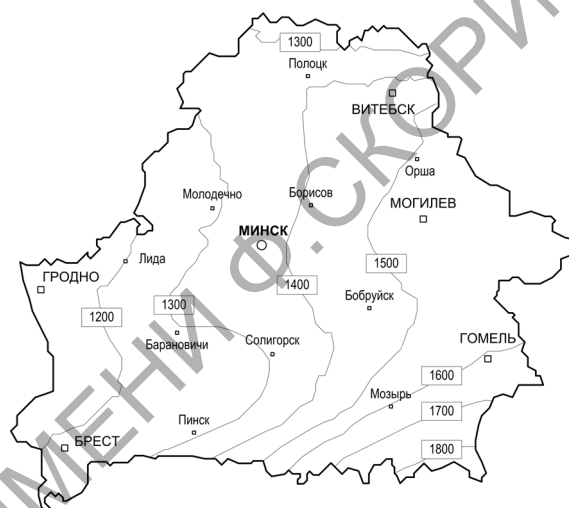


Рисунок 2.1 – Среднемесячный баланс энергии падающего солнечного излучения на территории Беларуси (кВт·час/м²/день)

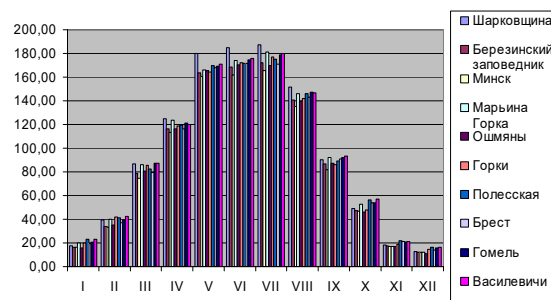


Рисунок 2.2 – Годовые вариации среднемесячного баланса энергии падающего солнечного излучения по регионам Беларуси

В настоящее время в РБ наблюдается рост числа компаний, занимающихся установкой солнечных батарей и станций как для автономных потребителей, так и коммерческих, занимающихся поставкой «зеленого» электричества в сеть по повышенным тарифам (таблица 2.1). Как видно, доля солнечных электроустановок в общем балансе возобновляемых источников энергии растет ежегодно примерно на 5 процентных пунктов.

Таблица 2.1 – Рост производства электроэнергии солнечными электростанциями Республики Беларусь, млн. кВт·ч, по данным [8]

Год	2014	2015	2016	2017	2018
Солнечные электростанции	2	9	26	89	118
Ветроустановки	9	39	73	97	99
Гидроэлектростанции	121	111	142	406	324
Всего возобновляемых источников энергии	132	159	241	592	541
Доля солнечных установок среди всех возобновляемых источников энергии, %	1,5	5,7	10,8	15,0	21,8

3 Основные типы полупроводниковых ФЭП

В настоящее время разрабатываются ФЭП (солнечные элементы) на различных материалах, которые условно можно разбить на 3 группы. К первой группе (I) относятся ФЭП на монокристаллических полупроводниках (кремний, соединения A_3B_5), которые обладают высоким кпд, но и большой стоимостью.

Ко второй группе (II) относятся тонкопленочные солнечные элементы (на основе различных модификаций кремния, соединениях $Cu(InGa)Se_2$, $CdS-CdTe$, тройных и четверных соединениях A_3B_5), обладающих меньшим кпд, но и меньшей стоимостью.

ФЭП третьей группы (III) находятся на стадии разработки и ожидается, что они обеспечат высокий кпд при низкой стоимости. В третью группу включают исследования по разработке СЭ на перовскитах, органических материалах, красителях, квантовых ямах и т. п.

Известны также гибридные ФЭП, сочетающие технические решения 1-ой и 2-ой групп, 1-ой и 3-ей, 2-ой и 3-ей, обеспечивающие значительное увеличение кпд при небольшом изменении стоимости ФЭП. В качестве примера таких ФЭП можно привести группу солнечных элементов из монокристаллического кремния с нанесенными на поверхность слоями альфа- и мульти- кремния, что обеспечило создание ФЭП с кпд более 20%. Такие тонкопленочные элементы помимо цены обладают еще и существенными преимуществами перед традиционными кремниевыми. В первую очередь сюда относится существенная экономия полупроводникового материала (в 50–100 раз), меньшее падение эффективности от температуры, возможность организации монолитной технологии изготовления, обеспечивающая организацию высокой скорости нанесения слоев ФЭП на большие площади и тем самым обеспечивающая низкую себестоимость производства. Еще одним преимуществом таких структур, в силу их зернистой микроморфологии, является работа при малых интенсивностях света, рассеянном свете и частичном затенении

фоточувствительной площади, откуда следует, что даже при меньшей эффективности солнечных батарей из таких материалов годовое количество электричества может быть больше, чем из монокристаллического кремния, что актуально для Республики Беларусь.

4 Общие требования к импульсным имитаторам солнечного излучения

Важнейший параметр, определяющий работу ФЭП, особенно концентраторного типа, это степень коллимированности падающего на ФЭП излучения. Для правильного измерения выходных характеристик расходимость преобразуемого излучения должна соответствовать расходимости лучей от солнечного диска ($\pm 0,26^\circ$). При линейных размерах модуля порядка 1 м на соответствующей площади должна обеспечиваться равномерность коллимированного излучения на уровне не хуже нескольких процентов при интегральной по спектру интенсивности в одну солнечную постоянную (для «космического» спектра АМ0 это 1367 Вт/см^2), а для «наземного» спектра АМ1.5 используется, как правило, значение 1000 Вт/см^2 .

Стандартным требованием при измерениях является поддержание температуры ФЭП на уровне 25°C . Для исследований и контроля параметров концентраторных ФЭП на технологических стадиях до их монтирования в модули возможно применение солнечных имитаторов с неколлимированным световым потоком. Условия высокой кратности концентрирования в этом случае могут быть выполнены при варьировании расстояния между ФЭП и высокоинтенсивным источником света. Как правило, в качестве последнего в солнечных имитаторах используются ксеноновые лампы непрерывного или импульсного режима горения. Выбор такого источника определяется близостью к спектру солнца спектра излучения ксенона при электрическом разряде в условиях высокого давления. Для ламп определенного типа, работающих в условиях газового разряда, разрабатываются интерференционные фильтры, корректирующие спектр для соответствия определенному типу солнечного спектра (АМ0, АМ1,5 и т. п.). Применение импульсных ксеноновых ламп в солнечных имитаторах позволяет обеспечить высокую интенсивность облучения ФЭП и концентраторных модулей и избежать тепловых эффектов.

При разработке имитатора солнечного излучения существенны выбор длительности импульса освещения и формирование квазистационарной (плоской) части этого импульса во времени при измерении нагрузочной вольт-амперной характеристики (ВАХ) ФЭП или модуля. В известных импульсных имитаторах солнечного излучения, в частности в разработанном в ФТИ им. А.Ф. Иоффе имитаторе, принято значение

длительности плоской части светового импульса порядка 1 мс. Для солнечных модулей на основе материалов с более длительным временем жизни носителей заряда необходимо увеличение длительности импульса засветки до 3–10 мс, либо использование режима измерения ВАХ по точкам, когда пара значений «ток-напряжение» измеряется на квазистационарной части каждого светового импульса, а перед следующим импульсом напряжение смещения p - n -перехода автоматически меняется.

Для исследований концентраторных ФЭП в лабораторных условиях, а также разбраковки чипов ФЭП на производстве используются измерительные комплексы, в которых импульсные солнечные имитаторы не включают в себя каких-либо оптических элементов, за исключением корректирующих спектр фильтров. Эквивалентная кратность концентрации солнечного излучения может составлять до 3000^{\times} при использовании одной лампы и до 10000^{\times} при использовании четырех ламп. В модификации имитатора с четырьмя лампами может быть реализована возможность варьирования суммарного спектра излучения, попадающего на ФЭП, за счет помещения определенных цветных фильтров перед каждой из ламп. Для тестирования плоских солнечных батарей большой площади коллимирование излучения не требуется, однако необходимо обеспечить большую абсолютную мощность излучения при высокой равномерности распределения по площади тестируемого объекта[9]–[11].

5 Нормативно-техническая документация метрологии солнечного излучения

Нормативная база метрологических средств измерений и фотоэлектрических испытаний полупроводниковых солнечных элементов включает следующие основные документы:

ГОСТ Р 56980-2016. Модули фотоэлектрические из кристаллического кремния наземные. Методы испытаний.

ГОСТ Р МЭК 60904-1-2013. Приборы фотоэлектрические. Часть 1. Измерение вольтамперных характеристик.

ГОСТ Р МЭК 60904-2-2013. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Приборы фотоэлектрические. Часть 2. Требования к эталонным солнечным приборам.

ГОСТ Р МЭК 60904-9-2016. Приборы фотоэлектрические. Часть 9. Требования к характеристикам имитаторов солнечного излучения.

ГОСТ 8.197-2005. ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений спектральной плотности энергетической яркости в диапазоне длин волн от 0,04 до 0,25 мкм.

ГОСТ 8.207-76. ГСИ. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Основные положения.

ГОСТ 8.552-2001. ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений потока излучения и энергетической освещенности в диапазоне длин волн от 0,03 до 0,40 мкм.

ГОСТ Р 8.587-2001. ГСИ. Средства измерений характеристик оптического излучения солнечных имитаторов. Методика поверки.

ГОСТ Р 8.665-2009. ГСИ. Люксметры и яркомеры фотоэлектрические. Методика поверки.

ГОСТ Р 8.807-2012. ГСИ. Средства измерений энергетической освещенности солнечным излучением. Методика поверки.

ГОСТ Р 8.720-2010. ГСИ. Измерители оптической мощности, источники оптического излучения, измерители обратных потерь и тестеры оптические малогабаритные в волоконно-оптических системах передачи. Методика поверки.

ГОСТ 8.195-89 Государственная система обеспечения единства измерений. Государственная поверочная схема для средств измерений спектральной плотности энергетической яркости, спектральной плотности силы излучения и спектральной плотности энергетической освещенности в диапазоне длин волн 0,25...25,00 мкм; силы излучения и энергетической освещенности в диапазоне длин волн 0,2...25,0 мкм.

ГОСТ 20.57.406-81 Комплексная система контроля качества. Изделия электронной техники, квантовой электроники и электротехнические. Методы испытаний.

При разработке методики выполнения измерений и сертификации полупроводниковых солнечных элементов необходимо руководствоваться также следующими рекомендациями Государственной системы обеспечения единства измерений РФ: 50.2.044-2005. ГСИ. Характеристики оптического излучения солнечных имитаторов. Методика выполнения измерений. В данных рекомендациях определен общий порядок проведения измерений, включая: требования к погрешности измерений, средства измерений и вспомогательные устройства, метод измерений, требования безопасности, требования к квалификации операторов, условия измерений, подготовка к выполнению измерений, порядок проведения измерений, контроль погрешности результатов измерений, оформление результатов измерений.

6 Исследование фотоэлектрических характеристик полупроводниковых ФЭП с помощью импульсного имитатора солнечного излучения

Для проведения исследований фотоэлектрических характеристик ФЭП в импульсном режиме ключевым является имитатор солнечного излучения для воспроизведения светового потока Солнца в спектральном диапазоне 0,2–2,5 мкм с интенсивностью на уровне 1340–1440 Вт/м². Имитатор включает источник

излучения и оптическую систему, направляющую поток в рабочую зону, систему контроля однородности светового потока в рабочей зоне, систему контроля спектрального состава светового потока во всем диапазоне, систему регистрации и анализа вольт-амперных характеристик ФЭП в импульсном режиме, а также методику протоколирования и анализа полученных метрологических параметров.

Импульсный фотоэлектрический тестер с варьруемым спектром излучения ИФТ-4/3 производства ЗАО «Техноэксан» (РФ) включает импульсный источник излучения в составе 4 газоразрядных (ксеноновых) ламп с блоками питания и электронный блок управления и регистрации. Газоразрядные ксеноновые лампы формируют излучение, спектр которого достаточно сильно отличается от солнечного (рисунок 6.1). Для питания каждой лампы источники питания формируют импульсы отдельно по форме, длительности и интенсивности. Кроме того, перед каждой лампой устанавливается корректирующий светофильтр для коррекции спектрального состава суммарного излучения.

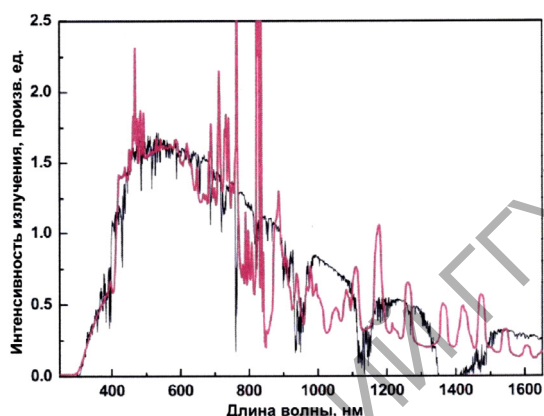


Рисунок 6.1 – Коррекция спектра излучения импульсных ламп для формирования стандартного спектра AM1.5 с помощью оптических фильтров. Оптический фильтр для импульсного имитатора AM1.5-IFK2000.50x50

Комплект оборудования импульсного осветителя включает в себя осветитель, светозащитный кожух, источник питания осветителя и управляющий компьютер. Источник питания осветителя формирует световой импульс каждой лампы-вспышки с плоской вершиной длительностью 3 миллисекунды. В осветителе не используются фокусирующие свет оптические элементы, а только диффузные отражатели для обеспечения равномерности распределения интенсивности освещения в пределах размеров тестируемого ФЭП.

В импульсном имитаторе солнечного излучения (рисунок 6.2) формируется импульс света с протяженным плато, используемым для записи

внешним устройством вольт-амперной характеристики (ВАХ) тестируемого ФЭП. Для питания ламп используется напряжение менее 1 кВ. Цепи заряда емкостных накопителей выполнены по схеме удвоения напряжения. Цепь разряда для каждой лампы имеет две ветви. При разряде это приводит к образованию импульса света с квазистационарным отрезком длительностью порядка 3 мс, в течение которого и осуществляется измерение вольт-амперной характеристики (ВАХ) ФЭП. Установка режимов работы каждой из импульсных ламп осуществляется с помощью управляющего компьютера.

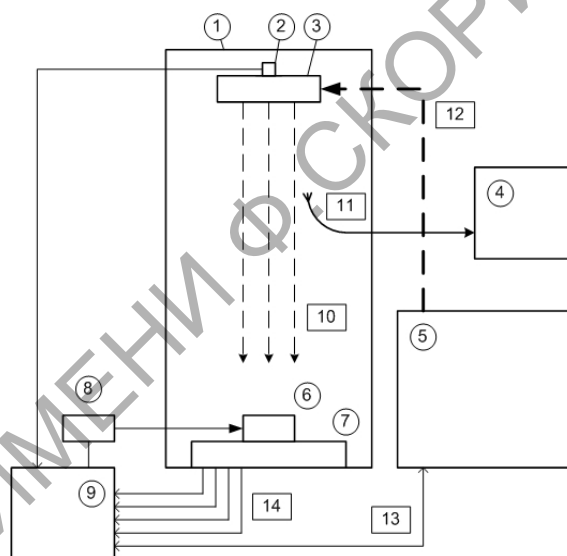


Рисунок 6.2 – Структурная схема аппаратно-измерительного комплекса с импульсным источником излучения:

- 1 – корпус осветителя,
- 2 – контрольный фотоэлемент,
- 3 – блок импульсных ксеноновых ламп,
- 4 – блок спектрофотометров,
- 5 – блок питания импульсных ламп,
- 6 – тестируемый ФЭП,
- 7 – рабочий столик с зондами,
- 8 – контроль температуры ФЭП,
- 9 – управляющий компьютер,
- 10 – импульсное излучение ламп,
- 11 – волоконно-оптический кабель,
- 12 – подача импульсного напряжения на лампы,
- 13 – управление блоком питания,
- 14 – сигналы напряжения и тока с ФЭП

Испытания на электромагнитную совместимость аппаратно-измерительного комплекса проводятся в соответствии со стандартами по Техническим Регламентом Таможенного Союза ТР ТС 020/2011 «Электромагнитная совместимость технических средств» и ГОСТ 30804.6.4-2013 (IEC 61000-6-4:2006) Совместимость технических средств электромагнитная [12]. Испытания проводятся с помощью тестового приемника электромагнитных помех.

7 Метрологические испытания ФЭП на аппаратно-измерительном комплексе

Целью проведения метрологических испытаний ФЭП является определение соответствия их энергетических параметров известным характеристикам, указанным в их технической документации, параметрам. Испытания проводятся путем проведения сравнительных измерений характеристик на каждом из представленных образцов в условиях освещения АМ 1,5 [13]–[17]. Программа и методика испытаний разработана с учетом требований ГОСТ 2.106-96.

Проверка выходных фотоэлектрических параметров ФЭП (напряжения холостого хода, тока короткого замыкания, фактора заполнения ВАХ и КПД) фотоэлектрических преобразователей солнечного излучения с известными параметрами проводится путем испытания ВАХ по методике, разработанной на основании ГОСТ Р МЭК 60904-1–2013, в условиях освещенности со стандартным спектром АМ 1,5 (МЭК 60904-3), при импульсном освещении (МЭК 60904-9).

При испытаниях крупноформатных ФЭП необходимо учитывать вклад емкостной компоненты в динамику изменения тока и фототока при импульсной развертке напряжения смещения [18]–[20]. Внутренняя емкость СЭ, включающая емкость p - n -перехода C_j , диффузионную емкость $C_d \sim \tau_d$ (время жизни неосновных носителей заряда), вместе с последовательным R_s , шунтирующим R_{sh} и дифференциальным сопротивлением R_d составляют RC цепь с соответствующей постоянной времени, определяющей переходные процессы при импульсных измерениях СЭ. Величина такой постоянной зависит от различных параметров, таких как рабочая точка (напряжение и ток), температура, уровень облучения, время жизни неосновных носителей, и других характеристик полупроводника.

В частности, точное измерение характеристик высокоэффективных c -Si СЭ, особенно элементов с тыльным контактом (ВСТ) и HJT гетероструктур [23] затруднено вследствие их высокой емкости (на порядок величины) в сравнении со стандартными Si СЭ при использовании импульсных имитаторов солнечного излучения. Для различных СЭ время сканирования ВАХ может варьироваться от ~ 2 до ~ 44 мс для получения точности измерений 0,5% [21]. В представленном АИК предусмотрен режим пошагового измерения тока и напряжения на ФЭП для минимизации влияния указанных компонент.

Заключение

Таким образом, рассмотрены основные параметры солнечного излучения для преобразования в электрическую энергию с помощью полупроводниковых фотоэлектрических преобразователей (солнечных элементов), в том числе в условиях Республики Беларусь. Приведена

нормативная база для подготовки и проведения испытаний ФЭП с помощью импульсных источников излучения. Представлены принцип работы и основные характеристики аппаратно-измерительного комплекса для испытаний ФЭП в импульсном режиме.

ЛИТЕРАТУРА

1. Myers, D.R. Solar radiation. Practical modeling for renewable energy applications / D.R. Myers. – CRC Press, Taylor & Francis Group LLC, USA/UK, 2013. – 172 p.

2. ASTM E490-00. Standard for solar constant and air mass zero solar spectral irradiance tables. – Amer. Soc. Testing and Materials: Philadelphia, West Conshohocken PA, USA, 2000. – 16 p.

3. Solar energy – Reference solar spectral irradiance at the ground at different receiving conditions – Part 1: Direct normal and hemispherical solar irradiance for air mass 1,5 : ISO 9845-1:1992. – Internat. Organ. for Standardization, 1992. – 14 p.

4. Usoskin, I.G. A history of solar activity over millennia / I.G. Usoskin // Review Article. Living Rev. Sol. Phys. – 2017. – № 14:3. – 97 p.

5. Hathaway, D.H. The Solar Cycle / D.H. Hathaway // Living Rev. Solar Phys. – 2015. – Vol. 12, № 4. – 87 p.

6. UV solar irradiance in observations and the NRLSSI and SATIRE-S models / K.L. Yeo, W.T. Ball, N.A. Krivova, S.K. Solanki, Y.C. Unruh, J. Morrill // J. Geophys. Res. – 2015. – Vol. 120. arXiv: 1507.01224v1.

7. Gueymard, C.A. A reevaluation of the solar constant based on a 42-year total solar irradiance time series and a reconciliation of spaceborne observations / C.A. Gueymard // SolarEnergy. – 2018. – Vol. 168. – P. 2–9.

8. Промышленность Республики Беларусь. Статистический сборник. – Мн.: Национальный статистический комитет Республики Беларусь, 2019. – 150 с.

9. Анализ тонкопленочных солнечных элементов на основе CIGS полупроводника с вариозонной структурой / В.Б. Залесский, С.А. Сергиеня, А.А. Ходин, В.Ф. Гременок // Альтернативная энергетика и экология. – 2008. – № 8. – С. 56–61.

10. Голографический концентратор для солнечного элемента / В.В. Ткаченко, А.И. Койко, В.Б. Залесский, В.А. Пилипович // Голография. Наука и практика. Сб. трудов 12-й Междун. конф. «Голография. Наука и Практика, ГО-ЛЮЭКСПО-2015» 12–15 октября 2015 г., Казань, Россия. – 2015. – С. 143–146.

11. Гременок, В.Ф. Солнечные элементы на основе полупроводниковых материалов / В.Ф. Гременок, М.С. Тиванов, В.Б. Залесский. – Минск: Изд. Центр БГУ, 2007. – 222 с.

12. Совместимость технических средств электромагнитная. Электромагнитные помехи

от технических средств, применяемых в промышленных зонах. Нормы и методы испытаний. ГОСТ 30804.6.4-2013 (IEC 61000-6-4:2006). Введ. 01.01.2014. – М.: Стандартинформ, 2013. – 18 с.

13. Приемники излучения полупроводниковые фотоэлектрические и фотоприемные устройства. Методы измерения фотоэлектрических параметров и определения характеристик. ГОСТ 17772-88. Введ. 01.07.1989. – М.: Издательство стандартов, 1988. – 85 с.

14. Государственная поверочная схема для средств измерений спектральной плотности энергетической яркости в диапазоне длин волн от 0,04 до 0,25 мкм. ГОСТ 8.197-2005. Введ. 01.09.2005. – М.: Стандартинформ, 2005. – 7 с.

15. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. ГОСТ 8.207-76. Введ. 01.01.1977. – М.: Издательство стандартов, 1986. – 16 с.

16. Государственная поверочная схема для средств измерений потока излучения и энергетической освещенности в диапазоне длин волн от 0,03 до 0,40 мкм. ГОСТ 8.552-2001. Введ. 11.01.2002. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2002. – 7 с.

17. Комплексная система контроля качества. Изделия электронной техники, квантовой электроники и электротехнические. Методы испытаний (с изменениями 1–10). ГОСТ 20.57.406-81.

Введ. 01.01.1982. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. – 207 с.

18. Friesen, G. Capacitance effects in high-efficiency cells / G. Friesen, H.A. Ossenbrink // Solar Energy Materials and Solar Cells. – 1997. – Vol. 48, iss. 1–4. – P. 77–83.

19. Understanding and overcoming the influence of capacitance effects on the measurement of high efficiency silicon solar cells / A. Edler, M. Schlemmer, J. Ranzmeyer, R. Harney // SiliconPV: April 03–05, 2012, Leuven, Belgium. – Energy Procedia 27. – 2012. – P. 267–272.

20. Accurate power measurements of high capacitance PV modules with short pulse simulators in a single flash / C. Monokroussos, D. Etienne, K. Morita, C. Dreier, U. Therhaag, W. Herrmann // 27th Europ. Photovolt. Solar Energy Conf. Exhib. Frankfurt, Germany, 24–28 Sept. 2012 / Proc. Ed.: S. Nowak, A. Jäger-Waldau, P. Helm. – WIP: München, Germany. – 2012. – P. 3687–3696.

21. Herman, M. Optimal I-V curve scan time of solar cells and modules in light of irradiance level / M. Herman, M. Jankovec, M. Topič. – Int. J. Photoenergy. – 2012. – Vol. 2012. – Article ID 151452. – 11 p.

Поступила в редакцию 20.06.2020.