

УДК 621.3.088

ОСОБЕННОСТИ МЕТОДОВ КАЛИБРОВКИ ИМИТАТОРА СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ КОНТРОЛЕ ЭНЕРГОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ МНОГОПЕРЕХОДНЫХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ

С.А. Богомолова^{1,2}

¹ФГБОУ ВПО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова»
РФ 428015, Чувашская Республика, г. Чебоксары, Московский просп., 15
тел.: +7(8352)45-21-93; e-mail: s_bogomolova@mail.ru

²Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы (ФГУП ВНИИМС)
РФ 119361, Москва, ул. Озёрная, 46
тел.: +7(495)437-37-29

doi: 10.15518/isjaee.2015.19.011

Заключение совета рецензентов: 01.10.15 Заключение совета экспертов: 15.10.15 Принято к публикации: 23.10.15

В статье проведен анализ методов настройки (калибровки) имитаторов солнечного излучения при измерении вольт-амперных характеристик полноразмерных многопереходных фотоэлектрических модулей (ФЭМ). Обоснован выбор метода настройки (калибровки) имитатора по параметрам «энергетическая освещенность» и «спектральная плотность энергетической освещенности» с использованием эталонного однопереходного ФЭМ и многопереходного ФЭМ. Отмечены преимущества применения данного метода в производственных условиях.

Ключевые слова: фотоэлектрический модуль, калибровка имитатора солнечного излучения, эталонный модуль, энергетическая освещенность, спектральная плотность энергетической освещенности.

APPROACH TO CALIBRATION OF SOLAR SIMULATOR FOR MONITORING THE ENERGY GENERATION BY MULTI-JUNCTION PHOTOVOLTAIC MODULES

S.A. Bogomolova^{1,2}

¹Chuvash State University
15 Moskovsky ave., Cheboksary, Chuvash Republic, 428015 Russian Federation
ph.: +7(8352)452193; e-mail: s_bogomolova@mail.ru

²All-Russian scientific research institute of metrological service
46 Ozernaya st., Moscow, 119361 Russian Federation
ph.: +7(495)437-37-29

doi: 10.15518/isjaee.2015.19.011

Referred 1 October 2015 Received in revised form 15 October 2015 Accepted 23 October 2015

The article summarizes the methods of solar simulators adjustment (calibration) in measuring current-voltage characteristics of the full-sized multi-junction photovoltaic modules. There is substantiated a choice of the method for adjusting the parameters "irradiance" and "spectral irradiance" with using single-junction and multi-junction reference photovoltaic modules. The advantages of using this method in mass-production are underlined.

Keywords: photovoltaic module, solar simulator calibration, reference module, irradiance, spectral irradiance.



Богомолова Светлана Анатольевна
Svetlana A. Bogomolova

Сведения об авторе: старший преподаватель кафедры «Промышленный менеджмент и сертификация», ФГБОУ ВПО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова».

Образование: ФГБОУ ВПО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова».

Область научных интересов: метрология, метрологическое обеспечение, фотоэнергетика.

Публикации: 15.

Information about the author: senior lecturer of the “Industrial Management and Certification” department, Chuvash State University.

Education: Chuvash State University.

Research area: metrology, metrological provision, photovoltaics.

Publications: 15.

Введение

Развитие солнечной энергетики сопровождается совершенствованием конструкций и технологических процедур изготовления фотоэлектрических модулей (ФЭМ). В настоящее время все более широкое распространение получают тонкопленочные технологии, которые обладают очевидными преимуществами в сравнении с технологиями на основе объемных кристаллических материалов: возможностью формирования многослойных структур, обеспечивающих более высокую эффективность преобразования, и меньшим расходом полупроводниковых материалов, энергии при изготовлении. Фотоэлектрические параметры ФЭМ являются эксплуатационными характеристиками и выражают эффективность преобразования солнечного излучения в электрическую энергию. Контроль фотоэлектрических параметров ФЭМ в промышленных условиях проводится методом измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) на имитаторах солнечного излучения. Данное испытательное оборудование обеспечивает формирование требуемого уровня энергетической освещенности на фотоактивной поверхности исследуе-

мого ФЭМ, кроме того, оно оснащено устройствами для измерения его нагрузочной ВАХ и температуры. Важным этапом при подготовке имитатора к процедуре контроля энергопроизводительности ФЭМ является настройка и калибровка по параметру «энергетическая освещенность» с целью обеспечения прослеживаемости результатов измерений ВАХ к Международной системе единиц (СИ) [1]. В данной работе рассмотрены особенности настройки и калибровки имитатора солнечного излучения при контроле энергопроизводительности многопереходных ФЭМ, состоящих из двух субэлементов со структурой аморфного гидрогенизированного и микрокристаллического кремния (*a*-Si/ μ c-Si).

Теоретические основы

Измерения вольт-амперных характеристик ФЭМ выполняют при создании на их фотоактивной поверхности энергетической освещенности $(1\ 000 \pm 5)$ Вт/м² со спектральной плотностью энергетической освещенности, соответствующей спектру *AM1.5G* [2], и температуре 25 °С.

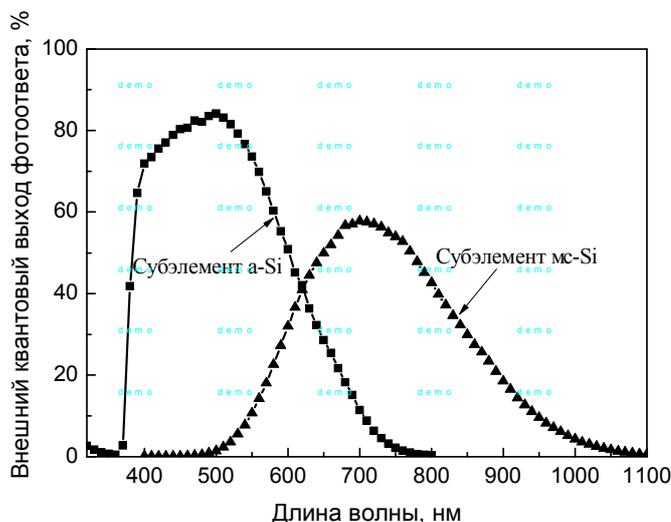


Рис. 1. Зависимость внешнего квантового выхода фотоответа от длины волны для субэлементов *a*-Si и μ c-Si многопереходного ФЭМ
Fig. 1. The dependence of external quantum efficiency of photoresponse from wavelength for the subcells *a*-Si and μ c-Si of multi-junction PV module



Структура многопереходных ФЭМ образована субэлементами, максимальная фоточувствительность которых наблюдается в различных диапазонах длин волн. В частности, субэлемент на основе *a-Si* генерирует фототок преимущественно под воздействием излучения синего спектра, а субэлемент на основе $\mu\text{-Si}$ – красного спектра [3]. Зависимость внешнего квантового выхода фотоответа от длины волны, характеризующая спектральную чувствительность, для субэлементов *a-Si* и $\mu\text{-Si}$ многопереходного ФЭМ приведена на рисунке 1.

Конструкция имитатора, предназначенного для оценивания энергопроизводительности многопереходных *a-Si/\mu-Si* ФЭМ, должна обеспечивать не только возможность настройки энергетической освещенности в рабочей области, но и регулировки спектрального состава излучения (сине-красного отношения спектра). Данным требованиям соответствует имитатор импульсного излучения *PVS1114i* фирмы NISSHINBO Mechatronics Inc. (Япония), служащий для измерения нагрузочных ВАХ и определения нормируемых выходных фотоэлектрических параметров полноразмерных ФЭМ площадью

$(1,3 \times 1,1) \text{ м}^2$. Энергетическая освещенность в рабочей области имитатора формируется комбинированным источником излучения, состоящим из 36-ти линейных галогенных и двух ксенонных импульсных ламп. Световой импульс с длительностью плоской части 50 мс создается за счет включения галогенных ламп, а затем и ксенонных ламп. Ксенонные лампы обеспечивают воспроизведение коротковолновой (синей) области спектра (300–700 нм), а галогенные – длинноволновой (красной) области спектра (550–1100 нм). В конструкции имитатора предусмотрена возможность регулирования энергетической освещенности и спектрального состава излучения (спектральной плотности энергетической освещенности) в рабочей области за счет изменения напряжения на лампах. Вклад излучения галогенных ламп в результирующий световой поток устанавливается в процентах в соответствии с данными электронной системы контроля осветителей. Спектральная плотность энергетической освещенности в рабочей области имитатора, а также спектры, формируемые ксенонным и галогенным источниками излучения, приведены на рисунке 2.

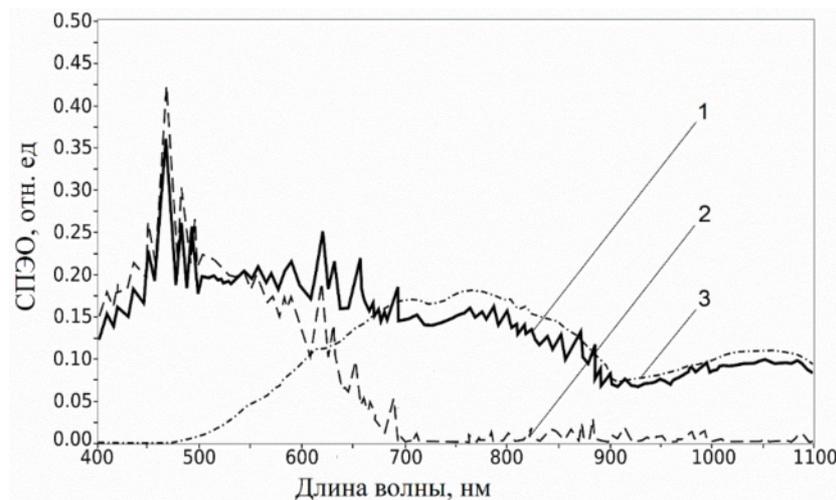


Рис. 2. Спектральная плотность энергетической освещенности (СПЭО) в рабочей области имитатора (1) и СПЭО для ксенонного (2) и галогенного (3) источников излучения
Fig. 2. The spectral irradiance in the test plane of the solar simulator (1) and the spectral irradiance for xenon (2) and halogen (3) sources of radiation

В [4] предложены два подхода к настройке (калибровке) имитаторов по энергетической освещенности с учетом спектра излучения при измерении ВАХ многопереходных ФЭМ:

- по силе тока короткого замыкания эталонного ФЭМ, скорректированного с учетом спектрального несоответствия [5];
- по силе тока короткого замыкания эталонного многопереходного ФЭМ при известных характеристиках спектральной чувствительности каждого субэлемента [6].

При реализации первого метода энергетическая освещенность имитатора настраивается в результате

многократных измерений силы тока короткого замыкания эталонного однопереходного ФЭМ, калибровочное значение которого, I_{sc}^{cal} , определяют из выражения [7]:

$$I_{sc}^{cal} = \frac{I_{sc}^{ref}}{MM}, \quad (1)$$

где I_{sc}^{ref} – значение силы тока короткого замыкания эталонного ФЭМ, приведенное в сертификате калибровки при стандартных условиях; MM – коэффици-

ент спектрального несоответствия, рассчитанный согласно [7] для субэлемента, ограничивающего фототок исследуемого многопереходного ФЭМ.

Второй метод настройки (калибровки) имитатора по параметру «энергетическая освещенность» основан на постоянстве значений отношения фототоков субэлементов как для стандартных условий, так и при исследованиях на имитаторе. Для каждого субэлемента справедливо равенство фототоков, генерируемых в стандартных условиях и под воздействием излучения имитатора: $I_{sim}^i = I_{ref}^i$. В этом случае настройка энергетической освещенности с учетом спектрального состава излучения осуществляется по силе тока короткого замыкания субэлементов, значения которых рассчитываются на основании результатов измерений характеристик спектральной чувствительности субэлементов и справочных значений спектральной плотности энергетической освещенности для стандартного спектра [4]:

$$I_{ref}^i = \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} E_{ref}(\lambda) SR_i(\lambda) d\lambda = \sum_k B_k \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} E_k(\lambda) SR_i(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

где I_{ref}^i – ток короткого замыкания (плотность фототока) i -го субэлемента при стандартных условиях; $SR_i(\lambda)$ – характеристика спектральной чувствительности i -го субэлемента; $E_{ref}(\lambda)$ – спектральная плотность энергетической освещенности для стандартного спектра [2]; B_k – коэффициент, устанавливающий соотношение интенсивностей излучения для k источников имитатора; $E_k(\lambda)$ – спектральная плотность энергетической освещенности k -го источника излучения имитатора.

Выбор соответствующего метода настройки (калибровки) основан на доступности измерительной информации при его реализации в производственных условиях. Оба рассмотренных метода основаны на использовании результатов измерений характеристик спектральной чувствительности эталонных и исследуемых ФЭМ, которые необходимы для вычисления коэффициента спектрального несоответствия (в первом методе) или плотностей фототоков (во втором методе). Измерения характеристик спектральной чувствительности (внешнего квантового выхода фотоответа) фотоэлектрических преобразователей выполняют на специализированных установках, обычно предназначенных для исследования солнечных элементов и малоразмерных ФЭМ площадью около $(0,2 \times 0,2) \text{ м}^2$ [8]. В процессе измерения многопереходного фотоэлектрического преобразователя необходимо создавать ограничение по фототоку исследуемого субэлемента, что обеспечивается подсветкой неисследуемых субэлементов от источников

дополнительного светового смещения. Следовательно, выполнить измерения характеристик спектральной чувствительности полноразмерного ФЭМ технически сложно, что создает препятствия для применения этих методов в производственных условиях. Дополнительным ограничением в случае первого метода является необходимость измерения спектральной плотности энергетической освещенности в диапазоне фоточувствительности фотоэлектрического преобразователя при каждом изменении спектра излучения имитатора.

В данной работе предложена методика настройки (калибровки) имитатора для измерений многопереходных $a\text{-Si}/\mu\text{c-Si}$ ФЭМ, предполагающая использование двух эталонных ФЭМ: однопереходного – для настройки и калибровки энергетической освещенности и двухпереходного – для корректировки спектрального состава излучения.

Процедура настройки (калибровки) имитатора солнечного излучения, предназначенного для контроля энергопроизводительности многопереходных $a\text{-Si}/\mu\text{c-Si}$ ФЭМ, реализуется в следующей последовательности:

- 1) корректировка спектральной плотности энергетической освещенности в результате измерения значений фотоэлектрических параметров (силы тока короткого замыкания, напряжения холостого хода, максимальной мощности, коэффициента заполнения ВАХ) эталонного многопереходного ФЭМ, структура и конструкция которого соответствуют исследуемому ФЭМ;
- 2) настройка (калибровка) энергетической освещенности по силе тока короткого замыкания эталонного однопереходного ФЭМ, характеристика спектральной чувствительности которого охватывает большую часть диапазона фоточувствительности исследуемого ФЭМ.

Методика эксперимента

- 1) Настройка спектрального состава излучения имитатора осуществлялась методом прямых измерений эталонного многопереходного фотоприемника при заданных соотношениях интенсивностей излучения от галогенного и ксенонного источников в суммарном световом потоке. В качестве эталонного фотоприемника использовался полноразмерный многопереходный ФЭМ, структура и конструкция которого соответствуют исследуемому ФЭМ. Конструкция многопереходного $a\text{-Si}/\mu\text{c-Si}$ ФЭМ имеет ограничение по фототоку, генерируемому нижним $\mu\text{c-Si}$ субэлементом с целью компенсации негативного эффекта фотоиндуцированной деградации, вызывающего снижение фототока $a\text{-Si}$ субэлемента в процессе эксплуатации ФЭМ [9].

Настройка спектральной плотности энергетической освещенности заключалась в определении оптимального сине-красного отношения спектра (доли галогенного излучения в суммарном световом потоке)



ке), при котором регистрируемые значения фотоэлектрических параметров эталонного ФЭМ (средние арифметические значения многократных повторений) оказываются в пределах доверительных интервалов, установленных в сертификате калибровки (при $k = 2, P = 95 \%$). В эксперименте использовался многопереходный ФЭМ, в сертификате калибровки которого указаны следующие действительные значения и доверительные интервалы для фотоэлектрических параметров: для силы тока короткого замыкания ($1,38 \pm 0,03$) А; для напряжения холостого хода ($127,7 \pm 1,3$) В; для максимальной мощности ($122,5 \pm 3,7$) Вт; для коэффициента заполнения ВАХ ($0,695 \pm 0,028$).

В процессе осуществления настройки спектрального состава излучения, при каждом изменении интенсивности излучения ксенонных и галогенных ламп, контролировалась стабильность величины энергетической освещенности в интервале ($1\ 000 \pm 5$) Вт/м² по силе тока короткого замыкания эталонного однопереходного *a-Si* ФЭМ.

2) Настройка (калибровка) имитатора по параметру «энергетическая освещенность» осуществлялась путем прямых измерений силы тока короткого замыкания эталонного фотоприемника. В результате было установлено соотношение между измеренным значением (средним арифметическим значением результатов многократных измерений) силы тока короткого замыкания эталонного фотоприемника и его

действительным значением, приведенным в сертификате калибровки. В качестве эталонного фотоприемника использовался однопереходный *a-Si* ФЭМ, в сертификате калибровки которого указаны следующие действительные значения и доверительные интервалы для фотоэлектрических параметров: для силы тока короткого замыкания ($1,31 \pm 0,03$) А; для напряжения холостого хода ($143,0 \pm 1,2$) В; для максимальной мощности ($126,7 \pm 5,1$) Вт; для коэффициента заполнения ВАХ ($0,676 \pm 0,020$).

Результаты эксперимента

При настройке спектральной плотности энергетической освещенности были выполнены многократные измерения фотоэлектрических параметров эталонным *a-Si/μc-Si* ФЭМ (10 повторений) при различных соотношениях интенсивностей излучения от галогенного и ксенонного источников: доля галогенного излучения в суммарном световом потоке изменялась от 64 % до 71 %. Средние арифметические значения результатов многократных измерений фотоэлектрических параметров приведены в таблице 1. Установлено, что значения силы тока короткого замыкания, напряжения холостого хода, максимальной мощности, коэффициента заполнения ВАХ находятся в пределах доверительных интервалов при соотношении излучений от галогенных и ксеноновых ламп 71 : 29.

Таблица 1

Средние арифметические значения результатов многократных измерений фотоэлектрических параметров эталонного многопереходного ФЭМ при настройке спектральной плотности энергетической освещенности в рабочей области имитатора

Table 1

Mean of the current-voltage characteristics in repeated measuring of reference multi-junction PV module for adjusting the spectral distribution in the test plane of solar simulator

Доля галогенного излучения, %	$I_{к.з.}$, А	$U_{х.х.}$, В	P_{max} , Вт	FF
64	1,2252	126,491	107,6878	0,6949
65	1,2639	126,6232	110,7651	0,6921
66	1,2840	126,6529	112,0278	0,6889
67	1,3158	126,7534	114,2400	0,6850
68	1,3360	126,7777	115,3353	0,6810
69	1,3557	126,8278	116,4255	0,6771
70	1,3869	126,8831	118,0843	0,6710
71	1,4096	126,9536	119,3982	0,6672

Примечание. Значения СКО результатов измерений: для тока короткого замыкания ($I_{к.з.}$) 0,15 %; для напряжения холостого хода ($U_{х.х.}$) 0,17 %; для максимальной мощности (P_{max}) 0,04 %; для коэффициента заполнения ВАХ (FF) 0,22 %.

При настройке (калибровке) имитатора по энергетической освещенности были выполнены многократные измерения силы тока короткого замыкания эталонного *a-Si* ФЭМ (10 повторений) при выбранном соотношении излучений от галогенных и ксенонных ламп. Полученный результат измерения, $I_{к.з.} = (1,313 \pm 0,001)$ А при $P = 95 \%$, находится в пре-

делах доверительного интервала, указанного в сертификате калибровки.

Заключение

Настройка (калибровка) имитатора солнечного излучения по энергетической освещенности проводится с целью обеспечения прослеживаемости ре-



зультатов измерений фотоэлектрических параметров ФЭМ к Международной системе единиц (СИ). При контроле энергопроизводительности многопереходных ФЭМ возникает необходимость корректировать спектральный состав излучения (спектральную плотность энергетической освещенности в рабочей области имитатора). В статье была предложена методика настройки (калибровки) имитатора по энергетической освещенности с учетом спектральной плотности энергетической освещенности, предполагающая использование двух эталонных ФЭМ. В результате выполненной работы можно сделать вывод о том, что данная методика обладает существенным преимуществом, обуславливающим ее применимость в промышленных условиях – простотой реализации измерительных процедур ввиду отсутствия необходимости в измерениях характеристик спектральной чувствительности фотоэлектрических преобразователей и спектра излучения для имитатора утвержденного класса.

Список литературы

1. ГОСТ 8.195 – 2013.ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений спектральной плотности энергетической яркости, спектральной плотности силы излучения, спектральной плотности энергетической освещенности, силы излучения и энергетической освещенности в диапазоне длин волн от 0,2 до 25,0 мкм.
2. ГОСТ Р МЭК 60904-3-2013. Государственная система обеспечения единства измерений. Приборы фотоэлектрические. Часть 3. Принципы измерения характеристик фотоэлектрических приборов с учетом стандартной спектральной плотности энергетической освещенности наземного солнечного излучения.
3. Колтун М.М. Оптика и метрология солнечных элементов. М.: Наука, 1985.
4. Guidelines for PV power measurement in industry (compiled by the European Commission Joint Research Center). Belgium, 2010.
5. Pravettoni M. et al. An alternative method for spectral response measurements of large-area thin-film photovoltaic modules // *Prog. Photovolt: Res. Appl.* 2012. V. 20. P. 416–422.
6. Hishikawa Y. et al. Irradiance and wavelength dependence of the I-V characteristics of solar cells // 12th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-12), Korea, 2001. P. 129–130.
7. ГОСТ Р МЭК 60904-7-2013 Государственная система обеспечения единства измерений. Приборы фотоэлектрические. Часть 7. Вычисление поправки на спектральное несоответствие при испытаниях фотоэлектрических приборов.

8. ГОСТ Р МЭК 60904-8-2013. Государственная система обеспечения единства измерений. Приборы фотоэлектрические. Часть 8. Измерение спектральной чувствительности фотоэлектрических приборов.

9. Staebler D.L., Wronsky C.R. Reversible Conductivity Changes in Discharge Produced Amorphous Si // *Appl. Phys. Lett.* 1977. V. 31, No 4. P. 292–294.

References

1. GOST 8.195–2013.GSI. Gosudarstvennââ poverochnââ shema dlâ sredstv izmerenij spektral'noj plotnosti ènergetičeskoj ârkosti, spektral'noj plotnosti sily izlučeniâ, spektral'noj plotnosti ènergetičeskoj osvešennosti, sily izlučeniâ i ènergetičeskoj osvešennosti v diapazone dlin voln ot 0,2 do 25,0 mkm (in Russ.).
2. GOST R MÈK 60904-3-2013. Gosudarstvennââ sistema obespečeniâ edinstva izmerenij. Pribory fotoèlektričeskie. Čast' 3. Principy izmereniâ harakteristik fotoèlektričeskih priborov s učetom standartnoj spektral'noj plotnosti ènergetičeskoj osvešennosti nazemnogo solnečnogo izlučeniâ (in Russ.).
3. Koltun M.M. Optika I metrologiâ solnečnyh èlementov. Moscow: Nauka Publ., 1985 (in Russ.).
4. Guidelines for PV power measurement in industry (compiled by the European Commission Joint Research Cen-ter). Belgium, 2010 (in Eng.).
5. Pravettoni M. et al. An alternative method for spectral response measurements of large-area thin-film photovoltaic modules. *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, 2012, vol. 20, pp. 416–422 (in Eng.).
6. Hishikawa Y. et al. Irradiance and wavelength dependence of the I-V charateristics of solar cells. 12th *International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-12)*, Korea, 2001, pp. 129–130 (in Eng.).
7. GOST R MÈK 60904-7-2013 Gosudarstvennââ sistema obespečeniâ edinstva izmerenij. Priboryfotoèlektričeskie. Čast' 7. Vyčislenie popravki na spektral'noe nesootvetstvie pri ispytaniâh fotoèlektričeskih priborov (in Russ.).
8. GOST R MÈK 60904-8-2013. Gosudarstvennââ sistema obespečeniâ edinstva izmerenij. Pribory fotoèlektričeskie. Čast' 8. Izmerenie spektral'noj čuvstvitel'nosti fotoèlektričeskih priborov (in Russ.).
9. Staebler D.L., Wronsky C.R. Reversible Conductivity Changes in Discharge Produced Amorphous Si. *Appl. Phys. Lett.* 1977, vol. 31, no. 4, pp. 292–294 (in Eng.).

Транслитерация по ISO 9:1995

