



**ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ**

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2011109916/28, 17.03.2011

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
17.03.2011

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 17.03.2011

(43) Дата публикации заявки: 27.09.2012 Бюл. № 27

(45) Опубликовано: 27.02.2013 Бюл. № 6

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: US 7696461 B2, 13.04.2010. RU 2318219 C1, 27.02.2008. RU 2012007 C1, 30.04.1994. SU 1755351 A1, 07.03.1992. EP 1686386 A1, 02.08.2006. EP 1170596 A2, 09.01.2002. US 4122383 A, 24.10.1978. WO 2011114838 A1, 22.09.2011.

Адрес для переписки:

124498, Москва, Зеленоград, пр-д 4806, 5,
стр.23, Закрытое акционерное общество
"ТЕЛЕКОМ-СТВ"

(72) Автор(ы):

Алексеев Алексей Валентинович (RU),
Белоусов Виктор Сергеевич (RU),
Звероловлев Владимир Михайлович (RU),
Короткевич Аркадий Владимирович (RU),
Яремчук Александр Федотович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Закрытое акционерное общество
"ТЕЛЕКОМ-СТВ" (RU)**(54) СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЛЬТАМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА СИМУЛЯТОРЕ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

(57) Реферат:

Изобретение области измерений электрофизических параметров солнечных элементов на основе применения устройств, позволяющих имитировать (симулировать) реальное солнечное излучение искусственными источниками света вместе с необходимой и встроенной в устройство электронной аппаратурой для обеспечения процесса измерений и определения параметров солнечных элементов с целью оценки их эксплуатационных характеристик. Способ определения вольтамперных характеристик кремниевых солнечных элементов на симуляторе солнечного излучения включает в себя облучение измеряемого и эталонного солнечных элементов импульсом света от одиночного импульсного источника светового излучения, определение по характеристикам

эталонного солнечного элемента калибровочных параметров измерительной системы симулятора, подачу на контролируемый солнечный элемент в течение длительности плоской части импульса $T = (1 \cdot 10^3 \div 1 \cdot 10^4)$ мкс регулируемого напряжения смещения $U(t)$ с шагом $\Delta t = (3 \div 30)$ мкс и измерение протекающего через него тока $I(t)$, а в качестве калибровочных параметров используют $I_{K.3}$ - ток короткого замыкания, A ; I_0 - обратный ток, A ; τ - постоянная времени релаксации, мкс, напряжение смещения $U(t)$ регулируют в соответствии с определенной зависимостью. Изобретение обеспечивает увеличение точности определения вольтамперных характеристик солнечных элементов в процессе проведения импульсных световых засветок. 1 пр.



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(51) Int. Cl.
H01L 31/18 (2006.01)
G01R 31/40 (2006.01)

(12) ABSTRACT OF INVENTION

(21)(22) Application: **2011109916/28, 17.03.2011**

(24) Effective date for property rights:
17.03.2011

Priority:

(22) Date of filing: **17.03.2011**

(43) Application published: **27.09.2012 Bull. 27**

(45) Date of publication: **27.02.2013 Bull. 6**

Mail address:

**124498, Moskva, Zelenograd, pr-d 4806, 5, str.23,
Zakrytoe aktsionernoe obshchestvo "TELEKOM-
STV"**

(72) Inventor(s):

**Alekseev Aleksej Valentinovich (RU),
Belousov Viktor Sergeevich (RU),
Zverolovlev Vladimir Mikhajlovich (RU),
Korotkevich Arkadij Vladimirovich (RU),
Jaremchuk Aleksandr Fedotovich (RU)**

(73) Proprietor(s):

**Zakrytoe aktsionernoe obshchestvo "TELEKOM-
STV" (RU)**

(54) METHOD OF DETERMINING VOLTAGE-CURRENT CHARACTERISTICS OF SOLAR CELLS ON SOLAR RADIATION SIMULATOR

(57) Abstract:

FIELD: physics.

SUBSTANCE: invention relates to measurement of electrophysical parameters of solar cells based on use of devices which enable to imitate (simulate) real solar radiation using artificial light sources along with the necessary and built-in electronic equipment to provide a process of measuring and determining parameters of solar cells in order to evaluate performance characteristics thereof. The method of determining voltage-current characteristics of silicon solar cells on a solar radiation simulator involves irradiating the measured and reference solar cells with a light pulse from a single pulsed light source, determining from the characteristics of the

reference solar cell calibration parameters of the measuring system of the simulator, applying across the controlled solar cell in the duration of the flat part of the pulse $T=(1 \cdot 10^{-3}-1 \cdot 10^{-4})$ mcs a controlled bias voltage $U(t)$ with increment $\Delta t=(3-30)$ mcs and measuring current $I(t)$ flowing through said cell, and the calibration parameters used are I_{sc} - short-circuit current, A; I_0 - reverse current, A; τ - time constant, mcs; bias voltage $U(t)$ is controlled according to a certain relationship.

EFFECT: high accuracy of determining voltage-current characteristics of solar cells during pulsed illumination.

1 ex

Способ относится к области измерительной техники, более конкретно к области измерений электрофизических параметров солнечных элементов на основе применения устройств, позволяющих имитировать (симулировать) реальное солнечное излучение искусственными источниками света вместе с необходимой и
5
встроенной в устройство электронной аппаратурой для обеспечения процесса измерений и определения параметров солнечных элементов с целью оценки их эксплуатационных характеристик.

Для оценки эксплуатационных характеристик солнечного элемента (СЭ) используют такие параметры, как ток короткого замыкания ($I_{к.з}$), напряжение холостого хода ($U_{хх}$), ток и напряжение в максимуме выходной мощности (I_{max} и P_{max}), последовательное и шунтирующие сопротивления СЭ, коэффициент полезного действия (КПД), коэффициент заполнения нагрузочной кривой (FF).

Все указанные параметры определяются из вольтамперной характеристики (ВАХ) солнечного элемента, которая является интегрированным параметром, характеризующим качество СЭ.

Вольтамперную характеристику СЭ определяют при стандартных условиях освещения (АМ 1,5 G), а в качестве источника светового излучения обычно применяют симуляторы солнечного излучения на базе импульсных источников на основе ксеноновых ламп.

Применение импульсных источников светового излучения выгодно отличает импульсные способы измерения от стационарных. В этом случае не происходит значительного нагрева СЭ под действием излучения, а также гораздо легче добиваться
25
одинаковой интенсивности светового потока за малые промежутки времени проведения измерений.

Способ более экономичен с точки зрения потребления электрической энергии.

Известен способ определения вольтамперных характеристик кремниевых солнечных элементов на симуляторе солнечного излучения, включающий в себя подачу на контролируемый солнечный элемент постоянного напряжения смещения $U(t)$, измерение протекающего через контролируемый солнечный элемент тока $I(t)$ при облучении его импульсным световым потоком, состоящим из нескольких световых источников с различным спектральным составом света, и построение по измеренным парам $U(t)$ и $I(t)$ вольтамперной характеристики контролируемого
35
солнечного элемента [1].

В данном способе спектр солнечного излучения симулятора воспроизводится за счет комбинации световых потоков от нескольких одиночных импульсных источников, спектр которых формируется различными по спектральному составу одиночными импульсными источниками света, что обеспечивается, в основном, за счет применения в коллимирующей системе симулятора специальных спектральных фильтров.

При этом формируется световой импульс с весьма протяженной «плоской» частью и длительностью $\geq 1 \cdot 10$ мкс. Таким образом, до начала спада плоской части импульса удается провести измерение не менее 200-300 пар значений $U(t)$ и $I(t)$.

Все параметры ВАХ контролируемого солнечного элемента определяются за один световой импульс, а сама ВАХ формируется устройством вывода симулятора (персональным компьютером) в течение нескольких секунд.

Хотя данный способ является одним из самых оперативных методов определения ВАХ солнечных элементов, он имеет весьма существенные недостатки:

- форма измеренной импульсной ВАХ существенно отличается от формы ВАХ,

определенной для контролируемого солнечного элемента при стационарных условиях засветки, т.к. способ не предусматривает компенсацию влияния температурного нагрева контролируемого солнечного элемента, а это приводит к возникновению дополнительной диффузионной емкости из-за переходных процессов в самом солнечном элементе в процессе импульсной засветки;

- необходимость применения громоздкой и экономически затратной аппаратуры (наличие сложной системы светофильтров для обеспечения максимального приближения суммарного спектра от одиночных источников к стандартному спектру солнечного излучения, электронную систему стабилизации светового потока и т.д.) для обеспечения постоянства потока светового излучения.

Точность измерений значений тока при использовании данного метода составляет $\pm 5 \div 10\%$.

Известен также способ определения вольтамперных характеристик кремниевых солнечных элементов на симуляторе солнечного излучения, включающий в себя облучение контролируемого солнечного элемента и эталонного солнечного элемента импульсным световым потоком, формируемым одиночным импульсным источником света при подаче на контролируемый солнечный элемент постоянного напряжения смещения $U(t)$, фиксацию по параметрам эталонного солнечного элемента интенсивности светового потока, соответствующего стандартным условиям измерений, замер протекающего при этом через контролируемый солнечный элемент тока $I(t)$ и построение по измеренным парам $U(t)$ и $I(t)$ вольтамперной характеристики контролируемого солнечного элемента [2].

Импульсный источник светового излучения (ксеноновая лампа) в этом способе излучает световой поток, интенсивность которого меняется во времени. Т.к. в этом способе отсутствует контроль амплитуды и длительности запускающего электрического импульса для обеспечения работы источника светового излучения, интенсивность светового потока на поверхности контролируемого солнечного элемента непрерывно меняется во времени. Зависимость интенсивности светового потока от времени имеет характерную форму с максимумом в определенный момент времени и падением амплитуды светового потока при увеличении длительности проведения измерений. В некоторый момент времени интенсивность светового потока сравнивается со стандартной величиной (AM 1,5 G), что регистрируется эталонным солнечным элементом, и в этот момент времени осуществляют измерение величины тока, протекающего через контролируемый солнечный элемент при условии, что напряжение смещения на нем всегда принудительно поддерживается на постоянном уровне.

Проводя серию таких измерений при различных значениях напряжения смещения, приложенного к контролируемому солнечному элементу, определяют ВАХ последнего.

Недостатком данного способа является необходимость применения большого количества импульсных засветок при различных напряжениях смещения, прикладываемого к контролируемому солнечному элементу, что в свою очередь приводит к существенному снижению оперативности данного метода из-за увеличения длительности определения ВАХ до нескольких минут.

Кроме того, всегда имеется неизбежная неточность в определении тока, протекающего через эталонный солнечный элемент, при достижении интенсивности света, соответствующей стандартным условиям (AM 1,5 G), в силу проявления переходных процессов в самом СЭ в процессе импульсной засветки (влияние

диффузионной емкости), что может существенно искажать форму импульсной ВАХ по отношению к форме ВАХ, определенной для контролируемого солнечного элемента при стационарных условиях засветки.

5 Наиболее близким по технической сущности и достигаемому результату является способ определения вольтамперных характеристик кремниевых солнечных элементов на симуляторе солнечного излучения, включающий в себя определение по характеристикам эталонного солнечного элемента калибровочных параметров измерительной системы симулятора, облучение контролируемого солнечного
10 элемента световым потоком, формируемым одиночным импульсным источником света, подачу на контролируемый солнечный элемент регулируемого напряжения смещения $U(t)$ в течение времени измерения $T=(1 \cdot 10^3 \div 1 \cdot 10^4)$ мкс с шагом $\Delta t=(3 \div 30)$ мкс, измерение протекающего через контролируемый солнечный элемент тока $I(t)$ и последующую корректировку по калибровочным параметрам эталонного солнечного
15 элемента полученных пар значений $U(t)$ и $I(t)$ при построении вольтамперной характеристики контролируемого солнечного элемента [3].

В данном способе для обеспечения однородности светового потока на поверхности контролируемого СЭ используется электронная схема регулировки тока,
20 протекающего через импульсный источник света. Регулировка тока обеспечивается за счет обратной связи по току, протекающему через эталонный СЭ, имеющего малую постоянную времени отклика (за счет малой площади эталонного СЭ).

За время длительности «плоской» части импульса $T=(1 \cdot 10^3 \div 1 \cdot 10^4)$ мкс при заданном шаге измерений $\Delta t=(3 \div 30)$ мкс определяется около 300÷350 пар $U(t)$ и $I(t)$, что
25 оказывается вполне достаточной величиной для построения ВАХ контролируемого солнечного элемента.

В процессе проведения измерений постоянная времени переходных процессов эталонного СЭ (за счет изменения параметров внешних корректирующих
30 электрических элементов электронной системы измерения) подстраивается таким образом, чтобы динамическая (выходная) вольтамперная характеристика эталонного СЭ соответствовала статической вольтамперной характеристике эталонного СЭ. Разница значений выходных напряжений $U(t)$ и токов $I(t)$ статической и динамической
35 вольтамперных характеристик эталонного СЭ используется как исходная информация для корректировки динамической вольтамперной характеристики контролируемого СЭ при окончательной обработке результатов измерения.

В качестве импульсного источника света в данном устройстве используется ксеноновая лампа, интенсивность и спектральный состав которой соответствует
40 стандарту АМ 1,5 G. Постоянную времени переходных процессов эталонного солнечного элемента можно корректировать в широких пределах за счет применения внешних корректирующих RC или LC цепей, входящих в состав электронной системы измерения симулятора.

К недостаткам упомянутого способа следует отнести невысокую точность
45 измерений (обеспечиваемая погрешность измерений находится на уровне $\pm 3 \div 5\%$) из-за отсутствия эффективного механизма компенсации диффузионной емкости как самого контролируемого СЭ, так и эталонного СЭ в процессе проведения измерений калибровочных параметров с использованием импульсной засветки.

50 Задачей изобретения является увеличение точности определения вольтамперных характеристик солнечных элементов в процессе проведения импульсных световых засветок.

Это достигается тем, что в способе определения вольтамперных характеристик

кремниевых солнечных элементов на симуляторе солнечного излучения, включающем в себя облучение измеряемого и эталонного солнечных элементов импульсом света от одиночного импульсного источника светового излучения, определение по характеристикам эталонного солнечного элемента калибровочных параметров измерительной системы симулятора, подачу на контролируемый солнечный элемент в течение длительности плоской части импульса $T=(1 \cdot 10^3 \div 1 \cdot 10^4)$ мкс регулируемого напряжения смещения $U(t)$ с шагом $\Delta t=(3 \div 30)$ мкс и измерение протекающего через него тока $I(t)$, в качестве калибровочных параметров используют

$I_{к.з.}$ - ток короткого замыкания, А;

I_0 - обратный ток, А;

τ - постоянная времени релаксации, мкс,

а напряжение смещения $U(t)$ регулируют в соответствии со следующей

зависимостью:

$$U(t) = 1,2 \frac{\ln \left(\frac{I_{к.з.}}{I_0} \left(1 - e^{-\frac{t \cdot \delta}{\tau}} \right) + 1 \right)}{\ln \left(\frac{I_{к.з.}}{I_0} \left(1 - e^{-\frac{T \cdot \delta}{\tau}} \right) + 1 \right)} - 0,5$$

где t - текущее время измерения в диапазоне $(0 \leq t \leq T)$, мкс;

δ ($\delta=0,005 \div 0,01$) - заданная погрешность измерений значения тока $I(t)$, отн.ед.

В известных науке и технике решениях аналогичной задачи не обнаружено использование управляемого напряжением источника тока, питающего солнечный элемент, для эффективного снижения диффузионной емкости контролируемого солнечного элемента до значений, когда ее влияние на переходный процесс, искажающий форму определяемой вольтамперной характеристики, становится пренебрежимо мало, поэтому все заявляемые отличия данного изобретения соответствуют критерию "Изобретательский уровень".

Сущность способа заключается в следующем. Определение ВАХ кремниевого солнечного элемента осуществляется на стандартном симуляторе солнечного излучения (импульсном тестере модели ST1000), предназначенном для определения прямой и обратной ветви ВАХ СЭ и солнечных батарей. Тестер состоит из импульсного осветителя с источником питания, схемы для подачи напряжения смещения, измерительного блока. Осветитель позволяет сформировать световой импульс, активно контролируемый по форме и интенсивности. В качестве осветителя используется ксеноновая импульсная лампа. Для обеспечения максимального совпадения спектра светового потока в соответствии со стандартами АМ 1,5 G имеются световые фильтры, подавляющие характерные отклонения спектральной характеристики ксеноновой лампы (пики интенсивности света при определенных длинах световых волн).

Применение указанной зависимости практически полностью компенсирует протекание переходных процессов, связанных с влиянием диффузионной емкости СЭ, что обеспечивает точность определения параметров ВАХ на уровне $\delta=0,5 \div 1,0\%$ в условиях импульсной засветки, то есть практически не отличающейся от точности определения параметров ВАХ в стационарных условиях засветки.

Аналитическая зависимость (1) представляет собой аппроксимацию экспериментальных пар $U(t)$ и $I(t)$, полученную при математической обработке большой серии измерений параметров кремниевых СЭ в условиях импульсной

засветки при стандартных условиях АМ 1,5 G.

Для успешного применения заявляемого способа необходима предварительная калибровка измерительной системы импульсного тестера для обеспечения измерений нагрузочных ВАХ контролируемых СЭ с гарантированной заданной погрешностью δ .
 С этой целью перед началом измерения пар $U(t)$ и $I(t)$ контролируемого СЭ определяют калибровочные параметры $I_{к.з}$, I_0 и τ , используемые в заявляемом способе. Значение $I_{к.з}$ определяется из предварительно измеренной ВАХ для эталонного СЭ (произвольно выбранного СЭ из партии СЭ, подлежащих контролю).
 В процессе измерения ВАХ эталонного СЭ также определяется и значение I_0 . Оценка τ осуществляется из измерения релаксационных кривых спада фототока.

Система обратной связи симулятора позволяет регулировать напряжение $U(t)$ на внешних электродах солнечного элемента в соответствии с зависимостью (1). Одновременно определяется величина тока $I(t)$, протекающего через него. Фактически схмотехническая реализация управляемого напряжением источника тока является аналоговым конвертором диффузионной емкости солнечного элемента, снижая ее величину до таких значений, когда динамическая ВАХ перестает отличаться от статической.

Новизна заявляемого изобретения обусловлена тем, что для достижения цели изобретения (увеличение точности определения вольтамперных характеристик солнечных элементов в процессе проведения импульсных световых засветок) используется оригинальная схмотехническая реализация управляемого напряжением (по оптимальному закону) источника тока, питающего солнечный элемент, что позволяет эффективно снизить диффузионную емкость контролируемого солнечного элемента до таких значений, когда ее влияние на переходный процесс, искажающий форму измеряемой ВАХ, становится пренебрежимо мало.

Пример выполнения

Для определения вольтамперных характеристик солнечных элементов по заявляемому способу была использована партия стандартных псевдоквадратных СЭ размером 125×125 мм объемом 52 шт. марки СЭ-ПСК тип С-14,5% БПКЖ.80.00.000ТУ.

Из указанной партии СЭ произвольно был выбран солнечный элемент, который в дальнейшем был использован в качестве эталонного.

По стандартной методике на стандартном симуляторе солнечного излучения (импульсном тестере модели ST1000) [4] были определены фотоэлектрические параметры эталонного СЭ, которые в дальнейшем использовались в качестве калибровочных:

ток короткого замыкания $I_{к.з}$, А ($I_{к.з}=5,63$ А);

обратный ток I_0 , А ($I_0=1,25 \cdot 10^{-10}$ А);

постоянная времени релаксации τ , мкс ($\tau=46$ мкс).

Указанные калибровочные параметры были введены в программу построения ВАХ тестера ST1000. Длительность импульса T была установлена равной $T=3 \cdot 10^3$ мкс, а погрешность измерений δ была установлена равной $\delta=0,005$, т.е 6,5%.

Количество измеряемых пар значений $U(t)$ и $I(t)$ была установлена равной 300, что соответствовало шагу по времени $\Delta t=T/300=10$ мкс.

Длительность контроля одного СЭ (от момента его установки на столик тестера до момента вывода ВАХ на экран монитора составила в среднем 0,5 мин, контроль всей партии (51 шт. СЭ) занял 26 мин.

В результате контроля 51 шт. СЭ были получены ВАХ, каждая из которой при наложении на ВАХ эталонного СЭ имела отклонение по $U(t)$ или $I(t)$ в любой точке не

более 0,5%.

Таким образом, заявляемый способ обеспечивает определение значений пар значений $U(t)$ и $I(t)$ при построении вольтамперных характеристик солнечных элементов в процессе проведения импульсных световых засветок с точностью $0,5 \div 1,0\%$ (по прототипу точность измерений составляет $3 \div 5\%$), что обеспечивается за счет эффективного снижения диффузионной емкости контролируемого солнечного элемента до таких значений при использовании заявляемого алгоритма регулировки напряжения смещения (когда ее влияние на переходный процесс, искажающий форму определяемой вольтамперной характеристики, становится пренебрежимо мало).

Источники информации

1. Патент США, МПК: G01R 31/302, №7,411,408 от 12.08.2008 г.
2. Патент США, МПК: G01R 31/303, №7,514,931 от 07.04.2009 г.
3. Патент США, МПК: G01C 21/02, №7,696,461 от 13.04.2010 г. - прототип.
4. Патент РФ, МПК: G01R 31/40, №2,318,219 от 27.02.2008 г.

Формула изобретения

Способ определения вольтамперных характеристик кремниевых солнечных элементов на симуляторе солнечного излучения, включающий в себя облучение измеряемого и эталонного солнечных элементов импульсом света от одиночного импульсного источника светового излучения, определение по характеристикам эталонного солнечного элемента калибровочных параметров измерительной системы симулятора, подачу на контролируемый солнечный элемент в течение длительности плоской части импульса $T=(1 \cdot 10^3 \div 1 \cdot 10^4)$ мкс регулируемого напряжения смещения $U(t)$ с шагом $\Delta t=(3 \div 30)$ мкс и измерение протекающего через него тока $I(t)$, отличающийся тем, что в качестве калибровочных параметров используют

$I_{к.з}$ - ток короткого замыкания, А;

I_0 - обратный ток, А;

τ - постоянная времени релаксации, мкс,

а напряжение смещения $U(t)$ регулируют в соответствии со следующей зависимостью:

$$U(t) = 1,2 \frac{\ln \left(\frac{I_{к.з}}{I_0} \left(1 - e^{-\frac{t \cdot \delta}{\tau}} \right) + 1 \right)}{\ln \left(\frac{I_{к.з}}{I_0} \left(1 - e^{-\frac{T \cdot \delta}{\tau}} \right) + 1 \right)} - 0,5,$$

где t - текущее время измерения в диапазоне $(0 \leq t \leq T)$, мкс;

δ ($\delta=0,005 \div 0,01$) - заданная погрешность измерений значения тока $I(t)$, отн.ед.