

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

Photovoltaic devices –

Part 8: Measurement of spectral responsivity of a photovoltaic (PV) device

Dispositifs photovoltaïques –

Partie 8: Mesure de la sensibilité spectrale d'un dispositif photovoltaïque (PV)

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60904-8:2014



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2014 IEC, Geneva, Switzerland

All rights reserved. Unless otherwise specified, no part of this publication may be reproduced or utilized in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying and microfilm, without permission in writing from either IEC or IEC's member National Committee in the country of the requester. If you have any questions about IEC copyright or have an enquiry about obtaining additional rights to this publication, please contact the address below or your local IEC member National Committee for further information.

Droits de reproduction réservés. Sauf indication contraire, aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de l'IEC ou du Comité national de l'IEC du pays du demandeur. Si vous avez des questions sur le copyright de l'IEC ou si vous désirez obtenir des droits supplémentaires sur cette publication, utilisez les coordonnées ci-après ou contactez le Comité national de l'IEC de votre pays de résidence.

IEC Central Office
3, rue de Varembe
CH-1211 Geneva 20
Switzerland

Tel.: +41 22 919 02 11
Fax: +41 22 919 03 00
info@iec.ch
www.iec.ch

About the IEC

The International Electrotechnical Commission (IEC) is the leading global organization that prepares and publishes International Standards for all electrical, electronic and related technologies.

About IEC publications

The technical content of IEC publications is kept under constant review by the IEC. Please make sure that you have the latest edition, a corrigenda or an amendment might have been published.

IEC Catalogue - webstore.iec.ch/catalogue

The stand-alone application for consulting the entire bibliographical information on IEC International Standards, Technical Specifications, Technical Reports and other documents. Available for PC, Mac OS, Android Tablets and iPad.

IEC publications search - www.iec.ch/searchpub

The advanced search enables to find IEC publications by a variety of criteria (reference number, text, technical committee,...). It also gives information on projects, replaced and withdrawn publications.

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

Stay up to date on all new IEC publications. Just Published details all new publications released. Available online and also once a month by email.

Electropedia - www.electropedia.org

The world's leading online dictionary of electronic and electrical terms containing more than 30 000 terms and definitions in English and French, with equivalent terms in 14 additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary (IEV) online.

IEC Glossary - std.iec.ch/glossary

More than 55 000 electrotechnical terminology entries in English and French extracted from the Terms and Definitions clause of IEC publications issued since 2002. Some entries have been collected from earlier publications of IEC TC 37, 77, 86 and CISPR.

IEC Customer Service Centre - webstore.iec.ch/csc

If you wish to give us your feedback on this publication or need further assistance, please contact the Customer Service Centre: csc@iec.ch.

A propos de l'IEC

La Commission Electrotechnique Internationale (IEC) est la première organisation mondiale qui élabore et publie des Normes internationales pour tout ce qui a trait à l'électricité, à l'électronique et aux technologies apparentées.

A propos des publications IEC

Le contenu technique des publications IEC est constamment revu. Veuillez vous assurer que vous possédez l'édition la plus récente, un corrigendum ou amendement peut avoir été publié.

Catalogue IEC - webstore.iec.ch/catalogue

Application autonome pour consulter tous les renseignements bibliographiques sur les Normes internationales, Spécifications techniques, Rapports techniques et autres documents de l'IEC. Disponible pour PC, Mac OS, tablettes Android et iPad.

Recherche de publications IEC - www.iec.ch/searchpub

La recherche avancée permet de trouver des publications IEC en utilisant différents critères (numéro de référence, texte, comité d'études,...). Elle donne aussi des informations sur les projets et les publications remplacées ou retirées.

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

Restez informé sur les nouvelles publications IEC. Just Published détaille les nouvelles publications parues. Disponible en ligne et aussi une fois par mois par email.

Electropedia - www.electropedia.org

Le premier dictionnaire en ligne de termes électroniques et électriques. Il contient plus de 30 000 termes et définitions en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans 14 langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International (IEV) en ligne.

Glossaire IEC - std.iec.ch/glossary

Plus de 55 000 entrées terminologiques électrotechniques, en anglais et en français, extraites des articles Termes et Définitions des publications IEC parues depuis 2002. Plus certaines entrées antérieures extraites des publications des CE 37, 77, 86 et CISPR de l'IEC.

Service Clients - webstore.iec.ch/csc

Si vous désirez nous donner des commentaires sur cette publication ou si vous avez des questions contactez-nous: csc@iec.ch.

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

Photovoltaic devices –

Part 8: Measurement of spectral responsivity of a photovoltaic (PV) device

Dispositifs photovoltaïques –

Partie 8: Mesure de la sensibilité spectrale d'un dispositif photovoltaïque (PV)

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

ICS 27.160

ISBN 978-2-8322-1530-2

Warning! Make sure that you obtained this publication from an authorized distributor.
Attention! Veuillez vous assurer que vous avez obtenu cette publication via un distributeur agréé.

CONTENTS

FOREWORD.....	4
1 Scope.....	6
2 Normative references	6
3 Marking	6
4 Testing	7
4.1 General.....	7
4.2 Special considerations	7
4.3 Measurement under white bias light	7
4.4 Applying a bias voltage to the device under test.....	7
5 General description of spectral responsivity measurement.....	7
6 Apparatus.....	9
6.1 General.....	9
6.2 Monochromatic light source	11
6.3 PV device holder and temperature control.....	12
6.4 PV device contacts	12
6.5 Bias light.....	12
6.6 DC measurements	12
6.7 AC measurements in the presence of bias light.....	13
6.8 Reference device	13
7 Measurement of spectral responsivity using a constant light source	13
7.1 General method with a grating monochromator or filter wheel	13
7.2 Measurement of the reference device for setup calibration.....	13
7.3 Measurement of the device under test	14
7.4 Calculation of spectral responsivity	15
7.5 Simplifications	16
8 Measurement of spectral responsivity under pulsed light	16
8.1 Additional apparatus	16
8.2 Test procedure.....	17
9 Measurements of series-connected modules	17
9.1 General.....	17
9.2 Additional apparatus	17
9.3 Test procedure.....	17
9.4 Calculation of spectral responsivity	20
10 Report	20

Figure 1 – Example block diagram of a differential spectral responsivity measuring instrument using a continuous light source and a grating monochromator 10

Figure 2 – Example block diagram of a differential spectral responsivity measuring instrument using a continuous light source and bandpass filters 11

Figure 3 – Example block diagram of a spectral responsivity measuring instrument using a pulsed light source and bandpass filters 17

Figure 4 – Example of the measurement setup for the differential spectral responsivity measurement of a target cell in a PV module, where the supplemental bias light is applied on all the cells in the module other than the target cell 18

- Figure 5 – Example of the measurement setup for the differential spectral responsivity measurement of a target cell in a PV module, where the supplemental bias light is applied on all the cells in a string of the module other than the target cell..... 19
- Figure 6 – Determination of the bias voltage V_b to set the voltage across the target cell to the short-circuit condition (see 9.3)..... 19

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60904-8:2014

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

PHOTOVOLTAIC DEVICES –

**Part 8: Measurement of spectral responsivity
of a photovoltaic (PV) device**

FOREWORD

- 1) The International Electrotechnical Commission (IEC) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of IEC is to promote international co-operation on all questions concerning standardization in the electrical and electronic fields. To this end and in addition to other activities, IEC publishes International Standards, Technical Specifications, Technical Reports, Publicly Available Specifications (PAS) and Guides (hereafter referred to as “IEC Publication(s)”). Their preparation is entrusted to technical committees; any IEC National Committee interested in the subject dealt with may participate in this preparatory work. International, governmental and non-governmental organizations liaising with the IEC also participate in this preparation. IEC collaborates closely with the International Organization for Standardization (ISO) in accordance with conditions determined by agreement between the two organizations.
- 2) The formal decisions or agreements of IEC on technical matters express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the relevant subjects since each technical committee has representation from all interested IEC National Committees.
- 3) IEC Publications have the form of recommendations for international use and are accepted by IEC National Committees in that sense. While all reasonable efforts are made to ensure that the technical content of IEC Publications is accurate, IEC cannot be held responsible for the way in which they are used or for any misinterpretation by any end user.
- 4) In order to promote international uniformity, IEC National Committees undertake to apply IEC Publications transparently to the maximum extent possible in their national and regional publications. Any divergence between any IEC Publication and the corresponding national or regional publication shall be clearly indicated in the latter.
- 5) IEC itself does not provide any attestation of conformity. Independent certification bodies provide conformity assessment services and, in some areas, access to IEC marks of conformity. IEC is not responsible for any services carried out by independent certification bodies.
- 6) All users should ensure that they have the latest edition of this publication.
- 7) No liability shall attach to IEC or its directors, employees, servants or agents including individual experts and members of its technical committees and IEC National Committees for any personal injury, property damage or other damage of any nature whatsoever, whether direct or indirect, or for costs (including legal fees) and expenses arising out of the publication, use of, or reliance upon, this IEC Publication or any other IEC Publications.
- 8) Attention is drawn to the Normative references cited in this publication. Use of the referenced publications is indispensable for the correct application of this publication.
- 9) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this IEC Publication may be the subject of patent rights. IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

International Standard IEC 60904-8 has been prepared by IEC technical committee 82: Solar photovoltaic energy systems.

This third edition cancels and replaces the second edition published in 1998 and constitutes a technical revision.

The main technical changes with respect to the previous edition are listed below:

- Re-writing of the clause on testing
- Addition of a new clause for the measurement of series-connected modules
- Addition of the requirements of ISO/IEC 17025
- Additional figures

The text of this standard is based on the following documents:

FDIS	Report on voting
82/822/FDIS	82/843/RVD

Full information on the voting for the approval of this standard can be found in the report on voting indicated in the above table.

A list of all parts in the IEC 60904 series, published under the general title *Photovoltaic devices*, can be found on the IEC website.

This publication has been drafted in accordance with the ISO/IEC Directives, Part 2.

The committee has decided that the contents of this publication will remain unchanged until the stability date indicated on the IEC web site under "<http://webstore.iec.ch>" in the data related to the specific publication. At this date, the publication will be

- reconfirmed,
- withdrawn,
- replaced by a revised edition, or
- amended.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60904-8:2014

PHOTOVOLTAIC DEVICES –

Part 8: Measurement of spectral responsivity of a photovoltaic (PV) device

1 Scope

This International Standard specifies the requirements for the measurement of the spectral responsivity of both linear and non-linear photovoltaic devices. It is only applicable to single-junction devices. The spectral responsivity of a photovoltaic device is used in cell development and cell analysis, as it provides a measure of recombination and other processes occurring inside the semiconductor or cell material system.

The spectral responsivity of a photovoltaic device is used for the correction of the spectral mismatch if a PV device is calibrated in a setup where the measurement spectrum is different from the reference spectral irradiance data given in IEC 60904-3 and a reference device with a different spectral responsivity to the device under test is used. This procedure is given in IEC 60904-7.

2 Normative references

The following documents, in whole or in part, are normatively referenced in this document and are indispensable for its application. For dated references, only the edition cited applies. For undated references, the latest edition of the referenced document (including any amendments) applies.

IEC 60904-3, *Photovoltaic devices – Part 3: Measurement principles for terrestrial photovoltaic (PV) solar devices with reference spectral irradiance data*

IEC 60904-7, *Photovoltaic devices – Part 7: Computation of the spectral mismatch correction for measurements of photovoltaic devices*

IEC 60904-9, *Photovoltaic devices – Part 9: Solar simulator performance requirements*

IEC 61215, *Crystalline silicon terrestrial photovoltaic (PV) modules – Design qualification and type approval*

IEC 61646, *Thin-film terrestrial photovoltaic (PV) modules – Design qualification and type approval*

IEC/TS 61836, *Solar photovoltaic energy systems – Terms, definitions and symbols*

ISO/IEC 17025, *General requirements for the competence of testing and calibration laboratories*

3 Marking

Each photovoltaic device should carry a clear and indelible marking. This marking should be cross-referenced against:

- name, monogram or symbol of the manufacturer;
- base material and type of photovoltaic device;

- type number or identification, if available;
- serial number, if applicable.

When the photovoltaic devices to be tested are prototypes of a new design and not from production, this fact shall be noted in the test report (see Clause 10).

4 Testing

4.1 General

The photovoltaic device shall be subjected to one of the procedures for spectral responsivity measurements defined in Clauses 7 to 9.

4.2 Special considerations

Preconditioning – Before beginning the measurements, the device under test shall be stabilized (if necessary) by an appropriate light soaking test procedure, as specified in IEC 61215 or IEC 61646. Different photovoltaic technologies may require different preconditioning procedures.

4.3 Measurement under white bias light

The procedures in Clause 7 and 9 require a white bias light being applied to the device under test during the determination of spectral responsivity. Under bias light conditions, not the spectral responsivity but rather the differential spectral responsivity is measured. The spectral responsivity can be determined from the differential spectral responsivity by taking the non-linearity into account based on a series of differential spectral responsivity measurements at bias light levels generating short-circuit currents in the device ranging from 5 % to 110 % of that at standard test conditions (see Clause 5). Most crystalline silicon solar cells have a differential spectral responsivity at a bias light generating 30 % to 40 % of their short-circuit current at standard test conditions that is identical to the spectral responsivity at standard test conditions. Therefore, the measurement should be performed with such bias light levels if the non-linearity of a crystalline silicon PV device is not determined. If the non-linearity is confirmed to be negligible, i.e. the differential spectral responsivity is constant within the irradiance range of interest, the differential spectral responsivity at a specific bias light level may be used. For details see Clause 5.

4.4 Applying a bias voltage to the device under test

Generally, the spectral responsivity of a photovoltaic device is measured at short-circuit conditions (zero bias voltage) of the photovoltaic device and used for the purposes of cell analysis and calculating the spectral mismatch.

In order to measure the spectral responsivity of the specimen under a specific voltage, a bias voltage may need to be applied. The bias voltage of the device shall be controlled by an external voltage source. If a bias voltage is applied it shall be specified in the report.

5 General description of spectral responsivity measurement

The spectral responsivity of a photovoltaic (PV) device is measured by irradiating it by means of a narrow-bandwidth light source at a series of different wavelengths covering its responsivity range, and measuring the short-circuit current and monochromatic irradiance at each of these wavelengths (formula 1), or short-circuit current and monochromatic light beam power (formula 2). The first type of measurement results in the spectral irradiance responsivity with the unit $A/W \cdot m^{-2}$. In order to determine the spectral responsivity as defined in IEC/TS 61836 this needs to be divided by the area of the device under test whereas the second type results directly in the spectral responsivity in the unit A/W .

In order to determine the output current of the device, the bias light as well as the monochromatic light should irradiate the entire area of the device uniformly. It is important to illuminate effectively the entire area of the device, as light not directly falling onto the active area may also contribute to the measured signal. If the spectral responsivity is used for the calculation of the spectral mismatch correction according to IEC 60904-7 the illuminated area during the measurement of the spectral responsivity should be identical to that during the measurement of the current-voltage characteristics. This is normally the entire device area. If not it should be suitably delimited by an aperture.

In case the area of the device is larger than the respective beam sizes the latter should be scanned appropriately across the entire device area to provide a uniform illumination. If both beams are scanned, the scanning should be synchronous with the bias light always illuminating a spot larger than the monochromatic light.

The temperature of the device should be controlled.

The current density of the device under test at each wavelength is divided by the respective irradiances to give spectral responsivity.

$$s(\lambda) = I_{sc}(\lambda)/E(\lambda)/A \quad (1)$$

where:

$s(\lambda)$ is the spectral responsivity of the device under test at the wavelength λ ;

$I_{sc}(\lambda)$ is the short-circuit current of the device under test at the wavelength λ ;

$E(\lambda)$ is the irradiance of the light source at the wavelength λ ;

A is the area of the device under test.

The area of the device under test shall be noted in the test report.

Alternatively, the short-circuit current $I_{sc}(\lambda)$ and the radiant power incident on the device $P(\lambda)$ may be measured. The spectral responsivity is then determined as:

$$s(\lambda) = I_{sc}(\lambda)/P(\lambda) \quad (2)$$

where:

$I_{sc}(\lambda)$ is the short-circuit current of the device under test at the wavelength λ ;

$P(\lambda)$ is the radiant power incident on the device at the wavelength λ .

The determination of $P(\lambda)$ requires the measurement of the area of the device under test. This area shall be noted in the test report.

In practice (see Clauses 7 and 9) a small modulated signal originating from the monochromatic light is superimposed on a large bias signal originating from the white bias light. In such cases the evaluated quantities need to be treated as differential and a wavelength dependent differential spectral responsivity (DSR) $\tilde{s}(\lambda, E)$ is determined for a specific bias light irradiance E . The spectral responsivity at standard test conditions $s(\lambda)|_{STC}$ will equal the differential spectral responsivity only if the device is strictly linear. If the non-linearity is confirmed to be negligible, the differential spectral response at a specific bias light level may be used. For example, if the differential spectral response or the resultant spectral mismatch factor is constant within the bias light levels to generate the I_{sc} between 5 % and 110 % of standard test conditions, the differential spectral response at a bias level of 100 % of standard test conditions may be used. In all other cases the DSR shall be measured at a sufficient number of bias irradiances and the resultant spectral responsivity can be calculated or a specific bias light irradiance E_0 shall be found with $\tilde{s}(\lambda, E_0) \approx s(\lambda)|_{STC}$.

6 Apparatus

6.1 General

A spectral responsivity measurement system consists of a continuous (chopped or unchopped) or pulsed monochromatic light source, an optional beam splitting assembly with a monitor detector, a device stage able to hold the device under test, a reference device, an optional bias light assembly and electrical instrumentation. Figures 1(a, b) and 2(a, b) show examples of test arrangements for the measurement of the DSR of a solar cell.

If an optical chopper is used (Figures 1 and 2) care needs to be taken that no bias light reflected of the optical chopper reaches the test plane.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60904-8:2014

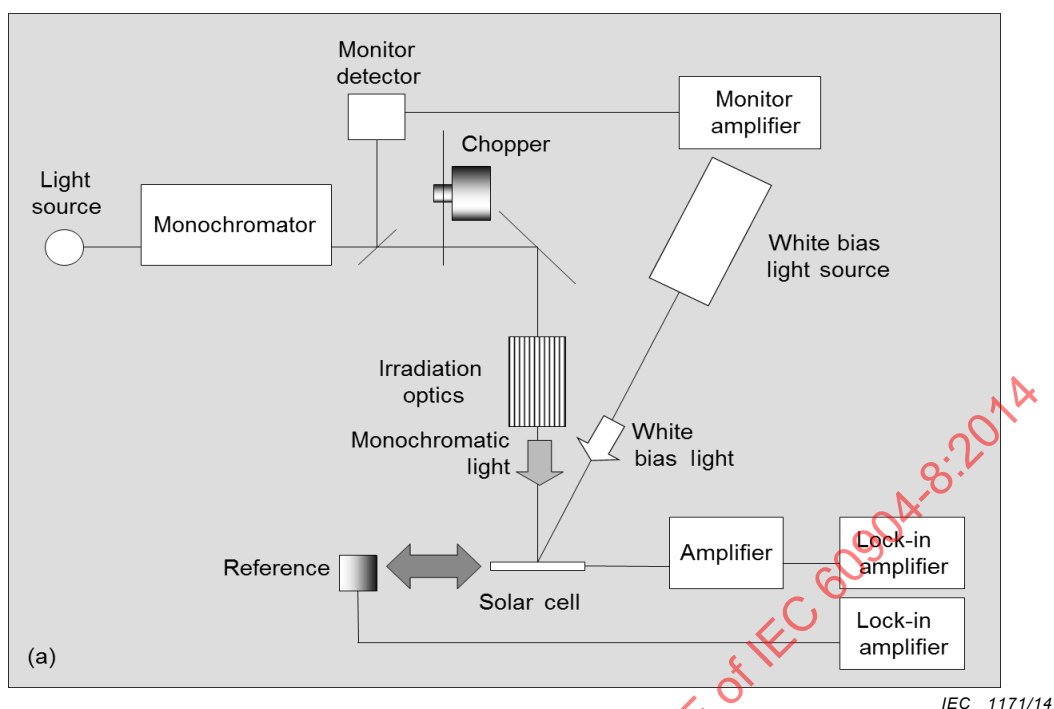


Figure 1a) – Monochromator ahead of chopper

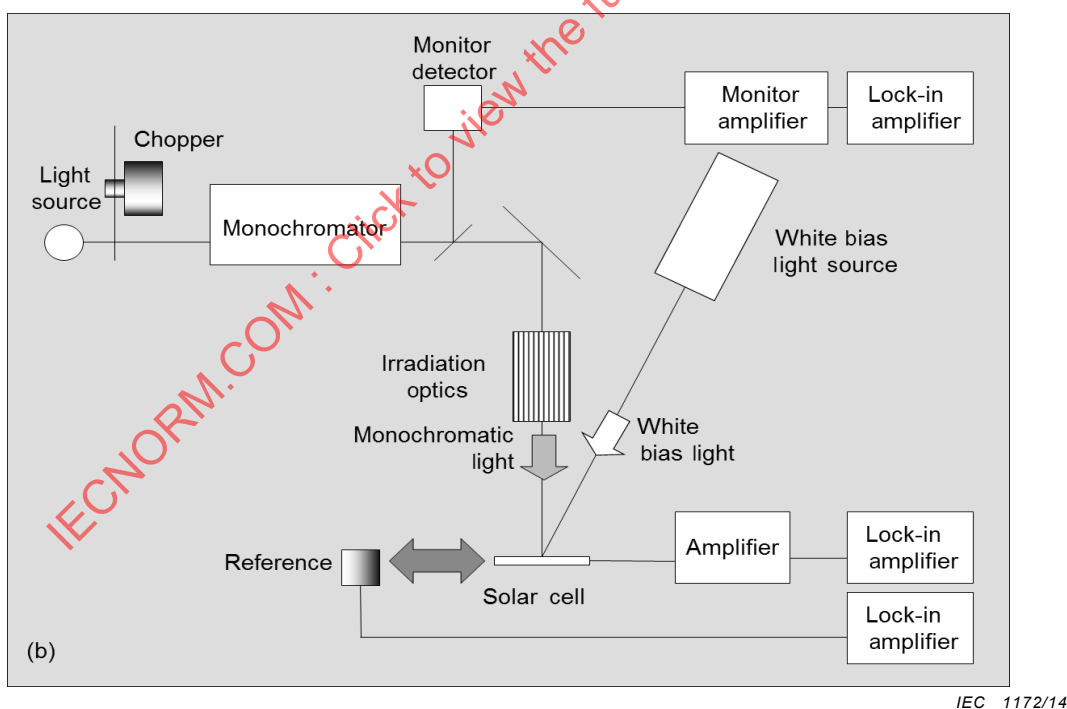


Figure 1b) – Chopper ahead of monochromator

Figure 1 – Example block diagram of a differential spectral responsivity measuring instrument using a continuous light source and a grating monochromator

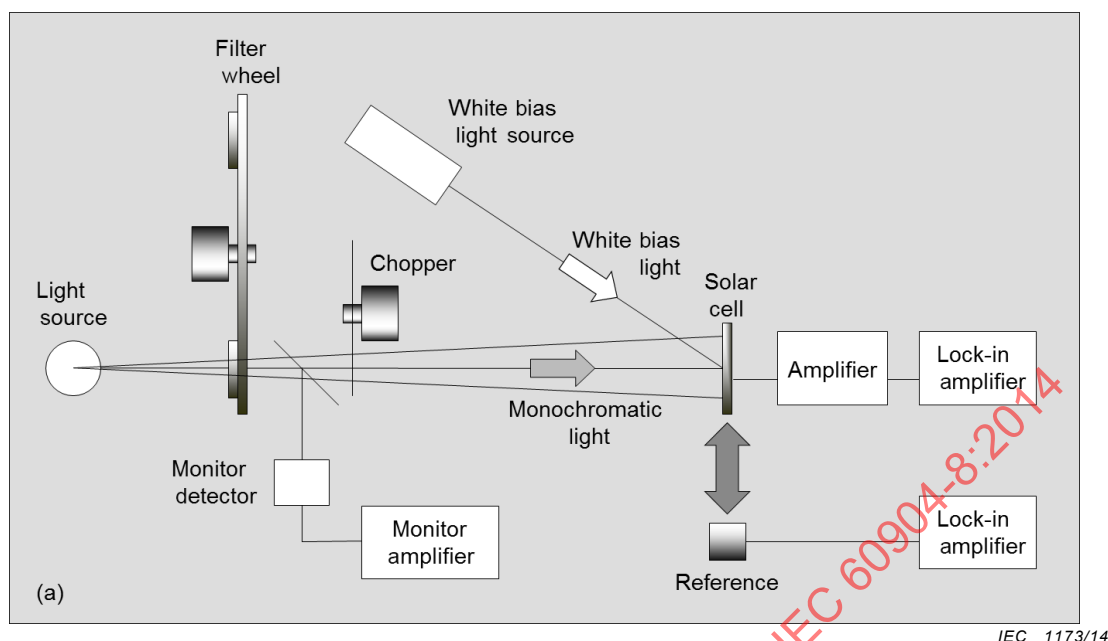


Figure 2a) – Filter ahead of chopper

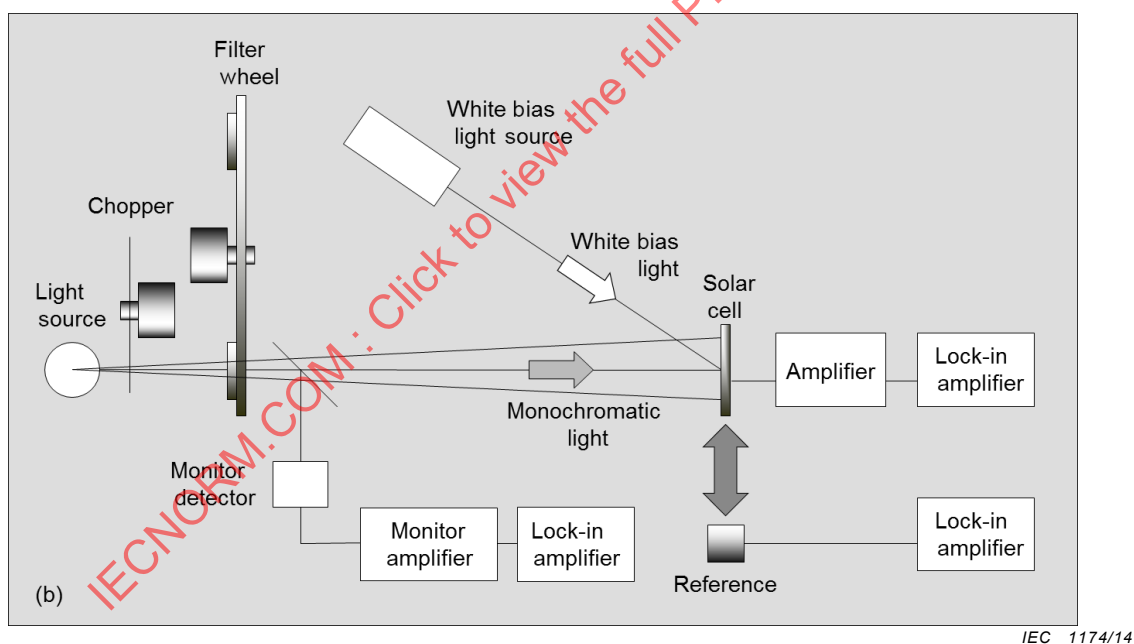


Figure 2b) – Chopper ahead of filter

Figure 2 – Example block diagram of a differential spectral responsivity measuring instrument using a continuous light source and bandpass filters

6.2 Monochromatic light source

The monochromatic light is usually generated by a light source and monochromator (for example a grating) or filter wheel with bandpass filters. The bandwidth (Full Width at Half Maximum, FWHM) of the monochromatic light should not exceed 20 nm for spectral responsivity measurements in the range between 300 nm and 1200 nm. In the range up to 3000 nm, the bandwidth should not exceed 50 nm.

The bandwidth of the monochromatic light should be chosen according to the fine structure of variation in the spectral responsivity of the device under test. Typically, a bandwidth (FWHM) of 10 nm – 15 nm is chosen for crystalline silicon cells or thin film solar cells.

The temporal light fluctuations caused by the lamp used for generating the monochromatic light and its power supply should be below 2 %. Spatial uniformity of the monochromatic light in the test plane should be better than ± 2 % determined according to IEC 60904-9. The spatial non-uniformity is especially relevant if the reference device and device under test deviate in their area or shape. It shall be considered within the uncertainty calculation. With a stable light source the reference and the device under test are normally measured consecutively in the same position and the non-uniformity is only relevant if the two are of different size. For sufficiently large area uniform illumination the reference and the device under test may be placed side-by-side and measured simultaneously thereby eliminating the effect of temporal fluctuations of the light source. Alternatively a beam splitting arrangement can provide two uniformly illuminated test planes for the test and reference devices.

NOTE This is analogous to the definition of simulator class A in IEC 60904-9.

6.3 PV device holder and temperature control

The PV device holder should provide the capability to make electrical connections to the device under test with good conductivity and to control the temperature of the device under test and the reference device. The temperature of the reference device and the device under test shall be measured or controlled to an accuracy of ± 1 °C with a repeatability of $\pm 0,5$ °C. The temperature uniformity of the reference device and the device under test should be within ± 2 °C. If the temperature of the reference device differs by more than 2 °C from the temperature at which it was calibrated, the calibration value shall be adjusted to the measured temperature.

NOTE Temperature differences of the reference device between its calibration and its use for a measurement typically will have their largest effect near the band edge of the reference device.

6.4 PV device contacts

A four point connection (Kelvin contacts, i.e. separate contacts for current and voltage) to the device under test should be used in order to allow the measurement of the cell voltage during the spectral responsivity measurement. It shall be designed such that the contacts do not impede the temperature control of the device under test, especially in the case of cells with all contacts on the back side.

NOTE If the device under test has a low shunt resistance, the correct measurement of the cell voltage is of special importance.

6.5 Bias light

For most PV devices, it is sufficient to use tungsten lamps or lamp arrays to generate the constant irradiance bias light. The light bias should illuminate the entire area of the device under test. The spatial non-uniformity (as defined in IEC 60904-9) of the applied bias light in the test plane should be less than 10 %, corresponding to class C. One possible scanning approach is described in Clause 5.

6.6 DC measurements

- a) Voltages and currents shall be measured to an accuracy of $\pm 0,2$ % of the open-circuit voltage or short-circuit current, respectively. Voltages and currents shall be measured using independent leads from the terminals of the specimen (four (4) wire leads), keeping them as short as possible. If the device under test is a bare cell, the 4-wire connection should start at the bus bars.

The connection method for cells should be carefully evaluated, as it may change the short-circuit condition of the cell due to resistive losses. Due to this effect, differences in spectral responsivity may occur.

- b) Short-circuit currents produced by the bias light should be measured at zero voltage. Typically current to voltage converters (transimpedance amplifier) can be used. Alternatively an external shunt resistor can be used together with a variable bias voltage source to offset the voltage drop across it. The variable voltage bias may be omitted if the voltage drop across the device under test is less than 3 % of its V_{oc} .

NOTE For a crystalline silicon solar cell this corresponds to typically a bias voltage of less than 20 mV.

6.7 AC measurements in the presence of bias light

If the spectral responsivity is measured using chopped monochromatic light in addition to bias light, the alternating monochromatically generated current shall be separated from the steady state current generated by the bias light by using a lock-in amplifier or equivalent equipment. As above an IV converter or an external shunt resistor should be chosen such that the voltage across the test device is less than 3 % of the open-circuit voltage. Care shall be taken to ensure that the measurement device or amplifier is not saturated by the DC current generated by the bias light. The chopping frequency shall be included in the test report.

The chopping frequency should be chosen such that the cycle time is longer than the time constant of the device under test. Furthermore, the chopping frequency should be chosen such that it does not coincide with the power frequency or its harmonics.

Set the voltage across the cell to the desired value (either 0 V for short-circuit conditions or the desired voltage).

6.8 Reference device

The irradiance or the power of the monochromatic light can be measured by reference devices such as thermal radiometers, calibrated photodiodes or photovoltaic devices. Silicon photodiodes can be used for the wavelength range of 300 nm to 1 100 nm. Ge photodiodes, InGaAs photodiodes or other devices with lower band gaps and thermal detectors can be used over a longer wavelength range. Devices under test which have a spectral responsivity over a wide wavelength range might necessitate the use of two or more different reference devices to cover this wide range.

NOTE Thermal detectors may not generally be suitable as they have time constants longer than the cycle time of the chopped light.

In the case that more than one reference device is used to extend the wavelength range of the measurement system, special care needs to be taken to avoid artefacts in the wavelength region of overlap of the reference devices.

7 Measurement of spectral responsivity using a constant light source

7.1 General method with a grating monochromator or filter wheel

If the light source is temporally stable, in the first step the reference device is measured at all wavelengths under consideration. In the second step, it is replaced by the PV device under test.

If the spatial distribution of light is uniform, the reference device and the PV device can be mounted next to each other and can be measured simultaneously. The other provisions of 7.2 and 7.3 do still apply in this case.

NOTE Analogous for a beam splitting arrangement providing two uniformly illuminated areas (see 6.2).

7.2 Measurement of the reference device for setup calibration

7.2.1 Mount the reference device in the spectral responsivity measurement system. Connect it to the instrumentation. Set its bias voltage to the conditions used at its calibration.

7.2.2 Set the reference device temperature to 25 °C or the temperature given by its calibration certificate, and maintain within the recommended temperature range of the reference device.

7.2.3 Set the monochromatic light beam to the size appropriate for both the measurement of the reference device and the device under test.

It is important to illuminate effectively the entire area of the device, as light not directly falling onto the active area may also contribute to the measured signal. If the spectral responsivity is used for the calculation of the spectral mismatch correction according to IEC 60904-7 the illuminated area during the measurement of the spectral responsivity should be identical to that during the measurement of the current-voltage characteristics. This is normally the entire device area. If not it should be suitably delimited by an aperture.

In case the area of the device is larger than the respective beam sizes the latter should be scanned appropriately across the entire device area to provide a uniform illumination. If both beams are scanned, the scanning should be synchronous with the bias light always illuminating a spot larger than the monochromatic light.

Special care shall be taken if the device under test is of different size in comparison to the reference device. In this case the smaller device should map the area of the larger device, (especially if the light beam is not uniform in irradiance) by measuring it at several positions. Spatial non-uniformity of the monochromatic light shall be considered explicitly in the determination of the final measurement uncertainty.

7.2.4 The bias light induced DC current $I_{\text{ref,DC}}$ of the reference device shall have the same value as during its calibrations (usually low bias light for reference solar cells and no bias light for reference photodiodes).

7.2.5 Measure the output $I_{\text{ref}}(\lambda, I_{\text{ref,DC}})$ of the reference device as a function of the wavelength under monochromatic illumination. For the calculation of the irradiance of the monochromatic light the differential spectral responsivity of the reference device at the bias current level $I_{\text{ref,DC}}$ as set in 7.2.4, shall be used.

In case of simultaneous measurement under a uniform light beam the measurement of the reference will be taken together with that of the device under test in 7.3.3. It is recommended to repeat the measurements with the positions of reference and device under test inverted and suitably average the results. In any case spatial non-uniformity of the monochromatic light shall be considered explicitly in the determination of the final measurement uncertainty.

7.3 Measurement of the device under test

7.3.1 Mount the device under test in the spectral responsivity measurement system. Connect it to the instrumentation. Set the bias voltage so that the voltage across the device under test corresponds to short-circuit conditions or to the required specific voltage.

7.3.2 Set the device temperature to 25 °C or the required temperature, and maintain within ± 1 °C.

If this is not possible for an inverted cell structure or a large area device, the temperature deviation should be noted in the test report.

7.3.3 Measure the complete wavelength dependent output $I(\lambda, I_{\text{bias}}(E))$ under at least 5 different bias light irradiances E resulting in bias light generated short-circuit currents $I_{\text{bias}}(E)$ ranging from 5 % and 110 % of the short-circuit current of the device under standard test conditions. Usually $I(\lambda, I_{\text{bias}}(E))$ is measured with a lock-in-amplifier and $I_{\text{bias}}(E)$ is measured with a multimeter in DC mode.

If the scanning approach as described in Clause 5 is used, the short-circuit current needs to be averaged along the scanning path.

7.3.4 Appropriate corrections for fluctuations of the light irradiance shall be applied if a monitor detector is used. If no monitor detector is used, verify the stability of the light for all wavelengths over the time of both measurements of reference device and device under test and include its variation in the uncertainty analysis.

7.4 Calculation of spectral responsivity

7.4.1 Determine the differential spectral responsivity $\tilde{s}(\lambda, I_{\text{bias}}(E))$ for each wavelength and each bias light setting:

$$\tilde{s}(\lambda, I_{\text{bias}}(E)) = \frac{I(\lambda, I_{\text{bias}}(E))}{I_{\text{ref}}(\lambda, I_{\text{ref,DC}})} \cdot \tilde{s}_{\text{ref}}(\lambda, I_{\text{ref,DC}}) \quad (3)$$

where $\tilde{s}_{\text{ref}}(\lambda, I_{\text{ref,DC}})$ is the given differential spectral responsivity of reference device.

7.4.2 Calculate the differential responsivity $\tilde{s}(I_{\text{bias}})$ for each bias light setting by integrating over all wavelengths:

$$\tilde{s}(I_{\text{bias}}) = \frac{\int_0^\infty \tilde{s}(\lambda, I_{\text{bias}}(E)) \cdot E_{\text{AM1.5G}}(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty E_{\text{AM1.5G}}(\lambda) d\lambda} \quad (4)$$

where $E_{\text{AM1.5G}}(\lambda)$ is the reference spectral irradiance distribution as defined in IEC 60904-3.

NOTE The irradiance E_{bias} is not known during the measurement. But the AM1.5G effective irradiance can be calculated afterwards: $E_{\text{bias}} = \int_0^{I_{\text{bias}}} \frac{1}{\tilde{s}(I)} dI$.

7.4.3 Calculate the responsivity $s(I_{\text{STC}})$ of the device under standard test conditions as:

$$s(I_{\text{STC}}) = \frac{I_{\text{STC}}}{\int_0^{I_{\text{STC}}} \frac{1}{\tilde{s}(I_{\text{bias}})} dI_{\text{bias}}} \quad (5)$$

where I_{STC} is determined by iteratively evaluating the integral in the denominator until it equals $1\,000\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.

Use the differential responsivity at the lowest bias level for the extrapolation to $I_{\text{bias}} = 0$. The lowest bias level should be approximately 50 W/m^2 .

7.4.4 Then calculate the spectral responsivity $s(\lambda, I_{\text{STC}})$ of the device under standard test conditions as:

$$s(\lambda, I_{\text{STC}}) = \frac{I_{\text{STC}}}{\int_0^{I_{\text{STC}}} \frac{1}{\tilde{s}(\lambda, I_{\text{bias}})} dI_{\text{bias}}} \quad (6)$$

This spectral responsivity can be used for the calculation of the spectral mismatch factor.

7.4.5 If necessary, the spectral responsivity may be interpolated as a function of the wavelength by appropriate methods (e.g. linear or spline). An estimate of the uncertainty shall be provided for the procedure.

7.5 Simplifications

7.5.1 If the measurements described in 7.3 cannot be performed at all bias light irradiances and at all wavelengths, then determine the bias light irradiance E_0 at which the differential spectral responsivity equals the spectral responsivity of the device under test using the following procedure. Measure the differential spectral responsivity $\tilde{s}(\lambda_i, I_{\text{bias}}(E))$ with a step width of 200 nm (i.e. for crystalline silicon at 3 to 5 different wavelengths λ_i) or at least at one wavelength λ_1 close to the maximal spectral responsivity at 3 to 5 different bias light irradiances E . The bias light irradiances shall result in bias currents I_{bias} ranging from approximately 5 % to approximately 110 % of the approximated $I_{\text{STC,approx}}$ of the device under test. Calculate the responsivity and the bias light level E_0 at which the measured differential responsivity $\tilde{s}(I_{\text{bias}})$ equals the calculated spectral responsivity $s(I_{\text{STC,approx}})$ according to the formulas of 7.4. Perform a differential spectral responsivity measurement at this bias light irradiance.

NOTE The approximated $I_{\text{STC,approx}}$ can be measured with a sun simulator without spectral mismatch correction.

7.5.2 If the measurements described in 7.5.1 cannot be performed, then determine the bias light irradiance E_0 at which the differential spectral responsivity equals the spectral responsivity of the device under test using the following procedure with white light instead of monochromatic light. Measure the differential white light responsivity $\tilde{s}(I_{\text{bias}}(E))$ at 3 to 5 different bias light irradiances E . These bias light irradiances shall result in bias currents I_{bias} ranging from approximately 5 % to approximately 110 % of the approximated $I_{\text{STC,approx}}$ of the device under test. Calculate the responsivity according to:

$$s(I_{\text{STC,approx}}) = \frac{I_{\text{STC,approx}}}{\int_0^{I_{\text{STC,approx}}} \frac{1}{\tilde{s}(I_{\text{bias}})} dI_{\text{bias}}} . \quad (7)$$

Identify the bias light level E_0 at which the measured differential white light responsivity $\tilde{s}(I_{\text{bias}})$ equals the calculated white light responsivity $s(I_{\text{STC,approx}})$. Perform a differential spectral responsivity measurement at this bias light irradiance.

For the white light responsivity it is recommended to use white light with a spectral match of at least Class B (as defined in IEC 60904-9) to the reference solar spectral irradiance distribution as defined in IEC 60904-3.

7.5.3 If the methods as described above cannot be used, then use a bias light level that generates approximately a short-circuit current of 30 % $I_{\text{STC,approx}}$ to 40 % $I_{\text{STC,approx}}$. The differential spectral responsivity so measured is assumed to equal the spectral responsivity at standard test conditions.

7.5.4 If this is not possible then use a bias light to give a minimum of 10 % of I_{sc} and verify that the monochromatically generated current in the device under test as function of wavelength does not vary by more than 2 % if the bias light irradiance is (a) reduced to 50 % and (b) increased by 50 %. If it varies more, then the two additional measurements should be included in the report.

8 Measurement of spectral responsivity under pulsed light

8.1 Additional apparatus

- A pulsed light source, e.g. a Xenon flash lamp combined with interference filters.
- For experimental set-ups, where simultaneous readings of the device under test and reference device are taken, no monitor is necessary.
- Sufficiently fast data acquisition to measure the full pulse shape of the output signals from the reference device, the device under test and the monitor (where appropriate) is required for measuring the spectral responsivity using pulsed monochromatic light.

8.2 Test procedure

An example of a test arrangement for pulsed solar spectral responsivity measurement system is shown in Figure 3.

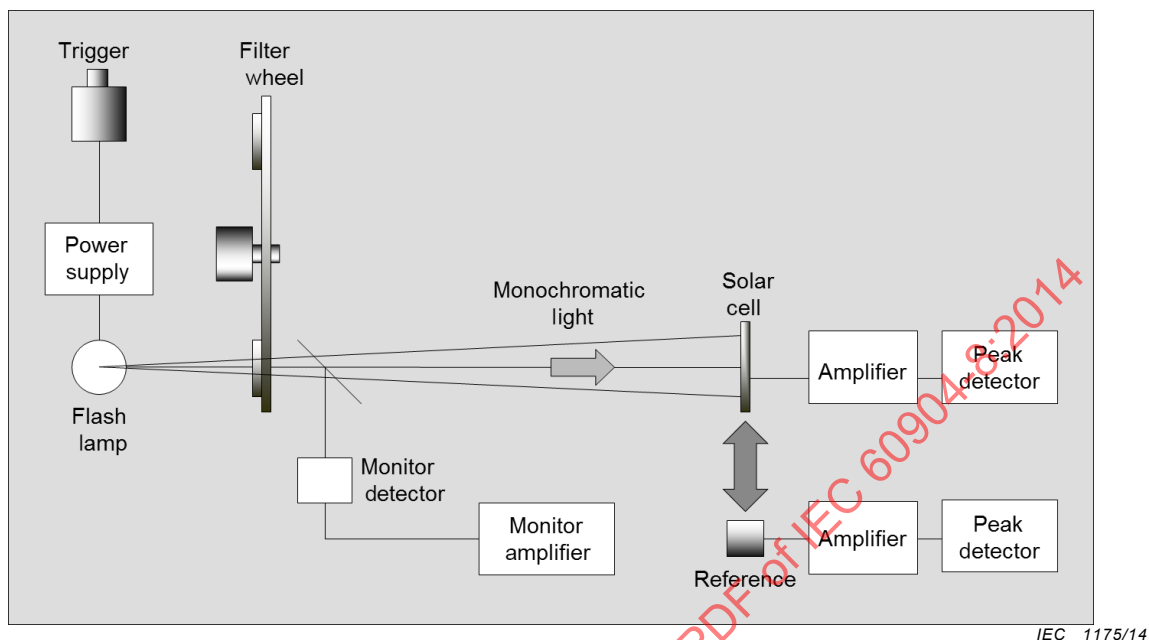


Figure 3 – Example block diagram of a spectral responsivity measuring instrument using a pulsed light source and bandpass filters

Apart from the change of light source and data acquisition system, the measurement method remains as given in 7.2 and 7.3, except that additional bias light is not required for this method.

The pulsed light method cannot be used on devices under test that have a response time that is slower than that of the pulse length in the given operating conditions. Therefore, it shall be verified that the ratio of the short-circuit currents of device under test and reference over the variation of the irradiance of the monochromatic light pulse is a constant. If not, one of the two devices may not be suitable for pulsed measurements.

9 Measurements of series-connected modules

9.1 General

When the spectral responsivity of a component cell in a series-connected PV module is to be measured, the following procedure can be used. The cell in the module to be measured is hereinafter referred to as the target cell.

9.2 Additional apparatus

A supplemental bias light source, which illuminates the whole area of the module, or one of the strings of the module divided by a bypass diode.

9.3 Test procedure

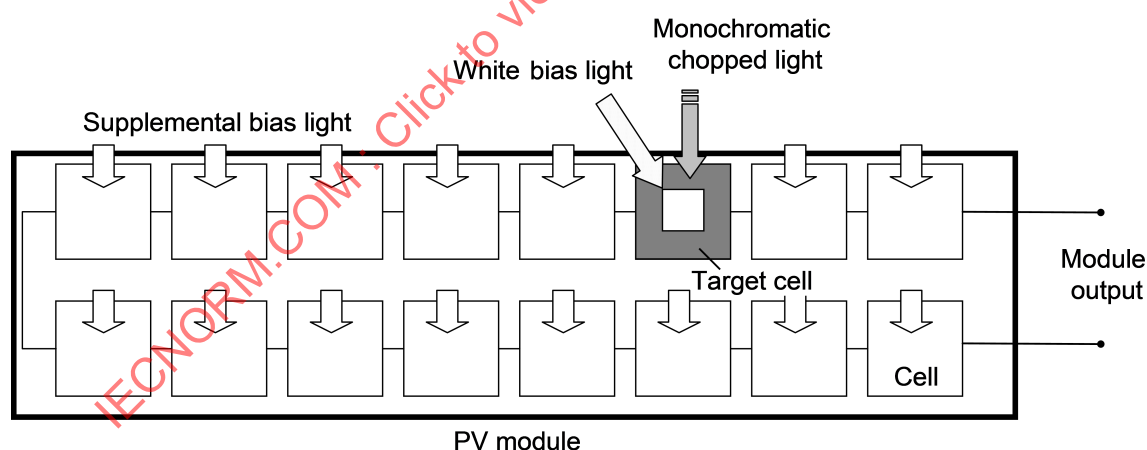
9.3.1 Mount the module in the spectral responsivity measurement system. Connect it to the instrumentation.

9.3.2 During the measurements the target cell shall be maintained at 25 °C (or other temperature) to an accuracy of ± 1 °C with a repeatability of $\pm 0,5$ °C. Other parts of the module shall be maintained in thermal equilibrium to an accuracy of ± 1 °C with a repeatability of $\pm 0,5$ °C.

9.3.3 Apply the supplemental bias light on all the cells in the module, and measure the I-V curve $I_1(V)$ of the module. Then shade the target cell from the supplemental bias light, and apply the white bias light to it. The irradiance of the white bias light and the supplemental bias light should be chosen so that the output current of the module is limited by the photocurrent of the target cell (Figure. 4), i.e. the white bias light plus the additional monochromatic light generate less photocurrent in the target cell than the worst cell in the remaining string or module generates for the applied light bias. If the circuit of the module is divided into strings by by-pass diodes, the cells in the string(s) without the target cell may be shaded instead of applying the supplemental bias light (Figure 5). Measure the I-V curve $I_2(V)$ of the module (Figure 6). The low voltage region shown by the dashed line in Figure 6, needs not be measured, because only $I_2(V)$ around the point B in the figure is necessary in the following procedure.

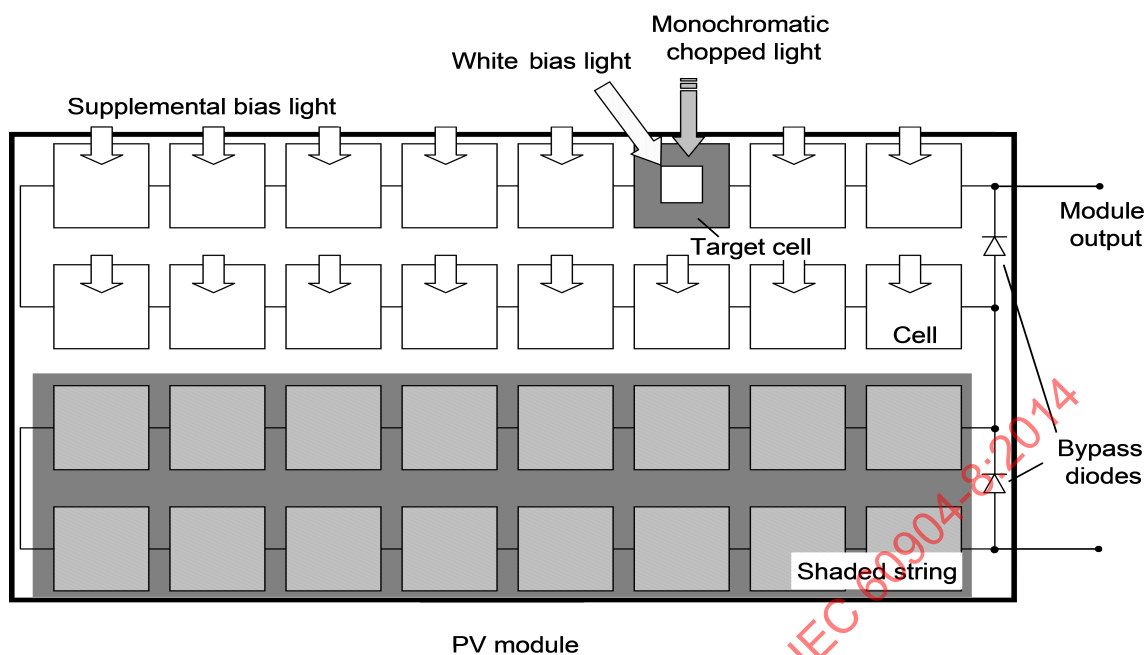
As a guideline to set the target cell to limit the output current of the whole module, it is recommended that the averaged irradiance of the target cell is smaller than that of other cells by at least $50 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. For example, if the bias light of $50 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ is applied on the whole area of the target cell, the averaged irradiance of the supplement bias light larger than $100 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ is recommended. If the bias light of $1\,000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ is applied on the $1/10$ area of the target cell, the averaged irradiance of the bias light is $100 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. In this case, the averaged irradiance of the supplement bias light larger than $150 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ is recommended.

Measuring the low voltage region of the $I_2(V)$, shown by the dashed line in Figure 5, applies high negative voltage on the target cell, because the output current of the module is limited by the target cell. Care should be exercised when applying high negative voltage as the performance of the target cell of some materials may be permanently damaged.



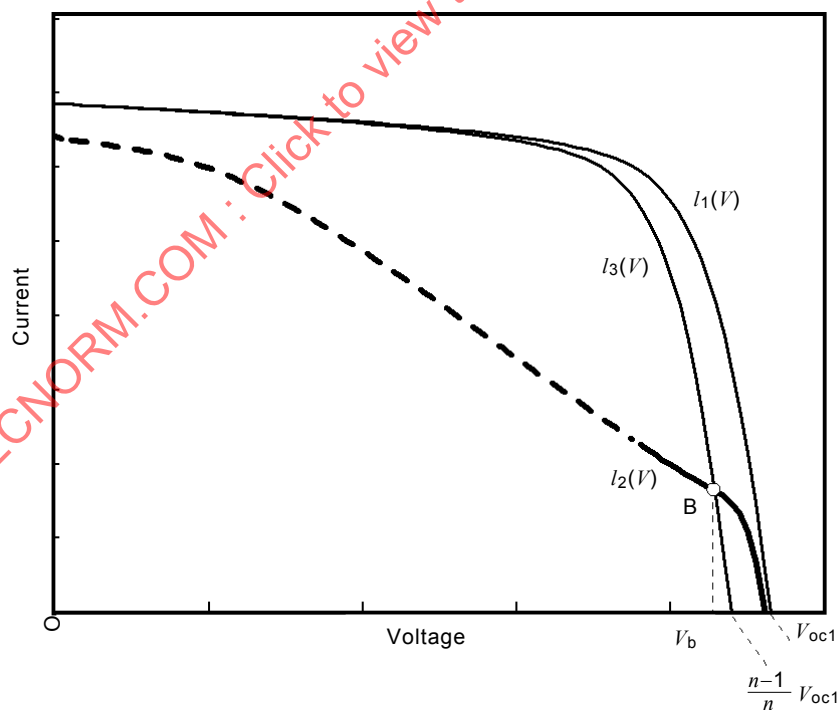
IEC 1176/14

Figure 4 – Example of the measurement setup for the differential spectral responsivity measurement of a target cell in a PV module, where the supplemental bias light is applied on all the cells in the module other than the target cell



IEC 1177/14

Figure 5 – Example of the measurement setup for the differential spectral responsivity measurement of a target cell in a PV module, where the supplemental bias light is applied on all the cells in a string of the module other than the target cell



IEC 1178/14

Figure 6 – Determination of the bias voltage V_b to set the voltage across the target cell to the short-circuit condition (see 9.3)

9.3.4 In order to set the voltage across the target cell to the short-circuit condition (zero bias voltage) apply bias voltage V_b as determined as follows. Firstly, calculate the total I-V curve $I_3(V)$ of the cells other than the target cell under the supplemental bias light by multiplying $I_1(V)$ by $(n-1)/n$ regarding the voltage by formula (8).

$$I_3(V) \equiv I_1\left(\frac{n}{n-1}V\right) \quad (8)$$

where n is the number of the component cells under the supplemental bias light in the module while measuring $I_1(V)$. Then V_b is determined as the voltage value of the graphical intersection (B in Figure 6) of $I_2(V)$ and $I_3(V)$. I-V curves may be interpolated in order to find the intersection. Apply the bias voltage to the module, which should put the voltage across the target cell to zero. It is noted that simply applying V_{oc1} multiplied by $(n-1)/n$ to the module results in the voltage of the target cell to be slightly forward biased. This condition is also acceptable if the spectral responsivity of the device is not dependent on the bias voltage.

9.3.5 Measure the currents of the device under test and the light monitor (if appropriate) as a function of the wavelength.

9.4 Calculation of spectral responsivity

Determine the spectral responsivity according to Clause 7.

10 Report

Following completion of the procedure, a certified report of the spectral responsivity measurements shall be prepared by the test agency in accordance with the procedures of ISO/IEC 17025. Each certificate or test report shall include at least the following information:

- a) a title;
- b) name and address of the test laboratory and location where the calibration or tests were carried out;
- c) unique identification of the certification or report and of each page;
- d) name and address of client, where appropriate;
- e) description and identification of the item calibrated or tested;
- f) characterization and condition of the calibration or test item;
- g) date of receipt of test item and date(s) of calibration or test, where appropriate;
- h) identification of calibration or test method used;
- i) identification of reference devices used in the calibration;
- j) reference to sampling procedure, where relevant;
- k) any deviations from, additions to or exclusions from the calibration or test method, and any other information relevant to a specific calibration or test, such as environmental conditions;
- l) type of monochromatic light source and its bandwidth (FWHM);
- m) level of bias light, and test device voltage;
- n) test device temperature and its deviation;
- o) reference device temperature and its deviation from the calibration temperature;
- p) monochromatic light levels or the current generated in the device under test by the monochromatic light;
- q) area of the device under test, where relevant;
- r) chopping frequency of the monochromatic light (where applicable);

- s) measurements, examinations and derived results of the spectral responsivity as function of wavelength;
 - t) a statement of the estimated uncertainty of the calibration or test result (where relevant);
 - u) a signature and title, or equivalent identification of the person(s) accepting responsibility for the content of the certificate or report, and the date of issue;
 - v) where relevant, a statement to the effect that the results relate only to the items calibrated or tested;
 - w) a statement that the certificate or report shall not be reproduced except in full, without the written approval of the laboratory.
-

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60904-8:2014

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	24
1 Domaine d'application	26
2 Références normatives	26
3 Marquage	27
4 Essais	27
4.1 Généralités	27
4.2 Considérations spéciales	27
4.3 Mesure sous une pseudolumière blanche	27
4.4 Application d'une tension de polarisation au dispositif en essai	27
5 Description générale de la mesure de la sensibilité spectrale	28
6 Appareillage	29
6.1 Généralités	29
6.2 Source de lumière monochromatique	32
6.3 Support du dispositif photovoltaïque et contrôle de température	33
6.4 Contacts du dispositif photovoltaïque	33
6.5 Pseudolumière	33
6.6 Mesures en courant continu	33
6.7 Mesures en courant alternatif en présence de pseudolumière	34
6.8 Dispositif de référence	34
7 Mesure de la sensibilité spectrale sous une source de lumière constante	34
7.1 Méthode générale avec un monochromateur à réseau ou une roue à filtres	34
7.2 Mesure du dispositif de référence pour l'étalonnage de l'installation	35
7.3 Mesure du dispositif en essai	36
7.4 Calcul de la sensibilité spectrale	36
7.5 Simplifications	37
8 Mesure de la sensibilité spectrale sous lumière pulsée	38
8.1 Appareillage complémentaire	38
8.2 Procédure d'essai	38
9 Mesures de modules raccordés en série	40
9.1 Généralités	40
9.2 Appareillage complémentaire	40
9.3 Procédure d'essai	40
9.4 Calcul de la sensibilité spectrale	43
10 Rapport	44
Figure 1 – Exemple de schéma fonctionnel pour l'équipement de mesure de la sensibilité spectrale différentielle avec une source de lumière continue et un monochromateur à réseau	31
Figure 2 – Exemple de schéma fonctionnel pour l'équipement de mesure de la sensibilité spectrale différentielle avec une source de lumière continue et des filtres passe-bande	32
Figure 3 – Exemple de schéma fonctionnel pour l'équipement de mesure de la sensibilité spectrale avec une source de lumière pulsée et des filtres passe-bande	39

Figure 4 – Exemple de montage pour la mesure de la sensibilité spectrale différentielle d'une cellule cible d'un module photovoltaïque, où la pseudolumière supplémentaire est appliquée sur toutes les cellules du module autres que la cellule cible	41
Figure 5 – Exemple de montage pour la mesure de la sensibilité spectrale différentielle d'une cellule cible d'un module photovoltaïque, où la pseudolumière supplémentaire est appliquée sur toutes les cellules d'une chaîne du module autres que la cellule cible	42
Figure 6 – Détermination de la tension de polarisation V_b pour régler la tension traversant la cellule cible en condition de court-circuit (voir 9.3)	43

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60904-8:2014

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

DISPOSITIFS PHOTOVOLTAÏQUES –

Partie 8: Mesure de la sensibilité spectrale d'un dispositif photovoltaïque (PV)

AVANT-PROPOS

- 1) La Commission Electrotechnique Internationale (IEC) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de l'IEC). L'IEC a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. A cet effet, l'IEC – entre autres activités – publie des Normes internationales, des Spécifications techniques, des Rapports techniques, des Spécifications accessibles au public (PAS) et des Guides (ci-après dénommés "Publication(s) de l'IEC"). Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet traité peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec l'IEC, participent également aux travaux. L'IEC collabore étroitement avec l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations.
- 2) Les décisions ou accords officiels de l'IEC concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux de l'IEC intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les Publications de l'IEC se présentent sous la forme de recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux de l'IEC. Tous les efforts raisonnables sont entrepris afin que l'IEC s'assure de l'exactitude du contenu technique de ses publications; l'IEC ne peut pas être tenue responsable de l'éventuelle mauvaise utilisation ou interprétation qui en est faite par un quelconque utilisateur final.
- 4) Dans le but d'encourager l'uniformité internationale, les Comités nationaux de l'IEC s'engagent, dans toute la mesure possible, à appliquer de façon transparente les Publications de l'IEC dans leurs publications nationales et régionales. Toutes divergences entre toutes Publications de l'IEC et toutes publications nationales ou régionales correspondantes doivent être indiquées en termes clairs dans ces dernières.
- 5) L'IEC elle-même ne fournit aucune attestation de conformité. Des organismes de certification indépendants fournissent des services d'évaluation de conformité et, dans certains secteurs, accèdent aux marques de conformité de l'IEC. L'IEC n'est responsable d'aucun des services effectués par les organismes de certification indépendants.
- 6) Tous les utilisateurs doivent s'assurer qu'ils sont en possession de la dernière édition de cette publication.
- 7) Aucune responsabilité ne doit être imputée à l'IEC, à ses administrateurs, employés, auxiliaires ou mandataires, y compris ses experts particuliers et les membres de ses comités d'études et des Comités nationaux de l'IEC, pour tout préjudice causé en cas de dommages corporels et matériels, ou de tout autre dommage de quelque nature que ce soit, directe ou indirecte, ou pour supporter les coûts (y compris les frais de justice) et les dépenses découlant de la publication ou de l'utilisation de cette Publication de l'IEC ou de toute autre Publication de l'IEC, ou au crédit qui lui est accordé.
- 8) L'attention est attirée sur les références normatives citées dans cette publication. L'utilisation de publications référencées est obligatoire pour une application correcte de la présente publication.
- 9) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments de la présente Publication de l'IEC peuvent faire l'objet de droits de brevet. L'IEC ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de brevets et de ne pas avoir signalé leur existence.

La Norme internationale IEC 60904-8 a été établie par le comité d'études 82 de l'IEC: Systèmes de conversion photovoltaïque de l'énergie solaire.

Cette troisième édition annule et remplace la deuxième édition parue en 1998. Cette édition constitue une révision technique.

Les modifications techniques majeures par rapport à l'édition précédente sont indiquées ci-dessous:

- Réécriture de l'article dédié aux essais
- Ajout d'un nouvel article relatif aux mesures des modules raccordés en série
- Ajout des exigences de l'ISO/IEC 17025

- Figures supplémentaires

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
82/822/FDIS	82/843/RVD

Le rapport de vote indiqué dans le tableau ci-dessus donne toute information sur le vote ayant abouti à l'approbation de cette norme.

Une liste de toutes les parties de la série IEC 60904, publiées sous le titre général *Dispositifs photovoltaïques*, peut être consultée sur le site web de l'IEC.

Cette publication a été rédigée selon les Directives ISO/IEC, Partie 2.

Le comité a décidé que le contenu de cette publication ne sera pas modifié avant la date de stabilité indiquée sur le site web de l'IEC sous "<http://webstore.iec.ch>" dans les données relatives à la publication recherchée. A cette date, la publication sera

- reconduite,
- supprimée,
- remplacée par une édition révisée, ou
- amendée.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60904-8:2014

DISPOSITIFS PHOTOVOLTAÏQUES –

Partie 8: Mesure de la sensibilité spectrale d'un dispositif photovoltaïque (PV)

1 Domaine d'application

La présente Norme internationale spécifie les exigences relatives à la mesure de la sensibilité spectrale des dispositifs photovoltaïques, linéaires et non linéaires. Cette norme s'applique uniquement aux dispositifs à jonction unique. La sensibilité spectrale d'un dispositif photovoltaïque est utilisée dans le développement et l'analyse des cellules, car elle permet de mesurer la recombinaison, ainsi que d'autres processus internes aux semi-conducteurs ou au système des matériaux des cellules.

La sensibilité spectrale d'un dispositif photovoltaïque est utilisée pour corriger la désadaptation spectrale si un dispositif photovoltaïque est étalonné dans une configuration où le spectre de mesure est différent des données de l'éclairement spectral de référence fournies dans l'IEC 60904-3, et où un dispositif de référence ayant une sensibilité spectrale différente par rapport au dispositif en essai est utilisé. Cette procédure est indiquée dans l'IEC 60904-7.

2 Références normatives

Les documents suivants sont cités en référence de manière normative, en intégralité ou en partie, dans le présent document et sont indispensables pour son application. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

IEC 60904-3, *Dispositifs photovoltaïques – Partie 3: Principes de mesure des dispositifs solaires photovoltaïques (PV) à usage terrestre incluant les données de l'éclairement spectral de référence*

IEC 60904-7, *Dispositifs photovoltaïques – Partie 7: Calcul de la correction de désadaptation des réponses spectrales dans les mesures de dispositifs photovoltaïques*

IEC 60904-9, *Dispositifs photovoltaïques – Partie 9: Exigences pour le fonctionnement des simulateurs solaires*

IEC 61215, *Modules photovoltaïques (PV) au silicium cristallin pour application terrestre – Qualification de la conception et homologation*

IEC 61646, *Modules photovoltaïques (PV) en couches minces pour application terrestre – Qualification de la conception et homologation*

IEC/TS 61836, *Solar photovoltaic energy systems – Terms, definitions and symbols* (disponible en anglais seulement)

ISO/IEC 17025, *Exigences générales concernant la compétence des laboratoires d'étalonnages et d'essais*

3 Marquage

Il convient que chaque dispositif photovoltaïque comporte un marquage clair et indélébile. Il convient que ce marquage puisse permettre de vérifier les références suivantes:

- nom, monogramme ou symbole du fabricant;
- matériaux de base et type de dispositif photovoltaïque;
- numéro de type ou identification, si disponible;
- numéro de série, le cas échéant.

Si les dispositifs photovoltaïques à soumettre aux essais sont des prototypes d'une nouvelle conception et non issus de la production, cela doit être indiqué dans le rapport d'essai (voir Article 10).

4 Essais

4.1 Généralités

Le dispositif photovoltaïque doit être soumis à l'une des procédures de mesure de sensibilité spectrale définies aux Articles 7 à 9.

4.2 Considérations spéciales

Préconditionnement – Avant de débiter les mesures, le dispositif en essai doit être stabilisé (si nécessaire) par une méthode d'essai appropriée d'exposition au rayonnement lumineux, telle que spécifiée par l'IEC 61215 ou l'IEC 61646. Des technologies photovoltaïques différentes peuvent nécessiter des procédures de préconditionnement différentes.

4.3 Mesure sous une pseudolumière blanche

Les procédures spécifiées aux Articles 7 et 9 exigent l'application d'une pseudolumière blanche au dispositif en essai lors de la détermination de la sensibilité spectrale. Dans des conditions de pseudolumière, on mesure non pas la sensibilité spectrale, mais la sensibilité spectrale différentielle. La sensibilité spectrale peut être déterminée à partir de la sensibilité spectrale différentielle en prenant en compte la non-linéarité, sur la base d'une série de mesures de la sensibilité spectrale différentielle à des niveaux de pseudolumière qui génèrent des courants de court-circuit dans le dispositif dans une plage comprise entre 5 % et 110 % de celle observée dans les conditions normales d'essai (voir Article 5). La plupart des cellules solaires au silicium cristallin ont une sensibilité spectrale différentielle qui génère, sous une pseudolumière, de 30 % à 40 % de leur courant de court-circuit dans les conditions normales d'essai, ce qui correspond à une proportion identique à la sensibilité spectrale dans ces mêmes conditions d'essai. Il convient par conséquent d'effectuer la mesure à ces niveaux de pseudolumière lorsque la non-linéarité d'un dispositif photovoltaïque au silicium cristallin n'est pas déterminée. Lorsqu'il est confirmé que la non-linéarité est négligeable, c'est-à-dire lorsque la sensibilité spectrale différentielle est constante dans la plage d'éclairement énergétique concernée, la sensibilité spectrale différentielle à un niveau de pseudolumière spécifique peut être utilisée. Pour des détails, voir l'Article 5.

4.4 Application d'une tension de polarisation au dispositif en essai

En général, la sensibilité spectrale d'un dispositif photovoltaïque est mesurée dans les conditions de court-circuit (tension de polarisation égale à zéro) du dispositif photovoltaïque et sert à analyser les cellules et à calculer la désadaptation spectrale.

Afin de mesurer la sensibilité spectrale de l'échantillon soumis à une tension particulière, il peut être nécessaire d'appliquer une tension de polarisation. La tension de polarisation du dispositif doit être contrôlée par une source de tension externe. Le cas échéant, l'application d'une tension de polarisation doit être mentionnée dans le rapport.

5 Description générale de la mesure de la sensibilité spectrale

La sensibilité spectrale d'un dispositif photovoltaïque est mesurée en éclairant celui-ci par une source de lumière à largeur de bande étroite à des longueurs d'onde différentes de façon à couvrir son domaine de sensibilité, et en mesurant le courant de court-circuit et l'éclairement énergétique monochromatique à chacune de ces longueurs d'onde (formule 1), ou le courant de court-circuit et la puissance du faisceau lumineux monochromatique (formule 2). Le premier type de mesure donne la sensibilité d'éclairement énergétique spectral exprimée en unité $A/W \cdot m^{-2}$. Afin de déterminer la sensibilité spectrale telle que définie dans l'IEC/TS 61836, il est nécessaire de diviser ce résultat par la surface du dispositif en essai, tandis que le second type de mesure donne directement la sensibilité spectrale exprimée en unité A/W .

Pour déterminer le courant de sortie du dispositif, il convient que la pseudolumière et la lumière monochromatique éclairent de manière uniforme toute la surface du dispositif. Il est important d'éclairer ladite surface de façon effective dans la mesure où la lumière qui n'éclaire pas directement la surface active peut également contribuer au signal mesuré. Lorsque la sensibilité spectrale est utilisée pour calculer la correction de la désadaptation spectrale conformément à l'IEC 60904-7, il convient que la surface éclairée au cours de la mesure de la sensibilité spectrale soit identique à celle observée au cours de la mesure des caractéristiques courant-tension. Il s'agit normalement de la surface complète du dispositif. Dans le cas contraire, il convient qu'elle soit limitée par une ouverture adaptée.

Dans le cas où la surface du dispositif est plus grande que les largeurs de faisceau respectives, il convient que ces dernières fassent l'objet d'un balayage approprié sur toute la surface du dispositif afin d'obtenir un éclairement uniforme. Lorsque les deux faisceaux sont balayés, il convient que le balayage soit synchrone avec la pseudolumière qui éclaire toujours un point plus grand que la lumière monochromatique.

Il convient de contrôler la température du dispositif.

La densité de courant du dispositif en essai à chaque longueur d'onde est divisée par l'éclairement respectif pour obtenir la sensibilité spectrale.

$$s(\lambda) = I_{sc}(\lambda)/E(\lambda)/A \quad (1)$$

où:

- $s(\lambda)$ est la sensibilité spectrale du dispositif en essai à la longueur d'onde λ ;
- $I_{sc}(\lambda)$ est le courant de court-circuit du dispositif en essai à la longueur d'onde λ ;
- $E(\lambda)$ est l'éclairement de la source de lumière à la longueur d'onde λ ;
- A est la surface du dispositif en essai.

La surface du dispositif en essai doit être notée dans le rapport d'essai.

En variante, le courant de court-circuit $I_{sc}(\lambda)$ et la puissance rayonnante incidente sur le dispositif $P(\lambda)$ peuvent être mesurés. La sensibilité spectrale est ensuite déterminée par:

$$s(\lambda) = I_{sc}(\lambda)/P(\lambda) \quad (2)$$

où:

- $I_{sc}(\lambda)$ est le courant de court-circuit du dispositif en essai à la longueur d'onde λ ;
- $P(\lambda)$ est la puissance rayonnante incidente sur le dispositif à la longueur d'onde λ .

La détermination de $P(\lambda)$ exige de mesurer la surface du dispositif en essai. Cette surface doit être mentionnée dans le rapport d'essai.

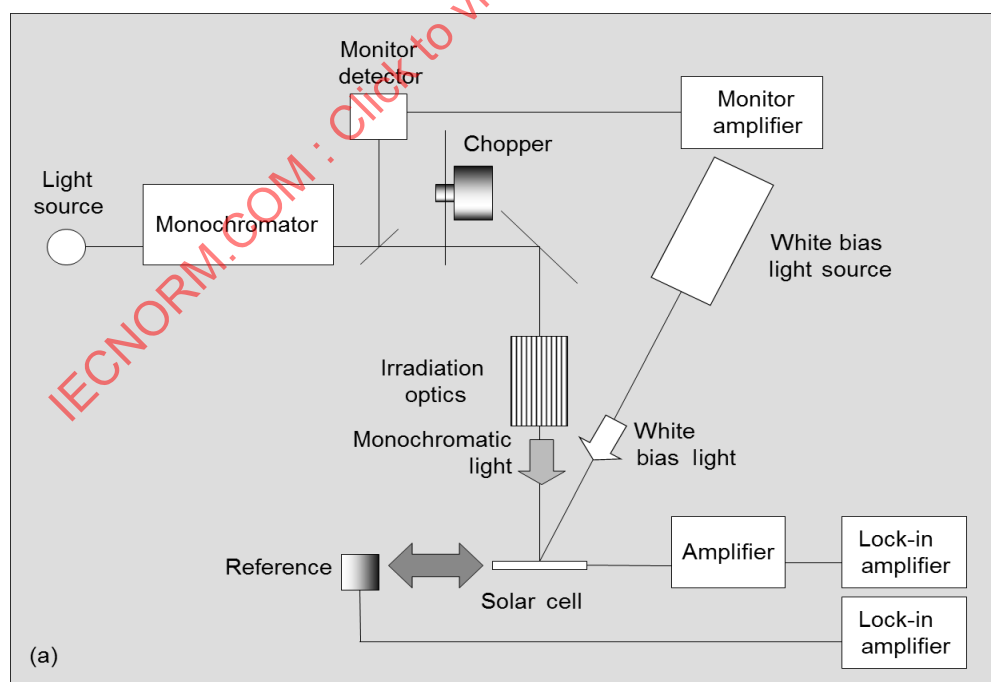
Dans la pratique (voir Articles 7 et 9), on superpose un faible signal modulé émis par la lumière monochromatique sur un pseudosignal élevé émis par la pseudolumière blanche. Dans ce type de cas, il est nécessaire de traiter les grandeurs évaluées comme des grandeurs différentielles, et une sensibilité spectrale différentielle dépendant de la longueur d'onde (DSR) $\bar{s}(\lambda, E)$ est déterminée pour un éclairement de pseudolumière spécifique E . La sensibilité spectrale dans les conditions normales d'essai $s(\lambda)|_{STC}$ est égale à la sensibilité spectrale différentielle uniquement si le dispositif est strictement linéaire. Lorsqu'il est confirmé que la non-linéarité est négligeable, la réponse spectrale différentielle à un niveau de pseudolumière spécifique peut être utilisée. Par exemple, lorsque la réponse spectrale différentielle ou le facteur de désadaptation spectrale résultant est constant avec les niveaux de pseudolumière, de manière à générer le courant de court-circuit I_{SC} entre 5 % et 110 % dans les conditions normales d'essai, la réponse spectrale différentielle à un niveau de pseudolumière de 100 % dans ces mêmes conditions, peut être utilisée. Dans tous les autres cas, on doit mesurer la DSR à un nombre suffisant d'éclairements de pseudolumière et la sensibilité spectrale résultante peut être calculée, ou on doit déterminer un éclairement de pseudolumière spécifique E_0 avec $\bar{s}(\lambda, E_0) \approx s(\lambda)|_{STC}$.

6 Appareillage

6.1 Généralités

Un système de mesure de la sensibilité spectrale se compose d'une source de lumière monochromatique continue (hachée ou non) ou pulsée, un système optionnel de séparation de faisceau avec un détecteur de contrôle, un système permettant de tenir le dispositif en essai, un dispositif de référence, un montage optionnel de pseudolumière et les équipements électriques. Les Figures 1(a, b) et 2(a, b) illustrent des exemples de montages d'essai pour la mesure de la DSR d'une cellule solaire.

Lorsqu'un hacheur optique est utilisé (Figures 1 et 2), il est nécessaire de veiller à ce qu'aucune pseudolumière réfléchie de ce dernier n'atteigne le plan d'essai.



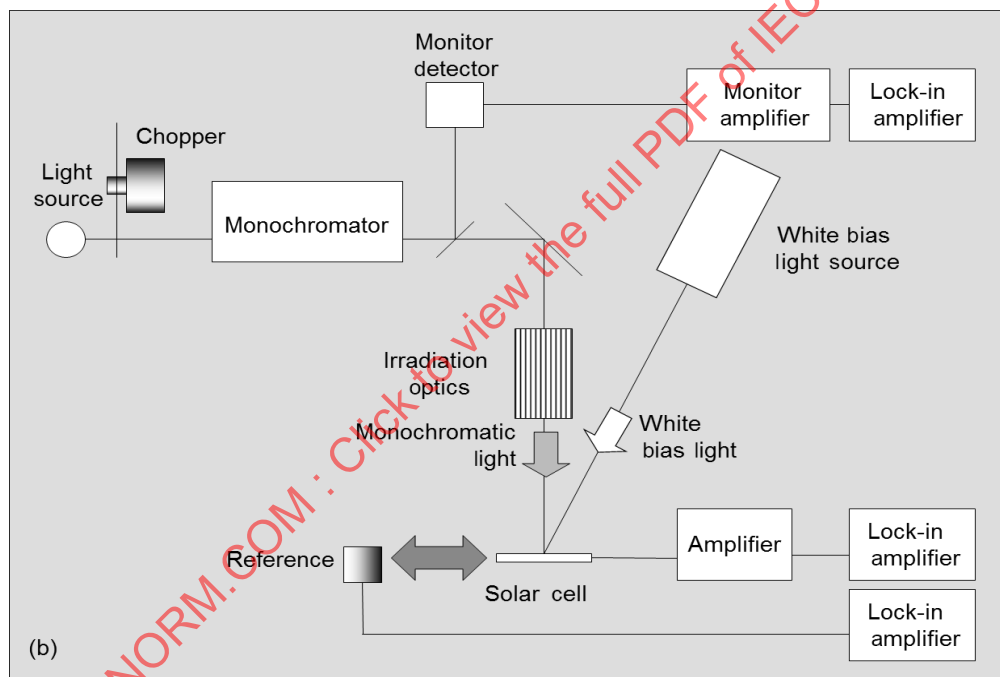
IEC 1171/14

Légende

Anglais	Français
Light source	Source de lumière

Anglais	Français
Monochromator	Monochromateur
Monitor detector	Détecteur de contrôle
Chopper	Hacheur
Monitor amplifier	Amplificateur de contrôle
White bias light source	Source de pseudolumière blanche
Irradiation optics	Optique d'éclairement
Monochromatic light	Lumière monochromatique
White bias light	Pseudolumière blanche
Reference	Référence
Solar cell	Cellule solaire
Amplifier	Amplificateur
Lock-in amplifier	Amplificateur à verrouillage

Figure 1a) – Monochromateur devant le hacheur



IEC 1172/14

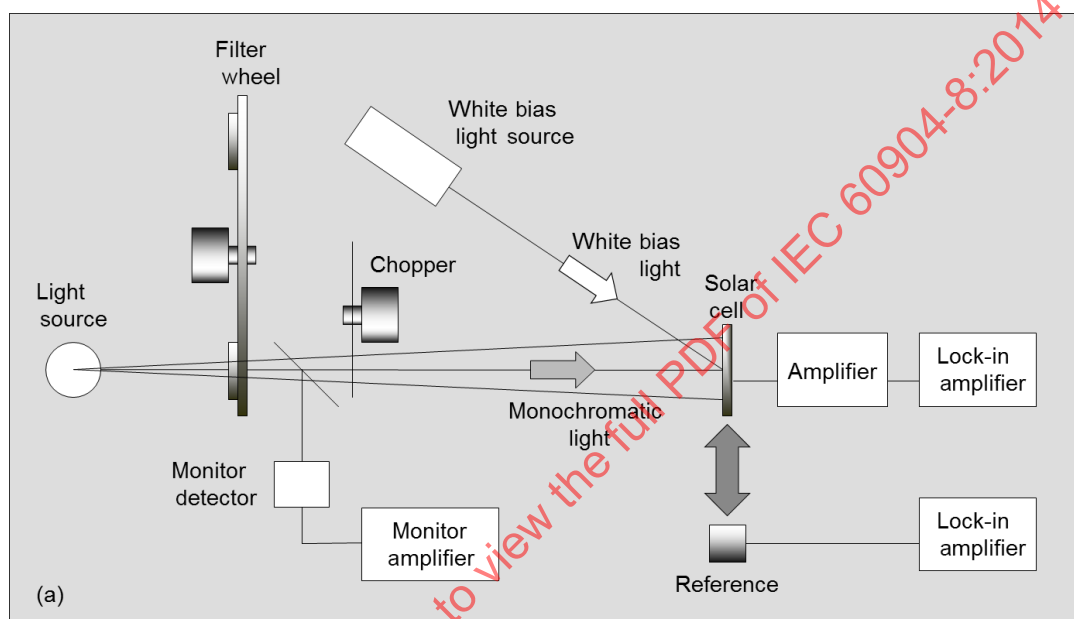
Légende

Anglais	Français
Light source	Source de lumière
Monochromator	Monochromateur
Monitor detector	Détecteur de contrôle
Chopper	Hacheur
Monitor amplifier	Amplificateur de contrôle
White bias light source	Source de pseudolumière blanche
Irradiation optics	Optique d'éclairement
Monochromatic light	Lumière monochromatique
White bias light	Pseudolumière blanche

Anglais	Français
Reference	Référence
Solar cell	Cellule solaire
Amplifier	Amplificateur
Lock-in amplifier	Amplificateur à verrouillage

Figure 1b) – Hacheur devant le monochromateur

Figure 1 – Exemple de schéma fonctionnel pour l'équipement de mesure de la sensibilité spectrale différentielle avec une source de lumière continue et un monochromateur à réseau

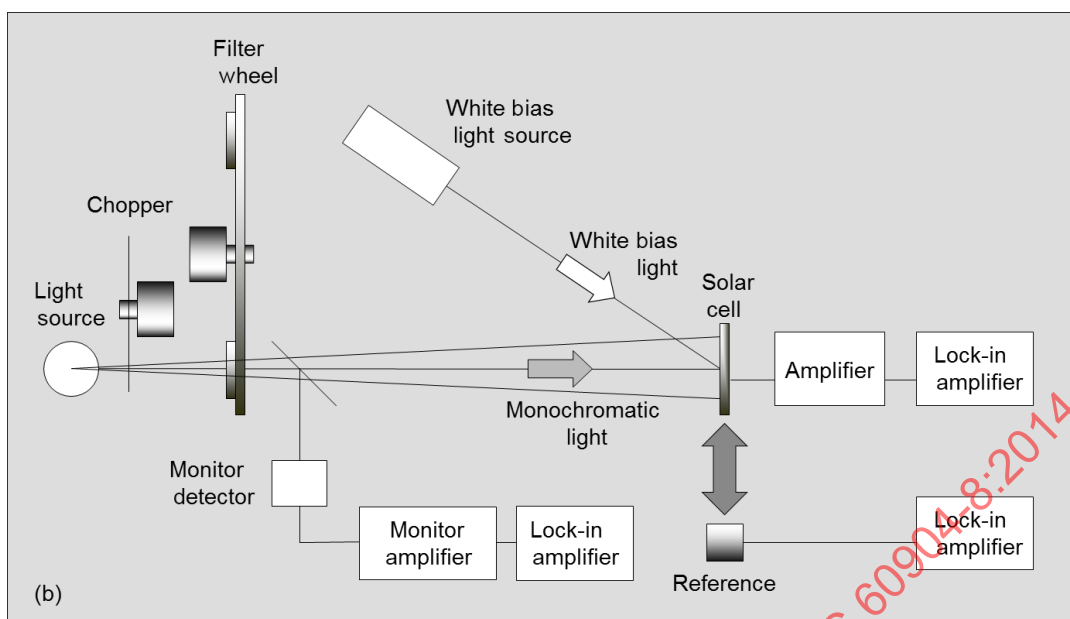


IEC 1173/14

Légende

Anglais	Français
Light source	Source de lumière
Chopper	Hacheur
Filter wheel	Roue à filtres
Monitor detector	Détecteur de contrôle
White bias light source	Source de pseudolumière blanche
Monitor amplifier	Amplificateur de contrôle
White bias light	Pseudolumière blanche
Monochromatic light	Lumière monochromatique
Solar cell	Cellule solaire
Reference	Référence
Current meter	Appareil de mesure de courant
Lock-in amplifier	Amplificateur à verrouillage
Amplifier	Amplificateur

Figure 2a) – Filtre devant le hacheur



IEC 1174/14

Légende

Anglais	Français
Light source	Source de lumière
Chopper	Hacheur
Filter wheel	Roue à filtres
Monitor detector	Détecteur de contrôle
White bias light source	Source de pseudolumière blanche
Monitor amplifier	Amplificateur de contrôle
White bias light	Pseudolumière blanche
Monochromatic light	Lumière monochromatique
Solar cell	Cellule solaire
Reference	Référence
Current meter	Appareil de mesure de courant
Lock-in amplifier	Amplificateur à verrouillage
Amplifier	Amplificateur

Figure 2b) – Hacheur devant le filtre

Figure 2 – Exemple de schéma fonctionnel pour l'équipement de mesure de la sensibilité spectrale différentielle avec une source de lumière continue et des filtres passe-bande

6.2 Source de lumière monochromatique

La lumière monochromatique est habituellement générée par une source de lumière et un monochromateur (par exemple, un réseau) ou une roue à filtres passe-bande. Il convient que la largeur de bande (Largeur à mi-hauteur, FWHM) de la lumière monochromatique ne dépasse pas 20 nm pour la mesure de la sensibilité spectrale dans les gammes comprises entre 300 nm et 1 200 nm. Dans les gammes jusqu'à 3 000 nm, il convient que la largeur de bande ne dépasse pas 50 nm.

Il convient de choisir la largeur de bande de la lumière monochromatique selon la structure fine de variation de la sensibilité spectrale du dispositif en essai. Généralement, une largeur

de bande (FWHM) de 10 nm – 15 nm est choisie pour les cellules au silicium cristallin ou les cellules solaires en couches minces.

Il convient que les fluctuations temporelles de la lumière causées par la lampe utilisée pour générer la lumière monochromatique et par son alimentation soient inférieures à 2 %. Il convient que l'uniformité spatiale de la lumière monochromatique dans le plan d'essai soit de plus de ± 2 % déterminée conformément à l'IEC 60904-9. La non-uniformité spatiale est particulièrement appropriée si le dispositif de référence et le dispositif en essai ont des formes ou des surfaces différentes. Ceci doit être pris en compte dans le calcul de l'incertitude. Avec une source de lumière stable, le dispositif de référence et celui soumis à essai sont normalement mesurés l'un après l'autre dans la même position. L'absence d'homogénéité n'intervient que si les deux dispositifs sont de tailles différentes. Si la surface d'éclairement est suffisamment grande et homogène, le dispositif de référence et celui soumis à essai peuvent être placés côte à côte et mesurés simultanément, en éliminant ainsi les effets des fluctuations temporelles de la source de lumière. Un montage avec un séparateur de faisceau peut également permettre l'éclairement homogène des plans d'essai pour chaque dispositif.

NOTE Ceci est similaire à la définition d'un simulateur de classe A de l'IEC 60904-9.

6.3 Support du dispositif photovoltaïque et contrôle de température

Il convient que le support du dispositif photovoltaïque permette d'effectuer des connexions électriques au dispositif en essai avec une bonne conductivité, ainsi que de contrôler sa température et celle du dispositif de référence. La température du dispositif de référence et du dispositif en essai doit être mesurée ou contrôlée avec une précision de ± 1 °C avec une reproductibilité de $\pm 0,5$ °C. Il convient que la température du dispositif de référence et du dispositif en essai ne varie pas de plus de ± 2 °C. Si la température du dispositif de référence varie de plus de 2 °C par rapport à sa température d'étalonnage, la valeur d'étalonnage doit être ajustée à la température mesurée.

NOTE Les différences de température entre l'étalonnage du dispositif de référence et son utilisation pour une mesure auront en général un plus grand impact sur le bord de la bande du dispositif de référence.

6.4 Contacts du dispositif photovoltaïque

Il convient d'utiliser une connexion à quatre points (contacts Kelvin, c'est-à-dire des contacts séparés pour le courant et la tension) au dispositif en essai, afin de permettre la mesure de la tension de la cellule pendant la mesure de la sensibilité spectrale. Les contacts doivent être placés de façon à ne pas empêcher le contrôle de la température du dispositif en essai, particulièrement dans le cas des cellules dont tous les contacts sont situés à l'arrière.

NOTE La mesure correcte de la tension de la cellule est particulièrement importante si le dispositif en essai possède une faible résistance de shunt.

6.5 Pseudolumière

Pour la plupart des dispositifs photovoltaïques, il suffit d'utiliser des lampes au tungstène ou un ensemble de lampes pour générer une pseudolumière d'éclairement constant. Il convient que la pseudolumière éclaire l'ensemble de la surface du dispositif en essai. Il convient que la non-uniformité spatiale (telle que définie dans l'IEC 60904-9) de la pseudolumière appliquée dans le plan d'essai soit inférieure à 10 %, ce qui correspond à la classe C. Une approche de balayage possible est décrite à l'Article 5.

6.6 Mesures en courant continu

- a) Les tensions et les courants doivent être mesurés respectivement avec une précision de $\pm 0,2$ % de la tension en circuit ouvert ou du courant de court-circuit. Ils doivent être mesurés au moyen de fils conducteurs indépendants aux bornes des échantillons (quatre (4) fils conducteurs), en les gardant les plus courts possible. Si le dispositif en essai est une cellule nue, il convient que la connexion à quatre fils parte des lignes de collecte.

Il convient d'évaluer la méthode de connexion des cellules avec soin, car celle-ci peut perturber les conditions de court-circuit de la cellule par des pertes résistives. Des différences de sensibilité spectrale peuvent apparaître à cause de cet effet.

- b) Il convient de mesurer les courants de court-circuit produits par la pseudolumière à une tension égale à zéro. En général, des convertisseurs courant-tension (amplificateur d'adaptation d'impédance) peuvent être utilisés. Une résistance de shunt externe peut également être utilisée conjointement à une source de tension de polarisation variable pour équilibrer les chutes de tension subies. La tension de polarisation variable peut être ignorée si les chutes de tension du dispositif en essai sont inférieures à 3 % de sa V_{OC} .

NOTE Pour une cellule solaire au silicium cristallin, cela correspond en général à une tension de polarisation de moins de 20 mV.

6.7 Mesures en courant alternatif en présence de pseudolumière

Si la sensibilité spectrale est mesurée à l'aide d'une lumière monochromatique hachée en complément de la pseudolumière, on doit séparer le courant alternatif monochromatique généré du courant constant généré par la pseudolumière grâce à l'utilisation d'un amplificateur à verrouillage ou d'un matériel équivalent. Comme mentionné ci-dessus, il convient de choisir un convertisseur IV ou une résistance de shunt externe de façon à ce que la tension qui traverse le dispositif en essai soit inférieure à 3 % de la tension en circuit ouvert. On doit s'assurer que le dispositif de mesure ou l'amplificateur n'est pas saturé par le courant continu généré par la pseudolumière. La fréquence de hachage doit figurer dans le rapport d'essai.

Il convient de choisir la fréquence de hachage de manière à ce que le temps de cycle soit supérieur à la constante de temps du dispositif en essai. De plus, il convient de choisir la fréquence de hachage de façon à ce qu'elle ne coïncide pas avec la fréquence d'alimentation ou ses harmoniques.

Régler la tension qui traverse la cellule à la valeur désirée (0 V pour les conditions de court-circuit, ou bien la tension désirée).

6.8 Dispositif de référence

L'éclairement ou la puissance de la lumière monochromatique peut être mesuré(e) par des dispositifs de référence tels que des radiomètres thermiques, des photodiodes étalonnées ou des dispositifs photovoltaïques. Des photodiodes au silicium peuvent être utilisées pour les gammes de longueurs d'onde allant de 300 nm à 1 100 nm. Des photodiodes Ge ou InGaAs ou d'autres dispositifs ayant des largeurs de bande inférieures ainsi que des détecteurs thermiques peuvent être utilisés pour des gammes de longueurs d'onde supérieures. Les dispositifs en essai ayant une sensibilité spectrale sur une large gamme de longueurs d'onde peuvent requérir l'utilisation de deux dispositifs de référence différents ou plus pour couvrir cette large gamme.

NOTE Généralement, les détecteurs thermiques peuvent ne pas être adaptés, dans la mesure où ils ont des constantes de temps plus longues que les temps de cycle de la lumière hachée.

Dans le cas où deux dispositifs de référence ou plus sont utilisés pour élargir la gamme de longueurs d'onde du système de mesure, il est nécessaire de bien faire attention à éviter des artefacts dans les gammes de longueurs d'ondes couvertes par les dispositifs de référence.

7 Mesure de la sensibilité spectrale sous une source de lumière constante

7.1 Méthode générale avec un monochromateur à réseau ou une roue à filtres

Si la source de lumière est temporellement stable, le dispositif de référence est mesuré en premier à toutes les longueurs d'onde considérées. Il est ensuite remplacé par le dispositif photovoltaïque en essai.

Si la distribution spatiale de la lumière est homogène, le dispositif de référence et le dispositif photovoltaïque peuvent être montés côte à côte et peuvent être mesurés simultanément. Les autres dispositions de 7.2 et 7.3 s'appliquent toujours dans ce cas.

NOTE De la même manière qu'avec un séparateur de faisceau éclairant deux surfaces d'essai de manière homogène (voir 6.2).

7.2 Mesure du dispositif de référence pour l'étalonnage de l'installation

7.2.1 Installer le dispositif de référence dans le système de mesure de la sensibilité spectrale. Le connecter aux équipements de mesure. Régler sa tension de polarisation aux mêmes conditions que pour son étalonnage.

7.2.2 Régler la température du dispositif de référence à 25 °C ou à la température indiquée sur le certificat d'étalonnage, et la maintenir dans la plage de températures recommandée du dispositif de référence.

7.2.3 Régler le faisceau lumineux monochromatique à la dimension appropriée pour mesurer le dispositif de référence et le dispositif en essai.

Il est important d'éclairer toute la surface du dispositif de façon effective dans la mesure où la lumière qui n'éclaire pas directement la surface active peut également contribuer au signal mesuré. Lorsque la sensibilité spectrale est utilisée pour calculer la correction de la désadaptation spectrale conformément à l'IEC 60904-7, il convient que la surface éclairée au cours de la mesure de la sensibilité spectrale soit identique à celle observée au cours de la mesure des caractéristiques courant-tension. Il s'agit normalement de la surface complète du dispositif. Dans le cas contraire, il convient qu'elle soit limitée par une ouverture adaptée.

Dans le cas où la surface du dispositif est plus grande que les largeurs de faisceau respectives, il convient que ces dernières fassent l'objet d'un balayage approprié sur toute la surface du dispositif afin d'obtenir un éclairage uniforme. Lorsque les deux faisceaux sont balayés, il convient que le balayage soit synchrone avec la pseudolumière qui éclaire toujours un point plus grand que la lumière monochromatique.

Un soin particulier doit être pris si le dispositif en essai a une taille différente de celle du dispositif de référence. Dans ce cas, il convient que la surface du dispositif plus petit recouvre la surface du dispositif plus grand (notamment si l'éclairage du faisceau lumineux n'est pas uniforme) en la mesurant en plusieurs positions. La non-uniformité spatiale de la lumière monochromatique doit être considérée de manière explicite dans la détermination de l'incertitude de mesure finale.

7.2.4 Le courant continu induit par la pseudolumière $I_{\text{ref,DC}}$ du dispositif de référence doit avoir la même valeur que lors de son étalonnage (habituellement, une pseudolumière faible pour les cellules solaires de référence et pas de pseudolumière pour les photodiodes de référence).

7.2.5 Mesurer la sortie $I_{\text{ref}}(\lambda, I_{\text{ref,DC}})$ du dispositif de référence en fonction de la longueur d'onde sous éclairage monochromatique. Pour le calcul de l'éclairage énergétique de la lumière monochromatique, la sensibilité spectrale différentielle du dispositif de référence au niveau du courant de polarisation $I_{\text{ref,DC}}$ tel que défini en 7.2.4, doit être utilisée.

En cas de mesure simultanée sous un faisceau lumineux uniforme, la mesure du dispositif de référence est effectuée, de même que celle du dispositif en essai en 7.3.3. Il est recommandé de répéter les mesures en inversant les positions du dispositif de référence et du dispositif en essai, et de calculer la moyenne des résultats de manière appropriée. Dans tous les cas, la non-uniformité spatiale de la lumière monochromatique doit être considérée de manière explicite dans la détermination de l'incertitude de mesure finale.

7.3 Mesure du dispositif en essai

7.3.1 Installer le dispositif en essai dans le système de mesure de la sensibilité spectrale. Le connecter aux équipements de mesure. Régler la tension de polarisation afin que la tension traversant le dispositif en essai corresponde aux conditions de court-circuit ou à la tension spécifique exigée.

7.3.2 Régler la température du dispositif à 25 °C ou à la température exigée, et la maintenir à ce niveau à ± 1 °C.

Si cela n'est pas possible pour une cellule à structure inversée ou un dispositif de grande surface, il convient de noter l'écart de température dans le rapport d'essai.

7.3.3 Mesurer la sortie complète dépendant de la longueur d'onde $I(\lambda, I_{\text{bias}}(E))$ sous au moins 5 éclairagements de pseudolumière différents E produisant des courants de court-circuit générés par cette même lumière $I_{\text{bias}}(E)$ compris entre 5 % et 110 % du courant de court-circuit du dispositif dans les conditions normales d'essai. Habituellement, $I(\lambda, I_{\text{bias}}(E))$ est mesurée à l'aide d'un amplificateur à verrouillage et $I_{\text{bias}}(E)$ est mesurée à l'aide d'un multimètre en mode continu.

Lorsque l'approche de balayage telle que décrite à l'Article 5 est appliquée, il est nécessaire de calculer la moyenne du courant de court-circuit le long de la trajectoire de balayage.

7.3.4 On doit corriger de manière appropriée les fluctuations de l'éclairement lumineux en cas d'utilisation d'un détecteur de contrôle. Si aucun détecteur de contrôle n'est utilisé, vérifier la stabilité de la lumière à toutes les longueurs d'onde pendant la durée des mesures du dispositif de référence et du dispositif en essai, y inclure ses variations dans l'analyse d'incertitude.

7.4 Calcul de la sensibilité spectrale

7.4.1 Déterminer la sensibilité spectrale différentielle $\tilde{s}(\lambda, I_{\text{bias}}(E))$ pour chaque longueur d'onde et chaque réglage de pseudolumière:

$$\tilde{s}(\lambda, I_{\text{bias}}(E)) = \frac{I(\lambda, I_{\text{bias}}(E))}{I_{\text{ref}}(\lambda, I_{\text{ref,DC}})} \cdot \tilde{s}_{\text{ref}}(\lambda, I_{\text{ref,DC}}) \quad (3)$$

où $\tilde{s}_{\text{ref}}(\lambda, I_{\text{ref,DC}})$ est la sensibilité spectrale différentielle du dispositif de référence.

7.4.2 Calculer la sensibilité différentielle $\tilde{s}(I_{\text{bias}})$ pour chaque réglage de pseudolumière par intégration sur toutes les longueurs d'onde:

$$\tilde{s}(I_{\text{bias}}) = \frac{\int_0^\infty \tilde{s}(\lambda, I_{\text{bias}}(E)) \cdot E_{\text{AM1.5G}}(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty E_{\text{AM1.5G}}(\lambda) d\lambda} \quad (4)$$

où $E_{\text{AM1.5G}}(\lambda)$ est la distribution d'éclairement énergétique spectral de référence telle que définie dans l'IEC 60904-3.

NOTE L'éclairement E_{bias} n'est pas connu lors de la mesure. L'éclairement efficace AM1.5G peut toutefois être calculé par la suite $E_{\text{bias}} = \int_0^{I_{\text{bias}}} \frac{1}{s(I)} dI$.