

# INTERNATIONAL STANDARD

## NORME INTERNATIONALE



**Measurement procedures for materials used in photovoltaic modules –  
Part 1-4: Encapsulants – Measurement of optical transmittance and calculation  
of the solar-weighted photon transmittance, yellowness index, and UV cut-off  
wavelength**

**Procédures de mesure des matériaux utilisés dans les modules  
photovoltaïques –  
Partie 1-4: Encapsulants – Mesurage du facteur de transmission optique  
et calcul du facteur de transmission photonique à pondération solaire,  
de l'indice de jaunissement et de la fréquence de coupure des UV**



## THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2020 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  
[info@iec.ch](mailto:info@iec.ch)  
[www.iec.ch](http://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 corrigendum or an amendment might have been published.

#### IEC publications search - [webstore.iec.ch/advsearchform](http://webstore.iec.ch/advsearchform)

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](http://webstore.iec.ch/justpublished)

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

#### IEC Customer Service Centre - [webstore.iec.ch/csc](http://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: [sales@iec.ch](mailto:sales@iec.ch).

#### Electropedia - [www.electropedia.org](http://www.electropedia.org)

The world's leading online dictionary on electrotechnology, containing more than 22 000 terminological entries 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](http://std.iec.ch/glossary)

67 000 electrotechnical terminology entries in English and French extracted from the Terms and definitions clause of IEC publications issued between 2002 and 2015. Some entries have been collected from earlier publications of IEC TC 37, 77, 86 and CISPR.

### 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.

#### Recherche de publications IEC -

[webstore.iec.ch/advsearchform](http://webstore.iec.ch/advsearchform)

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](http://webstore.iec.ch/justpublished)

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

#### Service Clients - [webstore.iec.ch/csc](http://webstore.iec.ch/csc)

Si vous désirez nous donner des commentaires sur cette publication ou si vous avez des questions contactez-nous: [sales@iec.ch](mailto:sales@iec.ch).

#### Electropedia - [www.electropedia.org](http://www.electropedia.org)

Le premier dictionnaire d'électrotechnologie en ligne au monde, avec plus de 22 000 articles terminologiques 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](http://std.iec.ch/glossary)

67 000 entrées terminologiques électrotechniques, en anglais et en français, extraites des articles Termes et définitions des publications IEC parues entre 2002 et 2015. Plus certaines entrées antérieures extraites des publications des CE 37, 77, 86 et CISPR de l'IEC.

# INTERNATIONAL STANDARD

## NORME INTERNATIONALE



**Measurement procedures for materials used in photovoltaic modules –  
Part 1-4: Encapsulants – Measurement of optical transmittance and calculation  
of the solar-weighted photon transmittance, yellowness index, and UV cut-off  
wavelength**

**Procédures de mesure des matériaux utilisés dans les modules  
photovoltaïques –  
Partie 1-4: Encapsulants – Mesurage du facteur de transmission optique  
et calcul du facteur de transmission photonique à pondération solaire,  
de l'indice de jaunissement et de la fréquence de coupure des UV**

INTERNATIONAL  
ELECTROTECHNICAL  
COMMISSION

COMMISSION  
ELECTROTECHNIQUE  
INTERNATIONALE

ICS 27.160

ISBN 978-2-8322-8968-6

**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.**

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62788-1-4:2016+AMD1:2020 CSV

## REDLINE VERSION

## VERSION REDLINE



**Measurement procedures for materials used in photovoltaic modules –  
Part 1-4: Encapsulants – Measurement of optical transmittance and calculation  
of the solar-weighted photon transmittance, yellowness index, and UV cut-off  
wavelength**

**Procédures de mesure des matériaux utilisés dans les modules  
photovoltaïques –  
Partie 1-4: Encapsulants – Mesurage du facteur de transmission optique  
et calcul du facteur de transmission photonique à pondération solaire,  
de l'indice de jaunissement et de la fréquence de coupure des UV**

## CONTENTS

|                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FOREWORD .....                                                                            | 3  |
| 1 Scope .....                                                                             | 5  |
| 2 Normative references .....                                                              | 5  |
| 3 Terms and definitions .....                                                             | 6  |
| 4 Principle .....                                                                         | 7  |
| 5 Apparatus .....                                                                         | 7  |
| 6 Test specimens .....                                                                    | 7  |
| 6.1 Nominal (and unweathered) transmittance to the cell .....                             | 7  |
| 6.2 Weathering studies .....                                                              | 8  |
| 6.3 Glass for superstrates/substrates .....                                               | 9  |
| 6.4 Number of specimens .....                                                             | 9  |
| 6.5 <del>Preconditioning</del> Conditioning of specimens .....                            | 9  |
| 7 Measurement procedure .....                                                             | 9  |
| 7.1 General .....                                                                         | 9  |
| 7.2 Specimen preparation .....                                                            | 10 |
| 7.3 Instrument calibration (baseline measurements) .....                                  | 10 |
| 7.4 Specimen measurements .....                                                           | 10 |
| 7.5 Witness measurements .....                                                            | 10 |
| 7.5.1 Witness specimen(s) .....                                                           | 11 |
| 7.5.2 Procedure for the witness specimen prior to the test specimen(s) .....              | 11 |
| 7.5.3 Measurement of the test specimen(s) .....                                           | 11 |
| 7.5.4 Procedure for the witness specimen after the test specimen(s) .....                 | 11 |
| 8 Calculation and expression of results .....                                             | 11 |
| 8.1 Post-processing of data .....                                                         | 11 |
| 8.2 Calculation of weighted transmittance .....                                           | 12 |
| 8.3 Calculation of the Yellowness Index ( $YI$ ) .....                                    | 12 |
| 8.4 Calculation of the UV cut-off wavelength .....                                        | 12 |
| 9 Uncertainty of measurements .....                                                       | 13 |
| 10 Test report .....                                                                      | 13 |
| Annex A (informative) Advanced analysis of transmittance (absorption coefficients) .....  | 15 |
| Annex B (informative) Applying the quantum efficiency of a specific cell technology ..... | 17 |
| Bibliography .....                                                                        | 19 |
| Table 1 – Details of the solar weight transmittance parameters .....                      | 12 |

## INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

### MEASUREMENT PROCEDURES FOR MATERIALS USED IN PHOTOVOLTAIC MODULES –

#### Part 1-4: Encapsulants – Measurement of optical transmittance and calculation of the solar-weighted photon transmittance, yellowness index, and UV cut-off wavelength

#### 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.

**This consolidated version of the official IEC Standard and its amendment has been prepared for user convenience.**

**IEC 62788-1-4 edition 1.1 contains the first edition (2016-09) [documents 82/1148/FDIS and 82/1165/RVD] and its amendment 1 (2020-10) [documents 82/1767/FDIS and 82/1791/RVD].**

**In this Redline version, a vertical line in the margin shows where the technical content is modified by amendment 1. Additions are in green text, deletions are in strikethrough red text. A separate Final version with all changes accepted is available in this publication.**

International Standard IEC 62788-1-4 has been prepared by IEC technical committee 82: Solar photovoltaic energy systems.

A list of all parts in the IEC 62788 series, published under the general title *Measurement procedures for materials used in photovoltaic modules*, 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 the base publication and its amendment 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.

**IMPORTANT – The 'colour inside' logo on the cover page of this publication indicates that it contains colours which are considered to be useful for the correct understanding of its contents. Users should therefore print this document using a colour printer.**

## MEASUREMENT PROCEDURES FOR MATERIALS USED IN PHOTOVOLTAIC MODULES –

### Part 1-4: Encapsulants – Measurement of optical transmittance and calculation of the solar-weighted photon transmittance, yellowness index, and UV cut-off wavelength

#### 1 Scope

This part of IEC 62788 provides a method for measurement of the optical transmittance of encapsulation materials used in photovoltaic (PV) modules. The standardized measurements in this procedure quantify the expected transmittance of the encapsulation to the PV cell. Subsequent calculation of solar-weighted transmittance allows for comparison between different materials. The results for unweathered material may be used in an encapsulation manufacturer's datasheets, in manufacturer's material or process development, in manufacturing quality control (material acceptance), or applied in the analysis of module performance.

This measurement method can also be used to monitor the performance of encapsulation materials after weathering, to help assess their durability. The standardized measurements are intended to examine an interior region within a PV module, e.g., without the effects of oxygen diffusion ~~around the edges~~ at the periphery of the cells. Subsequent calculation of yellowness index allows for quantification of durability and consideration of appearance. The change in transmittance, yellowness index, and ultraviolet (UV) cut-off wavelength may be used by encapsulation or module manufacturers to compare the durability of different materials.

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

ISO 291:2008, *Plastics – Standard atmospheres for conditioning and testing*

ISO 11664-1:2007, *Colorimetry – Part 1: CIE standard colorimetric observers*

ISO 11664-2:2007, *Colorimetry – Part 2: CIE standard illuminants*

ISO 13468-2:1999, *Plastics – Determination of the total luminous transmittance of transparent materials – Part 2: Double-beam instrument*

ISO 17223:2014, *Plastics – Determination of yellowness index and change in yellowness index*

ASTM E424-71:2007, *Standard test methods for solar energy transmittance and reflectance (Terrestrial) of sheet material*

### 3 Terms and definitions

For the purposes of this document, the following terms and definitions 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>

NOTE In cases where definitions already exist, refer to IEC TS 61836. Calculations related to these definitions are given in Clause 8.

#### 3.1

##### **solar-weighted transmittance of photon irradiance**

proportion of the solar spectral photon irradiance ( $E_{p\lambda}$ ,  $\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1}$ ) optically transmitted through the specimen, throughout the range of the terrestrial solar spectrum (280 nm to 2 500 nm) (see Table 1)

Note 1 to entry: The photon irradiance ( $E_{p\lambda}$ ,  $\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1}$ ) accounts for the wavelength-specific energy of the optical flux and should not be confused with spectral irradiance ( $E_{\lambda}$ ,  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1}$ ).

#### 3.2

##### **representative solar-weighted transmittance of photon irradiance**

proportion of the solar spectral photon irradiance ( $E_{p\lambda}$ ,  $\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1}$ ) optically transmitted through the specimen, throughout the range of the terrestrial solar spectrum (300 nm to 1 250 nm) (see Table 1)

Note 1 to entry: In the case of a PV device, the representative solar-weighted transmittance of photon irradiance is defined throughout the range of the spectrum utilized by a representative PV device (which may not include wavelengths as low as 280 nm or as great as 2 500 nm).

#### 3.3

##### **UV cut-off wavelength**

$\lambda_{\text{cUV}}$

wavelength of light below which the encapsulation is considered optically absorbing and above which the encapsulation is considered transmitting

Note 1 to entry: In this procedure, the absolute transmittance of 10 % (corresponding to the optical absorbance of 1) is considered as the threshold of the UV cut-off wavelength. As described further in [9]<sup>1</sup>, the UV cut-off wavelength may also be used to quantify the effects of weathering.

#### 3.4

##### **weathering**

process of subjecting specimens to environmental conditions that could include ultra-violet radiation, temperature, humidity, and ozone

Note 1 to entry: Weathering may occur in artificial or natural environments. Weathering could occur at the nominal (field) or an accelerated rate.

#### 3.5

##### **yellowness index**

$YI$

calculated value identifying the yellowness of the test specimen perceived by a human observer (see ASTM E313-10)

Note 1 to entry:  $YI$  may be used to quantify the effects of weathering.

<sup>1</sup> Numbers in square brackets refer to the Bibliography.

## 4 Principle

The total spectral transmittance of laminated specimens, containing encapsulation material, shall be measured using a spectrophotometer equipped with an integrating sphere. Solar-weighted transmittance, yellowness index, and UV cut-off wavelength will be subsequently calculated from the transmittance measurements.

The transmittance measured using this procedure may be used in a more advanced optical analysis to improve the accuracy of PV performance analysis or distinguish between different encapsulation materials, as described in Annex A. The transmittance measured using this procedure may be used to estimate module performance (current yield) if the quantum efficiency of the PV cell is known, as described in Annex B. The method does not attempt to account for variations in transmittance with the angle of incidence, which may vary with time of day, sky conditions, and geometry of the module, especially if optical concentration is used.

## 5 Apparatus

The test instrument shall consist of a double beam spectrophotometer equipped with an integrating sphere. A single beam spectrophotometer may be used if the port reflectance can be properly accounted for, as in Annex A and [2]. Details regarding the construction and configurations of the test instrument may be found in ISO 13468-2 or ASTM E424-71. A measurement range of at least 280 nm to 2 500 nm is required for calculation of the solar-weighted transmittance using the AM1.5 global spectrum as in IEC 60904-3. A wavelength increment no larger than 1 nm is preferred for the measurement, however increments up to 5 nm are permitted with linear interpolation to 1 nm.

An integrating sphere of at least 100 mm in diameter with a port area of < 5 %, as in [11], is recommended to reduce the error in the measurement. The port area as in [9] should not exceed 13 %.

## 6 Test specimens

### 6.1 Nominal (and unweathered) transmittance to the cell

Specimens shall be constructed using a laminate structure of glass/encapsulation, as described in Annex A and [42].

The solar-weighted transmittance and representative solar-weighted transmittance, as calculated in Clause 8, may be used for the purpose of reporting on an encapsulation manufacturer's datasheet.

The specimens shall contain an examination region free from visible flaws including: scratches, pits, sink marks, bubbles, or other imperfections. The examination region shall be at least 50 % larger in diameter than the measurement area of the test instrument.

NOTE 1 A spot size of 1 cm × 1 cm is common in many commercial spectrophotometer instruments. Use of specimens at least 2 to 3 times this size will improve uniformity (resulting from fabrication) and handling (during measurement).

The size (length and width) should be adequate to allow the specimen to fit inside the test instrument.

The nominal thickness of the ~~encapsulation~~ encapsulant specimens shall be equal to the thickness intended for use in PV modules.

Specimens should be cured (if applicable) according to the manufacturer's specification and using a process as similar as possible to the method used in the intended manufacturing process.

The thickness of the encapsulation portion of the test specimen shall be measured after its preparation. The thickness shall be taken as the average of three measurements obtained at different locations on the test region of the specimen.

Glass plates shall be parallel with minimal edge pinch or edge flare. I.e. the encapsulation thickness at any of the corners shall not be more than 10 % different than that in the centre of the sample. In a typical bag laminator this will require the use of a frame around the samples during lamination, but any other means of accomplishing this specification is acceptable.

The back surface of the specimens (the exposed encapsulation intended to face to the integrating sphere) shall not be intentionally textured.

For additional resolution to more accurately distinguish between materials, subsequent studies may utilize a thicker encapsulation layer that may be analysed to determine the optical attenuation coefficient as described in Annex A.

If the encapsulation material is intended to be used with superstrates other than glass, the same procedure may be used in a subsequent study. Specimens using polymeric superstrates may be prone to optical polarization occurring within the instrument. As in [9] and [12], a depolarizer should be used with the instrument to minimize the effects of polarization.

NOTE 2 The effect of haze in specimens prone to optical haze can be mitigated through the use of a diffusing film, as described in [13].

## 6.2 Weathering studies

A glass/encapsulation/glass laminate specimen geometry is recommended.

The size (length and width) should be adequate to allow the specimen to fit inside the test instrument.

~~As described in [14], the minimum size of 5 cm × 5 cm is recommended for weathering specimens based on previous examinations of poly (ethylene-co-vinyl acetate).~~

The minimum size of 7,5 cm × 7,5 cm is recommended for weathering specimens based on previous examinations of poly (ethylene-co-vinyl acetate).

Large specimens are preferred in weathering studies, because a test region may be distinguished, where the diffusion of oxygen or moisture is limited.

Other geometries may be used with this procedure to evaluate the effects of weathering. For example, a permeable polymeric backsheet facilitates the examination of moisture ingress. Some PV modules make use of an edge seal to reduce moisture permeation.

Separate “blank” pieces of superstrate or substrate may be weathered with the test specimens to quantify the degradation of those components.

The specimens shall contain an examination region free from visible flaws including: scratches, pits, sink marks, bubbles or other imperfections. The examination region shall be at least 50 % larger in diameter than the measurement area of the test instrument.

The nominal thickness of the ~~encapsulation~~ encapsulant specimens shall be as intended for use in the PV module. Specimens should be cured (if applicable) according to the manufacturer's specification and as similar as possible to the method used in the intended manufacturing procedure.

The thickness of the encapsulation in the laminate may be controlled by inserting a removable material around the specimen perimeter.

### 6.3 Glass for superstrates/substrates

Measurements of the nominal (unweathered) transmittance to the cell for the purpose of encapsulation manufacturer's datasheets shall be performed using  $(3 \pm 0,2)$  mm thick silica glass. The glass shall have smooth, defect-free surfaces that are sufficiently flat and parallel such that the diffuse component of transmitted light is less than 1 % between 280 nm and 2 500 nm.

The solar-weighted transmittance of photon irradiance of silica glass, which may be used to verify that the composition of the glass is appropriate, is approximately  $(93 \pm 1)$  % between 280 nm and 2 500 nm, because the reduction in transmittance comes from reflections at the surfaces. The UV cut-off wavelength for silica should be less than 225 nm. As in [1] and [12], the transmittance of the glass should be greater than 90 % at 280 nm.

The glass shall not be coated or contain antireflective layers. The glass shall not be intentionally textured.

Subsequent examination beyond that intended for the encapsulation material datasheet (including performance and weathering), such as for the purpose of quality control for production monitoring, may be performed according to this procedure using other superstrate and/or substrate materials that can incorporate other optical features, e.g., antireflective coatings, surface texture, and untempered soda-lime PV glass.

The process of solarization, where a redox reaction of trace impurities affects the UV cut-off wavelength and corresponding range of transmittance, can occur if glass other than silica is used [14]. It is therefore advised for weathering studies to UV condition substrate and superstrate materials, other than silica, prior to lamination.

NOTE Silica glass is more durable than soda-lime glass and will better resist glass corrosion in accelerated tests.

### 6.4 Number of specimens

A minimum of 3 replicates shall be used for the determination of the transmittance to the cell or in weathering studies. Optical characteristics, including transmittance,  $YI$ , and the UV cut-off wavelength shall be subsequently calculated using the average of the three separate specimens, with the range of the measurements indicated to identify their variability.

### 6.5 ~~Preconditioning~~ Conditioning of specimens

Specimens used for the purpose of datasheet reporting shall be maintained at  $(23 \pm 2)$  °C,  $(50 \pm 5 \text{ } 10)$  % RH for at least 24 h, as ~~recommended~~ specified per Class 2 in ISO 291, prior to optical measurement.

The use of elevated temperature and humidity conditions in a weathering study may result in a supersaturated moisture condition within specimens, affecting their optical transmittance when they are returned to the laboratory ambient condition. In such cases, specimen conditioning, including a controlled environmental chamber, may be applied to prevent spurious effects, e.g., optical haze or moisture related absorptance. Specimen-condition effects may be verified using periodic measurements. Refer to the weathering test procedure for any specific details related to specimen conditioning and storage intermittent to weathering.

## 7 Measurement procedure

### 7.1 General

Transmittance measurements shall be performed in accordance with the procedure in ISO 13468-2.

## 7.2 Specimen preparation

Prior to measurement, specimens should be free of dust, grease or other contaminants. Specimens may be wiped with a solution of deionized water and mild soap for cleaning prior to measurement using a cleanroom wipe or lint free cloth. The specimens and instrument should be in thermal equilibrium prior to measurement.

## 7.3 Instrument calibration (baseline measurements)

Allow the instrument lamp to adequately equilibrate after it has been lighted, observing the typical warm-up period, e.g., 15 min or as recommended by the instrument manufacturer. Perform the correction scan(s) to compensate for the instrument baseline signal.

The 100 % transmittance baseline measurement should be performed in air, with no superstrate, specimen, or substrate material present. The 0 % transmittance baseline measurement should also be performed, if possible.

Periodic measurement of the baseline is recommended to minimize instrument drift and ensure the measured values are accurate. The instrument drift occurring over an extended measurement session may be instrument specific.

It is recommended to maintain the instrument drift below 0,05 % to minimize the uncertainty of measurement (Clause 9). The instrument drift should be considered in the instrument bias when the uncertainty of measurements is determined.

## 7.4 Specimen measurements

Perform the transmittance measurements for the test specimens over the wavelength range of at least 280 nm to 2 500 nm using a 1 nm increment.

Linear interpolation to a 1 nm increment may be used when only a coarser measurement increment (maximum of 5 nm) is available. The error associated with a coarser increment may be more influential at shorter wavelengths (where  $YI$  and the UV cut-off wavelength are determined) than at longer wavelengths (where only the solar-weighted transmittance is affected). When applied, the use of linear interpolation should be noted in the test report.

Discontinuities associated with changes in the optical components (including detector, light source, and/or monochromator) may occur during the measurement. Such discontinuities can be minimized via the instrument settings.

It may be useful to extend the range of measurement in weathering durability studies to provide insight into the results. For example, by measuring UV wavelengths as low as 200 nm, the integrity of UV absorbers and stabilizers can be confirmed from the UV cut-off wavelength.

The spectral bandwidth of the measurement should be less than or equal to the increment of the measurement, i.e., 1 nm or 5 nm.

## 7.5 Witness measurements

Perform the transmittance measurements on a witness specimen at the beginning of each measurement session to ensure proper operation of the instrument and minimize the measurement error. Perform the transmittance measurements of any witness specimens using the same procedure applied to the test specimen(s). The witness specimens may include a traceable standard specimen, laboratory working witness specimen, or the silica superstrate/substrate material.

### 7.5.1 Witness specimen(s)

The witness specimens may include a traceable standard specimen, laboratory working witness specimen, or the silica superstrate/substrate material. Witness specimen(s) for control measurements may also include a non-weathered glass working witness specimen of the same construction used in module representative test specimen(s) or reference (glass or polymeric superstrate) specimen(s). When not being used for control measurements, a working witness specimen shall be stored in the dark at 23 °C and 50 % humidity as specified per Class 2 in ISO 291.

### 7.5.2 Procedure for the witness specimen prior to the test specimen(s)

After instrument equilibration and baselining, perform the transmittance measurements on a witness specimen at the beginning of each measurement session to ensure proper operation of the instrument and minimize the measurement error. Perform the transmittance measurements of the witness specimen using the same procedure that will be applied to the test specimen(s).

The verification wavelengths for the working reference shall be  $\pm 50$  nm from the instrument transitions for the source, detector, and gratings. Because of the limitations of measurement, including noise from scattering at short wavelengths, the verification wavelengths shall not extend below 225 nm. In the case of many commercial instruments where the source, detector, and grating transitions occur at 350 nm, 800 nm, and 800 nm, respectively, the verification wavelengths should include the ranges 250 nm to 300 nm, 400 nm to 750 nm and 850 nm to 2500 nm (in the case of standard measurements) or 225 nm to 300 nm, 400 nm to 750 nm and 850 nm to 2 500 nm (in the case of measurements of weathered specimens).

The transmittance at each of the verification wavelengths should be within 0,25 % of the known transmittance (or laboratory running average) for the witness specimen. If the transmittance at each verification wavelength is not within 0,25 % of the known transmittance, the instrument baseline shall be performed again (including as many as three times) and the witness specimen shall be remeasured. If the transmittance at each wavelength continues to be greater than 0,25 % of the known transmittance, the instrument should be maintained or repaired.

### 7.5.3 Measurement of the test specimen(s)

After the witness specimen has been verified, the test specimen(s) shall be measured.

### 7.5.4 Procedure for the witness specimen after the test specimen(s)

After the test specimen(s) have been measured, perform the transmittance measurements on a witness specimen at the end of each measurement session to ensure proper operation of the instrument through the measurement session. Perform the transmittance measurements of the witness specimen using the same procedure that will be applied to the test specimen(s). The transmittance at each of the verification wavelengths should be within 0,25 % of the known transmittance (or laboratory running average) for the witness specimen. If the transmittance at each verification wavelength is not within 0,25 % of the known transmittance, the measured data for the test specimen(s) shall be considered invalid and the test specimen(s) shall be measured again in a subsequent session.

## 8 Calculation and expression of results

### 8.1 Post-processing of data

The measurements obtained from three separate specimens shall be averaged at each wavelength increment. ~~The range (difference of the maximum and minimum) shall also be determined at each wavelength increment.~~ The variability shall be reported for each characteristic (weighted transmittance, yellowness index, and UV cut-off wavelength) as the range (difference of the maximum and minimum measurements) for the three specimens.

## 8.2 Calculation of weighted transmittance

The solar-weighted transmittance may be calculated from formula (1):

$$\tau_{\text{sw}} = \frac{\int \tau[\lambda] E_{\text{p}\lambda}[\lambda] d\lambda}{\int E_{\text{p}\lambda}[\lambda] d\lambda} \quad (1)$$

Where

- $\tau_{\text{sw}}$  refers to the solar-weighted transmittance (%);
- $\tau$  is the measured transmittance of the specimen (%);
- $\lambda$  is the wavelength of light (nm); and
- $E_{\text{p}\lambda}$  is the reference global spectral photon irradiance (as given in IEC 60904-3).

The details for the calculation of the various solar-weighted transmittance parameters are identified in Table 1. The parameters include: the “solar-weighted” transmittance, which may be applied generally, based on a broad solar spectrum; and the “representative solar-weighted” transmittance, which may be applied for most commercially available single junction terrestrial PV cells (including silicon, cadmium telluride, copper indium gallium selenide, and gallium arsenide) based on their useable wavelength range. The solar-weighted transmittance (as well as  $YI$ ) obtained from the spectrophotometer measurements (1 nm interval) shall be calculated using a discretized sum, by means of the modified trapezoidal integration technique, as in IEC 60904-3. The denominator for formula (1) is specified in Table 1 for the purpose of verification, based on IEC 60904-3.

**Table 1 – Details of the solar weight transmittance parameters**

| Parameter                                                                                                                                                                                                        | Symbol              | Lower bound wavelength<br>nm | Upper bound wavelength<br>nm | $\int E_{\text{p}\lambda}[\lambda] d\lambda$<br>$\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| “solar-weighted” transmittance                                                                                                                                                                                   | $\tau_{\text{sw}}$  | 280                          | 2 500                        | $4,15502132187479 \times 10^{21}$                                                   |
| “representative solar-weighted” transmittance                                                                                                                                                                    | $\tau_{\text{rsw}}$ | 300                          | 1 250                        | $3,03000915425 \times 10^{21}$                                                      |
| NOTE The solar-weighted spectral transmittance may be more specifically applied to estimate module performance, i.e., current yield, if the quantum efficiency of the PV cell is known, as described in Annex B. |                     |                              |                              |                                                                                     |

## 8.3 Calculation of the Yellowness Index ( $YI$ )

$YI$  shall be calculated according to the procedure in ISO 17223. The three tristimulus coefficients shall be determined using the CIE Standard D65 Illuminant spectrum (as in ISO 11664-2), and the CIE 1964 XYZ colour space (for a human observer with a 10° field of view, as in ISO 11664-1).  $YI$  shall be calculated for a wavelength increment, e.g., 1 nm, consistent with the measured transmittance data.

NOTE Additional details related to the  $YI$  may be found in ASTM E313-10 and ASTM E308-08.

## 8.4 Calculation of the UV cut-off wavelength

The UV cut-off wavelength,  $\lambda_{\text{cUV}}$ , shall be determined as the longest wavelength (linearly interpolated to the nearest tenth of a nm) in the UV range (where  $\lambda \leq 400$  nm) where the transmittance equals 10 % or less.

In cases where the UV cut-off wavelength is known to be less than 280 nm, the range of measurement should be extended below 280 nm to quantify its specific value.

## 9 Uncertainty of measurements

The uncertainty associated with the randomness of measurement may be estimated from:

$$\sigma_{\text{ran}} = \frac{\int \Delta\tau[\lambda] E_{\text{p}\lambda}[\lambda] d\lambda}{\int E_{\text{p}\lambda}[\lambda] d\lambda} = S_n \sqrt{\sum_{i=1}^n (\sigma_{\tau}[\lambda])^2} \quad (2)$$

where

- $\sigma_{\text{ran}}$  represents the random variation of measurement;
- $\Delta\tau$  is the uncertainty of the transmittance measurement;
- $\lambda$  is the wavelength of light;
- $E_{\text{p}\lambda}$  is the reference spectral photon irradiance;
- $S_n$  is the coefficient for Student's t-distribution (3,18245 for 3 specimens at the 95 % confidence interval), and
- $\sigma_{\tau}$  is the standard deviation of the transmittance measurements (at each wavelength increment).

The final (reported) uncertainty may be estimated from:

$$\sigma_{\text{tot}} = \sqrt{(\sigma_{\text{inst}})^2 + (\sigma_{\text{ran}})^2} \quad (3)$$

where

- $\sigma_{\text{tot}}$  represents the total uncertainty;
- $\sigma_{\text{inst}}$  is the instrument bias (accounting for the particular make of the instrument, the instrument settings (including integration time), as well as instrument drift); and
- $\sigma_{\text{ran}}$  is the random variation of measurement (the accuracy of the instrument as well as the specimen variability).

$\sigma_{\text{ran}}$  may be evaluated for the test instrument from the average of 10 measurements (multiplied by the corresponding  $S_n$  value of 2,22814) with no specimen present (nominal transmittance of 100 %). Similarly,  $\sigma_{\text{inst}}$  may be evaluated for the test instrument from a series of successive periodic measurements with no specimen present, with the rate of drift being determined from a trendline fit. While  $\sigma_{\text{tot}}$  may vary with the lamp age, a single representative evaluation is expected to adequately represent the test instrument used within a particular test laboratory.

Calculate the uncertainty for other test results (such as YI) using the same method as for transmittance, *i.e.*, the method of propagation of error. These estimates should also account for the uncertainty associated with instrument bias in addition to random error.

The repeatability and reproducibility of the method, including solar-weighted transmittance, yellowness index, and the UV cut-off wavelength, are described in Annex A and [12].

## 10 Test report

A report of the tests shall be prepared by the test agency. The report shall contain the detail specification for the specimens. 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 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 tested, including specimen type, specimen thickness (and its range of variation), the specimen size (length and width), the superstrate/substrate material(s) and their characteristics;
- f) characterization and ~~condition~~ state of the test item, including the method and details of specimen preparation (including curing, lamination, or similar processing if applicable) and ~~preconditioning~~ conditioning;
- g) date of receipt of test item and date(s) of test, where appropriate;
- h) identification of test method used; including the make and model of the spectrophotometer and the integrating sphere;
- i) reference to sampling procedure, where relevant;
- j) any deviations from, additions to, or exclusions from, the test method and any other information relevant to a specific test, such as environmental conditions; and the procedure(s) and condition(s) used for weathering and any ~~preconditioning~~ conditioning conducted prior to measurements;
- k) measurements, examinations and derived results supported by tables, graphs, sketches and photographs as appropriate including the complete set of the tabulated average transmittance values and the corresponding range of the averaged values; the estimated uncertainty of the transmittance measurement (instrument); the averaged solar-weighted transmittance of photon irradiance and the corresponding range of the averaged values; the averaged representative solar-weighted transmittance of photon irradiance and the corresponding range of the averaged values (as well as the wavelength range considered); the UV cut-off wavelength and its uncertainty; and any failures observed;
- l) the yellowness index and its uncertainty (which should be determined after each weathering interval in addition to its original value in the case of weathering experiments);
- m) a statement of the estimated uncertainty of the test results (where relevant); the measurement of the witness specimen (if utilized) and its deviation from its witness values. When applicable, the details of the witness specimen (such as its preparation, composition, and thickness) shall be specified;
- n) 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;
- o) where relevant, a statement to the effect that the results relate only to the items tested;
- p) a statement that the certificate or report shall not be reproduced except in full, without the written approval of the laboratory.

## Annex A (informative)

### Advanced analysis of transmittance (absorption coefficients)

The measurements described in this procedure may be supplemented to allow for a more rigorous optical analysis. The determination of the optical attenuation coefficient allows the optical transmittance to be generalized and extended to any possible configuration. Such analysis may be used to improve the accuracy of PV performance analysis, account for changes in the module design (such as the thickness of the encapsulation), or to distinguish between different encapsulation materials. Characteristics including transmittance,  $YI$ , and the UV cut-off wavelength strongly vary with the specimen thickness; the methods described in this annex may therefore be used to standardize measurements to a representative thickness.

Optical transmittance also depends upon the material layers present within the specimen. A more rigorous analysis, summarized in this annex, may be used to consider loss of transmitted light, including the reflectance at material interfaces.

Hemispherical reflectance and transmittance data may be used to calculate the attenuation coefficient for a minimally absorbing material. The terminology “low absorbing” implies that light reflected from the rear interface is not fully absorbed prior to reaching the front interface. For this method, the specimen is ideally flat, free standing, of uniform known thickness, and minimally scattering, i.e., minimal optical haze. The method is based on work presented in [1]. As described in [2] and [3], the absorbance is first determined using the formula:

$$\alpha_c[\lambda] = 1 - \tau_m[\lambda] - \rho_m[\lambda] \quad (\text{A.1})$$

Nomenclature in the formula includes:  $\alpha_c$ , the calculated optical absorbance (normalized intensity);  $\tau_m$ , the measured optical transmittance (normalized intensity);  $\rho_m$ , the measured optical reflectance (normalized intensity); and  $\lambda$ , the wavelength (m). The measured reflectance should be corrected to an absolute scale (using a certified calibrated reflectance specimen) for spectrophotometers that report relative reflectance measurements. The absolute reflectance of the specimen may be determined if its measured relative reflectance is multiplied by the reflectance of a calibrated specimen. The measured transmittance and measured reflectance include the effects of multiple passes of light, occurring as the result of internal reflections, as described in [4].

A subsequent analysis of the measured reflectance and transmittance data may be used to account for the internal reflections, in order to represent a single optical pass through the material. The reflections occurring at the air/sample interface as well as the absorbance for a single pass (occurring normal to the specimen), can be determined from the measured values using the formulas:

$$\rho_i[\lambda] = \frac{-\left(1 + (\tau_m[\lambda])^2 + 2\rho_m[\lambda] - (\rho_m[\lambda])^2\right) + \sqrt{\left(1 + (\tau_m[\lambda])^2 + 2\rho_m[\lambda] - (\rho_m[\lambda])^2\right)^2 + 4(\rho_m[\lambda] - 2)\rho_m[\lambda]}}{2(\rho_m[\lambda] - 2)} \quad (\text{A.2})$$

$$\alpha_{sp}[\lambda] = \frac{\rho_i[\lambda]\alpha_c[\lambda] - \alpha_c[\lambda]}{\rho_i[\lambda]\alpha_c[\lambda] + \rho_i[\lambda] - 1} \quad (\text{A.3})$$

$$\psi[\lambda] = -\frac{1}{z} \ln(1 - \alpha_{sp}[\lambda]) \quad (\text{A.4})$$

New nomenclature in the formulas includes:  $\rho_i$ , the reflectance at the interfaces (normalized intensity);  $\alpha_{sp}$ , the absorptance occurring for a single optic pass through the specimen (normalized intensity);  $\psi$ , the attenuation coefficient (typically represented as “ $\alpha$ ” in Beer’s law,  $m^{-1}$ ); and  $z$ , the specimen thickness (m).

After determining the attenuation coefficient, it is possible to predict the transmittance for a specimen of arbitrary thickness using the “single pass transmittance”, indicated using the subscript –sp, considered here to represent a laminated silica glass superstrate/encapsulation geometry:

$$\tau_{sp}[\lambda] = [1 - \rho'[\lambda]] e^{-\psi_g[\lambda] \cdot z_g} e^{-\psi_p[\lambda] \cdot z_p} \quad (A.5)$$

$$\rho' = \frac{(n_a - n_g)^2 + (k_a - k_g)^2}{(n_a + n_g)^2 + (k_a + k_g)^2} \quad (A.6)$$

$$\psi = \frac{4\pi k}{\lambda} \quad (A.7)$$

New nomenclature in the formulas includes:  $\tau_{sp}$ , the estimated single pass transmittance (normalized intensity);  $\rho'$ , the reflectance at the interface between air and glass (normalized intensity);  $n$ , the real component of the refractive index (unitless);  $k$ , the extinction coefficient (unitless); and  $\pi$ , the mathematical constant, 3,142. The subscript -g represents the glass; -p represents the encapsulation; and -a represents air. The analysis here assumes that the reflections occurring at the glass/encapsulation interface are negligible at all wavelengths. Then for an air/glass system,  $n_a$ , the refractive index for air, approximately equals 1 and the  $k_a$ , the extinction coefficient for air, approximately equals 0. To estimate  $\rho'$ , the refractive index for glass ( $n_g$ ) shall be known. The extinction coefficient for glass,  $k_g$ , may be taken from [5] for soda-lime glass or determined from the analysis, i.e.,  $\psi$ , of a monolithic glass specimen for other types of glass. An iterative solution method, described in [6], may be used to solve for  $n$ ,  $k$ , and  $\psi$  instead of the closed-form solutions in formulas (A.5) and (A.6). For the purpose of comparing encapsulation materials based solely on their optical performance, excluding the PV module architecture, it is possible to remove reflection from  $\tau_{sp}$ , giving the “internal absorptance” of the encapsulation,  $\alpha_i$  (normalized intensity):

$$\alpha_i[\lambda] = 1 - e^{-\psi_p[\lambda] \cdot z_p} \quad (A.8)$$

## Annex B (informative)

### Applying the quantum efficiency of a specific cell technology

In practice, a PV module cannot capture all of the radiant energy emitted from the sun. Each cell technology has its own capability for converting optical energy into electrical energy. This capability may also vary according to the manufacturer, and is summarized in the quantum efficiency. Representative external quantum efficiency profiles may be found in [7] and [8]. The quantum efficiency-weighted transmittance may be calculated from the formula:

$$\tau_{QE} = \frac{\int \tau[\lambda] Q_{ext}[\lambda] E_{p\lambda}[\lambda] d\lambda}{\int Q_{ext}[\lambda] E_{p\lambda}[\lambda] d\lambda} \quad (B.1)$$

where

$\tau_{QE}$  refers to the quantum efficiency-weighted transmittance (performance units, specific to a particular cell);

$\tau$  is the measured transmittance of the specimen at the incident angle (units of normalized intensity);

$\lambda$  is the wavelength of light (m);

$Q_{ext}$  is the external quantum efficiency of the cell (electrons·photon<sup>-1</sup>); and

$E_{p\lambda}$  is the reference spectral photon irradiance

( $E_{p\lambda}[\lambda] = \frac{\lambda}{hc} E_{\lambda}[\lambda]$  as given in IEC 60904-3, m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>·nm<sup>-1</sup>).

$\tau_{QE}$  may be used to evaluate application specific transmittance. For example,  $\tau_{QE}$  may be used to select between encapsulation materials based on their expected performance with a particular PV cell technology. When comparing between encapsulation materials, all other components (including superstrate and substrate) and factors (including thermal management) are assumed to be equal.

In cases where more than one junction is connected within a cell,  $\tau_{QE}$  shall be evaluated separately for each of the junctions. In such cells, the junctions may be connected in series, where the least illuminated junction, e.g., lowest  $\tau_{QE}$ , may limit the current produced by the cell. In such cases the transmittance through each junction shall be known. It should be noted that in addition to  $\tau_{QE}$ , other factors may motivate a current-limited condition, including: the physical thickness of the junction (affecting its capacity to harvest energy), the series resistance of each junction, and the colorcast present, e.g., the atmospheric depth and corresponding transmittance of the atmosphere.

The theoretical maximum current density may be estimated from the formula:

$$J = q \int \tau[\lambda] Q_{ext}[\lambda] E_{p\lambda}[\lambda] d\lambda \quad (B.2)$$

where

$J$  refers to the short circuit current density (A·m<sup>-2</sup>);

$q$  is the charge of a single electron (1,602 × 10<sup>-19</sup> C);

$h$  is Planck's constant (6,626 × 10<sup>-34</sup> W·s<sup>2</sup>);

$c$  is the speed of light in a vacuum ( $2,998 \times 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ );  
 $\lambda$  is the wavelength of light (m);  
 $\tau$  is the measured transmittance of the specimen (normalized intensity);  
 $Q_{\text{ext}}$  is the external quantum efficiency of the cell (unitless); and  
 $E_{p\lambda}$ , the incident spectral photon irradiance ( $\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1}$ ).

Alternatively the absolute spectral response ( $S$ , units of A/W) and  $E_{\lambda}$ , the reference spectral irradiance (as in IEC 60904-3,  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1}$ ) can be used to estimate the theoretical maximum current density:

$$J = \int \tau[\lambda] S[\lambda] E_{\lambda}[\lambda] d\lambda \quad (\text{B.3})$$

NOTE The current density may be determined similarly for any known spectral photon irradiance, in addition to that in IEC 60904-3.

The current yield may be affected by additional losses associated with a PV module or system, including: inverter efficiency, temperature related loss, and the area coverage of the module by the cells.

## Bibliography

- [1] K.R. McIntosh, G. Lau, J.N. Cotrell, K. Hanton, D.L. Bätzner, F. Bettiol, and B.S. Richards, *Increase in External Quantum Efficiency of Encapsulated Silicon Solar Cells from a Luminescent Down-Shifting Layer*, Prog. Photovolt: Res. Appl., 17 (2009), 191–197
- [2] E. Hecht, *Optics (2nd edition)*, Chapter 4. Addison–Wesley: New York, 1987
- [3] E.D. Palik, *Handbook of Optical Constants of Solids*, Academic Press Limited: London, 1998
- [4] K.R. McIntosh, J.N. Cotrell, J.S. Cumpston, A.W. Norris, N. E. Powell, B.M. Ketola, *An Optical Comparison of Silicone and EVA Encapsulants for Conventional Silicon PV Modules: A Ray-Tracing Study*, Proc. IEEE PVSC, 2009, 544-549
- [5] M. Rubin, *Optical Properties of Soda Lime Glasses*, Solar Energy Mats., 12 (1985), 275-288
- [6] M.D. Kempe, *Accelerated UV Test Methods and Selection Criteria for Encapsulants of Photovoltaic Devices*, Proc. IEEE PVSC, 2008, 1-6
- [7] S. Nann, K. Emery, *Spectral effects on PV-device rating*, Solar Energy Mats Solar Cells, 27 (1992), 189-216
- [8] M.A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa, W. Warta, *Solar cell Efficiency Tables* (version 41), PIP: Res. App., 21 (2013), 1–11
- [9] D.C. Miller, J. Apezteguia, J.G. Bokria, M. Köhl, N.E. Powell, M.E. Smith, M.D. White, H. R. Wilson, J.H. Wohlgemuth, *Examination of An Optical Transmittance Test for Photovoltaic Encapsulation Materials*, Proc SPIE 2013, 8825-8
- [10] *RSA-PE-20, AQ-00073-000, Rev. 7*, Labsphere Inc., 2001, 1-34
- [11] *Technical Guide: Integrating Sphere Theory and Application*, Labsphere Inc., 2008, 1-22
- [12] D.C. Miller, J. Apezteguia, J.G. Bokria, M. Köhl, N.E. Powell, M.E. Smith, M.D. White, H. R. Wilson, J.H. Wohlgemuth, *Examination of An Optical Transmittance Test for Photovoltaic Encapsulation Materials*, NREL-PR-5200-60379, 2013, 1-24
- [13] A.M. Nilsson, A. Jonsson, J.C. Jonsson, A. Roos, *Method for more accurate transmittance measurements of low-angle scattering samples using an integrating sphere with an entry port beam diffuser*, Appl. Opt., 50 (7), 2011, 999-1006
- [14] ~~C.G. Reid, J.G. Bokria, J.T. Woods, UV aging and outdoor exposure correlation for EVA PV encapsulants, Proc. SPIE, 8825, 2013~~
- W. Thiemsorn, K. Keowkamnerd, S. Phanichphant, P. Suwannathada, H. Hessenkemper, "Influence of glass basicity on redox interactions of iron-manganese-copper ion pairs in soda-lime-silica glass", *Glass Phys. Chem.*, 34 (2008), 19-29

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

ASTM E308-08, *Standard practice for computing the colours of objects by using the CIE system*

ASTM E313-10, *Standard practice for calculating yellowness and whiteness indices from instrumentally measured colour coordinates*

---

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62788-1-4:2016+AMD1:2020 CSV

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62788-1-4:2016+AMD1:2020 CSV

## SOMMAIRE

|                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| AVANT-PROPOS .....                                                                                      | 23 |
| 1 Domaine d'application .....                                                                           | 25 |
| 2 Références normatives .....                                                                           | 25 |
| 3 Termes et définitions .....                                                                           | 26 |
| 4 Principe .....                                                                                        | 27 |
| 5 Appareillage .....                                                                                    | 27 |
| 6 Éprouvettes d'essai .....                                                                             | 27 |
| 6.1 Facteur de transmission nominal (et sans exposition aux intempéries) de la cellule .....            | 27 |
| 6.2 Études sur l'exposition aux intempéries .....                                                       | 28 |
| 6.3 Verre pour substrats inversés/substrats .....                                                       | 29 |
| 6.4 Nombre d'éprouvettes .....                                                                          | 30 |
| 6.5 <del>Préconditionnement</del> Conditionnement des éprouvettes .....                                 | 30 |
| 7 Procédure de mesure .....                                                                             | 30 |
| 7.1 Généralités .....                                                                                   | 30 |
| 7.2 Préparation des éprouvettes .....                                                                   | 30 |
| 7.3 Étalonnage de l'instrument (mesurages de base) .....                                                | 30 |
| 7.4 Mesurages des éprouvettes .....                                                                     | 31 |
| 7.5 Mesurages témoins .....                                                                             | 31 |
| 7.5.1 Éprouvettes témoins .....                                                                         | 31 |
| 7.5.2 Procédure relative à l'éprouvette témoin avant les éprouvettes d'essai .....                      | 31 |
| 7.5.3 Mesurages des éprouvettes d'essai .....                                                           | 32 |
| 7.5.4 Procédure relative à l'éprouvette témoin après les éprouvettes d'essai .....                      | 32 |
| 8 Calcul et expression des résultats .....                                                              | 32 |
| 8.1 Post-traitement des données .....                                                                   | 32 |
| 8.2 Calcul du facteur de transmission pondéré .....                                                     | 32 |
| 8.3 Calcul de l'indice de jaunissement ( $YI$ ) .....                                                   | 33 |
| 8.4 Calcul de la longueur d'onde de coupure des UV .....                                                | 33 |
| 9 Incertitude de mesure .....                                                                           | 33 |
| 10 Rapport d'essai .....                                                                                | 34 |
| Annexe A (informative) Analyse avancée du facteur de transmission (coefficients d'absorption) .....     | 36 |
| Annexe B (informative) Application du rendement quantique d'une technologie de cellule spécifique ..... | 38 |
| Bibliographie .....                                                                                     | 40 |
| Tableau 1 – Détails des paramètres de facteur de transmission à pondération solaire .....               | 33 |

## COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

### PROCÉDURES DE MESURE DES MATÉRIAUX UTILISÉS DANS LES MODULES PHOTOVOLTAÏQUES –

#### Partie 1-4: Encapsulants – Mesurage du facteur de transmission optique et calcul du facteur de transmission photonique à pondération solaire, de l'indice de jaunissement et de la fréquence de coupure des UV

#### 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.

**Cette version consolidée de la Norme IEC officielle et de son amendement a été préparée pour la commodité de l'utilisateur.**

**L'IEC 62788-1-4 édition 1.1 contient la première édition (2016-09) [documents 82/1148/FDIS et 82/1165/RVD] et son amendement 1 (2020-10) [documents 82/1767/FDIS et 82/1791/RVD].**

**Dans cette version Redline, une ligne verticale dans la marge indique où le contenu technique est modifié par l'amendement 1. Les ajouts sont en vert, les suppressions sont en rouge, barrées. Une version Finale avec toutes les modifications acceptées est disponible dans cette publication.**

La Norme internationale IEC 62788-1-4 a été établie par le comité d'études 82 de l'IEC: Systèmes de conversion photovoltaïque de l'énergie solaire.

Une liste de toutes les parties de la série IEC 62788, publiées sous le titre général: *Procédures de mesure des matériaux utilisés dans les modules 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 la publication de base et de son amendement 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.

**IMPORTANT – Le logo "colour inside" qui se trouve sur la page de couverture de cette publication indique qu'elle contient des couleurs qui sont considérées comme utiles à une bonne compréhension de son contenu. Les utilisateurs devraient, par conséquent, imprimer cette publication en utilisant une imprimante couleur.**

## PROCÉDURES DE MESURE DES MATÉRIAUX UTILISÉS DANS LES MODULES PHOTOVOLTAÏQUES –

### Partie 1-4: Encapsulants – Mesurage du facteur de transmission optique et calcul du facteur de transmission photonique à pondération solaire, de l'indice de jaunissement et de la fréquence de coupure des UV

#### 1 Domaine d'application

La présente partie de l'IEC 62788 fournit une méthode de mesure du facteur de transmission optique des matériaux d'encapsulation utilisés dans les modules photovoltaïques (PV). Les mesurages normalisés de cette procédure permettent de quantifier le facteur de transmission prévu de l'encapsulation vers la cellule PV. Le calcul ultérieur du facteur de transmission à pondération solaire permet de comparer les différents matériaux. Les résultats concernant les matériaux non exposés aux intempéries peuvent être utilisés dans les fiches techniques d'un fabricant d'encapsulation, dans le développement des matériaux ou du procédé du fabricant, dans le contrôle de la qualité de fabrication (acceptation du matériau) ou être appliqués dans l'analyse des performances du module.

Cette méthode de mesure peut également être utilisée pour contrôler les performances des matériaux d'encapsulation après exposition aux intempéries, afin d'évaluer leur durabilité. Les mesurages normalisés sont destinés à examiner une zone intérieure d'un module PV, par exemple, sans les effets de diffusion d'oxygène ~~autour des bords~~ à la ~~périphérie~~ des cellules. Le calcul ultérieur de l'indice de jaunissement permet de quantifier la durabilité et de prendre en compte l'aspect. La variation du facteur de transmission, de l'indice de jaunissement et de la fréquence de coupure des ultraviolets (UV) peut être utilisée par les fabricants d'encapsulation ou de module pour comparer la durabilité des différents matériaux.

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

ISO 291:2008, *Plastiques – Atmosphères normales de conditionnement et d'essai*

ISO 11664-1:2007, *Colorimétrie – Partie 1: Observateurs CIE de référence pour la colorimétrie*

ISO 11664-2:2007, *Colorimétrie – Partie 2: Illuminants CIE normalisés*

ISO 13468-2:1999, *Plastiques – Détermination du facteur de transmission du flux lumineux total des matériaux transparents – Partie 2: Instrument à double faisceau*

ISO 17223:2014, *Plastics – Determination of yellowness index and change in yellowness index* (disponible en anglais seulement)

ASTM E424-71:2007, *Standard test methods for solar energy transmittance and reflectance (Terrestrial) of sheet material*

### 3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions 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>

NOTE Si des définitions existent déjà, voir l'IEC TS 61836. Les calculs liés à ces définitions sont donnés à l'Article 8.

#### 3.1

##### **facteur de transmission à pondération solaire de l'éclairement photonique**

proportion de l'éclairement photonique spectral solaire ( $E_{p\lambda}$ ,  $\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1}$ ) transmis de manière optique à travers l'éprouvette, sur toute la plage du spectre lumineux solaire terrestre (280 nm à 2 500 nm), (voir le Tableau 1)

Note 1 à l'article: L'éclairement photonique ( $E_{p\lambda}$ ,  $\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1}$ ) représente l'énergie spécifique à la longueur d'onde du flux optique. Il convient de ne pas le confondre avec l'éclairement spectral ( $E_{\lambda}$ ,  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1}$ ).

#### 3.2

##### **facteur de transmission à pondération solaire représentatif de l'éclairement photonique**

proportion de l'éclairement photonique spectral solaire ( $E_{p\lambda}$ ,  $\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1}$ ) transmis de manière optique à travers l'éprouvette, sur toute la plage du spectre lumineux solaire terrestre (300 nm à 1 250 nm), (voir le Tableau 1)

Note 1 à l'article: Dans le cas d'un dispositif PV, le facteur de transmission à pondération solaire représentatif de l'éclairement photonique est défini sur toute la plage du spectre utilisé par un dispositif PV représentatif (qui peut ne pas inclure les longueurs d'onde aussi faibles que 280 nm ou aussi élevées que 2 500 nm).

#### 3.3

##### **longueur d'onde de coupure des UV**

$\lambda_{\text{cUV}}$

longueur d'onde de la lumière en dessous de laquelle l'encapsulation est considérée comme étant absorbante d'un point de vue optique, et au-dessus de laquelle l'encapsulation est considérée comme étant émettrice

Note 1 à l'article: Dans cette procédure, le facteur de transmission absolu de 10 % (correspondant à l'absorbance optique de 1) est considéré comme étant le seuil de la longueur d'onde de coupure des UV. Comme indiqué dans le document [9]<sup>1</sup>, la longueur d'onde de coupure des UV peut également être utilisée pour quantifier les effets de l'exposition aux intempéries.

#### 3.4

##### **exposition aux intempéries**

processus par lequel des éprouvettes sont soumises à des conditions environnementales pouvant inclure les rayonnements ultra-violet, la température, l'humidité et l'ozone

Note 1 à l'article: L'exposition aux intempéries peut avoir lieu dans des environnements artificiels ou naturels. L'exposition aux intempéries peut avoir lieu à vitesse nominale (champ) ou à vitesse accélérée.

<sup>1</sup> Les chiffres entre crochets renvoient à la Bibliographie.

### 3.5

#### indice de jaunissement

*YI*

valeur calculée identifiant le jaunissement de l'éprouvette d'essai perçu par un observateur humain (voir l'ASTM E313-10)

Note 1 à l'article: L'indice *YI* peut être utilisé pour quantifier les effets de l'exposition aux intempéries.

Note 2 à l'article: L'abréviation "YI" est dérivée du terme anglais développé correspondant "yellowness index".

## 4 Principe

Le facteur de transmission spectrale totale des éprouvettes stratifiées, contenant le matériau d'encapsulation, doit être mesuré à l'aide d'un spectrophotomètre équipé d'une sphère d'Ulbricht. Le facteur de transmission à pondération solaire, l'indice de jaunissement et la fréquence de coupure des UV sont ensuite calculés à partir des mesurages du facteur de transmission.

Le facteur de transmission mesuré dans le cadre de cette procédure peut être utilisé dans une analyse optique plus approfondie, afin d'améliorer l'exactitude de l'analyse des performances PV ou de différencier les différents matériaux d'encapsulation (voir l'Annexe A). Le facteur de transmission mesuré dans le cadre de cette procédure peut être utilisé pour estimer les performances du module (rendement actuel) si le rendement quantique de la cellule PV est connu (voir l'Annexe B). La méthode ne tient pas compte des variations du facteur de transmission avec l'angle d'incidence, qui peut varier selon le moment de la journée, des conditions météorologiques et de la géométrie du module, particulièrement si la concentration *optique* est utilisée.

## 5 Appareillage

L'instrument d'essai doit être composé d'un spectrophotomètre à double faisceau équipé d'une sphère d'Ulbricht. Un spectrophotomètre à faisceau unique peut être utilisé si le facteur de réflexion de l'accès peut être correctement pris en compte (voir l'Annexe A et le document [2]). Les détails relatifs à la construction et aux configurations de l'instrument d'essai peuvent être consultés dans l'ISO 13468-2 ou l'ASTM E424-71. Une étendue de mesure d'au moins 280 nm à 2 500 nm est exigée pour calculer le facteur de transmission à pondération solaire utilisant le spectre global AM1.5 (voir l'IEC 60904-3). Un incrément de longueur d'onde inférieur ou égal à 1 nm est préférable pour le mesurage, toutefois les incréments supérieurs à 5 nm sont admis avec une interpolation linéaire de 1 nm.

Une sphère d'Ulbricht d'au moins 100 mm de diamètre et d'une surface d'accès < 5 % (voir le document [11]), est recommandée pour réduire l'erreur de mesure. Il convient que la surface d'accès minimale (voir le document [9]) n'excède pas 13 %.

## 6 Éprouvettes d'essai

### 6.1 Facteur de transmission nominal (et sans exposition aux intempéries) de la cellule

Les éprouvettes doivent être composées d'une structure stratifiée de verre/d'encapsulation (voir l'Annexe A et le document [12]).

Le facteur de transmission à pondération solaire et le facteur de transmission à pondération solaire représentative, tels qu'ils sont calculés à l'Article 8, peuvent être utilisés pour la consignation sur la fiche technique d'un fabricant d'encapsulation.

Les éprouvettes doivent contenir une zone d'examen dépourvue de défaut visible, y compris les rayures, les creux, les dépressions en surface, les bulles ou autres imperfections. Le

diamètre de la zone d'examen doit être au moins 50 % plus important que la zone de mesure de l'instrument d'essai.

NOTE 1 Une taille de point de 1 cm × 1 cm est une dimension commune dans la plupart des spectrophotomètres disponibles dans le commerce. L'utilisation d'éprouvettes d'au moins 2 à 3 fois cette taille permet d'améliorer l'uniformité (résultant de la fabrication) et le traitement (pendant le mesurage).

Il convient que la taille (longueur et largeur) soit adaptée pour permettre à l'éprouvette de s'ajuster dans l'instrument d'essai.

L'épaisseur nominale des éprouvettes d'~~encapsulation~~ encapsulant doit être égale à l'épaisseur prévue dans le cadre d'une utilisation dans des modules PV.

Il convient de durcir les éprouvettes (le cas échéant) selon les spécifications du fabricant et d'utiliser un processus se rapprochant le plus possible de la méthode utilisée dans le procédé de fabrication prévu.

L'épaisseur de la partie d'encapsulation de l'éprouvette d'essai doit être mesurée après sa préparation. L'épaisseur doit être prise comme la moyenne de trois mesurages obtenue en différents emplacements sur la zone d'essai de l'éprouvette.

Les plaques de verre doivent être parallèles au pincement de bord ou à la surluminance de bord. En d'autres termes, l'épaisseur d'encapsulation dans tous les coins ne doit pas différer de plus de 10 % de celle au centre de l'échantillon. Dans une machine à stratifier les sacs classique, cela exige l'utilisation d'un cadre autour des échantillons lors de la stratification, mais d'autres moyens pour réaliser cette spécification sont acceptables.

L'arrière des éprouvettes (l'encapsulation exposée destinée à faire face à la sphère d'Ulbricht) ne doit pas être volontairement texturé.

Pour obtenir une meilleure résolution et différencier avec une plus grande exactitude les matériaux, des études ultérieures peuvent utiliser une couche d'encapsulation plus épaisse, laquelle peut être analysée afin de déterminer le coefficient d'affaiblissement optique (voir l'Annexe A).

Si le matériau d'encapsulation est destiné à être utilisé avec des substrats inversés autres que le verre, la même procédure peut être utilisée dans une étude ultérieure. Les éprouvettes utilisant des substrats inversés polymérisés peuvent être sujettes à la polarisation optique se produisant à l'intérieur de l'instrument. Conformément aux documents [9] et [12], il convient d'utiliser un dépolarisant avec l'instrument de manière à réduire le plus possible les effets de la polarisation.

NOTE 2 Les effets de la brume sèche sur les éprouvettes sujettes à la brume optique peuvent être limités grâce à l'utilisation d'un film diffusant (voir [13]).

## 6.2 Études sur l'exposition aux intempéries

La géométrie d'une éprouvette en verre/matériau d'encapsulation/stratifié-verre est recommandée.

Il convient que la taille (longueur et largeur) soit adaptée pour permettre à l'éprouvette de s'ajuster dans l'instrument d'essai.

~~Comme cela est décrit dans le document [14], la taille minimale de 5 cm × 5 cm est recommandée pour les éprouvettes exposées aux intempéries sur la base d'examen antérieurs de poly(éthylène-co-acétate de vinyle).~~

La taille minimale de 7,5 cm x 7,5 cm est recommandée pour les éprouvettes exposées aux intempéries sur la base d'examen antérieurs de poly(éthylène-co-acétate de vinyle).

Il est préférable d'utiliser des éprouvettes volumineuses pour les études sur l'exposition aux intempéries, car une zone d'essai peut être distinguée, dans laquelle la diffusion de l'oxygène ou de l'humidité est limitée.

D'autres géométries peuvent être utilisées dans le cadre de cette procédure pour évaluer les effets de l'exposition aux intempéries. Par exemple, une couche arrière polymérisée perméable facilite l'examen de la pénétration d'humidité. Certains modules PV utilisent un joint d'étanchéité périphérique pour réduire la perméabilité à l'humidité.

Des morceaux "vierges" séparés de substrat inversé ou de substrat peuvent être exposés aux intempéries avec les éprouvettes d'essai afin de quantifier la dégradation de ces composants.

Les éprouvettes doivent contenir une zone d'examen dépourvue de défaut visible, y compris les rayures, les creux, les dépressions en surface, les bulles ou autres imperfections. Le diamètre de la zone d'examen doit être au moins 50 % plus important que la zone de mesure de l'instrument d'essai.

L'épaisseur nominale des éprouvettes d'~~encapsulation~~ encapsulant doit être telle que prévue pour une utilisation dans des modules PV. Il convient de durcir les éprouvettes (le cas échéant) selon les spécifications du fabricant et en se rapprochant le plus possible de la méthode utilisée dans le procédé de fabrication prévu.

L'épaisseur de l'encapsulation dans le stratifié peut être contrôlée en insérant un matériau amovible autour du périmètre de l'éprouvette.

### 6.3 Verre pour substrats inversés/substrats

Le facteur de transmission nominal (sans exposition aux intempéries) de la cellule pour les besoins des fiches techniques du fabricant d'encapsulation doit être mesuré à l'aide d'un verre de silice de  $(3 \pm 0,2)$  mm d'épaisseur. Les surfaces du verre doivent être lisses et sans défaut, et suffisamment planes et parallèles pour que la composante diffuse de la lumière émise soit inférieure à 1 % entre 280 nm et 2 500 nm.

Le facteur de transmission à pondération solaire de l'éclairement photonique du verre de silice, qui peut être utilisé pour vérifier que la composition du verre est appropriée, est d'environ  $(93 \pm 1)$  % entre 280 nm et 2 500 nm, la réduction du facteur de transmission provenant des réflexions sur les surfaces. Il convient que la longueur d'onde de coupure des UV pour la silice soit inférieure à 225 nm. Comme dans les documents [1] et [12], il convient que le facteur de transmission du verre soit supérieur à 90 % à 280 nm.

Le verre ne doit pas être revêtu ou contenir des couches antiréfléchissantes. Le verre ne doit pas être volontairement texturé.

Un examen ultérieur allant au-delà de ce qui est prévu pour la fiche technique du matériau d'encapsulation (y compris en matière de performance et d'exposition aux intempéries), par exemple à des fins de contrôle de la qualité en vue du contrôle de la production, peut être réalisé conformément à cette procédure à l'aide d'autres matériaux de substrat inversé et/ou substrat qui peuvent présenter d'autres caractéristiques optiques (revêtements antiréfléchissants, texture superficielle et verre de PV sodocalcique non trempé, par exemple).

Le processus de solarisation, au cours duquel une réaction d'oxydoréduction des traces d'impureté affecte la longueur d'onde de coupure des UV et la plage correspondante du facteur de transmission, peut se produire si le verre utilisé n'est pas un verre de silice [14]. Il est par conséquent conseillé, pour les études sur l'exposition aux intempéries, de procéder à un conditionnement aux UV des matériaux qui constituent les substrats et les substrats inversés, autres que la silice, avant la stratification.

NOTE Le verre de silice présente une plus grande durabilité que le verre sodocalcique et il résiste mieux à la corrosion lorsqu'il est soumis à des essais accélérés.

## 6.4 Nombre d'éprouvettes

Au moins 3 échantillons doivent être utilisés pour déterminer le facteur de transmission de la cellule ou dans les études sur l'exposition aux intempéries. Les caractéristiques optiques y compris le facteur de transmission ( $YI$ ) et la longueur d'onde de coupure des UV doivent être calculées en utilisant la moyenne des trois éprouvettes séparées, et avec l'étendue de mesure indiquée afin d'identifier leur variabilité.

## 6.5 Préconditionnement Conditionnement des éprouvettes

~~Avant de procéder au mesurage optique, et conformément à l'ISO 291, les éprouvettes utilisées pour la consignation sur les fiches techniques doivent être maintenues à  $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ ,  $(50 \pm 5)\%$  d'humidité relative pendant au moins 24 h.~~

Avant de procéder au mesurage optique, et comme spécifié pour la Classe 2 selon l'ISO 291, les éprouvettes utilisées pour la consignation sur les fiches techniques doivent être maintenues à  $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ ,  $(50 \pm 10)\%$  d'humidité relative pendant au moins 24 h.

L'utilisation de conditions de température et d'humidité élevées dans une étude sur l'exposition aux intempéries peut donner lieu à une condition d'humidité sursaturée dans l'éprouvette, ce qui a une incidence sur le facteur de transmission optique lorsque l'éprouvette retrouve les conditions ambiantes de laboratoire. Dans ce cas, le conditionnement de l'éprouvette, incluant une chambre climatique contrôlée, peut être appliqué afin d'éviter les effets indésirables (brume optique ou facteur d'absorption lié à l'humidité, par exemple). Les effets sur la condition de l'éprouvette peuvent être vérifiés par des mesurages réguliers. Voir la procédure d'essai climatique pour obtenir des détails spécifiques relatifs au conditionnement et au stockage de l'éprouvette suite à l'exposition aux intempéries.

## 7 Procédure de mesure

### 7.1 Généralités

Le facteur de transmission doit être mesuré conformément à la procédure de l'ISO 13468-2.

### 7.2 Préparation des éprouvettes

Avant de procéder au mesurage, il convient de débarrasser les éprouvettes de la poussière, de la graisse ou d'autres contaminants. ~~Il convient que les éprouvettes et l'instrument aient atteint l'équilibre thermique avant de procéder au mesurage.~~ Les éprouvettes peuvent être essuyées à l'aide d'une lingette pour salle propre ou d'un chiffon non pelucheux en utilisant une solution d'eau déminéralisée et de savon doux pour les nettoyer avant le mesurage.

### 7.3 Étalonnage de l'instrument (mesurages de base)

Après l'avoir allumée, laisser la lampe de l'instrument atteindre l'équilibre thermique, en observant la période de préchauffage classique (15 min, par exemple) ou selon les recommandations du fabricant de l'instrument. Procéder à une ou à des analyses de correction afin de compenser le signal de référence de l'instrument.

Il convient de procéder à un mesurage de référence du facteur de transmission de 100 % dans l'air, en l'absence de matériau de substrat inversé, d'éprouvette ou de substrat. Dans la mesure du possible, il convient également de procéder à un mesurage de référence du facteur de transmission de 0 %.

Il est recommandé de mesurer régulièrement la valeur de référence afin de réduire le plus possible la dérive de l'instrument et d'assurer l'exactitude des valeurs mesurées. Une dérive

de l'instrument se produisant sur une session de mesure étendue peut être spécifique à l'instrument.

Il est recommandé de maintenir la dérive de l'instrument sous 0,05 % afin de réduire le plus possible l'incertitude de mesure (Article 9). Il convient de considérer la dérive de l'instrument dans l'erreur de justesse de l'instrument lors de la détermination de l'incertitude de mesure.

#### 7.4 Mesurages des éprouvettes

Procéder aux mesurages du facteur de transmission des éprouvettes d'essai sur la plage de longueurs d'onde comprises entre 280 nm et 2 500 nm au moins, par incrément de 1 nm.

L'interpolation linéaire par incrément de 1 nm peut être utilisée uniquement lorsqu'un incrément de mesure plus grossier (5 nm au maximum) est disponible. L'erreur associée à un incrément plus grossier peut être plus déterminante à des longueurs d'onde plus courtes (où  $YI$  et la longueur d'onde de coupure des UV sont déterminés) qu'à des longueurs d'onde plus longues (où seul le facteur de transmission à pondération solaire est affecté). Si l'interpolation linéaire est utilisée, il convient de le noter dans le rapport d'essai.

Des discontinuités associées aux variations dans les composants optiques (y compris le détecteur, la source de lumière et/ou le monochromateur) peuvent se produire pendant le mesurage. Ces discontinuités peuvent être limitées grâce aux réglages de l'instrument.

Il peut s'avérer utile d'étendre l'étendue de mesure dans les études de durabilité aux intempéries afin de donner une idée des résultats. Par exemple, en mesurant les longueurs d'onde des UV à 200 nm, l'intégrité des absorbeurs et stabilisateurs d'UV peut être confirmée à partir de la longueur d'onde de coupure des UV.

Il convient que la largeur de bande spectrale de mesure soit inférieure ou égale à l'incrément de mesure, c'est-à-dire 1 nm ou 5 nm.

#### 7.5 Mesurages témoins

Procéder aux mesurages du facteur de transmission sur une éprouvette témoin au début de chaque session de mesure afin d'assurer le bon fonctionnement de l'instrument et de réduire le plus possible les erreurs de mesure. Procéder aux mesurages du facteur de transmission d'une éprouvette témoin en utilisant la même procédure que celle appliquée à (aux) éprouvette(s) d'essai. L'éprouvette témoin peut être une éprouvette étalon traçable, une éprouvette témoin de laboratoire ou le matériau de substrat inversé/substrat de silice.

##### 7.5.1 Éprouvettes témoins

L'éprouvette témoin peut être une éprouvette étalon traçable, une éprouvette témoin de laboratoire ou le matériau de substrat inversé/substrat de silice. Parmi les éprouvettes témoins pour les mesurages de contrôle, il peut aussi y avoir une éprouvette témoin de travail en verre n'ayant pas été exposée aux intempéries et de construction identique à celle utilisée dans les éprouvettes d'essai représentatives d'un module ou dans les éprouvettes de référence (substrat inversé en verre ou polymérisé). Lorsqu'elle n'est pas utilisée pour des mesurages de contrôle, une éprouvette témoin de travail doit être stockée à l'abri de la lumière à 23 °C et 50 % d'humidité, comme spécifié pour la Classe 2 dans l'ISO 291.

##### 7.5.2 Procédure relative à l'éprouvette témoin avant les éprouvettes d'essai

Après la mise en équilibre de l'instrument et l'ajustement de la ligne de base, procéder aux mesurages du facteur de transmission sur une éprouvette témoin au début de chaque session de mesure, afin d'assurer le bon fonctionnement de l'instrument et de réduire le plus possible les erreurs de mesure. Procéder aux mesurages du facteur de transmission de l'éprouvette témoin en utilisant la même procédure que celle prévue pour être appliquée aux éprouvettes d'essai.

Les longueurs d'onde de vérification pour la référence de travail doivent être à  $\pm 50$  nm des transitions de l'instrument pour la source, le détecteur et les réseaux. En raison des limites de mesure, notamment du bruit lié à la diffusion aux courtes longueurs d'onde, les longueurs d'onde de vérification ne doivent pas être inférieures à 225 nm. Dans le cas des nombreux instruments du commerce dont les transitions pour la source, le détecteur et le réseau se produisent respectivement à 350 nm, 800 nm, et 800 nm, il convient que les longueurs d'onde de vérification incluent les plages de 250 nm à 300 nm, 400 nm à 750 nm et 850 nm à 2 500 nm (dans le cas de mesurages normalisés) ou 225 nm à 300 nm, 400 nm à 750 nm et 850 nm à 2 500 nm (dans le cas de mesurages d'échantillons exposés aux intempéries).

Il convient que le facteur de transmission à chacune des longueurs d'onde de vérification se situe à 0,25 % du facteur de transmission connu (ou de la moyenne glissante de laboratoire) pour l'éprouvette témoin. Si le facteur de transmission à chacune des longueurs d'onde de vérification ne se situe pas à 0,25 % du facteur de transmission connu, la ligne de base de l'instrument doit être de nouveau établie (jusqu'à trois fois) et l'éprouvette témoin doit être de nouveau mesurée. Si le facteur de transmission à chaque longueur d'onde reste supérieur à 0,25 % du facteur de transmission connu, il convient de soumettre l'instrument à une maintenance ou à une réparation.

### 7.5.3 Mesurages des éprouvettes d'essai

Après vérification de l'éprouvette témoin, les éprouvettes d'essai doivent être mesurées.

### 7.5.4 Procédure relative à l'éprouvette témoin après les éprouvettes d'essai

Après avoir mesuré les éprouvettes d'essai, procéder aux mesurages du facteur de transmission sur une éprouvette témoin à la fin de chaque session de mesure, afin de garantir le bon fonctionnement de l'instrument au cours de la session de mesure. Procéder aux mesurages du facteur de transmission de l'éprouvette témoin en utilisant la même procédure que celle prévue pour être appliquée aux éprouvettes d'essai. Il convient que le facteur de transmission à chacune des longueurs d'onde de vérification se situe à 0,25 % du facteur de transmission connu (ou de la moyenne glissante de laboratoire) pour l'éprouvette témoin. Si le facteur de transmission à chaque longueur d'onde de vérification ne se situe pas à 0,25 % du facteur de transmission connu, les données mesurées concernant les éprouvettes d'essai doivent être considérées comme non valables et ces dernières doivent être mesurées de nouveau lors d'une session ultérieure.

## 8 Calcul et expression des résultats

### 8.1 Post-traitement des données

Les mesurages obtenus à partir de trois éprouvettes distinctes doivent être moyennés à chaque incrément de longueur d'onde. ~~La plage (différence entre la valeur minimale et la valeur maximale) doit également être déterminée à chaque incrément de longueur d'onde.~~ La variabilité doit être consignée pour chaque caractéristique (facteur de transmission pondéré, indice de jaunissement et longueur d'onde de coupure des UV) comme la plage (différence entre la mesure minimale et la mesure maximale) pour les trois éprouvettes.

### 8.2 Calcul du facteur de transmission pondéré

Le facteur de transmission à pondération solaire peut être calculé à l'aide de la formule (1):

$$\tau_{sw} = \frac{\int \tau[\lambda] E_{p\lambda}[\lambda] d\lambda}{\int E_{p\lambda}[\lambda] d\lambda} \quad (1)$$

où

$\tau_{sw}$  est le facteur de transmission à pondération solaire (%);  
 $\tau$  est le facteur de transmission mesuré de l'éprouvette (%);  
 $\lambda$  est la longueur d'onde de la lumière (nm); et  
 $E_{p\lambda}$  est l'éclairement photonique spectral global de référence (voir l'IEC 60904-3).

Les détails du calcul des différents paramètres du facteur de transmission à pondération solaire sont définis au Tableau 1. Les paramètres incluent: le facteur de transmission "à pondération solaire" qui peut être appliqué de manière générale, en fonction d'un large spectre lumineux solaire, et le facteur de transmission "à pondération solaire représentative", qui peut être appliqué à la plupart des cellules PV à usage terrestre à une seule jonction disponibles dans le commerce (y compris le silicium, le tellure de cadmium, le sélénure de cuivre-indium-gallium et l'arséniure de gallium) en fonction de leur plage de longueurs d'onde utilisable. Le facteur de transmission à pondération solaire (ainsi que  $YI$ ) obtenu à partir des mesurages du spectrophotomètre (intervalle de 1 nm) doit être calculé à l'aide d'une somme discrétisée au moyen d'une technique d'intégration trapézoïdale modifiée (voir l'IEC 60904-3). Le dénominateur de la formule (1) est spécifié au Tableau 1 pour les besoins de la vérification, conformément à l'IEC 60904-3.

**Tableau 1 – Détails des paramètres de facteur de transmission à pondération solaire**

| Paramètre                                                                                                                                                                                                                                                | Symbole      | Limite inférieure de longueur d'onde nm | Limite supérieure de longueur d'onde nm | $\int E_{p\lambda}[\lambda] d\lambda$<br>m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| facteur de transmission "à pondération solaire"                                                                                                                                                                                                          | $\tau_{sw}$  | 280                                     | 2 500                                   | $4,15502132187479 \times 10^{21}$                                         |
| facteur de transmission "à pondération solaire représentative"                                                                                                                                                                                           | $\tau_{rsw}$ | 300                                     | 1 250                                   | $3,03000915425 \times 10^{21}$                                            |
| NOTE Le facteur de transmission spectral à pondération solaire peut être plus spécifiquement appliqué pour estimer les performances du module, c'est-à-dire le rendement actuel, si le rendement quantique de la cellule PV est connu (voir l'Annexe B). |              |                                         |                                         |                                                                           |

### 8.3 Calcul de l'indice de jaunissement ( $YI$ )

L'indice de jaunissement  $YI$  doit être calculé selon la procédure de l'ISO 17223. Les trois coefficients trichromatiques doivent être déterminés à l'aide du spectre de l'illuminant normalisé CIE D65 (comme dans l'ISO 11664-2) et de l'espace chromatique XYZ CIE 1964 (pour un observateur humain avec un champ de vision de 10°, comme dans l'ISO 11664-1). L'indice  $YI$  doit être calculé pour un incrément de longueur d'onde (1 nm, par exemple) cohérent avec les données de facteur de transmission mesurées.

NOTE Les détails supplémentaires relatifs à l'indice de jaunissement  $YI$  peuvent être consultés dans l'ASTM E313-10 et l'ASTM E308-08.

### 8.4 Calcul de la longueur d'onde de coupure des UV

La longueur d'onde de coupure des UV,  $\lambda_{cUV}$ , doit être déterminée comme étant la longueur d'onde la plus importante (Interpolation linéaire au dixième de nm près) dans la plage d'UV ( $\lambda \leq 400$  nm) dans laquelle le facteur de transmission est égal à 10 % au maximum.

Si la longueur d'onde de coupure des UV est réputée être inférieure à 280 nm, il convient d'étendre l'étendue de mesure sous 280 nm pour quantifier sa valeur spécifique.

## 9 Incertitude de mesure

L'incertitude associée au caractère aléatoire du mesurage peut être estimée à partir de:

$$\sigma_{\text{ran}} = \frac{\int \Delta\tau[\lambda] E_{\text{p}\lambda}[\lambda] d\lambda}{\int E_{\text{p}\lambda}[\lambda] d\lambda} = S_n \sqrt{\sum_{i=1}^n (\sigma_{\tau}[\lambda])^2} \quad (2)$$

où

$\sigma_{\text{ran}}$  représente la variation aléatoire du mesurage;

$\Delta\tau$  est l'incertitude de mesure du facteur de transmission;

$\lambda$  est la longueur d'onde de la lumière;

$E_{\text{p}\lambda}$  est l'éclairement photonique spectral de référence;

$S_n$  est le coefficient de la loi de Student (3,18245 pour 3 éprouvettes à l'intervalle de confiance de 95 %), et

$\sigma_{\tau}$  est l'écart-type des mesurages du facteur de transmission (à chaque incrément de longueur d'onde).

L'incertitude (enregistrée) finale peut être estimée à partir de:

$$\sigma_{\text{tot}} = \sqrt{(\sigma_{\text{inst}})^2 + (\sigma_{\text{ran}})^2} \quad (3)$$

où

$\sigma_{\text{tot}}$  représente l'incertitude totale;

$\sigma_{\text{inst}}$  est l'erreur de justesse de l'instrument (représentant la fabrication particulière de l'instrument, les réglages de l'instrument (y compris le temps d'intégration), ainsi que la dérive de l'instrument); et

$\sigma_{\text{ran}}$  est la variation aléatoire du mesurage (l'exactitude de l'instrument et la variabilité de l'éprouvette).

La variation  $\sigma_{\text{ran}}$  peut être évaluée pour l'instrument d'essai à partir de la moyenne de 10 mesurages (multipliée par la valeur  $S_n$  correspondante de 2,22814) en l'absence d'éprouvette (facteur de transmission nominal de 100 %). De la même manière, l'erreur  $\sigma_{\text{inst}}$  peut être évaluée pour l'instrument d'essai à partir d'une série de mesures régulières successives en l'absence d'éprouvette, le taux de dérive étant déterminé à partir d'une courbe de tendance. Alors que  $\sigma_{\text{tot}}$  peut varier avec l'âge de la lampe, une seule évaluation représentative est prévue pour représenter de manière appropriée l'instrument d'essai utilisé dans un laboratoire d'essai particulier.

Calculer l'incertitude pour d'autres résultats d'essai (YI, par exemple) à l'aide de la même méthode que celle utilisée pour le facteur de transmission, c'est-à-dire la méthode de propagation des erreurs. Il convient que ces estimations tiennent également compte de l'incertitude associée à l'erreur de justesse de l'instrument en plus de l'erreur aléatoire.

La répétabilité et la reproductibilité de la méthode, y compris le facteur de transmission à pondération solaire, l'indice de jaunissement et la longueur d'onde de coupure des UV, sont décrites dans l'Annexe A et dans le document [12].

## 10 Rapport d'essai

Un rapport d'essai doit être préparé par le laboratoire d'essai. Le rapport doit comporter la spécification particulière des éprouvettes. Chaque certificat ou rapport d'essai doit inclure, au moins, les informations suivantes:

- a) un titre;
- b) le nom et l'adresse du laboratoire d'essai, ainsi que le site de réalisation des essais;

- c) l'identification unique du certificat ou du rapport, ainsi que de chaque page;
- d) le nom et l'adresse du client, le cas échéant;
- e) la description et l'identification de l'élément soumis à essai, y compris le type, l'épaisseur (et sa plage de variation) et la taille de l'éprouvette (longueur et largeur), les matériaux de substrat inversé/substrat et leurs caractéristiques;
- f) la caractérisation et l'état de l'élément d'essai, y compris la méthode et les détails de préparation des éprouvettes (y compris le durcissement, la stratification ou un traitement similaire, s'il y a lieu) et le ~~préconditionnement~~ conditionnement;
- g) la date de réception de l'élément soumis à essai et la ou les dates de réalisation de l'essai, le cas échéant;
- h) l'identification de la méthode d'essai utilisée, y compris la fabrication et le modèle du spectrophotomètre et de la sphère d'Ulbricht;
- i) la référence à la procédure d'échantillonnage, le cas échéant;
- j) tous les écarts, tous les ajouts ou toutes les exclusions par rapport à la méthode d'essai et autres informations relatives à un essai spécifique (les conditions d'environnement, par exemple), ainsi que la ou les procédures et conditions utilisées pour l'exposition aux intempéries et le ~~préconditionnement~~ conditionnement réalisé avant les mesurages;
- k) les mesurages, examens et résultats déduits étayés par des tableaux, graphiques, croquis et photographies, selon le cas, y compris l'ensemble complet des valeurs moyennes du facteur de transmission sous forme de tableau et la plage correspondante des valeurs moyennées; l'incertitude estimée de mesure du facteur de transmission (instrument); le facteur de transmission à pondération solaire moyenné de l'éclairement photonique et la plage correspondante des valeurs moyennes; le facteur de transmission à pondération solaire représentative moyenné de l'éclairement photonique et la plage correspondante des valeurs moyennes (ainsi que la plage de longueurs d'onde à l'étude); la longueur d'onde de coupure des UV et son incertitude; et toutes les défaillances observées;
- l) l'indice de jaunissement et son incertitude (qu'il convient de déterminer entre chaque exposition aux intempéries, en plus de sa valeur d'origine en cas d'expérience d'exposition aux intempéries);
- m) une déclaration de l'incertitude estimée des résultats d'essai (le cas échéant); le mesurage de l'éprouvette témoin (si elle est utilisée) et son écart par rapport aux valeurs témoins. Selon le cas, les caractéristiques de l'éprouvette témoin (sa préparation, sa composition et son épaisseur, par exemple) doivent être spécifiées;
- n) une signature et une fonction, ou une identification équivalente de la ou des personnes assumant la responsabilité du contenu du certificat ou du rapport, et la date d'émission;
- o) le cas échéant, un énoncé stipulant que les résultats se rapportent aux seuls éléments soumis à essai;
- p) un énoncé stipulant que le certificat ou le rapport ne doit pas être reproduit, sauf dans son intégralité, sans le consentement écrit du laboratoire.

## Annexe A (informative)

### Analyse avancée du facteur de transmission (coefficients d'absorption)

Les mesurages décrits dans cette procédure peuvent être complétés afin de permettre une analyse optique plus rigoureuse. La détermination du coefficient d'affaiblissement optique permet de généraliser et d'étendre le facteur de transmission optique à toutes les configurations possibles. Ce type d'analyse peut être utilisé pour améliorer l'exactitude de l'analyse de performance PV, pour tenir compte des modifications de la conception de module (l'épaisseur de l'encapsulation, par exemple) ou pour différencier les différents matériaux d'encapsulation. Les caractéristiques, notamment le facteur de transmission, l'indice de jaunissement ( $YI$ ) et la longueur d'onde de coupure des UV, varient fortement selon l'épaisseur de l'éprouvette. Les méthodes décrites dans la présente annexe peuvent donc être utilisées pour normaliser les mesurages à une épaisseur représentative.

Le facteur de transmission optique dépend également des couches de matériau présentes dans l'éprouvette. Une analyse plus rigoureuse, définie dans la présente annexe, peut être utilisée pour tenir compte de la perte de lumière émise, y compris le facteur de réflexion aux niveaux des interfaces matérielles.

Les données relatives au facteur de réflexion hémisphérique et au facteur de transmission peuvent être utilisées pour calculer le coefficient d'affaiblissement d'un matériau légèrement absorbant. Le terme "légèrement absorbant" signifie que la lumière réfléchie par l'interface arrière n'est pas totalement absorbée avant d'atteindre l'interface avant. Dans l'idéal, pour cette méthode, l'éprouvette est plate, posée librement, d'épaisseur uniforme connue et légèrement dispersée, c'est-à-dire présentant une brume optique minimale. La méthode s'appuie sur les travaux présentés dans [1]. Comme indiqué dans [2] et [3], le facteur d'absorption est en premier lieu déterminé par la formule suivante:

$$\alpha_c[\lambda] = 1 - \tau_m[\lambda] - \rho_m[\lambda] \quad (\text{A.1})$$

La nomenclature de la formule inclut:  $\alpha_c$ , le facteur d'absorption calculé (intensité normalisée);  $\tau_m$ , le facteur de transmission optique mesuré (intensité normalisée);  $\rho_m$ , le facteur de réflexion optique mesuré (intensité normalisée); et  $\lambda$ , la longueur d'onde (m). Il convient de corriger le facteur de réflexion mesuré à une échelle absolue (à l'aide d'une éprouvette de réflexion étalonnée certifiée) pour les spectrophotomètres qui rapportent des mesurages de facteur de réflexion relatif. Le facteur de réflexion absolu de l'éprouvette peut être déterminé en multipliant son facteur de réflexion relatif mesuré par le facteur de réflexion d'une éprouvette étalonnée. Le facteur de transmission mesuré et le facteur de réflexion mesuré incluent les effets de plusieurs passages de lumière, se produisant suite à des réflexions internes (voir [4]).

Une analyse ultérieure des données relatives au facteur de réflexion mesuré et au facteur de transmission mesuré peut être utilisée pour tenir compte des réflexions internes, afin de représenter un seul passage optique à travers le matériau. Les réflexions se produisant au niveau de l'interface air/échantillon et le facteur d'absorption correspondant à un seul passage (perpendiculaire à l'éprouvette) peuvent être déterminés à partir des valeurs mesurées à l'aide des formules suivantes:

$$\rho_i[\lambda] = \frac{-\left(1 + (\tau_m[\lambda])^2 + 2\rho_m[\lambda] - (\rho_m[\lambda])^2\right) + \sqrt{\left(1 + (\tau_m[\lambda])^2 + 2\rho_m[\lambda] - (\rho_m[\lambda])^2\right)^2 + 4(\rho_m[\lambda] - 2)\rho_m[\lambda]}}{2(\rho_m[\lambda] - 2)} \quad (\text{A.2})$$

$$\alpha_{sp}[\lambda] = \frac{\rho_i[\lambda]\alpha_c[\lambda] - \alpha_c[\lambda]}{\rho_i[\lambda]\alpha_c[\lambda] + \rho_i[\lambda] - 1} \quad (\text{A.3})$$

$$\psi[\lambda] = -\frac{1}{z} \ln(1 - \alpha_{sp}[\lambda]) \quad (\text{A.4})$$

La nouvelle nomenclature des formules inclut:  $\rho_i$ , le facteur de réflexion au niveau des interfaces (intensité normalisée);  $\alpha_{sp}$ , le facteur d'absorption correspondant à un seul passage optique à travers l'éprouvette (intensité normalisée);  $\psi$ , le coefficient d'affaiblissement (en général représenté par " $\alpha$ " dans la loi de Beer,  $\text{m}^{-1}$ ); et  $z$ , l'épaisseur de l'éprouvette (m).

Après avoir déterminé le coefficient d'affaiblissement, il est possible de prévoir le facteur de transmission d'une éprouvette d'épaisseur arbitraire à l'aide d'un "facteur de transmission à un seul passage", indiqué à l'aide de l'indice  $-sp$ , pris en compte ici pour représenter une géométrie de substrat inversé/d'encapsulation de verre de silice stratifié:

$$\tau_{sp}[\lambda] = [1 - \rho'[\lambda]] e^{-\psi_g[\lambda] \cdot z_g} e^{-\psi_p[\lambda] \cdot z_p} \quad (\text{A.5})$$

$$\rho' = \frac{(n_a - n_g)^2 + (k_a - k_g)^2}{(n_a + n_g)^2 + (k_a + k_g)^2} \quad (\text{A.6})$$

$$\psi = \frac{4\pi k}{\lambda} \quad (\text{A.7})$$

La nouvelle nomenclature des formules inclut:  $\tau_{sp}$ , le facteur de transmission à un seul passage estimé (intensité normalisée);  $\rho'$ , le facteur de réflexion au niveau de l'interface entre l'air et le verre (intensité normalisée);  $n$ , la composante réelle de l'indice de réfraction (sans unité);  $k$ , le coefficient d'extinction (sans unité); et  $\pi$ , la constante mathématique, 3,142. L'indice -g représente le verre, -p l'encapsulation et -a l'air. L'analyse part ici du principe que les réflexions se produisant au niveau de l'interface verre/encapsulation sont négligeables à toutes les longueurs d'onde. Ensuite, pour un système air/verre,  $n_a$ , l'indice de réfraction de l'air est environ égal à 1, et  $k_a$ , le coefficient d'extinction de l'air, est environ égal à 0. Pour estimer  $\rho'$ , l'indice de réfraction du verre ( $n_g$ ) doit être connu. Le coefficient d'extinction du verre,  $k_g$ , peut être obtenu dans [5] pour le verre sodocalcique ou déterminé à partir de l'analyse, c'est-à-dire,  $\psi$ , d'une éprouvette de verre monolithique pour d'autres types de verres. Une méthode par solution itérative (voir [6]) peut être utilisée pour résoudre  $n$ ,  $k$  et  $\psi$  au lieu des solutions analytiques présentées dans les formules (A.5) et (A.6). Pour comparer les matériaux d'encapsulation uniquement en fonction de leurs performances optiques, en excluant l'architecture de module PV, il est possible de retirer la réflexion de  $\tau_{sp}$ , ce qui donne le "facteur d'absorption interne" de l'encapsulation,  $\alpha_i$  (intensité normalisée):

$$\alpha_i[\lambda] = 1 - e^{-\psi_p[\lambda] \cdot z_p} \quad (\text{A.8})$$

## Annexe B (informative)

### Application du rendement quantique d'une technologie de cellule spécifique

Dans la pratique, un module PV ne peut pas capturer toute l'énergie rayonnante émise par le soleil. Chaque technologie cellulaire dispose d'une capacité de conversion de l'énergie optique en énergie électrique qui lui est propre. Cette capacité peut également varier en fonction du fabricant, et est récapitulée dans le rendement quantique. Les profils de rendement quantique externe représentatifs peuvent être consultés dans les documents [7] et [8]. Le facteur de transmission à pondération par rendement quantique peut être calculé à l'aide de la formule suivante:

$$\tau_{QE} = \frac{\int \tau[\lambda] Q_{ext}[\lambda] E_{p\lambda}[\lambda] d\lambda}{\int Q_{ext}[\lambda] E_{p\lambda}[\lambda] d\lambda} \quad (B.1)$$

où

$\tau_{QE}$  fait référence au facteur de transmission à pondération par rendement quantique (unités de performances, spécifiques à une cellule particulière);

$\tau$  est le facteur de transmission mesuré de l'éprouvette à l'angle d'incidence (unités d'intensité normalisée);

$\lambda$  est la longueur d'onde de la lumière (m);

$Q_{ext}$  est le rendement quantique externe de la cellule (électrons·photon<sup>-1</sup>); et

$E_{p\lambda}$  est l'éclairement photonique spectral de référence

( $E_{p\lambda}[\lambda] = \frac{\lambda}{hc} E_{\lambda}[\lambda]$  donné dans l'IEC 60904-3, m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>·nm<sup>-1</sup>).

$\tau_{QE}$  peut être utilisé pour évaluer le facteur de transmission spécifique à l'application. Par exemple,  $\tau_{QE}$  peut être utilisé pour choisir parmi les matériaux d'encapsulation en fonction de leurs performances prévues avec une technologie de cellule PV particulière. Lors de la comparaison des matériaux d'encapsulation, tous les autres composants (y compris le substrat inversé et le substrat) et facteurs (y compris la gestion thermique) sont censés être égaux.

Si plusieurs jonctions sont connectées dans une cellule,  $\tau_{QE}$  doit être évalué séparément pour chacune d'elles. Dans ces cellules, les jonctions peuvent être connectées en série, la jonction la moins éclairée ( $\tau_{QE}$  le plus bas, par exemple) pouvant limiter le courant produit par la cellule. Dans ce cas, le facteur de transmission de chaque jonction doit être connu. Il convient de noter que, outre  $\tau_{QE}$ , d'autres facteurs peuvent motiver une condition de limitation de courant, y compris l'épaisseur physique de la jonction (affectant sa capacité pour récolter l'énergie), la résistance en série de chaque jonction et la dominante de couleur (la profondeur atmosphérique, par exemple) et le facteur de transmission correspondant de l'atmosphère.

La densité de courant maximale théorique peut être estimée à partir de la formule:

$$J = q \int \tau[\lambda] Q_{\text{ext}}[\lambda] E_{\text{p}\lambda}[\lambda] d\lambda \quad (\text{B.2})$$

où

$J$  fait référence à la densité de courant de court-circuit ( $\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$ );

$q$  est la charge d'un seul électron ( $1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$ );

$h$  est la constante de Planck ( $6,626 \times 10^{-34} \text{ W}\cdot\text{s}^2$ );

$c$  est la vitesse de la lumière dans le vide ( $2,998 \times 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ );

$\lambda$  est la longueur d'onde de la lumière (m);

$\tau$  est le facteur de transmission mesuré de l'éprouvette (intensité normalisée);

$Q_{\text{ext}}$  est le rendement quantique externe de la cellule (sans unité); et

$E_{\text{p}\lambda}$  est l'éclairement photonique spectral incident ( $\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1}$ ).

En variante, la réponse spectrale absolue ( $S$ , unités de  $\text{A/W}$ ) et  $E_{\lambda}$  l'éclairement spectral de référence (conformément à l'IEC 60904-3,  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1}$ ) peuvent être utilisés pour estimer la densité de courant maximale théorique:

$$J = \int \tau[\lambda] S[\lambda] E_{\lambda}[\lambda] d\lambda \quad (\text{B.3})$$

NOTE La densité de courant peut être déterminée de la même manière pour tous les éclairagements photoniques spectraux connus, outre ceux de l'IEC 60904-3.

Le rendement actuel peut être affecté par des pertes supplémentaires associées à un module ou système PV, y compris: le rendement de l'onduleur, les pertes liées à la température et la surface de couverture du module par les cellules.

## Bibliographie

- [1] K.R. McIntosh, G. Lau, J.N. Cotrell, K. Hanton, D.L. Bätzner, F. Bettiol, and B.S. Richards, *Increase in External Quantum Efficiency of Encapsulated Silicon Solar Cells from a Luminescent Down-Shifting Layer*, Prog. Photovolt: Res. Appl., 17 (2009), 191–197
- [2] E. Hecht, *Optics (2nd edition)*, Chapter 4. Addison–Wesley: New York, 1987
- [3] E.D. Palik, *Handbook of Optical Constants of Solids*, Academic Press Limited: London, 1998
- [4] K.R. McIntosh, J.N. Cotrell, J.S. Cumpston, A.W. Norris, N. E. Powell, B.M. Ketola, *An Optical Comparison of Silicone and EVA Encapsulants for Conventional Silicon PV Modules: A Ray-Tracing Study*, Proc. IEEE PVSC, 2009, 544-549
- [5] M. Rubin, *Optical Properties of Soda Lime Glasses*, Solar Energy Mats., 12 (1985), 275-288
- [6] M.D. Kempe, *Accelerated UV Test Methods and Selection Criteria for Encapsulants of Photovoltaic Devices*, Proc. IEEE PVSC, 2008, 1-6
- [7] S. Nann, K. Emery, *Spectral effects on PV-device rating*, Solar Energy Mats Solar Cells, 27 (1992), 189-216
- [8] M.A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa, W. Warta, *Solar cell Efficiency Tables* (version 41), PIP: Res. App., 21 (2013), 1–11
- [9] D.C. Miller, J. Apezteguia, J.G. Bokria, M. Köhl, N.E. Powell, M.E. Smith, M.D. White, H. R. Wilson, J.H. Wohlgemuth, *Examination of An Optical Transmittance Test for Photovoltaic Encapsulation Materials*, Proc SPIE 2013, 8825-8
- [10] *RSA-PE-20, AQ-00073-000, Rev. 7*, Labsphere Inc., 2001, 1-34
- [11] *Technical Guide: Integrating Sphere Theory and Application*, Labsphere Inc., 2008, 1-22
- [12] D.C. Miller, J. Apezteguia, J.G. Bokria, M. Köhl, N.E. Powell, M.E. Smith, M.D. White, H. R. Wilson, J.H. Wohlgemuth, *Examination of An Optical Transmittance Test for Photovoltaic Encapsulation Materials*, NREL-PR-5200-60379, 2013, 1-24
- [13] A.M. Nilsson, A. Jonsson, J.C. Jonsson, A. Roos, *Method for more accurate transmittance measurements of low-angle scattering samples using an integrating sphere with an entry port beam diffuser*, Appl. Opt., 50 (7), 2011, 999-1006
- [14] ~~C.G. Reid, J.G. Bokria, J.T. Woods, UV aging and outdoor exposure correlation for EVA PV encapsulants, Proc. SPIE, 8825, 2013~~
- W. Thiemsorn, K. Keowkamnerd, S. Phanichphant, P. Suwannathada, H. Hessenkemper, "Influence of glass basicity on redox interactions of iron-manganese-copper ion pairs in soda-lime-silica glass", *Glass Phys. Chem.*, 34 (2008), 19-29

ASTM E308-08, *Standard practice for computing the colours of objects by using the CIE system*

ASTM E313-10, *Standard practice for calculating yellowness and whiteness indices from instrumentally measured colour coordinates*

---

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62788-1-4:2016+AMD1:2020 CSV

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62788-1-4:2016+AMD1:2020 CSV

**FINAL VERSION****VERSION FINALE**

**Measurement procedures for materials used in photovoltaic modules –  
Part 1-4: Encapsulants – Measurement of optical transmittance and calculation  
of the solar-weighted photon transmittance, yellowness index, and UV cut-off  
wavelength**

**Procédures de mesure des matériaux utilisés dans les modules  
photovoltaïques –  
Partie 1-4: Encapsulants – Mesurage du facteur de transmission optique  
et calcul du facteur de transmission photonique à pondération solaire,  
de l'indice de jaunissement et de la fréquence de coupure des UV**

## CONTENTS

|                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FOREWORD .....                                                                            | 3  |
| 1 Scope .....                                                                             | 5  |
| 2 Normative references .....                                                              | 5  |
| 3 Terms and definitions .....                                                             | 6  |
| 4 Principle .....                                                                         | 7  |
| 5 Apparatus .....                                                                         | 7  |
| 6 Test specimens .....                                                                    | 7  |
| 6.1 Nominal (and unweathered) transmittance to the cell .....                             | 7  |
| 6.2 Weathering studies .....                                                              | 8  |
| 6.3 Glass for superstrates/substrates .....                                               | 9  |
| 6.4 Number of specimens .....                                                             | 9  |
| 6.5 Conditioning of specimens .....                                                       | 9  |
| 7 Measurement procedure .....                                                             | 9  |
| 7.1 General .....                                                                         | 9  |
| 7.2 Specimen preparation .....                                                            | 10 |
| 7.3 Instrument calibration (baseline measurements) .....                                  | 10 |
| 7.4 Specimen measurements .....                                                           | 10 |
| 7.5 Witness measurements .....                                                            | 10 |
| 7.5.1 Witness specimen(s) .....                                                           | 11 |
| 7.5.2 Procedure for the witness specimen prior to the test specimen(s) .....              | 11 |
| 7.5.3 Measurement of the test specimen(s) .....                                           | 11 |
| 7.5.4 Procedure for the witness specimen after the test specimen(s) .....                 | 11 |
| 8 Calculation and expression of results .....                                             | 11 |
| 8.1 Post-processing of data .....                                                         | 11 |
| 8.2 Calculation of weighted transmittance .....                                           | 12 |
| 8.3 Calculation of the Yellowness Index ( $YI$ ) .....                                    | 12 |
| 8.4 Calculation of the UV cut-off wavelength .....                                        | 12 |
| 9 Uncertainty of measurements .....                                                       | 13 |
| 10 Test report .....                                                                      | 13 |
| Annex A (informative) Advanced analysis of transmittance (absorption coefficients) .....  | 15 |
| Annex B (informative) Applying the quantum efficiency of a specific cell technology ..... | 17 |
| Bibliography .....                                                                        | 19 |
| Table 1 – Details of the solar weight transmittance parameters .....                      | 12 |

## INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

### MEASUREMENT PROCEDURES FOR MATERIALS USED IN PHOTOVOLTAIC MODULES –

#### Part 1-4: Encapsulants – Measurement of optical transmittance and calculation of the solar-weighted photon transmittance, yellowness index, and UV cut-off wavelength

#### 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.

**This consolidated version of the official IEC Standard and its amendment has been prepared for user convenience.**

**IEC 62788-1-4 edition 1.1 contains the first edition (2016-09) [documents 82/1148/FDIS and 82/1165/RVD] and its amendment 1 (2020-10) [documents 82/1767/FDIS and 82/1791/RVD].**

**This Final version does not show where the technical content is modified by amendment 1. A separate Redline version with all changes highlighted is available in this publication.**

International Standard IEC 62788-1-4 has been prepared by IEC technical committee 82: Solar photovoltaic energy systems.

A list of all parts in the IEC 62788 series, published under the general title *Measurement procedures for materials used in photovoltaic modules*, 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 the base publication and its amendment 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 62788-1-4:2016+AMD1:2020 CSV

## MEASUREMENT PROCEDURES FOR MATERIALS USED IN PHOTOVOLTAIC MODULES –

### Part 1-4: Encapsulants – Measurement of optical transmittance and calculation of the solar-weighted photon transmittance, yellowness index, and UV cut-off wavelength

#### 1 Scope

This part of IEC 62788 provides a method for measurement of the optical transmittance of encapsulation materials used in photovoltaic (PV) modules. The standardized measurements in this procedure quantify the expected transmittance of the encapsulation to the PV cell. Subsequent calculation of solar-weighted transmittance allows for comparison between different materials. The results for unweathered material may be used in an encapsulation manufacturer's datasheets, in manufacturer's material or process development, in manufacturing quality control (material acceptance), or applied in the analysis of module performance.

This measurement method can also be used to monitor the performance of encapsulation materials after weathering, to help assess their durability. The standardized measurements are intended to examine an interior region within a PV module, e.g., without the effects of oxygen diffusion at the periphery of the cells. Subsequent calculation of yellowness index allows for quantification of durability and consideration of appearance. The change in transmittance, yellowness index, and ultraviolet (UV) cut-off wavelength may be used by encapsulation or module manufacturers to compare the durability of different materials.

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

ISO 291:2008, *Plastics – Standard atmospheres for conditioning and testing*

ISO 11664-1:2007, *Colorimetry – Part 1: CIE standard colorimetric observers*

ISO 11664-2:2007, *Colorimetry – Part 2: CIE standard illuminants*

ISO 13468-2:1999, *Plastics – Determination of the total luminous transmittance of transparent materials – Part 2: Double-beam instrument*

ISO 17223:2014, *Plastics – Determination of yellowness index and change in yellowness index*

ASTM E424-71:2007, *Standard test methods for solar energy transmittance and reflectance (Terrestrial) of sheet material*

### 3 Terms and definitions

For the purposes of this document, the following terms and definitions 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>

NOTE In cases where definitions already exist, refer to IEC TS 61836. Calculations related to these definitions are given in Clause 8.

#### 3.1

##### **solar-weighted transmittance of photon irradiance**

proportion of the solar spectral photon irradiance ( $E_{p\lambda}$ ,  $\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1}$ ) optically transmitted through the specimen, throughout the range of the terrestrial solar spectrum (280 nm to 2 500 nm) (see Table 1)

Note 1 to entry: The photon irradiance ( $E_{p\lambda}$ ,  $\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1}$ ) accounts for the wavelength-specific energy of the optical flux and should not be confused with spectral irradiance ( $E_{\lambda}$ ,  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1}$ ).

#### 3.2

##### **representative solar-weighted transmittance of photon irradiance**

proportion of the solar spectral photon irradiance ( $E_{p\lambda}$ ,  $\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1}$ ) optically transmitted through the specimen, throughout the range of the terrestrial solar spectrum (300 nm to 1 250 nm) (see Table 1)

Note 1 to entry: In the case of a PV device, the representative solar-weighted transmittance of photon irradiance is defined throughout the range of the spectrum utilized by a representative PV device (which may not include wavelengths as low as 280 nm or as great as 2 500 nm).

#### 3.3

##### **UV cut-off wavelength**

$\lambda_{\text{cUV}}$

wavelength of light below which the encapsulation is considered optically absorbing and above which the encapsulation is considered transmitting

Note 1 to entry: In this procedure, the absolute transmittance of 10 % (corresponding to the optical absorbance of 1) is considered as the threshold of the UV cut-off wavelength. As described further in [9]<sup>1</sup>, the UV cut-off wavelength may also be used to quantify the effects of weathering.

#### 3.4

##### **weathering**

process of subjecting specimens to environmental conditions that could include ultra-violet radiation, temperature, humidity, and ozone

Note 1 to entry: Weathering may occur in artificial or natural environments. Weathering could occur at the nominal (field) or an accelerated rate.

#### 3.5

##### **yellowness index**

$YI$

calculated value identifying the yellowness of the test specimen perceived by a human observer (see ASTM E313-10)

Note 1 to entry:  $YI$  may be used to quantify the effects of weathering.

<sup>1</sup> Numbers in square brackets refer to the Bibliography.

## 4 Principle

The total spectral transmittance of laminated specimens, containing encapsulation material, shall be measured using a spectrophotometer equipped with an integrating sphere. Solar-weighted transmittance, yellowness index, and UV cut-off wavelength will be subsequently calculated from the transmittance measurements.

The transmittance measured using this procedure may be used in a more advanced optical analysis to improve the accuracy of PV performance analysis or distinguish between different encapsulation materials, as described in Annex A. The transmittance measured using this procedure may be used to estimate module performance (current yield) if the quantum efficiency of the PV cell is known, as described in Annex B. The method does not attempt to account for variations in transmittance with the angle of incidence, which may vary with time of day, sky conditions, and geometry of the module, especially if optical concentration is used.

## 5 Apparatus

The test instrument shall consist of a double beam spectrophotometer equipped with an integrating sphere. A single beam spectrophotometer may be used if the port reflectance can be properly accounted for, as in Annex A and [2]. Details regarding the construction and configurations of the test instrument may be found in ISO 13468-2 or ASTM E424-71. A measurement range of at least 280 nm to 2 500 nm is required for calculation of the solar-weighted transmittance using the AM1.5 global spectrum as in IEC 60904-3. A wavelength increment no larger than 1 nm is preferred for the measurement, however increments up to 5 nm are permitted with linear interpolation to 1 nm.

An integrating sphere of at least 100 mm in diameter with a port area of < 5 %, as in [11], is recommended to reduce the error in the measurement. The port area as in [9] should not exceed 13 %.

## 6 Test specimens

### 6.1 Nominal (and unweathered) transmittance to the cell

Specimens shall be constructed using a laminate structure of glass/encapsulation, as described in Annex A and [42].

The solar-weighted transmittance and representative solar-weighted transmittance, as calculated in Clause 8, may be used for the purpose of reporting on an encapsulation manufacturer's datasheet.

The specimens shall contain an examination region free from visible flaws including: scratches, pits, sink marks, bubbles, or other imperfections. The examination region shall be at least 50 % larger in diameter than the measurement area of the test instrument.

NOTE 1 A spot size of 1 cm × 1 cm is common in many commercial spectrophotometer instruments. Use of specimens at least 2 to 3 times this size will improve uniformity (resulting from fabrication) and handling (during measurement).

The size (length and width) should be adequate to allow the specimen to fit inside the test instrument.

The nominal thickness of the encapsulant specimens shall be equal to the thickness intended for use in PV modules.

Specimens should be cured (if applicable) according to the manufacturer's specification and using a process as similar as possible to the method used in the intended manufacturing process.

The thickness of the encapsulation portion of the test specimen shall be measured after its preparation. The thickness shall be taken as the average of three measurements obtained at different locations on the test region of the specimen.

Glass plates shall be parallel with minimal edge pinch or edge flare. I.e. the encapsulation thickness at any of the corners shall not be more than 10 % different than that in the centre of the sample. In a typical bag laminator this will require the use of a frame around the samples during lamination, but any other means of accomplishing this specification is acceptable.

The back surface of the specimens (the exposed encapsulation intended to face to the integrating sphere) shall not be intentionally textured.

For additional resolution to more accurately distinguish between materials, subsequent studies may utilize a thicker encapsulation layer that may be analysed to determine the optical attenuation coefficient as described in Annex A.

If the encapsulation material is intended to be used with superstrates other than glass, the same procedure may be used in a subsequent study. Specimens using polymeric superstrates may be prone to optical polarization occurring within the instrument. As in [9] and [12], a depolarizer should be used with the instrument to minimize the effects of polarization.

NOTE 2 The effect of haze in specimens prone to optical haze can be mitigated through the use of a diffusing film, as described in [13].

## 6.2 Weathering studies

A glass/encapsulation/glass laminate specimen geometry is recommended.

The size (length and width) should be adequate to allow the specimen to fit inside the test instrument.

The minimum size of 7,5 cm × 7,5 cm is recommended for weathering specimens based on previous examinations of poly (ethylene-co-vinyl acetate).

Large specimens are preferred in weathering studies, because a test region may be distinguished, where the diffusion of oxygen or moisture is limited.

Other geometries may be used with this procedure to evaluate the effects of weathering. For example, a permeable polymeric backsheet facilitates the examination of moisture ingress. Some PV modules make use of an edge seal to reduce moisture permeation.

Separate “blank” pieces of superstrate or substrate may be weathered with the test specimens to quantify the degradation of those components.

The specimens shall contain an examination region free from visible flaws including: scratches, pits, sink marks, bubbles or other imperfections. The examination region shall be at least 50 % larger in diameter than the measurement area of the test instrument.

The nominal thickness of the encapsulant specimens shall be as intended for use in the PV module. Specimens should be cured (if applicable) according to the manufacturer's specification and as similar as possible to the method used in the intended manufacturing procedure.

The thickness of the encapsulation in the laminate may be controlled by inserting a removable material around the specimen perimeter.

### 6.3 Glass for superstrates/substrates

Measurements of the nominal (unweathered) transmittance to the cell for the purpose of encapsulation manufacturer's datasheets shall be performed using  $(3 \pm 0,2)$  mm thick silica glass. The glass shall have smooth, defect-free surfaces that are sufficiently flat and parallel such that the diffuse component of transmitted light is less than 1 % between 280 nm and 2 500 nm.

The solar-weighted transmittance of photon irradiance of silica glass, which may be used to verify that the composition of the glass is appropriate, is approximately  $(93 \pm 1)$  % between 280 nm and 2 500 nm, because the reduction in transmittance comes from reflections at the surfaces. The UV cut-off wavelength for silica should be less than 225 nm. As in [1] and [12], the transmittance of the glass should be greater than 90 % at 280 nm.

The glass shall not be coated or contain antireflective layers. The glass shall not be intentionally textured.

Subsequent examination beyond that intended for the encapsulation material datasheet (including performance and weathering), such as for the purpose of quality control for production monitoring, may be performed according to this procedure using other superstrate and/or substrate materials that can incorporate other optical features, e.g., antireflective coatings, surface texture, and untempered soda-lime PV glass.

The process of solarization, where a redox reaction of trace impurities affects the UV cut-off wavelength and corresponding range of transmittance, can occur if glass other than silica is used [14]. It is therefore advised for weathering studies to UV condition substrate and superstrate materials, other than silica, prior to lamination.

NOTE Silica glass is more durable than soda-lime glass and will better resist glass corrosion in accelerated tests.

### 6.4 Number of specimens

A minimum of 3 replicates shall be used for the determination of the transmittance to the cell or in weathering studies. Optical characteristics, including transmittance,  $YI$ , and the UV cut-off wavelength shall be subsequently calculated using the average of the three separate specimens, with the range of the measurements indicated to identify their variability.

### 6.5 Conditioning of specimens

Specimens used for the purpose of datasheet reporting shall be maintained at  $(23 \pm 2)$  °C,  $(50 \pm 10)$  % RH for at least 24 h, as specified per Class 2 in ISO 291, prior to optical measurement.

The use of elevated temperature and humidity conditions in a weathering study may result in a supersaturated moisture condition within specimens, affecting their optical transmittance when they are returned to the laboratory ambient condition. In such cases, specimen conditioning, including a controlled environmental chamber, may be applied to prevent spurious effects, e.g., optical haze or moisture related absorptance. Specimen-condition effects may be verified using periodic measurements. Refer to the weathering test procedure for any specific details related to specimen conditioning and storage intermittent to weathering.

## 7 Measurement procedure

### 7.1 General

Transmittance measurements shall be performed in accordance with the procedure in ISO 13468-2.

## 7.2 Specimen preparation

Prior to measurement, specimens should be free of dust, grease or other contaminants. Specimens may be wiped with a solution of deionized water and mild soap for cleaning prior to measurement using a cleanroom wipe or lint free cloth. The specimens and instrument should be in thermal equilibrium prior to measurement.

## 7.3 Instrument calibration (baseline measurements)

Allow the instrument lamp to adequately equilibrate after it has been lighted, observing the typical warm-up period, e.g., 15 min or as recommended by the instrument manufacturer. Perform the correction scan(s) to compensate for the instrument baseline signal.

The 100 % transmittance baseline measurement should be performed in air, with no superstrate, specimen, or substrate material present. The 0 % transmittance baseline measurement should also be performed, if possible.

Periodic measurement of the baseline is recommended to minimize instrument drift and ensure the measured values are accurate. The instrument drift occurring over an extended measurement session may be instrument specific.

It is recommended to maintain the instrument drift below 0,05 % to minimize the uncertainty of measurement (Clause 9). The instrument drift should be considered in the instrument bias when the uncertainty of measurements is determined.

## 7.4 Specimen measurements

Perform the transmittance measurements for the test specimens over the wavelength range of at least 280 nm to 2 500 nm using a 1 nm increment.

Linear interpolation to a 1 nm increment may be used when only a coarser measurement increment (maximum of 5 nm) is available. The error associated with a coarser increment may be more influential at shorter wavelengths (where  $YI$  and the UV cut-off wavelength are determined) than at longer wavelengths (where only the solar-weighted transmittance is affected). When applied, the use of linear interpolation should be noted in the test report.

Discontinuities associated with changes in the optical components (including detector, light source, and/or monochromator) may occur during the measurement. Such discontinuities can be minimized via the instrument settings.

It may be useful to extend the range of measurement in weathering durability studies to provide insight into the results. For example, by measuring UV wavelengths as low as 200 nm, the integrity of UV absorbers and stabilizers can be confirmed from the UV cut-off wavelength.

The spectral bandwidth of the measurement should be less than or equal to the increment of the measurement, i.e., 1 nm or 5 nm.

## 7.5 Witness measurements

Perform the transmittance measurements on a witness specimen at the beginning of each measurement session to ensure proper operation of the instrument and minimize the measurement error. Perform the transmittance measurements of any witness specimens using the same procedure applied to the test specimen(s). The witness specimens may include a traceable standard specimen, laboratory working witness specimen, or the silica superstrate/substrate material.

### 7.5.1 Witness specimen(s)

The witness specimens may include a traceable standard specimen, laboratory working witness specimen, or the silica superstrate/substrate material. Witness specimen(s) for control measurements may also include a non-weathered glass working witness specimen of the same construction used in module representative test specimen(s) or reference (glass or polymeric superstrate) specimen(s). When not being used for control measurements, a working witness specimen shall be stored in the dark at 23 °C and 50 % humidity as specified per Class 2 in ISO 291.

### 7.5.2 Procedure for the witness specimen prior to the test specimen(s)

After instrument equilibration and baselining, perform the transmittance measurements on a witness specimen at the beginning of each measurement session to ensure proper operation of the instrument and minimize the measurement error. Perform the transmittance measurements of the witness specimen using the same procedure that will be applied to the test specimen(s).

The verification wavelengths for the working reference shall be  $\pm 50$  nm from the instrument transitions for the source, detector, and gratings. Because of the limitations of measurement, including noise from scattering at short wavelengths, the verification wavelengths shall not extend below 225 nm. In the case of many commercial instruments where the source, detector, and grating transitions occur at 350 nm, 800 nm, and 800 nm, respectively, the verification wavelengths should include the ranges 250 nm to 300 nm, 400 nm to 750 nm and 850 nm to 2500 nm (in the case of standard measurements) or 225 nm to 300 nm, 400 nm to 750 nm and 850 nm to 2 500 nm (in the case of measurements of weathered specimens).

The transmittance at each of the verification wavelengths should be within 0,25 % of the known transmittance (or laboratory running average) for the witness specimen. If the transmittance at each verification wavelength is not within 0,25 % of the known transmittance, the instrument baseline shall be performed again (including as many as three times) and the witness specimen shall be remeasured. If the transmittance at each wavelength continues to be greater than 0,25 % of the known transmittance, the instrument should be maintained or repaired.

### 7.5.3 Measurement of the test specimen(s)

After the witness specimen has been verified, the test specimen(s) shall be measured.

### 7.5.4 Procedure for the witness specimen after the test specimen(s)

After the test specimen(s) have been measured, perform the transmittance measurements on a witness specimen at the end of each measurement session to ensure proper operation of the instrument through the measurement session. Perform the transmittance measurements of the witness specimen using the same procedure that will be applied to the test specimen(s). The transmittance at each of the verification wavelengths should be within 0,25 % of the known transmittance (or laboratory running average) for the witness specimen. If the transmittance at each verification wavelength is not within 0,25 % of the known transmittance, the measured data for the test specimen(s) shall be considered invalid and the test specimen(s) shall be measured again in a subsequent session.

## 8 Calculation and expression of results

### 8.1 Post-processing of data

The measurements obtained from three separate specimens shall be averaged at each wavelength increment. The variability shall be reported for each characteristic (weighted transmittance, yellowness index, and UV cut-off wavelength) as the range (difference of the maximum and minimum measurements) for the three specimens.

## 8.2 Calculation of weighted transmittance

The solar-weighted transmittance may be calculated from formula (1):

$$\tau_{\text{sw}} = \frac{\int \tau[\lambda] E_{\text{p}\lambda}[\lambda] d\lambda}{\int E_{\text{p}\lambda}[\lambda] d\lambda} \quad (1)$$

Where

- $\tau_{\text{sw}}$  refers to the solar-weighted transmittance (%);
- $\tau$  is the measured transmittance of the specimen (%);
- $\lambda$  is the wavelength of light (nm); and
- $E_{\text{p}\lambda}$  is the reference global spectral photon irradiance (as given in IEC 60904-3).

The details for the calculation of the various solar-weighted transmittance parameters are identified in Table 1. The parameters include: the “solar-weighted” transmittance, which may be applied generally, based on a broad solar spectrum; and the “representative solar-weighted” transmittance, which may be applied for most commercially available single junction terrestrial PV cells (including silicon, cadmium telluride, copper indium gallium selenide, and gallium arsenide) based on their useable wavelength range. The solar-weighted transmittance (as well as  $YI$ ) obtained from the spectrophotometer measurements (1 nm interval) shall be calculated using a discretized sum, by means of the modified trapezoidal integration technique, as in IEC 60904-3. The denominator for formula (1) is specified in Table 1 for the purpose of verification, based on IEC 60904-3.

**Table 1 – Details of the solar weight transmittance parameters**

| Parameter                                                                                                                                                                                                        | Symbol              | Lower bound wavelength<br>nm | Upper bound wavelength<br>nm | $\int E_{\text{p}\lambda}[\lambda] d\lambda$<br>$\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| “solar-weighted” transmittance                                                                                                                                                                                   | $\tau_{\text{sw}}$  | 280                          | 2 500                        | $4,15502132187479 \times 10^{21}$                                                   |
| “representative solar-weighted” transmittance                                                                                                                                                                    | $\tau_{\text{rsw}}$ | 300                          | 1 250                        | $3,03000915425 \times 10^{21}$                                                      |
| NOTE The solar-weighted spectral transmittance may be more specifically applied to estimate module performance, i.e., current yield, if the quantum efficiency of the PV cell is known, as described in Annex B. |                     |                              |                              |                                                                                     |

## 8.3 Calculation of the Yellowness Index ( $YI$ )

$YI$  shall be calculated according to the procedure in ISO 17223. The three tristimulus coefficients shall be determined using the CIE Standard D65 Illuminant spectrum (as in ISO 11664-2), and the CIE 1964 XYZ colour space (for a human observer with a 10° field of view, as in ISO 11664-1).  $YI$  shall be calculated for a wavelength increment, e.g., 1 nm, consistent with the measured transmittance data.

NOTE Additional details related to the  $YI$  may be found in ASTM E313-10 and ASTM E308-08.

## 8.4 Calculation of the UV cut-off wavelength

The UV cut-off wavelength,  $\lambda_{\text{cUV}}$ , shall be determined as the longest wavelength (linearly interpolated to the nearest tenth of a nm) in the UV range (where  $\lambda \leq 400$  nm) where the transmittance equals 10 % or less.

In cases where the UV cut-off wavelength is known to be less than 280 nm, the range of measurement should be extended below 280 nm to quantify its specific value.

## 9 Uncertainty of measurements

The uncertainty associated with the randomness of measurement may be estimated from:

$$\sigma_{\text{ran}} = \frac{\int \Delta\tau[\lambda] E_{\text{p}\lambda}[\lambda] d\lambda}{\int E_{\text{p}\lambda}[\lambda] d\lambda} = S_n \sqrt{\sum_{i=1}^n (\sigma_{\tau}[\lambda])^2} \quad (2)$$

where

- $\sigma_{\text{ran}}$  represents the random variation of measurement;
- $\Delta\tau$  is the uncertainty of the transmittance measurement;
- $\lambda$  is the wavelength of light;
- $E_{\text{p}\lambda}$  is the reference spectral photon irradiance;
- $S_n$  is the coefficient for Student's t-distribution (3,18245 for 3 specimens at the 95 % confidence interval), and
- $\sigma_{\tau}$  is the standard deviation of the transmittance measurements (at each wavelength increment).

The final (reported) uncertainty may be estimated from:

$$\sigma_{\text{tot}} = \sqrt{(\sigma_{\text{inst}})^2 + (\sigma_{\text{ran}})^2} \quad (3)$$

where

- $\sigma_{\text{tot}}$  represents the total uncertainty;
- $\sigma_{\text{inst}}$  is the instrument bias (accounting for the particular make of the instrument, the instrument settings (including integration time), as well as instrument drift); and
- $\sigma_{\text{ran}}$  is the random variation of measurement (the accuracy of the instrument as well as the specimen variability).

$\sigma_{\text{ran}}$  may be evaluated for the test instrument from the average of 10 measurements (multiplied by the corresponding  $S_n$  value of 2,22814) with no specimen present (nominal transmittance of 100 %). Similarly,  $\sigma_{\text{inst}}$  may be evaluated for the test instrument from a series of successive periodic measurements with no specimen present, with the rate of drift being determined from a trendline fit. While  $\sigma_{\text{tot}}$  may vary with the lamp age, a single representative evaluation is expected to adequately represent the test instrument used within a particular test laboratory.

Calculate the uncertainty for other test results (such as YI) using the same method as for transmittance, *i.e.*, the method of propagation of error. These estimates should also account for the uncertainty associated with instrument bias in addition to random error.

The repeatability and reproducibility of the method, including solar-weighted transmittance, yellowness index, and the UV cut-off wavelength, are described in Annex A and [12].

## 10 Test report

A report of the tests shall be prepared by the test agency. The report shall contain the detail specification for the specimens. 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 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 tested, including specimen type, specimen thickness (and its range of variation), the specimen size (length and width), the superstrate/substrate material(s) and their characteristics;
- f) characterization and state of the test item, including the method and details of specimen preparation (including curing, lamination, or similar processing if applicable) and conditioning;
- g) date of receipt of test item and date(s) of test, where appropriate;
- h) identification of test method used; including the make and model of the spectrophotometer and the integrating sphere;
- i) reference to sampling procedure, where relevant;
- j) any deviations from, additions to, or exclusions from, the test method and any other information relevant to a specific test, such as environmental conditions; and the procedure(s) and condition(s) used for weathering and any conditioning conducted prior to measurements;
- k) measurements, examinations and derived results supported by tables, graphs, sketches and photographs as appropriate including the complete set of the tabulated average transmittance values and the corresponding range of the averaged values; the estimated uncertainty of the transmittance measurement (instrument); the averaged solar-weighted transmittance of photon irradiance and the corresponding range of the averaged values; the averaged representative solar-weighted transmittance of photon irradiance and the corresponding range of the averaged values (as well as the wavelength range considered); the UV cut-off wavelength and its uncertainty; and any failures observed;
- l) the yellowness index and its uncertainty (which should be determined after each weathering interval in addition to its original value in the case of weathering experiments);
- m) a statement of the estimated uncertainty of the test results (where relevant); the measurement of the witness specimen (if utilized) and its deviation from its witness values. When applicable, the details of the witness specimen (such as its preparation, composition, and thickness) shall be specified;
- n) 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;
- o) where relevant, a statement to the effect that the results relate only to the items tested;
- p) a statement that the certificate or report shall not be reproduced except in full, without the written approval of the laboratory.

## Annex A (informative)

### Advanced analysis of transmittance (absorption coefficients)

The measurements described in this procedure may be supplemented to allow for a more rigorous optical analysis. The determination of the optical attenuation coefficient allows the optical transmittance to be generalized and extended to any possible configuration. Such analysis may be used to improve the accuracy of PV performance analysis, account for changes in the module design (such as the thickness of the encapsulation), or to distinguish between different encapsulation materials. Characteristics including transmittance,  $YI$ , and the UV cut-off wavelength strongly vary with the specimen thickness; the methods described in this annex may therefore be used to standardize measurements to a representative thickness.

Optical transmittance also depends upon the material layers present within the specimen. A more rigorous analysis, summarized in this annex, may be used to consider loss of transmitted light, including the reflectance at material interfaces.

Hemispherical reflectance and transmittance data may be used to calculate the attenuation coefficient for a minimally absorbing material. The terminology “low absorbing” implies that light reflected from the rear interface is not fully absorbed prior to reaching the front interface. For this method, the specimen is ideally flat, free standing, of uniform known thickness, and minimally scattering, i.e., minimal optical haze. The method is based on work presented in [1]. As described in [2] and [3], the absorbance is first determined using the formula:

$$\alpha_c[\lambda] = 1 - \tau_m[\lambda] - \rho_m[\lambda] \quad (\text{A.1})$$

Nomenclature in the formula includes:  $\alpha_c$ , the calculated optical absorbance (normalized intensity);  $\tau_m$ , the measured optical transmittance (normalized intensity);  $\rho_m$ , the measured optical reflectance (normalized intensity); and  $\lambda$ , the wavelength (m). The measured reflectance should be corrected to an absolute scale (using a certified calibrated reflectance specimen) for spectrophotometers that report relative reflectance measurements. The absolute reflectance of the specimen may be determined if its measured relative reflectance is multiplied by the reflectance of a calibrated specimen. The measured transmittance and measured reflectance include the effects of multiple passes of light, occurring as the result of internal reflections, as described in [4].

A subsequent analysis of the measured reflectance and transmittance data may be used to account for the internal reflections, in order to represent a single optical pass through the material. The reflections occurring at the air/sample interface as well as the absorbance for a single pass (occurring normal to the specimen), can be determined from the measured values using the formulas:

$$\rho_i[\lambda] = \frac{-\left(1 + (\tau_m[\lambda])^2 + 2\rho_m[\lambda] - (\rho_m[\lambda])^2\right) + \sqrt{\left(1 + (\tau_m[\lambda])^2 + 2\rho_m[\lambda] - (\rho_m[\lambda])^2\right)^2 + 4(\rho_m[\lambda] - 2)\rho_m[\lambda]}}{2(\rho_m[\lambda] - 2)} \quad (\text{A.2})$$

$$\alpha_{sp}[\lambda] = \frac{\rho_i[\lambda]\alpha_c[\lambda] - \alpha_c[\lambda]}{\rho_i[\lambda]\alpha_c[\lambda] + \rho_i[\lambda] - 1} \quad (\text{A.3})$$

$$\psi[\lambda] = -\frac{1}{z} \ln(1 - \alpha_{sp}[\lambda]) \quad (\text{A.4})$$

New nomenclature in the formulas includes:  $\rho_i$ , the reflectance at the interfaces (normalized intensity);  $\alpha_{sp}$ , the absorptance occurring for a single optic pass through the specimen (normalized intensity);  $\psi$ , the attenuation coefficient (typically represented as “ $\alpha$ ” in Beer’s law,  $m^{-1}$ ); and  $z$ , the specimen thickness (m).

After determining the attenuation coefficient, it is possible to predict the transmittance for a specimen of arbitrary thickness using the “single pass transmittance”, indicated using the subscript –sp, considered here to represent a laminated silica glass superstrate/encapsulation geometry:

$$\tau_{sp}[\lambda] = [1 - \rho'[\lambda]] e^{-\psi_g[\lambda] \cdot z_g} e^{-\psi_p[\lambda] \cdot z_p} \quad (A.5)$$

$$\rho' = \frac{(n_a - n_g)^2 + (k_a - k_g)^2}{(n_a + n_g)^2 + (k_a + k_g)^2} \quad (A.6)$$

$$\psi = \frac{4\pi k}{\lambda} \quad (A.7)$$

New nomenclature in the formulas includes:  $\tau_{sp}$ , the estimated single pass transmittance (normalized intensity);  $\rho'$ , the reflectance at the interface between air and glass (normalized intensity);  $n$ , the real component of the refractive index (unitless);  $k$ , the extinction coefficient (unitless); and  $\pi$ , the mathematical constant, 3,142. The subscript -g represents the glass; -p represents the encapsulation; and -a represents air. The analysis here assumes that the reflections occurring at the glass/encapsulation interface are negligible at all wavelengths. Then for an air/glass system,  $n_a$ , the refractive index for air, approximately equals 1 and the  $k_a$ , the extinction coefficient for air, approximately equals 0. To estimate  $\rho'$ , the refractive index for glass ( $n_g$ ) shall be known. The extinction coefficient for glass,  $k_g$ , may be taken from [5] for soda-lime glass or determined from the analysis, i.e.,  $\psi$ , of a monolithic glass specimen for other types of glass. An iterative solution method, described in [6], may be used to solve for  $n$ ,  $k$ , and  $\psi$  instead of the closed-form solutions in formulas (A.5) and (A.6). For the purpose of comparing encapsulation materials based solely on their optical performance, excluding the PV module architecture, it is possible to remove reflection from  $\tau_{sp}$ , giving the “internal absorptance” of the encapsulation,  $\alpha_i$  (normalized intensity):

$$\alpha_i[\lambda] = 1 - e^{-\psi_p[\lambda] \cdot z_p} \quad (A.8)$$

## Annex B (informative)

### Applying the quantum efficiency of a specific cell technology

In practice, a PV module cannot capture all of the radiant energy emitted from the sun. Each cell technology has its own capability for converting optical energy into electrical energy. This capability may also vary according to the manufacturer, and is summarized in the quantum efficiency. Representative external quantum efficiency profiles may be found in [7] and [8]. The quantum efficiency-weighted transmittance may be calculated from the formula:

$$\tau_{QE} = \frac{\int \tau[\lambda] Q_{ext}[\lambda] E_{p\lambda}[\lambda] d\lambda}{\int Q_{ext}[\lambda] E_{p\lambda}[\lambda] d\lambda} \quad (B.1)$$

where

$\tau_{QE}$  refers to the quantum efficiency-weighted transmittance (performance units, specific to a particular cell);

$\tau$  is the measured transmittance of the specimen at the incident angle (units of normalized intensity);

$\lambda$  is the wavelength of light (m);

$Q_{ext}$  is the external quantum efficiency of the cell (electrons·photon<sup>-1</sup>); and

$E_{p\lambda}$  is the reference spectral photon irradiance

( $E_{p\lambda}[\lambda] = \frac{\lambda}{hc} E_{\lambda}[\lambda]$  as given in IEC 60904-3, m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>·nm<sup>-1</sup>).

$\tau_{QE}$  may be used to evaluate application specific transmittance. For example,  $\tau_{QE}$  may be used to select between encapsulation materials based on their expected performance with a particular PV cell technology. When comparing between encapsulation materials, all other components (including superstrate and substrate) and factors (including thermal management) are assumed to be equal.

In cases where more than one junction is connected within a cell,  $\tau_{QE}$  shall be evaluated separately for each of the junctions. In such cells, the junctions may be connected in series, where the least illuminated junction, e.g., lowest  $\tau_{QE}$ , may limit the current produced by the cell. In such cases the transmittance through each junction shall be known. It should be noted that in addition to  $\tau_{QE}$ , other factors may motivate a current-limited condition, including: the physical thickness of the junction (affecting its capacity to harvest energy), the series resistance of each junction, and the colorcast present, e.g., the atmospheric depth and corresponding transmittance of the atmosphere.

The theoretical maximum current density may be estimated from the formula:

$$J = q \int \tau[\lambda] Q_{ext}[\lambda] E_{p\lambda}[\lambda] d\lambda \quad (B.2)$$

where

$J$  refers to the short circuit current density (A·m<sup>-2</sup>);

$q$  is the charge of a single electron (1,602 × 10<sup>-19</sup> C);

$h$  is Planck's constant (6,626 × 10<sup>-34</sup> W·s<sup>2</sup>);

$c$  is the speed of light in a vacuum ( $2,998 \times 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ );  
 $\lambda$  is the wavelength of light (m);  
 $\tau$  is the measured transmittance of the specimen (normalized intensity);  
 $Q_{\text{ext}}$  is the external quantum efficiency of the cell (unitless); and  
 $E_{p\lambda}$ , the incident spectral photon irradiance ( $\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1}$ ).

Alternatively the absolute spectral response ( $S$ , units of A/W) and  $E_{\lambda}$ , the reference spectral irradiance (as in IEC 60904-3,  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1}$ ) can be used to estimate the theoretical maximum current density:

$$J = \int \tau[\lambda] S[\lambda] E_{\lambda}[\lambda] d\lambda \quad (\text{B.3})$$

NOTE The current density may be determined similarly for any known spectral photon irradiance, in addition to that in IEC 60904-3.

The current yield may be affected by additional losses associated with a PV module or system, including: inverter efficiency, temperature related loss, and the area coverage of the module by the cells.

## Bibliography

- [1] K.R. McIntosh, G. Lau, J.N. Cotsell, K. Hanton, D.L. Bätzner, F. Bettiol, and B.S. Richards, *Increase in External Quantum Efficiency of Encapsulated Silicon Solar Cells from a Luminescent Down-Shifting Layer*, Prog. Photovolt: Res. Appl., 17 (2009), 191–197
- [2] E. Hecht, *Optics (2nd edition)*, Chapter 4. Addison–Wesley: New York, 1987
- [3] E.D. Palik, *Handbook of Optical Constants of Solids*, Academic Press Limited: London, 1998
- [4] K.R. McIntosh, J.N. Cotsell, J.S. Cumpston, A.W. Norris, N. E. Powell, B.M. Ketola, *An Optical Comparison of Silicone and EVA Encapsulants for Conventional Silicon PV Modules: A Ray-Tracing Study*, Proc. IEEE PVSC, 2009, 544-549
- [5] M. Rubin, *Optical Properties of Soda Lime Glasses*, Solar Energy Mats., 12 (1985), 275-288
- [6] M.D. Kempe, *Accelerated UV Test Methods and Selection Criteria for Encapsulants of Photovoltaic Devices*, Proc. IEEE PVSC, 2008, 1-6
- [7] S. Nann, K. Emery, *Spectral effects on PV-device rating*, Solar Energy Mats Solar Cells, 27 (1992), 189-216
- [8] M.A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa, W. Warta, *Solar cell Efficiency Tables* (version 41), PIP: Res. App., 21 (2013), 1–11
- [9] D.C. Miller, J. Apezteguia, J.G. Bokria, M. Köhl, N.E. Powell, M.E. Smith, M.D. White, H. R. Wilson, J.H. Wohlgemuth, *Examination of An Optical Transmittance Test for Photovoltaic Encapsulation Materials*, Proc SPIE 2013, 8825-8
- [10] *RSA-PE-20, AQ-00073-000, Rev. 7*, Labsphere Inc., 2001, 1-34
- [11] *Technical Guide: Integrating Sphere Theory and Application*, Labsphere Inc., 2008, 1-22
- [12] D.C. Miller, J. Apezteguia, J.G. Bokria, M. Köhl, N.E. Powell, M.E. Smith, M.D. White, H. R. Wilson, J.H. Wohlgemuth, *Examination of An Optical Transmittance Test for Photovoltaic Encapsulation Materials*, NREL-PR-5200-60379, 2013, 1-24
- [13] A.M. Nilsson, A. Jonsson, J.C. Jonsson, A. Roos, *Method for more accurate transmittance measurements of low-angle scattering samples using an integrating sphere with an entry port beam diffuser*, Appl. Opt., 50 (7), 2011, 999-1006
- [14] W. Thiemsorn, K. Keowkamnerd, S. Phanichphant, P. Suwannathada, H. Hessenkemper, "Influence of glass basicity on redox interactions of iron-manganese-copper ion pairs in soda-lime-silica glass", *Glass Phys. Chem.*, 34 (2008), 19-29

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

ASTM E308-08, *Standard practice for computing the colours of objects by using the CIE system*

ASTM E313-10, *Standard practice for calculating yellowness and whiteness indices from instrumentally measured colour coordinates*

---

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62788-1-4:2016+AMD1:2020 CSV

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62788-1-4:2016+AMD1:2020 CSV

## SOMMAIRE

|                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| AVANT-PROPOS .....                                                                                      | 23 |
| 1 Domaine d'application .....                                                                           | 25 |
| 2 Références normatives .....                                                                           | 25 |
| 3 Termes et définitions .....                                                                           | 26 |
| 4 Principe .....                                                                                        | 27 |
| 5 Appareillage .....                                                                                    | 27 |
| 6 Éprouvettes d'essai .....                                                                             | 27 |
| 6.1 Facteur de transmission nominal (et sans exposition aux intempéries) de la cellule .....            | 27 |
| 6.2 Études sur l'exposition aux intempéries .....                                                       | 28 |
| 6.3 Verre pour substrats inversés/substrats .....                                                       | 29 |
| 6.4 Nombre d'éprouvettes .....                                                                          | 30 |
| 6.5 Conditionnement des éprouvettes .....                                                               | 30 |
| 7 Procédure de mesure .....                                                                             | 30 |
| 7.1 Généralités .....                                                                                   | 30 |
| 7.2 Préparation des éprouvettes .....                                                                   | 30 |
| 7.3 Étalonnage de l'instrument (mesurages de base) .....                                                | 30 |
| 7.4 Mesurages des éprouvettes .....                                                                     | 31 |
| 7.5 Mesurages témoins .....                                                                             | 31 |
| 7.5.1 Éprouvettes témoins .....                                                                         | 31 |
| 7.5.2 Procédure relative à l'éprouvette témoin avant les éprouvettes d'essai .....                      | 31 |
| 7.5.3 Mesurages des éprouvettes d'essai .....                                                           | 32 |
| 7.5.4 Procédure relative à l'éprouvette témoin après les éprouvettes d'essai .....                      | 32 |
| 8 Calcul et expression des résultats .....                                                              | 32 |
| 8.1 Post-traitement des données .....                                                                   | 32 |
| 8.2 Calcul du facteur de transmission pondéré .....                                                     | 32 |
| 8.3 Calcul de l'indice de jaunissement ( $YI$ ) .....                                                   | 33 |
| 8.4 Calcul de la longueur d'onde de coupure des UV .....                                                | 33 |
| 9 Incertitude de mesure .....                                                                           | 33 |
| 10 Rapport d'essai .....                                                                                | 34 |
| Annexe A (informative) Analyse avancée du facteur de transmission (coefficients d'absorption) .....     | 36 |
| Annexe B (informative) Application du rendement quantique d'une technologie de cellule spécifique ..... | 38 |
| Bibliographie .....                                                                                     | 40 |
| Tableau 1 – Détails des paramètres de facteur de transmission à pondération solaire .....               | 33 |

## COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

### PROCÉDURES DE MESURE DES MATÉRIAUX UTILISÉS DANS LES MODULES PHOTOVOLTAÏQUES –

#### Partie 1-4: Encapsulants – Mesurage du facteur de transmission optique et calcul du facteur de transmission photonique à pondération solaire, de l'indice de jaunissement et de la fréquence de coupure des UV

#### 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.

**Cette version consolidée de la Norme IEC officielle et de son amendement a été préparée pour la commodité de l'utilisateur.**

**L'IEC 62788-1-4 édition 1.1 contient la première édition (2016-09) [documents 82/1148/FDIS et 82/1165/RVD] et son amendement 1 (2020-10) [documents 82/1767/FDIS et 82/1791/RVD].**

**Cette version Finale ne montre pas les modifications apportées au contenu technique par l'amendement 1. Une version Redline montrant toutes les modifications est disponible dans cette publication.**

La Norme internationale IEC 62788-1-4 a été établie par le comité d'études 82 de l'IEC: Systèmes de conversion photovoltaïque de l'énergie solaire.

Une liste de toutes les parties de la série IEC 62788, publiées sous le titre général: *Procédures de mesure des matériaux utilisés dans les modules 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 la publication de base et de son amendement 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 62788-1-4:2016+AMD1:2020 CSV

## PROCÉDURES DE MESURE DES MATÉRIAUX UTILISÉS DANS LES MODULES PHOTOVOLTAÏQUES –

### Partie 1-4: Encapsulants – Mesurage du facteur de transmission optique et calcul du facteur de transmission photonique à pondération solaire, de l'indice de jaunissement et de la fréquence de coupure des UV

#### 1 Domaine d'application

La présente partie de l'IEC 62788 fournit une méthode de mesure du facteur de transmission optique des matériaux d'encapsulation utilisés dans les modules photovoltaïques (PV). Les mesurages normalisés de cette procédure permettent de quantifier le facteur de transmission prévu de l'encapsulation vers la cellule PV. Le calcul ultérieur du facteur de transmission à pondération solaire permet de comparer les différents matériaux. Les résultats concernant les matériaux non exposés aux intempéries peuvent être utilisés dans les fiches techniques d'un fabricant d'encapsulation, dans le développement des matériaux ou du procédé du fabricant, dans le contrôle de la qualité de fabrication (acceptation du matériau) ou être appliqués dans l'analyse des performances du module.

Cette méthode de mesure peut également être utilisée pour contrôler les performances des matériaux d'encapsulation après exposition aux intempéries, afin d'évaluer leur durabilité. Les mesurages normalisés sont destinés à examiner une zone intérieure d'un module PV, par exemple, sans les effets de diffusion d'oxygène à la périphérie des cellules. Le calcul ultérieur de l'indice de jaunissement permet de quantifier la durabilité et de prendre en compte l'aspect. La variation du facteur de transmission, de l'indice de jaunissement et de la fréquence de coupure des ultraviolets (UV) peut être utilisée par les fabricants d'encapsulation ou de module pour comparer la durabilité des différents matériaux.

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

ISO 291:2008, *Plastiques – Atmosphères normales de conditionnement et d'essai*

ISO 11664-1:2007, *Colorimétrie – Partie 1: Observateurs CIE de référence pour la colorimétrie*

ISO 11664-2:2007, *Colorimétrie – Partie 2: Illuminants CIE normalisés*

ISO 13468-2:1999, *Plastiques – Détermination du facteur de transmission du flux lumineux total des matériaux transparents – Partie 2: Instrument à double faisceau*

ISO 17223:2014, *Plastics – Determination of yellowness index and change in yellowness index* (disponible en anglais seulement)

ASTM E424-71:2007, *Standard test methods for solar energy transmittance and reflectance (Terrestrial) of sheet material*

### 3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions 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>

NOTE Si des définitions existent déjà, voir l'IEC TS 61836. Les calculs liés à ces définitions sont donnés à l'Article 8.

#### 3.1

##### **facteur de transmission à pondération solaire de l'éclairement photonique**

proportion de l'éclairement photonique spectral solaire ( $E_{p\lambda}$ ,  $\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1}$ ) transmis de manière optique à travers l'éprouvette, sur toute la plage du spectre lumineux solaire terrestre (280 nm à 2 500 nm), (voir le Tableau 1)

Note 1 à l'article: L'éclairement photonique ( $E_{p\lambda}$ ,  $\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1}$ ) représente l'énergie spécifique à la longueur d'onde du flux optique. Il convient de ne pas le confondre avec l'éclairement spectral ( $E_{\lambda}$ ,  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1}$ ).

#### 3.2

##### **facteur de transmission à pondération solaire représentatif de l'éclairement photonique**

proportion de l'éclairement photonique spectral solaire ( $E_{p\lambda}$ ,  $\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1}$ ) transmis de manière optique à travers l'éprouvette, sur toute la plage du spectre lumineux solaire terrestre (300 nm à 1 250 nm), (voir le Tableau 1)

Note 1 à l'article: Dans le cas d'un dispositif PV, le facteur de transmission à pondération solaire représentatif de l'éclairement photonique est défini sur toute la plage du spectre utilisé par un dispositif PV représentatif (qui peut ne pas inclure les longueurs d'onde aussi faibles que 280 nm ou aussi élevées que 2 500 nm).

#### 3.3

##### **longueur d'onde de coupure des UV**

$\lambda_{\text{cUV}}$

longueur d'onde de la lumière en dessous de laquelle l'encapsulation est considérée comme étant absorbante d'un point de vue optique, et au-dessus de laquelle l'encapsulation est considérée comme étant émettrice

Note 1 à l'article: Dans cette procédure, le facteur de transmission absolu de 10 % (correspondant à l'absorbance optique de 1) est considéré comme étant le seuil de la longueur d'onde de coupure des UV. Comme indiqué dans le document [9]<sup>1</sup>, la longueur d'onde de coupure des UV peut également être utilisée pour quantifier les effets de l'exposition aux intempéries.

#### 3.4

##### **exposition aux intempéries**

processus par lequel des éprouvettes sont soumises à des conditions environnementales pouvant inclure les rayonnements ultra-violet, la température, l'humidité et l'ozone

Note 1 à l'article: L'exposition aux intempéries peut avoir lieu dans des environnements artificiels ou naturels. L'exposition aux intempéries peut avoir lieu à vitesse nominale (champ) ou à vitesse accélérée.

<sup>1</sup> Les chiffres entre crochets renvoient à la Bibliographie.