

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

Photovoltaic devices –

Part 8-1: Measurement of spectral responsivity of multi-junction photovoltaic (PV) devices

Dispositifs photovoltaïques –

Partie 8-1: Mesurage de la sensibilité spectrale des dispositifs photovoltaïques (PV) multijonctions



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2017 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 20 000 terms and definitions in English and French, with equivalent terms in 16 additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary (IEV) online.

IEC Glossary - std.iec.ch/glossary

65 000 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 20 000 termes et définitions en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans 16 langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International (IEV) en ligne.

Glossaire IEC - std.iec.ch/glossary

65 000 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 8-1: Measurement of spectral responsivity of multi-junction photovoltaic (PV) devices

Dispositifs photovoltaïques –

Partie 8-1: Mesurage de la sensibilité spectrale des dispositifs photovoltaïques (PV) multijonctions

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

ICS 27.160

ISBN 978-2-8322-4339-8

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.....	3
1 Scope.....	5
2 Normative references	5
3 Terms and definitions	5
4 General considerations.....	6
5 Bias light	6
6 Bias voltage.....	6
7 Apparatus.....	7
7.1 General.....	7
7.2 Apparatus for measurement of SR using continuous light source	7
7.3 Apparatus for measurement of SR using pulsed light source.....	8
7.4 Apparatus for measurement of series-connected modules.....	8
8 Measurement of SR.....	8
8.1 Measurement of SR using continuous light source	8
8.2 Measurement of SR using pulsed light source.....	8
8.3 Measurement of series-connected modules	8
9 Correction of measured SR.....	8
9.1 General.....	8
9.2 Correction for shunting.....	9
9.3 Correction for luminescent coupling	9
9.3.1 General	9
9.3.2 Correcting the SR of the second junction (for the coupling $J_1 \rightarrow J_2$).....	10
9.3.3 Correcting the SR of the third junction (for the coupling $J_1 \rightarrow J_2$ and $J_2 \rightarrow J_3$).....	10
9.3.4 Correcting the SR of the fourth (or higher) junction	11
10 Report	11
Bibliography.....	13

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

PHOTOVOLTAIC DEVICES –

**Part 8-1: Measurement of spectral responsivity
of multi-junction photovoltaic (PV) devices**

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 60904-8-1 has been prepared by IEC technical committee 82: Solar photovoltaic energy systems.

The text of this International Standard is based on the following documents:

FDIS	Report on voting
82/1255/FDIS	82/1273/RVD

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

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

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

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

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

PHOTOVOLTAIC DEVICES –

Part 8-1: Measurement of spectral responsivity of multi-junction photovoltaic (PV) devices

1 Scope

This part of IEC 60904 gives guidance for the measurement of the spectral responsivity (SR) of multi-junction photovoltaic devices. It is principally intended for non-concentrating devices, but parts may be applicable also to concentrating multi-junction PV devices. The SR is required for analysis of measured current-voltage characteristics of multi-junction PV devices as described in IEC 60904-1-1.

The requirements for measurement of SR of single-junction PV devices are covered by IEC 60904-8, whereas this document describes the additional requirements for the measurement of SR of multi-junction PV devices. This document only considers the measurement of SR of individual junction layers within a two-terminal multi-junction device.

This document may be applicable to PV devices designed for use under concentrated irradiation if they are measured without the optics for concentration.

2 Normative references

The following documents are referred to in the text in such a way that some or all of their content constitutes requirements of this document. For dated references, only the edition cited applies. For undated references, the latest edition of the referenced document (including any amendments) applies.

IEC 60904-8, *Photovoltaic devices – Part 8: Measurement of spectral responsivity of a photovoltaic (PV) device*

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

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

3 Terms and definitions

For the purposes of this document, the terms and definitions given in IEC TS 61836 and the following apply.

ISO and IEC maintain terminological databases for use in standardization at the following addresses:

- IEC Electropedia: available at <http://www.electropedia.org/>
- ISO Online browsing platform: available at <http://www.iso.org/obp>

3.1

current limiting junction

junction in a multi-junction photovoltaic device in which under given illumination conditions the lowest photovoltaic current is generated

4 General considerations

The procedure for measurement of the Spectral Responsivity (SR) of single-junction PV devices is described in detail in IEC 60904-8. The procedure for measurement of the SR of a multi-junction PV device requires the same basic principles, but is more complex, in particular with respect to requirements for bias light and bias voltage.

This document describes the additional considerations, requirements and procedures for the measurement of the SR of multi-junction PV devices based on the measurement principles of single-junction PV devices.

Therefore, the provisions in IEC 60904-8 are also valid for the measurement of multi-junction PV devices except where explicitly amended by this document.

Multi-junction PV devices consist of two or more series-connected junctions, each of which responds in a different wavelength band of light. For multi-junction PV devices which provide separate connections to each junction, the measurement of individual junction SR is identical to that for single-junction devices as described in IEC 60904-8 using the appropriate connections.

The procedures in this document describe the measurement of the SR of two-terminal multi-junction PV devices, i.e. devices which have two or more series-connected junctions with only two external electrical connections. The measurement procedures allow the successive measurement of the SR of each of these junctions by appropriately setting the measurement conditions using the correct bias light (Clause 5) and bias voltage (Clause 6).

5 Bias light

The measurement of the SR of single-junction PV devices (IEC 60904-8) requires bias light of unspecified spectral content. For multi-junction photovoltaic devices the measurement of the SR of a particular junction requires that this junction is current limiting. This is achieved by applying bias light to all other junctions in the multi-junctions device such that at all times during the measurement each of them produces a photovoltaic current larger than the photovoltaic current generated in the junction under test. The photovoltaic current in the junction-under-test might be generated partly by the bias light to the other junctions in addition to the monochromatic light used for the actual measurement of SR. The spatial non-uniformity (as defined in IEC 60904-9) of the applied bias light over the active area of the multi-junction device should be less than 10 %, corresponding to class C.

For each junction to be measured in turn in a n-junction device, appropriate bias light has to be applied to the device. This is most easily achieved with n bias light sources, where each bias light source emits light in a limited wavelength range within the SR range of a corresponding junction. However, other solutions such as single bias light sources with suitable optical filters or broadband bias light sources are also possible.

In IEC 60904-8 the broadband bias light is called white bias light. The bias light required for multi-junction devices is also often called coloured. However, as the wavelength ranges are not limited to the visible part of the spectrum and to avoid any potential confusion, in this document the bias light is referred to as either broadband (i.e. covering the responsivity of several junctions) or narrowband (i.e. specific to the wavelength range of responsivity of a specific junction).

6 Bias voltage

The SR of a single junction device is generally measured at short-circuit conditions (zero bias voltage), but may also be measured at a specific voltage provided by an external bias voltage source, as described in IEC 60904-8.

In the case of multi-junction PV devices, the overall external voltage bias has to be distinguished from the voltage bias across the junction-under-test. The external overall voltage of a multi-junction device is composed of the voltage across the junction under test and the voltage across the remaining junctions. The other junctions will be forward biased due to the applied bias light (see Clause 5) so the junction-under-test will be under reverse bias when the external voltage bias is set to zero. SR measurements of a junction under reverse bias may result in an overestimate of its SR. To avoid this and in order to have zero-voltage conditions at the junction-under-test, an external bias voltage has to be applied using a suitable external voltage source.

The required external bias voltage shall be set by one of the following methods:

- The external bias voltage should be equal to the sum of voltages generated in the junctions not under test by the bias light applied to them. In the case that the applied bias light generates no photovoltaic current in the junction-under-test, measure the open circuit voltage of the device under test with the bias light applied. Then adjust the power supply providing the external bias voltage to this value.
- If the above procedure is not achievable, the bias voltage shall be set initially equal to $(n - 1)/n$ times the open-circuit voltage of the multi-junction device (where n is the number of junctions). Test whether the external voltage bias is appropriate: with bias light (see Clause 5) and bias voltage applied, select a wavelength at which the junction-under-test is expected to have a SR near its maximum and observe the variation of the signal (and optionally the variation of the phase of the signal when using a chopped signal) while changing bias voltage or increasing bias light. With varying bias voltage the signal should remain constant for a range of bias voltages (plateau) (and the phase of the signal should approach that which would be observed for a single-junction PV device on the same system). The correct bias voltage is any value of the plateau (and the phase stabilizes within a few degrees of the single-junction value). Then select a wavelength at which the junction-under-test is expected to have zero SR and again vary bias voltage. With zero external bias voltage a signal might be observed, which should vanish as external voltage bias is increased. The correct bias voltage is reached when the signal is minimized. Normally this is also for a range of bias voltages. Choose a bias voltage consistent with both tests.
- If with both approaches described above no bias voltage can be obtained, the estimated sum of the open circuit voltage of all junctions not under test can be used as a base bias voltage for SR measurement. In this case two additional measurements at bias voltages approximately $\pm 10\%$ with respect to the base bias voltage should be performed to investigate voltage independence.

7 Apparatus

7.1 General

The main difference with respect to the apparatus for measurement of SR of single-junction devices is the requirement for specific bias light (according to Clause 5) during the measurement of SR of multi-junction PV devices. Suitable equipment for providing the bias light are light emitting diodes (LEDs) or broadband light sources with suitable optical filters, or any other suitable light source (such as unfocussed lasers).

The external voltage bias source, which is optional in the SR measurement of single-junction devices, becomes mandatory for the SR measurement of multi-junction devices.

7.2 Apparatus for measurement of SR using continuous light source

The apparatus required is similar to that specified in IEC 60904-8 for the SR measurement of single-junction PV devices with the modification of the bias light as per Clause 5.

7.3 Apparatus for measurement of SR using pulsed light source

The apparatus required for measuring the SR using a single pulse light source is similar to that specified in IEC 60904-8 for the SR measurement of single-junction PV devices with the addition of the bias light as per Clause 5.

7.4 Apparatus for measurement of series-connected modules

The apparatus required is similar to that specified in IEC 60904-8 for the SR measurement of single-junction PV devices with the modification of the bias light as per Clause 5 for the target cell. The supplemental bias light applied to the rest of the module needs to be able to generate photovoltaic currents in all junctions, either by a summation of several narrow bandwidth light sources or by a suitable broadband light source.

8 Measurement of SR

8.1 Measurement of SR using continuous light source

The measurement is analogous to the case of single-junction PV devices with modification of the bias light as per Clause 5. Additionally, a suitable external bias voltage shall be applied as per Clause 6.

Using chopped light and a lock-in technique, not only the magnitude of the signal, but where possible also its phase shall be recorded, as this contains potentially valuable information (see bibliography).

8.2 Measurement of SR using pulsed light source

The measurement is analogous to the case of single-junction PV devices with addition of bias light as per Clause 5. Additionally, a suitable external bias voltage shall be applied as per Clause 6.

8.3 Measurement of series-connected modules

The measurement is analogous to the case of single-junction PV devices with modification of the bias light as per Clause 5 for the target cell. The supplemental bias light applied to the rest of the module needs to generate photovoltaic currents in all junctions of the cells not under test, which are larger than the maximum photovoltaic current generated in the junction-under-test within the cell under test (target cell). The conditions for the bias voltage are already covered in IEC 60904-8.

9 Correction of measured SR

9.1 General

The measured SR may deviate from the true SR due to shunting of the junctions and/or due to luminescent coupling. In both cases a correction of the measured SR is required.

Shunting in the target junction leads to non-zero slope (near the short circuit point) of the I-V curve of the junction, which results in a shift of the operating voltage and consequently in a non-zero contribution of other junctions to the measured SR.

Luminescent coupling in multi-junction PV devices is the phenomenon where radiative recombination in a high bandgap junction in forward voltage bias leads to photons that are emitted towards a lower bandgap junction, and when absorbed in the lower bandgap junction they create additional photovoltaic current in that junction. The effect is especially prominent in measurements of the SR because the light biasing required to force one of the junctions to be current-limiting necessarily forces the remaining junctions into forward bias.

For a junction in a multi-junction PV device that is influenced by shunting and/or luminescent coupling, a non-zero SR will be observed at shorter wavelengths (tails) in the wavelength responsivity region of a higher bandgap filtering junction.

The following procedure should be used to differentiate shunting from luminescent coupling if there is question about the origin, and then the respective correction procedure applied. With the monochromatic light in the wavelength region of the tail, vary the applied voltage bias and monitor the magnitude of the signal: if the PV device is dominated by shunting, the magnitude of the signal will vary with the voltage bias, whereas if the PV device is dominated by luminescent coupling the magnitude should be constant. It is noted that the luminescence coupling may be dependent on the bias voltage or the irradiance of the bias light, which may complicate the differentiation.

Similar effects can also arise from a reverse bias breakdown in the current limiting junction.

9.2 Correction for shunting

The correction for shunting is described below. First the SR of all junctions is measured.

The following formula (1) gives an expression for the measured SR and may be used to correct such a measured SR.

$$SR_{meas} = \frac{\sum_{i=1}^n SR_i \frac{dV_i}{dI_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{dV_i}{dI_i}} \quad (1)$$

where

- SR_{meas} is the measured SR;
- n is the number of junctions in the multi-junction device;
- i is the junction index;
- SR_i is the true SR of the i -th junction;
- dV_i/dI_i is the slope of the I-V curve of the i -th junction at its operating point during SR measurement.

The correction of the measured SR to yield the true SR of one junction may be possible, based on prior knowledge (or assumptions) of the SR at certain wavelengths. Normally this is the identification of a measurement artefact (a non-zero SR) in a wavelength region where the material of the junction is known to have zero SR. Correction factors can be calculated at specific wavelengths and then applied to the entire wavelength range of the measurement. This is possible without the explicit knowledge of the current-voltage curve. In the case of the above mentioned artefact, the SR of another junction is scaled and subtracted to remove the artefact. Furthermore the SR of junction exhibiting the artefact is then scaled up dividing it by (1-scaling factor).

For additional details see bibliography.

9.3 Correction for luminescent coupling

9.3.1 General

In the following procedure of how to correct for luminescent coupling, the various junctions J_i are indexed starting from the highest bandgap (1 = top junction, 2 = second junction, etc.). This procedure only considers coupling between adjacent junctions, and neglects a direct coupling from, for example, $J_1 \rightarrow J_3$ because the middle junction in that case should be thick enough to absorb all the luminescence arising from J_1 . The corrections are applied sequentially, meaning that the second junction is corrected for the effects of $J_1 \rightarrow J_2$ coupling, and then the third junction is corrected for the combined effects of $J_1 \rightarrow J_2$ and $J_2 \rightarrow J_3$, etc.

9.3.2 Correcting the SR of the second junction (for the coupling $J_1 \rightarrow J_2$)

9.3.2.1 This correction applies for the bottom junction SR of a two-junction PV device, or in the second junction SR of a three (or more) junction PV device.

9.3.2.2 Identify a wavelength range $[\lambda_1, \lambda_2]$ where:

- a) the top junction has a SR close to its maximum;
- b) the SR curve is relatively smooth.

9.3.2.3 For a wavelength λ_0 near the midpoint of the range $[\lambda_1, \lambda_2]$, calculate the ratio $\beta_{12}^{(2)}$

$$\beta_{12}^{(2)} = \frac{SR_2^{meas}(\lambda_0)}{SR_1^{act}(\lambda_0)} \quad (2)$$

where

$SR_i^{meas}(\lambda)$ refers to the measured SR curve of the i^{th} junction;

$SR_i^{act}(\lambda)$ refers to the actual (*i.e.* corrected) SR curve of the i^{th} junction.

For the top junction there is no correction, so:

$$SR_1^{act}(\lambda) = SR_1^{meas}(\lambda) \quad (3)$$

9.3.2.4 Using the result of formula (2), estimate the correction factor $\nu_{12}^{(2)}$

$$\nu_{12}^{(2)} \approx \frac{\beta_{12}^{(2)}}{1 - \beta_{12}^{(2)}} \quad (4)$$

9.3.2.5 Calculate the corrected second junction $SR_2^{act}(\lambda)$ curve as:

$$SR_2^{act}(\lambda) = (1 + \nu_{12}^{(2)}) \cdot SR_2^{meas}(\lambda) - \nu_{12}^{(2)} \cdot SR_1^{act}(\lambda) = \frac{SR_2^{meas}(\lambda)}{1 - \beta_{12}^{(2)}} - \frac{\beta_{12}^{(2)}}{1 - \beta_{12}^{(2)}} SR_1^{act}(\lambda) \quad (5)$$

9.3.2.6 Incrementally adjust the value of $\nu_{12}^{(2)}$ and repeat 9.3.2.5 so that the average value of SR_2^{act} is zero over the range $[\lambda_1, \lambda_2]$ — this can be done by a formal calculation of the average value of the corrected SR, but sufficient accuracy is usually obtained by a simple visual inspection (of the second junction SR curve) that the average SR appears to be approximately zero.

9.3.3 Correcting the SR of the third junction (for the coupling $J_1 \rightarrow J_2$ and $J_2 \rightarrow J_3$)

9.3.3.1 This correction applies for the bottom junction SR of a three junction PV device, or for the third junction SR of a four (or more) junction PV device. To correct for the coupling, two constants $\nu_{12}^{(3)}$ and $\nu_{23}^{(3)}$ are to be determined. $SR_2^{act}(\lambda)$ shall be determined before proceeding, following the procedure above for the correction of the SR of the second junction.

9.3.3.2 Identify a wavelength range $[\lambda_1^T, \lambda_2^T]$ in the region of the top junction responsivity where:

- a) the top junction has a SR close to its maximum;
- b) the SR curve is relatively smooth.

9.3.3.3 For a wavelength λ_0^T near the middle of the range $[\lambda_1^T, \lambda_2^T]$, calculate:

$$\beta_{12}^{(3)} = \frac{SR_3^{meas}(\lambda_0^T)}{SR_1^{act}(\lambda_0^T)} \quad (6)$$

9.3.3.4 Identify a wavelength range $[\lambda_1^M, \lambda_2^M]$ in the region of the middle junction responsivity where:

- the middle junction has a SR close to its maximum;
- the SR curve is relatively smooth.

9.3.3.5 For a wavelength λ_0^M near the middle of the range $[\lambda_1^M, \lambda_2^M]$, calculate:

$$\beta_{23}^{(3)} = \frac{SR_3^{meas}(\lambda_0^M)}{SR_2^{act}(\lambda_0^M)} \quad (7)$$

9.3.3.6 Estimate the first correction factor $\nu_{12}^{(3)}$:

$$\nu_{12}^{(3)} = \frac{\beta_{12}^{(3)}}{\beta_{23}^{(3)}} \quad (8)$$

9.3.3.7 Estimate the second correction factor $\nu_{23}^{(3)}$:

$$\nu_{23}^{(3)} = \frac{\beta_{12}^{(3)}}{\nu_{12}^{(3)} - (1 + \nu_{12}^{(3)}) \cdot \beta_{12}^{(3)}} = \frac{\beta_{23}^{(3)}}{1 - (1 + \nu_{12}^{(3)}) \cdot \beta_{23}^{(3)}} = \frac{\beta_{23}^{(3)}}{1 - (\beta_{23}^{(3)} + \beta_{12}^{(3)})} \quad (9)$$

9.3.3.8 Calculate the corrected third junction $SR_3^{act}(\lambda)$ curve as:

$$SR_3^{act}(\lambda) = (1 + \nu_{23}^{(3)} + \nu_{12}^{(3)} \nu_{23}^{(3)}) \cdot SR_3^{meas}(\lambda) - \nu_{23}^{(3)} \cdot SR_2^{act}(\lambda) - \nu_{12}^{(3)} \nu_{23}^{(3)} \cdot SR_1^{act}(\lambda) \quad (10)$$

9.3.3.9 Incrementally adjust the values of $\nu_{12}^{(3)}$ and $\nu_{23}^{(3)}$ and repeat 9.3.3.8 so that the average value of SR_3^{act} is zero over the ranges $[\lambda_1^T, \lambda_2^T]$ and $[\lambda_1^M, \lambda_2^M]$ — as before, this can be done by a formal calculation of the average values of the corrected SR, but sufficient accuracy is usually obtained by a simple visual inspection that the SR appears to be zero in the two wavelength ranges.

9.3.4 Correcting the SR of the fourth (or higher) junction

The SR of the fourth (or higher) junction can be corrected with reasonable accuracy by neglecting the effects from the top junction(s) and considering only the couplings from the preceding two junctions.

For the fourth junction:

- Correct the SR of the second and third junction as described above (9.3.2 and 9.3.3).
- Follow the procedure for the third junction again, but with all subscripts and superscripts increased by 1.

Correcting the SR of higher junctions is a straightforward extension of this procedure.

For additional details see bibliography.

10 Report

Following completion of the procedure, a certified report of the SR measurements shall be prepared by the test agency. Each certificate or test report shall include all the items as required by IEC 60904-8. Additionally, the following shall also be included and specified for each tested junction:

- Identification of bias light applied including wavelengths, bandwidths and irradiances;
- Description of the method adopted for bias-voltage determination;

- External bias voltage actually applied;
- Documentation of corrections applied, if any;
- Statement of the estimated uncertainty of the calibration or test results applicable to the measurement procedures for multi-junction devices.

Bibliography

M. A. Steiner, S. R Kurtz, J. F. Geisz, W. E. McMahon and J. M. Olson, "Using phase effects to understand measurements of the quantum efficiency and related luminescent coupling in a multijunction solar cell", *IEEE Journal of Photovoltaics*, Vol. 2, No. 4, 2012, pp.424-433

Myles A. Steiner, John F. Geisz, Tom E. Moriarty, Ryan M. France, William E. McMahon, Jerry M. Olson, Sarah R. Kurtz and Daniel J. Friedman, "Measuring IV curves and subcell photovoltaic currents in the presence of luminescent coupling", *Journal of Photovoltaics*, 3, 879, 2013

M. Meusel, R. Adelhelm, F. Dimroth, A.W. Bett, and W. Warta, *Spectral Mismatch Correction and Spectrometric Characterization of Monolithic III-V Multi-Junction Solar Cells. Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2002, 10(4): pp. 243-255

G. Siefer, C. Baur, and A.W. Bett, "External Quantum Efficiency Measurements of Germanium Bottom Subcells: Measurement Artifacts and Correction Procedures", *Proceedings of the 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 2010, Honolulu, HI pp. 000704 – 07

Y. Hishikawa, Y. Tsuno, K. Kurokawa, "Spectral response measurements of PV modules and multi-junction devices", *Proceedings of 22nd European Photovoltaics Solar Energy Conference*, 2007, Milan, Italy, pp.2765-2769

Y. Tsuno, Y. Hishikawa, K. Kurokawa, "A method for spectral response measurements of various PV modules", *Proceedings of 23rd European Photovoltaics Solar Energy Conference*, 2008, Valencia, Spain, pp.2723-2727

T. Sogabe, A. Ogura, C.-Y. Hung, V. Evstropov, M. Mintairov, M. Shvarts, Y. Okada, "Experimental characterization and self-consistent modeling of luminescence coupling effect in III-V multijunction solar cells", *Applied Physics Letters*, 103, 263907, 2013; doi: 10.1063/1.4858970

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	15
1 Domaine d'application	17
2 Références normatives	17
3 Termes et définitions	17
4 Considérations générales	18
5 Pseudolumière.....	18
6 Tension de polarisation	19
7 Matériel	20
7.1 Généralités	20
7.2 Matériel de mesure de la sensibilité spectrale à l'aide d'une source de lumière continue	20
7.3 Matériel de mesure de la sensibilité spectrale à l'aide d'une source de lumière pulsée	20
7.4 Matériel de mesure de modules connectés en série	20
8 Mesurage de la sensibilité spectrale	20
8.1 Mesurage de la sensibilité spectrale à l'aide d'une source de lumière continue	20
8.2 Mesurage de la sensibilité spectrale à l'aide d'une source de lumière pulsée	20
8.3 Mesurage de modules connectés en série.....	21
9 Correction de la sensibilité spectrale mesurée	21
9.1 Généralités	21
9.2 Correction du shunt	21
9.3 Correction du couplage luminescent	22
9.3.1 Généralités	22
9.3.2 Correction de la sensibilité spectrale de la deuxième jonction (pour le couplage $J_1 \rightarrow J_2$).....	22
9.3.3 Correction de la sensibilité spectrale de la troisième jonction (pour le couplage $J_1 \rightarrow J_2$ et $J_2 \rightarrow J_3$)	23
9.3.4 Correction de la sensibilité spectrale de la quatrième jonction (ou jonction supérieure)	24
10 Rapport	24
Bibliographie.....	25

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

DISPOSITIFS PHOTOVOLTAÏQUES –

**Partie 8-1: Mesurage de la sensibilité spectrale
des dispositifs photovoltaïques (PV) multijonctions**

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 60904-8-1 a été établie par le comité d'études 82 de l'IEC: Systèmes de conversion photovoltaïque de l'énergie solaire.

Le texte de cette Norme internationale est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
82/1255/FDIS	82/1273/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.

Ce document a été rédigé selon les Directives ISO/IEC, Partie 2.

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.

Le comité a décidé que le contenu de ce document 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 au document recherché. A cette date, le document sera

- reconduit,
- supprimé,
- remplacé par une édition révisée, ou
- amendé.

DISPOSITIFS PHOTOVOLTAÏQUES –

Partie 8-1: Mesurage de la sensibilité spectrale des dispositifs photovoltaïques (PV) multijonctions

1 Domaine d'application

La présente partie de l'IEC 60904 fournit des préconisations relatives au mesurage de la sensibilité spectrale (SS) des dispositifs photovoltaïques multijonctions. Elle concerne essentiellement les dispositifs qui ne sont pas à concentration, mais des parties peuvent également être appliquées aux dispositifs photovoltaïques multijonctions à concentration. La sensibilité spectrale est exigée pour analyser les caractéristiques courant-tension mesurées des appareils photovoltaïques multijonctions décrits dans l'IEC 60904-1-1.

Les exigences relatives au mesurage de la sensibilité spectrale des dispositifs PV à jonction unique sont couvertes par l'IEC 60904-8, alors que le présent document décrit les exigences supplémentaires relatives au mesurage de la sensibilité spectrale des dispositifs PV multijonctions. Le présent document prend uniquement en considération le mesurage de la sensibilité spectrale de chaque couche de jonction au sein d'un dispositif multijonction à deux bornes.

Le présent document peut être applicable aux dispositifs PV conçus pour être utilisés sous une exposition énergétique concentrée, s'ils sont mesurés sans les éléments optiques de concentration.

2 Références normatives

Les documents suivants cités dans le texte constituent, pour tout ou partie de leur contenu, des exigences du présent document. 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 60904-8, *Dispositifs photovoltaïques – Partie 8: Mesure de la sensibilité spectrale d'un dispositif photovoltaïque (PV)*

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

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

3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions donnés dans l'IEC TS 61836, ainsi que les suivants s'appliquent.

L'ISO et l'IEC tiennent à jour des bases de données terminologiques destinées à être utilisées en normalisation, consultables aux adresses suivantes:

- IEC Electropedia: disponible à l'adresse <http://www.electropedia.org/>
- ISO Online browsing platform: disponible à l'adresse <http://www.iso.org/obp>

3.1

jonction à limitation en courant

jonction d'un dispositif photovoltaïque multijonction dans laquelle le courant photovoltaïque le plus faible est généré dans des conditions d'éclairage données

4 Considérations générales

La procédure de mesure de la sensibilité spectrale (SS) des dispositifs PV à jonction unique est détaillée dans l'IEC 60904-8. La procédure de mesure de la sensibilité spectrale d'un dispositif PV multijonction s'appuie sur les mêmes principes de base, mais plus complexes, concernant en particulier les exigences relatives à la pseudolumière et à la tension de polarisation.

Le présent document décrit les considérations, exigences et procédures supplémentaires relatives au mesurage de la sensibilité spectrale des dispositifs PV multijonctions reposant sur les principes de mesure des dispositifs PV à jonction unique.

Par conséquent, les dispositions de l'IEC 60904-8 sont également valables pour le mesurage des dispositifs PV multijonctions, sauf si elles sont explicitement amendées par le présent document.

Les dispositifs PV multijonctions sont composés d'au moins deux jonctions connectées en série, chacune d'elles réagissant dans une bande de longueurs d'onde de lumière différente. Pour les dispositifs PV multijonctions assurant des connexions séparées à chaque jonction, le mesurage de la sensibilité spectrale de chaque jonction est identique à celui des dispositifs à jonction unique tels que décrits dans l'IEC 60904-8 utilisant les connexions appropriées.

Les procédures figurant dans le présent document décrivent le mesurage de la sensibilité spectrale de dispositifs PV multijonctions à deux bornes, c'est-à-dire les dispositifs équipés d'au moins deux jonctions connectées en série avec uniquement deux connexions électriques externes. Les procédures de mesure permettent de mesurer successivement la sensibilité spectrale de chacune de ces jonctions en établissant de manière appropriée les conditions de mesure à l'aide de la pseudolumière (Article 5) et de la tension de polarisation (Article 6) correctes.

5 Pseudolumière

Le mesurage de la sensibilité spectrale des dispositifs PV à jonction unique (IEC 60904-8) exige une pseudolumière de répartition spectrale non spécifiée. Pour les dispositifs photovoltaïques multijonctions, le mesurage de la sensibilité spectrale d'une jonction particulière exige que ladite jonction soit à limitation en courant. Pour ce faire, il suffit d'appliquer la pseudolumière à toutes les autres jonctions du dispositif multijonction de sorte que, à tout moment du mesurage, chacune d'elles génère un courant photovoltaïque plus important que celui généré dans la jonction en essai. Le courant photovoltaïque de la jonction en essai peut être généré en partie par la pseudolumière appliquée aux autres jonctions en plus de la lumière monochromatique utilisée pour le mesurage réel de la sensibilité spectrale. Il convient que la non-uniformité spatiale (définie dans l'IEC 60904-9) de la pseudolumière appliquée sur la zone active du dispositif multijonction soit inférieure à 10 %, correspondant à la classe C.

Pour chaque jonction à mesurer tout à tour dans un dispositif à n jonctions, la pseudolumière appropriée doit être appliquée au dispositif. Cela est plus aisément obtenu avec n sources de pseudolumière, chacune d'elles émettant de la lumière dans une plage de longueurs d'onde limitée dans la plage de sensibilité spectrale d'une jonction correspondante. Toutefois, d'autres solutions sont également possibles (sources de pseudolumière uniques équipées de filtres optiques adaptés ou sources de pseudolumière à large bande, par exemple).

Dans l'IEC 60904-8, la pseudolumière à large bande est appelée "pseudolumière blanche". La pseudolumière exigée pour les dispositifs multijonctions est également souvent dite "colorée". Toutefois, les plages de longueurs d'onde n'étant pas limitées à la partie visible du spectre, et afin d'éviter toute confusion éventuelle, la pseudolumière est dite, dans le présent document, à large bande (c'est-à-dire couvrant la sensibilité de plusieurs jonctions) ou à bande étroite (c'est-à-dire spécifique à la plage de longueurs d'onde de la sensibilité d'une jonction particulière).

6 Tension de polarisation

La sensibilité spectrale d'un dispositif à jonction unique est en général mesurée aux conditions de court-circuit (tension de polarisation égale à zéro), mais elle peut également l'être à une tension particulière fournie par une source externe de tension de polarisation (voir l'IEC 60904-8).

Dans le cas des dispositifs PV multijonctions, la tension de polarisation externe globale doit être différenciée de la tension de polarisation de la jonction en essai. La tension globale externe d'un dispositif multijonction est composée de la tension dans la jonction en essai et de la tension dans les jonctions restantes. Les autres jonctions font l'objet d'une polarisation directe due à la pseudolumière appliquée (voir l'Article 5), la jonction en essai faisant donc l'objet d'une polarisation inverse lorsque la tension de polarisation externe est nulle. Les mesurages de la sensibilité spectrale d'une jonction sous polarisation inverse peuvent donner lieu à une surestimation de sa sensibilité spectrale. Pour éviter cela et disposer de conditions de tension nulle au niveau de la jonction en essai, une tension de polarisation externe doit être appliquée à l'aide d'une source de tension externe adaptée.

La tension de polarisation externe exigée doit être définie selon l'une des méthodes suivantes:

- Il convient que la tension de polarisation externe soit égale à la somme des tensions générées dans les jonctions non soumises à l'essai par la pseudolumière qui leur est appliquée. Si la pseudolumière appliquée ne génère pas de courant photovoltaïque dans la jonction en essai, mesurer la tension en circuit ouvert du dispositif en essai avec la pseudolumière appliquée. Ensuite, régler l'alimentation en attribuant cette valeur à la tension de polarisation externe.
- Si la procédure ci-dessus ne peut être réalisée, la tension de polarisation doit être réglée au départ à $(n - 1)/n$ fois la tension en circuit ouvert du dispositif multijonction (n étant le nombre de jonctions). Déterminer par un essai si la tension de polarisation externe est appropriée: la pseudolumière (voir l'Article 5) et la tension de polarisation étant appliquées, choisir la longueur d'onde à laquelle la sensibilité spectrale de la jonction en essai est censée être proche de sa valeur maximale, et observer la variation du signal (et éventuellement celle de sa phase si un signal haché est utilisé) lors du changement de tension de polarisation, il convient que le signal demeure constant pour une plage de tensions de polarisation (plateau) (et que la phase du signal approche celle qui serait observée pour un dispositif PV à jonction unique sur le même système). La tension de polarisation correcte correspond à toute valeur du plateau (et la phase se stabilise dans la limite de quelques degrés de la valeur de jonction unique). Ensuite, sélectionner la longueur d'onde à laquelle la sensibilité spectrale de la jonction en essai est censée être nulle, puis faire de nouveau varier la tension de polarisation. Avec une tension de polarisation externe nulle, un signal peut être observé, et il convient qu'il disparaisse au fur et à mesure de l'augmentation de la tension de polarisation externe. La tension de polarisation correcte est atteinte lorsque le signal est réduit le plus possible. Normalement, cela concerne également une plage de tensions de polarisation. Choisir une tension de polarisation cohérente avec les deux essais.
- Si avec les deux approches décrites ci-dessus, aucune tension de polarisation ne peut être obtenue, l'estimation de la somme de la tension en circuit ouvert de toutes les jonctions non soumises à l'essai peut être utilisée en tant que tension de polarisation de la base pour le mesurage de la sensibilité spectrale. Dans ce cas, il convient de réaliser

deux mesurages supplémentaires à des tensions de polarisation d'environ ± 10 % par rapport à la tension de polarisation de la base en vue de rechercher l'indépendance par rapport à la tension.

7 Matériel

7.1 Généralités

La principale différence avec le matériel de mesure de la sensibilité spectrale des dispositifs à jonction unique est l'exigence relative à la pseudolumière spécifique (conformément à l'Article 5) lors du mesurage de la sensibilité spectrale des dispositifs PV multijonctions. Les équipements adaptés pour fournir la pseudolumière sont les diodes électroluminescentes (LED), les sources de lumière à large bande équipées de filtres optiques adaptés ou d'autres sources de lumière adaptées (les lasers non focalisés, par exemple).

La source de tension de polarisation externe, qui est facultative pour mesurer la sensibilité spectrale des dispositifs à jonction unique, devient obligatoire pour mesurer celle des dispositifs multijonctions.

7.2 Matériel de mesure de la sensibilité spectrale à l'aide d'une source de lumière continue

Le matériel doit être similaire à celui présenté dans l'IEC 60904-8 pour mesurer la sensibilité spectrale des dispositifs PV à jonction unique par modification de la pseudolumière (voir l'Article 5).

7.3 Matériel de mesure de la sensibilité spectrale à l'aide d'une source de lumière pulsée

Le matériel exigé pour mesurer la sensibilité spectrale à l'aide d'une seule source de lumière pulsée doit être similaire à celui présenté dans l'IEC 60904-8 pour mesurer la sensibilité spectrale des dispositifs PV à jonction unique en ajoutant la pseudolumière (voir l'Article 5).

7.4 Matériel de mesure de modules connectés en série

Le matériel doit être similaire à celui présenté dans l'IEC 60904-8 pour mesurer la sensibilité spectrale des dispositifs PV à jonction unique par modification de la pseudolumière (voir l'Article 5) pour la cellule cible. La pseudolumière supplémentaire appliquée au reste du module doit être en mesure de générer des courants photovoltaïques dans toutes les jonctions, soit en ajoutant plusieurs sources de lumière à bande étroite, soit par une source de lumière à large bande.

8 Mesurage de la sensibilité spectrale

8.1 Mesurage de la sensibilité spectrale à l'aide d'une source de lumière continue

Le mesurage s'apparente à celui des dispositifs PV à jonction unique avec modification de la pseudolumière (voir l'Article 5). De plus, une tension de polarisation externe adaptée doit être appliquée (voir l'Article 6).

En utilisant la lumière hachée et une technique de verrouillage, non seulement l'amplitude du signal mais également, dans la mesure du possible, sa phase, doivent être enregistrées, étant donné qu'elles contiennent des informations potentiellement valables (voir la bibliographie).

8.2 Mesurage de la sensibilité spectrale à l'aide d'une source de lumière pulsée

Le mesurage s'apparente à celui des dispositifs PV à jonction unique avec une pseudolumière supplémentaire (voir l'Article 5). De plus, une tension de polarisation externe adaptée doit être appliquée (voir l'Article 6).

8.3 Mesurage de modules connectés en série

Le mesurage s'apparente à celui des dispositifs PV à jonction unique avec modification de la pseudolumière (voir l'Article 5) pour la cellule cible. La pseudolumière supplémentaire appliquée au reste du module doit générer des courants photovoltaïques dans toutes les jonctions des cellules qui ne sont pas soumises à l'essai, lesquels sont supérieurs au courant photovoltaïque maximal généré dans la jonction en essai à l'intérieur de la cellule soumise à l'essai (cellule cible). Les conditions de la tension de polarisation sont déjà couvertes par l'IEC 60904-8.

9 Correction de la sensibilité spectrale mesurée

9.1 Généralités

La sensibilité spectrale mesurée peut s'écarter de la sensibilité spectrale vraie compte tenu du shunt des jonctions et/ou du couplage luminescent. Dans les deux cas, la sensibilité spectrale mesurée doit être corrigée.

Le shunt dans les jonctions cibles donne lieu à une pente non nulle (proche du point de court-circuit) de la courbe I-V de la jonction, ce qui décale la tension de service et, par conséquent, se traduit par une contribution non nulle des autres jonctions à la sensibilité spectrale mesurée.

Le couplage luminescent dans les dispositifs PV multijonctions est un phénomène dans lequel la recombinaison radiative dans une jonction à largeur de bande interdite élevée dans la tension de polarisation directe émet des photons vers une jonction à largeur de bande interdite inférieure et, lorsqu'ils sont absorbés par cette dernière, créent un courant photovoltaïque supplémentaire dans cette jonction. L'effet est particulièrement important dans les mesurages de la sensibilité spectrale, la polarisation de la lumière, exigée pour forcer l'une des jonctions à limiter le courant, obligeant nécessairement les autres jonctions à passer en polarisation directe.

S'agissant d'une jonction d'un dispositif PV multijonction influencée par le shunt et/ou le couplage luminescent, une sensibilité spectrale non nulle est observée à des longueurs d'onde plus courtes (queues) dans la région de sensibilité aux longueurs d'onde d'une jonction de filtrage à largeur de bande interdite élevée.

Il convient d'utiliser la procédure suivante pour faire la distinction entre le shunt et le couplage luminescent en cas de doute sur l'origine, puis d'appliquer la procédure de correction correspondante. La lumière monochromatique se trouvant dans la gamme de longueurs d'onde de la queue, faire varier la tension de polarisation appliquée et surveiller l'amplitude du signal: si le dispositif PV est dominé par le shunt, l'amplitude du signal varie en fonction de la tension de polarisation, alors que si le dispositif PV est dominé par le couplage luminescent, il convient que l'amplitude soit constante. Noter que le couplage luminescent peut dépendre de la tension de polarisation ou de l'éclairement de la pseudolumière, ce qui peut compliquer la distinction.

Des effets similaires peuvent également apparaître par suite du claquage par polarisation inverse dans la jonction à limitation en courant.

9.2 Correction du shunt

La correction du shunt est décrite ci-dessous. D'abord, la sensibilité spectrale de toutes les jonctions est mesurée.

La formule (1) suivante exprime la sensibilité spectrale mesurée et peut être utilisée pour la corriger.

$$SR_{meas} = \frac{\sum_{i=1}^n SR_i \frac{dV_i}{dI_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{dV_i}{dI_i}} \quad (1)$$

où

- SR_{meas} est la sensibilité spectrale mesurée;
 n est le nombre de jonctions dans le dispositif multijonction;
 i est l'indice de jonction;
 SR_i est la sensibilité spectrale vraie de la $i^{\text{ème}}$ jonction;
 dV_i/dI_i est la pente de la courbe I-V de la $i^{\text{ème}}$ jonction en son point de fonctionnement lors du mesurage de la sensibilité spectrale.

La correction de la sensibilité spectrale mesurée peut permettre d'obtenir la sensibilité spectrale vraie d'une jonction, en s'appuyant sur les connaissances (ou les hypothèses) préalables de la sensibilité spectrale à certaines longueurs d'onde. Normalement, il s'agit de l'identification d'un artefact de mesure (une sensibilité spectrale non nulle) dans une zone de longueur d'onde dans laquelle le matériau de la jonction est réputé avoir une sensibilité spectrale nulle. Les facteurs de correction peuvent être calculés à des longueurs d'onde particulières, puis appliqués à l'ensemble de la plage de longueurs d'onde du mesurage. Ceci est possible sans la connaissance explicite de la courbe courant-tension. Dans le cas de l'artefact mentionné ci-dessus, la sensibilité spectrale d'une autre jonction est mise à l'échelle et déduite pour éliminer l'artefact. De plus, la sensibilité spectrale de la jonction présentant l'artefact est ensuite augmentée en la divisant par (1-facteur d'échelle).

Se reporter à la bibliographie pour de plus amples informations.

9.3 Correction du couplage luminescent

9.3.1 Généralités

Dans la procédure suivante de correction du couplage luminescent, les différentes jonctions J_i sont indexées à partir de la largeur de bande interdite la plus élevée (1 = jonction supérieure, 2 = deuxième jonction, etc.). Cette procédure tient compte uniquement du couplage entre des jonctions adjacentes, et ignore le couplage direct à partir de, par exemple, $J_1 \rightarrow J_3$, car il convient que la jonction intermédiaire soit, dans ce cas, suffisamment épaisse pour absorber toute la luminescence provenant de J_1 . Les corrections sont appliquées en séquence, ce qui signifie que les effets du couplage $J_1 \rightarrow J_2$ de la deuxième jonction sont corrigés, puis les effets combinés de $J_1 \rightarrow J_2$ et $J_2 \rightarrow J_3$, de la troisième jonction sont corrigés, etc.

9.3.2 Correction de la sensibilité spectrale de la deuxième jonction (pour le couplage $J_1 \rightarrow J_2$)

9.3.2.1 Cette correction s'applique à la sensibilité spectrale de la jonction inférieure d'un dispositif PV à deux jonctions ou à la sensibilité spectrale de la deuxième jonction d'un dispositif PV à trois jonctions (voire plus).

9.3.2.2 Identifier une plage de longueurs d'onde $[\lambda_1, \lambda_2]$ dans laquelle:

- la sensibilité spectrale de la jonction supérieure est proche de sa valeur maximale;
- la courbe de sensibilité spectrale est relativement lisse.

9.3.2.3 Pour une longueur d'onde λ_0 proche du point milieu de la plage $[\lambda_1, \lambda_2]$, calculer le rapport $\beta_{12}^{(2)}$

$$\beta_{12}^{(2)} = \frac{SR_2^{meas}(\lambda_0)}{SR_1^{act}(\lambda_0)} \quad (2)$$

où

$SR_i^{meas}(\lambda)$ se rapporte à la courbe de sensibilité spectrale mesurée de la $i^{\text{ème}}$ jonction;

$SR_i^{act}(\lambda)$ se rapporte à la courbe de sensibilité spectrale réelle (c'est-à-dire corrigée) mesurée de la $i^{\text{ème}}$ jonction.

La jonction supérieure ne fait l'objet d'aucune correction, donc:

$$SR_1^{act}(\lambda) = SR_1^{meas}(\lambda) \quad (3)$$

9.3.2.4 À l'aide des résultats de la formule (2), estimer le facteur de correction $v_{12}^{(2)}$

$$v_{12}^{(2)} \approx \frac{\beta_{12}^{(2)}}{1 - \beta_{12}^{(2)}} \quad (4)$$

9.3.2.5 Calculer la courbe $SR_2^{act}(\lambda)$ de la deuxième jonction corrigée grâce à la formule (5) ci-dessous:

$$SR_2^{act}(\lambda) = (1 + v_{12}^{(2)}) \cdot SR_2^{meas}(\lambda) - v_{12}^{(2)} \cdot SR_1^{act}(\lambda) = \frac{SR_2^{meas}(\lambda)}{1 - \beta_{12}^{(2)}} - \frac{\beta_{12}^{(2)}}{1 - \beta_{12}^{(2)}} SR_1^{act}(\lambda) \quad (5)$$

9.3.2.6 Ajuster par incrément la valeur de $v_{12}^{(2)}$ et répéter 9.3.2.5 de sorte que la valeur moyenne de SR_2^{act} soit nulle sur la plage $[\lambda_1, \lambda_2]$. Pour ce faire, utiliser un calcul formel de la valeur moyenne de la sensibilité spectrale corrigée, une exactitude suffisante étant toutefois souvent obtenue par un simple examen visuel (de la courbe de la sensibilité spectrale de la deuxième jonction) permettant de constater que la sensibilité spectrale moyenne semble s'approcher de zéro.

9.3.3 Correction de la sensibilité spectrale de la troisième jonction (pour le couplage $J_1 \rightarrow J_2$ et $J_2 \rightarrow J_3$)

9.3.3.1 Cette correction s'applique à la sensibilité spectrale de la jonction inférieure d'un dispositif PV à trois jonctions ou à la sensibilité spectrale de la troisième jonction d'un dispositif PV à quatre jonctions (voire plus). Pour corriger le couplage, les deux constantes $v_{12}^{(3)}$ et $v_{23}^{(3)}$ doivent être déterminées. $SR_2^{act}(\lambda)$ doit être déterminé avant de continuer, en suivant la procédure ci-dessus de correction de la sensibilité spectrale de la deuxième jonction.

9.3.3.2 Identifier une plage de longueurs d'onde $[\lambda_1^T, \lambda_2^T]$ dans la région de la sensibilité de la jonction supérieure, où:

- a) la sensibilité spectrale de la jonction supérieure est proche de sa valeur maximale;
- b) la courbe de sensibilité spectrale est relativement lisse.

9.3.3.3 Pour une longueur d'onde λ_0^T proche du milieu de la plage $[\lambda_1^T, \lambda_2^T]$, calculer:

$$\beta_{12}^{(3)} = \frac{SR_3^{meas}(\lambda_0^T)}{SR_1^{act}(\lambda_0^T)} \quad (6)$$

9.3.3.4 Identifier une plage de longueurs d'onde $[\lambda_1^M, \lambda_2^M]$ dans la région de la sensibilité de la jonction médiane, où:

- a) la sensibilité spectrale de la jonction médiane est proche de sa valeur maximale;
- b) la courbe de sensibilité spectrale est relativement lisse.

9.3.3.5 Pour une longueur d'onde λ_0^M proche du milieu de la plage $[\lambda_1^M, \lambda_2^M]$, calculer:

$$\beta_{23}^{(3)} = \frac{SR_3^{meas}(\lambda_0^M)}{SR_2^{act}(\lambda_0^M)} \quad (7)$$

9.3.3.6 Estimer le premier facteur de correction $\nu_{12}^{(3)}$:

$$\nu_{12}^{(3)} = \frac{\beta_{12}^{(3)}}{\beta_{23}^{(3)}} \quad (8)$$

9.3.3.7 Estimer le deuxième facteur de correction $\nu_{23}^{(3)}$:

$$\nu_{23}^{(3)} = \frac{\beta_{12}^{(3)}}{\nu_{12}^{(3)} - (1 + \nu_{12}^{(3)}) \cdot \beta_{12}^{(3)}} = \frac{\beta_{23}^{(3)}}{1 - (1 + \nu_{12}^{(3)}) \cdot \beta_{23}^{(3)}} = \frac{\beta_{23}^{(3)}}{1 - (\beta_{23}^{(3)} + \beta_{12}^{(3)})} \quad (9)$$

9.3.3.8 Calculer la courbe $SR_3^{act}(\lambda)$ de la troisième jonction corrigée grâce à la formule (10) ci-dessous:

$$SR_3^{act}(\lambda) = (1 + \nu_{23}^{(3)} + \nu_{12}^{(3)} \nu_{23}^{(3)}) \cdot SR_3^{meas}(\lambda) - \nu_{23}^{(3)} \cdot SR_2^{act}(\lambda) - \nu_{12}^{(3)} \nu_{23}^{(3)} \cdot SR_1^{act}(\lambda) \quad (10)$$

9.3.3.9 Ajuster par incrément les valeurs de $\nu_{12}^{(3)}$ et $\nu_{23}^{(3)}$, et répéter 9.3.3.8 de sorte que la valeur moyenne de SR_3^{act} soit nulle sur les plages $[\lambda_1^T, \lambda_2^T]$ et $[\lambda_1^M, \lambda_2^M]$. Pour ce faire, utiliser comme précédemment un calcul formel des valeurs moyennes de la sensibilité spectrale corrigée, une exactitude suffisante étant toutefois souvent obtenue par un simple examen visuel permettant de constater que la sensibilité spectrale semble être nulle dans les deux plages de longueurs d'onde.

9.3.4 Correction de la sensibilité spectrale de la quatrième jonction (ou jonction supérieure)

La sensibilité spectrale de la quatrième jonction (ou jonction supérieure) peut être corrigée selon une exactitude raisonnable en ignorant les effets de la ou des jonctions supérieures et en ne tenant compte que des couplages issus des deux jonctions précédentes.

Pour la quatrième jonction

- Corriger la sensibilité spectrale de la deuxième jonction et de la troisième jonction comme indiqué ci-dessus (9.3.2 et 9.3.3).
- Suivre de nouveau la procédure pour la troisième jonction, mais en augmentant de 1 les indices inférieurs et les indices supérieurs.

La correction de la sensibilité spectrale des jonctions supérieures est une extension directe de cette procédure.

Voir la bibliographie pour de plus amples informations.

10 Rapport

A l'issue de la procédure, un rapport certifié des mesurages de la sensibilité spectrale doit être préparé par l'organisme chargé des essais. Chaque certificat ou rapport d'essai doit comporter tous les éléments exigés par l'IEC 60904-8. De plus, les éléments suivants doivent être également inclus et spécifiés pour chaque jonction soumise à l'essai:

- Identification de la pseudolumière appliquée, y compris les longueurs d'onde, les bandes passantes et les éclaircissements;
- Description de la méthode adoptée pour déterminer la tension de polarisation;
- Tension de polarisation externe réellement appliquée;
- Documentation des corrections appliquées, le cas échéant;
- Déclaration de l'incertitude estimée de l'étalonnage ou des résultats d'essai applicables aux procédures de mesure des dispositifs multijonctions.

Bibliographie

M. A. Steiner, S. R Kurtz, J. F. Geisz, W. E. McMahon and J. M. Olson, "Using phase effects to understand measurements of the quantum efficiency and related luminescent coupling in a multijunction solar cell", *IEEE Journal of Photovoltaics*, Vol. 2, No. 4, 2012, pp. 424-433

Myles A. Steiner, John F. Geisz, Tom E. Moriarty, Ryan M. France, William E. McMahon, Jerry M. Olson, Sarah R. Kurtz and Daniel J. Friedman, "Measuring IV curves and subcell photovoltaic currents in the presence of luminescent coupling", *Journal of Photovoltaics*, 3, 879, 2013

M. Meusel, R. Adelhelm, F. Dimroth, A.W. Bett, and W. Warta, *Spectral Mismatch Correction and Spectrometric Characterization of Monolithic III-V Multi-Junction Solar Cells. Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2002, 10(4): pp. 243-255

G. Siefer, C. Baur, and A.W. Bett, "External Quantum Efficiency Measurements of Germanium Bottom Subcells: Measurement Artifacts and Correction Procedures", *Proceedings of the 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 2010, Honolulu, HI pp. 000704 – 07

Y. Hishikawa, Y. Tsuno, K. Kurokawa, "Spectral response measurements of PV modules and multi-junction devices", *Proceedings of 22nd European Photovoltaics Solar Energy Conference*, 2007, Milan, Italy, pp.2765-2769

Y. Tsuno, Y. Hishikawa, K. Kurokawa, "A method for spectral response measurements of various PV modules", *Proceedings of 23rd European Photovoltaics Solar Energy Conference*, 2008, Valencia, Spain, pp.2723-2727

T. Sogabe, A. Ogura, C.-Y. Hung, V. Evstropov, M. Mintairov, M. Shvarts, Y. Okada "Experimental characterization and self-consistent modeling of luminescence coupling effect in III-V multijunction solar cells", *Applied Physics Letters*, 103, 263907, 2013; doi: 10.1063/1.4858970

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

3, rue de Varembé
PO Box 131
CH-1211 Geneva 20
Switzerland

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